



**Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz  
und Überwachung der Radioaktivität  
(KSR)**

**Commission fédérale de la protection contre les  
radiations et de surveillance de la radioactivité  
(CPR)**

**Analyse des contributions à l'irradiation de  
la population Suisse en 2004**

**Analyse der Beiträge zur Strahlenexposition  
der Schweizer Bevölkerung in 2004**

**Bern, November 2005**

**Adresse de commande:**

Commission fédérale de protection contre les radiations  
et de surveillance de la radioactivité  
Office fédéral de la santé publique  
3003 Berne

**Bezugsadresse:**

Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz  
und Überwachung der Radioaktivität  
Bundesamt für Gesundheit  
3003 Bern

**Verteiler:**

Mitglieder der KSR  
Experten der KSR  
EDI  
BAG  
BFE/HSK  
SUVA  
KOMABC  
KSA  
NAZ  
PSI  
IRA  
UVEK  
Deutschland (SSK, FS)

**Distribution:**

Membres de la CPR  
Experts de la CPR  
DFI  
OFSP  
OFEN/DSN  
SUVA  
COPABC  
CSA  
CENAL  
PSI  
IRA  
DETEC  
France (SFRP, ASN)

*Ce rapport peut être téléchargé à l'adresse:*

*Dieser Bericht kann unter folgender Adresse herunter geladen werden:*

[www.ksr-cpr.ch](http://www.ksr-cpr.ch)



## INHALTSVERZEICHNIS

1. **Einleitung**
2. **Beitrag von Radon**
3. **Beitrag durch Inkorporation**
4. **Beitrag der kosmischen Strahlung**
5. **Beitrag der terrestrischen Komponente**
6. **Beitrag der Medizin**
7. **Schlussfolgerungen**

Bei Bedarf sind weitere Informationen zu den einzelnen Kapiteln bei folgenden Personen erhältlich:

Radon: [Georges Piller](#) (BAG)

Inkorporation: [Christian Wernli](#) (PSI)

Kosmische Strahlung: [Christophe Murith](#) (BAG)

Terrestrische Strahlung: [Hansruedi Völkle](#) (BAG)

Medizin: [Jean-François Valley](#) (IRA)

## 1 Einleitung

Die mittleren Dosiswerte zur Strahlungsexposition der Schweizer Bevölkerung werden seit Jahren regelmässig in den Berichten des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) "Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz" berechnet und in Form von Kuchendiagrammen dargestellt. Die KSR hat es für sinnvoll erachtet, die Gültigkeit dieser Werte zu prüfen. Dazu sollten die aktuellen Berechnungsgrundlagen explizit definiert und die Durchschnittswerte durch Angaben zur Verteilung dieser Werte ergänzt werden.

Die mittlere Dosis ist nämlich je nach Lebensbedingungen nicht unbedingt für alle Personen repräsentativ. Deshalb scheint es wichtig, interessierte Kreise über die Variationsbreite der verschiedenen Strahlungsbeiträge zu informieren. Bei der Strahlungsexposition werden im vorliegenden Dokument mehrere Kategorien unterschieden. Zuoberst steht mit Radon die bedeutendste Belastung, der die gesamte Bevölkerung ständig ausgesetzt ist, zuunterst die Medizin, da in diesem Bereich nur unter bestimmten Umständen und an einzelne Personen Strahlung abgegeben wird. Für diese beiden Komponenten sind eine grosse Variationsbreite und echte Möglichkeiten für eine Reduktion der höchsten Dosen zu erwarten. Beschränkter sind demgegenüber die Dosisunterschiede wie auch die Möglichkeiten für eine Strahlungsreduktion im Bereich der Inkorporation, der kosmischen Strahlung und der terrestrischen Strahlung, denen die Bevölkerung ständig ausgesetzt ist.

Auf der Grundlage der von den einzelnen Spezialisten eingereichten Unterlagen hat die Subkommission für Umweltüberwachung den vorliegenden Bericht mit einer Zusammenfassung zur Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung erarbeitet. Die Dosen von beruflich strahlenexponierten Personen fallen in die Zuständigkeit der Expertengruppe für Dosimetrie im Strahlenschutz und sind nicht Gegenstand der vorliegenden Analyse. Während bei diesen Personen die Dosen individuell beobachtet werden und die Verteilung deshalb einfacher zu bestimmen ist, liegen zur Exposition einzelner Personen der übrigen Bevölkerung praktisch keine Zahlen vor, weshalb sich die Schätzungen auf Hypothesen zu einem durchschnittlichen Verhalten stützen.

Durch die Analyse der einzelnen Beiträge zur Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung konnte eine Bestandesaufnahme der in der Schweiz zur Berechnung dieser Werte verwendeten Methodologien erarbeitet werden.

Die Ergebnisse bestätigen die zuvor evaluierten mittleren Dosiswerte. Diese Studie zeigt jedoch, dass es problematisch ist, eine abschliessende Bilanz zu den verschiedenen Strahlenkategorien zu ziehen und die entsprechenden Werte als effektive, für die gesamte Bevölkerung gültige Dosen darzustellen. Aus dieser Sicht wären vertiefte Analysen zu den Erkenntnissen über die Dosisverteilung insbesondere im Bereich der Inkorporation und der Medizin nützlich.

## 2 Beitrag von Radon

### 2.1 Einleitung

Das radioaktive Edelgas Radon dringt vorwiegend vom Untergrund her in unseren Wohnbereich ein. Mit der Atemluft gelangen Radon und Radonfolgeprodukte in die Lunge. Dort können sich die Radonfolgeprodukte absetzen und das Gewebe bestrahlen. Daraus kann Lungenkrebs resultieren.

Radon ist kein neues Problem. Schon zu Beginn des 16. Jahrhunderts wurde von einer geheimnisvollen Lungenkrankheit berichtet, an der Minenarbeiter in Böhmen starben. Die so genannte Schneeberger-Krankheit wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts als Lungenkrebs identifiziert. Die Ursache dafür blieb aber bis in die fünfziger Jahre unbekannt. Erst dann wurde bemerkt, dass Radonfolgeprodukte zu einer erhöhten Strahlendosis in der Lunge führten.

Der Zusammenhang zwischen Lungenkrebssterblichkeit und Exposition durch Radonfolgeprodukte bei Bergarbeitern ist gut dokumentiert [1]. Die gemeinsame Analyse von 11 Studien ergibt eine lineare Expositions-Wirkungsbeziehung.

Das „Pooling“ der epidemiologischen Studien Europas ergibt eine Zunahme des Lungenkrebsrisikos von 8% pro 100 Bq/m<sup>3</sup> [2,3]. Wird die Unsicherheit bei der Bestimmung der Exposition mitberücksichtigt, steigt die Zunahme auf 16% pro 100 Bq/m<sup>3</sup>. Auch die amerikanischen Fallkontrollstudien wurden gemeinsam analysiert und führen zu vergleichbaren Ergebnissen [4]. Wird die Analyse auf Datensätze mit genaueren Radondaten beschränkt, steigt auch hier das geschätzte Risiko weiter an.

Die WHO hat Radon schon vor rund 10 Jahren als krebserregend für den Menschen eingestuft [5]. Seither wurde eine ganze Reihe von epidemiologischen Fallkontrollstudien durchgeführt und publiziert [6]. Die deutsche Strahlenschutzkommission hat dazu folgendes festgehalten [7]:

- Epidemiologische Studien bei der Bevölkerung zeigen, dass sich durch Radonexposition das Risiko für Lungenkrebs erhöht.
- Ein statistisch signifikantes zusätzliches Lungenkrebsrisiko ist ab Radonkonzentrationen von 150 Bq/m<sup>3</sup> nachweisbar.
- Das zusätzliche relative Lungenkrebsrisiko folgt einer linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert („LNT-Hypothese“).

Die bisherigen Radonmessungen in rund 55'000 Gebäuden zeigen, dass in beinahe 700 Häusern der gesetzliche Grenzwert von 1'000 Bq/m<sup>3</sup> überschritten ist. Diese Gebäude befinden sich vorwiegend in Alpen- und Jura-Regionen. Es gibt aber auch im Mittelland vereinzelte Bauten mit zu hohen Werten. Hochrechnungen weisen darauf hin, dass in der Schweiz in einigen Tausend Wohnhäusern der Grenzwert für Radon (1'000 Bq/m<sup>3</sup>) überschritten ist.

Nach dem Rauchen ist Radon die wichtigste Ursache für Lungenkrebs, der etwa 2'800 Opfer pro Jahr fordert. Nach neusten Erkenntnissen könnten in der Schweiz 240 dieser Lungenkrebsfälle dem Radon zugeschrieben werden [8].

## 2.2 Methodik

Die schweizerische Radon-Datenbank wird vom BAG geführt und umfasst alle in der Schweiz in Wohngebäuden ermittelten Radon-Konzentrationen. Es stehen über 100'000 Messungen, wovon 70'000 in Wohn- und Aufenthaltsräumen, aus 55'000 Gebäuden zur Verfügung. Für die Ermittlung der Strahlendosis der Bevölkerung werden ausschliesslich die Messungen aus Wohn- und Aufenthaltsräumen verwendet. Die Messungen werden vorwiegend während der Heizperiode durchgeführt und es ist eine Messdauer von drei Monaten empfohlen. Für die Messung werden Radon-Dosimeter von Messstellen verwendet, die vom BAG anerkannt sind.

Die Strahlenschutzverordnung (StSV) sieht vor, dass für die Radon-Konzentration ein über ein Jahr gemittelter Wert verwendet wird. Aus diesem Grunde wurde basierend auf Messungen im Winter und im Sommer in 300 Räumen die folgende Korrektur eingeführt [9]

$$A_0 = A_m \frac{N_{Wi} + N_{So}}{1.12 \cdot N_{Wi} + 0.88 \cdot N_{So}}$$

Dabei ist  $A_0$  die über ein Jahr gemittelte Radon-Konzentration in  $\text{Bq/m}^3$ ,  $A_m$  die gemessene Radon-Konzentration in  $\text{Bq/m}^3$ .  $N_{Wi}$  ist die Expositionszeit während Wintermonaten (Oktober bis März) in Tagen,  $N_{So}$  die Expositionszeit während Sommermonaten (April bis September) in Tagen.

Anschliessend werden die Messwerte im Haus auf das Stockwerk bezogen, in dem die Bevölkerung im Mittel wohnt. Die Korrektur erfolgt mittels nachfolgender Formel:

$$A_{0,St} = A_0 \cdot e^{-0.19 \cdot (St_m - St)}$$

wobei  $A_{0,St}$  die Stockwerk-Korrigierte Radon-Konzentration in  $\text{Bq/m}^3$  ist,  $St$  das Stockwerk, in dem gemessen wurde und  $St_m$  das Stockwerk, in dem die Bevölkerung des entsprechenden Kantons im Mittel wohnt (vgl. Tabelle 2.1).

Kanton	Stock	Kanton	Stock	Kanton	Stock
AG	1.03	GR	1.17	SZ	1.2
AI	0.57	JU	0.78	TG	0.88
AR	0.86	LU	1.4	TI	1.29
BE	1.11	NE	1.57	UR	0.99
BL	1.18	NW	1.31	VD	1.52
BS	1.94	OW	1.05	VS	1.3
FR	1.02	SG	1.08	ZG	1.48
GE	2.89	SH	1.12	ZH	1.21
GL	0.93	SO	0.92		

Tabelle 2.1 : Stockwerk, in dem die Bevölkerung im Mittel wohnt; nach Kanton;  
Quelle: Bundesamt für Statistik

In einzelnen Gebäude und Gemeinden wurden viele Messungen durchgeführt, was den Mittelwert merklich beeinflussen könnte. Aus diesem Grunde wurde für jedes Gebäude das arithmetische Mittel der Stockwerkkorrigierten Konzentrationen als repräsentativer Wert übernommen und mit dem Populationsanteil der entsprechenden Gemeinde gewichtet. Damit resultiert für die Schweiz der folgende Mittelwert für die Radonkonzentration in Wohn- und Aufenthaltsräumen:

$$A = \frac{1}{\sum_{i=1}^N pop_i} \sum_{i=1}^N pop_i \left[ \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \left[ \frac{1}{N_{ij}} \sum_{k=1}^{N_{ij}} A_{b,St_{ijk}} \right] \right]$$

Dabei sind:       $pop_i$       Population der Gemeinde i  
                       N            Anzahl erfasster Gemeinden  
                        $N_i$         Anzahl gemessener Gebäude in der Gemeinde i  
                        $N_{ij}$        Anzahl Messungen im Gebäude j der Gemeinde i

Die beschriebenen Korrekturen und Gewichtungen führen zu einem Mittel der Radon-Konzentrationen von 75 Bq/m<sup>3</sup>. Mit den Konversionsfaktoren der „International Commission on Radiological Protection“ [10] und einer Aufenthaltszeit von 7'000 Stunden ergibt dies eine Jahresdosis von 1.28 mSv.

Für den Arbeitsbereich gibt es keine systematischen Untersuchungen. Es wird davon ausgegangen, dass Arbeitende tieferen Radonkonzentrationen ausgesetzt sind. Nimmt man für den Arbeitsbereich im Mittel rund die halbe Radonkonzentration an, ergibt sich mit der jährlichen Arbeitszeit von 2'000 Stunden eine Jahresdosis von 0.26 mSv. Es ist zu bemerken, dass die ICRP für Wohn-/Aufenthalts- und Arbeitsbereich verschiedene Konversionsfaktoren verwendet. Massgebende Einflüsse sind Staubgehalt, Partikelgrösse und Anteil angelagerter bzw. freier Radon-Folgeprodukte.

Auch das kurzlebige <sup>220</sup>Rn, Thoron genannt, trägt etwas zur Strahlendosis bei. Es liegen heute aber dafür keine schweizerischen Daten vor. Daher wird ein Dosisbeitrag von 0.1 mSv pro Jahr angenommen, wie im UNSCEAR-2000-Report [11] angegeben.

Damit ergeben sich für die Bevölkerung in der Schweiz die mittleren Strahlendosen gemäss Tabelle 2.2:

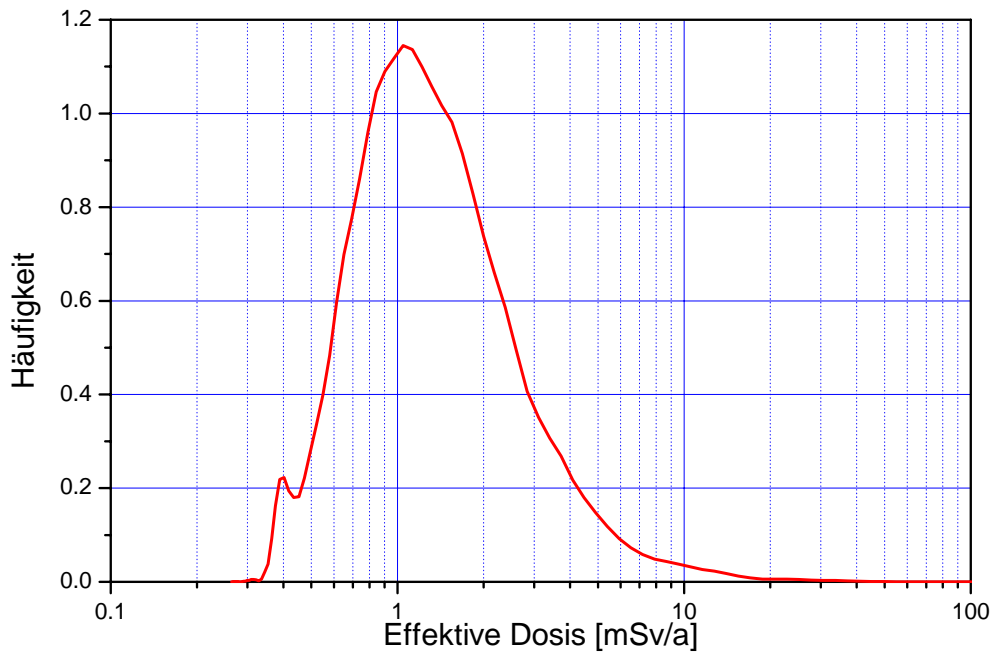
	Radon [Bq/m <sup>3</sup> ]	Aufenthalt [h/a]	Konversionsfaktor [mSv/(Bqh/m <sup>3</sup> )]		Dosis [mSv/a]
Wohn-, Aufenthaltsräume	75	7'000	2.44 10 <sup>-6</sup>	->	1.28
Arbeitsräume	40	2'000	3.17 10 <sup>-6</sup>	->	0.26
Thoron ( <sup>222</sup> Rn)					0.1
<b>Total</b>					<b>1.64</b>

Tabelle 2.2 : Berechnung der mittleren jährlichen effektiven Strahlendosis

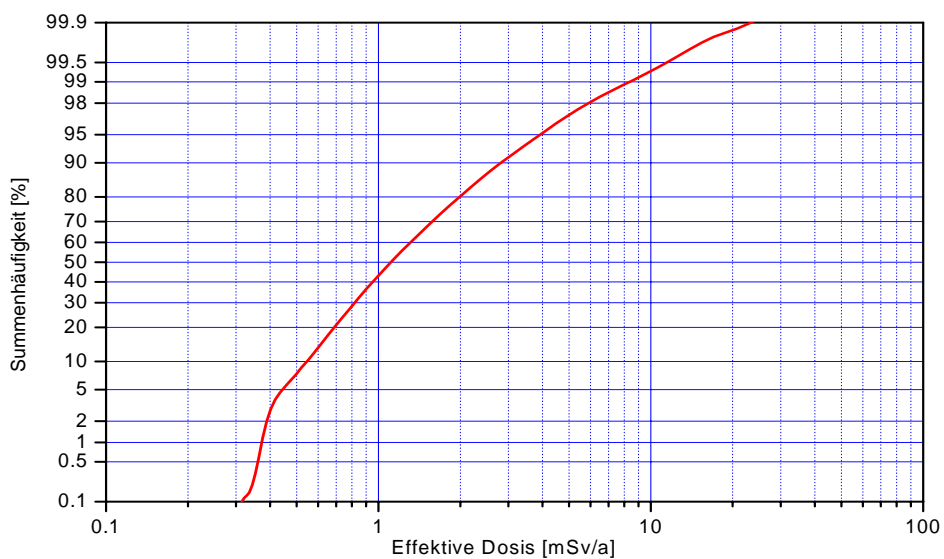
### 2.3 Mittelwerte und Verteilungen

Figur 2.1 zeigt die Verteilung der aus den Stockwerkkorrigierten und Populationsgewichteten Radon-Konzentrationen ermittelten effektiven Strahlendosen.

Figur 2.2 stellt die entsprechende Summenhäufigkeitsverteilung dar. Für den Arbeitsbereich wurde jeweils eine Verteilung angenommen, die die gleiche Form aufweist wie die der Wohn- und Aufenthaltsräume, jedoch um rund einen Faktor zwei zu tieferen Radon-Konzentrationen verschoben.



Figur 2.1: Verteilung der effektiven Strahlendosen durch Radon



Figur 2.2: Summenhäufigkeitsverteilung der effektiven Strahlendosen durch Radon



## 2.4 Schlussfolgerungen

In früheren Veröffentlichungen [12] wurde für Radon eine Strahlendosis von 1.6 mSv/a angegeben. Diese umfasste einen 10%-Beitrag durch Thoron und basierte auf einem Radonmittel von 60 Bq/m<sup>3</sup>.

Die oben beschriebene Methode führt zu einem Populationsgewichteten arithmetischen Mittel von 75 Bq/m<sup>3</sup>. Dies ergibt zusammen mit den beschriebenen Annahmen betreffend Arbeitsbereich und Beitrag durch Thoron auch eine effektive Strahlendosis von 1.6 mSv pro Jahr für die Bevölkerung in der Schweiz.

Die Verteilungen zeigen den weiten Bereich der effektiven Strahlendosen durch Radon, von Bruchteilen von milli-Sievert bis zu über 100 mSv pro Jahr in Einzelfällen.

## 2.5 Referenzen

- [1] Lubin, J., Boice, J.D., Edling, C.H., Hornung, R., Howe, G., Kunz, E., Kusiak, A., Morrison, H.I., Radford, E.P., Samet, J.M., Tirmarche, M., Woodward, A., Xiang, Y.S. and Pierce, D.A. (1994), "Radon and lung cancer risk: A joint analysis of 11 underground miners studies", US National Institutes of Health. NIH publication No. 94-3644
- [2] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen, J-M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, H. Deo, R. Falk, F. Forastiere, M. Hakama, I. Heid, L. Kreienbrock, M. Kreuzer, F. Lagarde, I. Mäkeläinen, C. Muir-head, W. Oberaigner, G. Pershagen, A. Ruano-Ravina, E. Ruosteenoja, A. Schaffrath Rosario, M. Tirmarche, L. Tomáek, E. Whitley, H-E. Wichmann, R. Doll, Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, *BMJ*, doi:10.1136/bmj.38308.477650.63 (published 21 December 2004)
- [3] S. Darby et al., Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, extended version to be published in *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*
- [4] Krewski, Daniel; Lubin, Jay H.; Zielinski, Jan M.; Alavanja, Michael; Catalan, Vanessa S.; Field, R William ; Klotz, Judith B.; Letourneau, Ernest G.; Lynch, Charles F.; Lyon, Joseph I.; Sandler, Dale P.; Schoenberg, Janet B.; Steck, Daniel J.; Stolwijk, Jan A.; Weinberg, "Residential Radon and Risk of Lung Cancer: A Combined Analysis of 7 North American Case-Control Studies". *Epidemiology*. 16(2):137-145, March 2005.
- [5] WHO, (1996), "Indoor air Quality: A risk-based approach to health criteria for radon indoors", Report on a WHO Working Group, Eilat, Isreal, 28 March-4 April 1993, EUR/ICP/CEH 108(A)

- [6] Kreienbrock, L., (2003) "[Radon und Gesundheit](http://www.bag.admin.ch/strahlen/ionisant/radon/generalites/x/Kreienbrock.pdf)", Radon-Forum vom 3./4. November 2003 in Luzern.  
<http://www.bag.admin.ch/strahlen/ionisant/radon/generalites/x/Kreienbrock.pdf>;  
konsultiert am 27.02.2005
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, "Auswertung der vorliegenden Gesundheitsstudien, Bundesanzeiger Nr. 141, vom 30. Juli 2004, Seite 16'881
- [8] Bundesamt für Gesundheit, "Radon – Attributables Risiko in der Schweiz", Mandat an die Tierärztliche Hochschule Hannover, Bericht in Vorbereitung
- [9] Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, „Radon – Jahresbericht 1995“
- [10] ICRP (International Commission on Radiological Protection) (1993), "Protection against Radon-222 at Home and at Work", ICRP Publ. 65, Annals of ICRP Vol 23/2, Pergamon Press, Oxford
- [11] UNSCEAR-2000, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly, Annex B, page 108
- [12] Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, „Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz“, Jahresberichte

### 3. Beitrag durch Inkorporation

#### 3.1 Einleitung

Die genaue Ermittlung der Dosen der Bevölkerung durch Inkorporation von Radionukliden setzt die Kenntnis mehrerer Datensätze voraus, z.B.:

- Verzehrsgewohnheiten (Warenkorb) aufgeteilt nach Bevölkerungsgruppen und Regionen;
- Aktivitätskonzentrationen der verschiedenen Radionuklide in den Nahrungsmitteln;
- Chemische Form der Radionuklide (z.B. bei Mineralwässern);
- $^{40}\text{K}$  Aktivitäten im Körper bei Personen aus allen Bevölkerungs- und Altersgruppen.

Umfassende und belastbare Daten dazu sind nicht leicht erhältlich. Es ist deshalb nicht überraschend, dass nicht nur die Schweiz, sondern auch viele andere Länder ihre Abschätzung der Dosen durch Inkorporation von natürlichen Radionukliden weitgehend auf die Publikationen der UNSCEAR [1] abstützen. Unsicher ist dabei, ob sich diese Daten tatsächlich auf die nationalen Verhältnisse übertragen lassen. Die Streuung der Werte kann nicht bestimmt werden, da UNSCEAR nur Mittelwerte publiziert.

#### 3.2 Natürliche Radionuklide

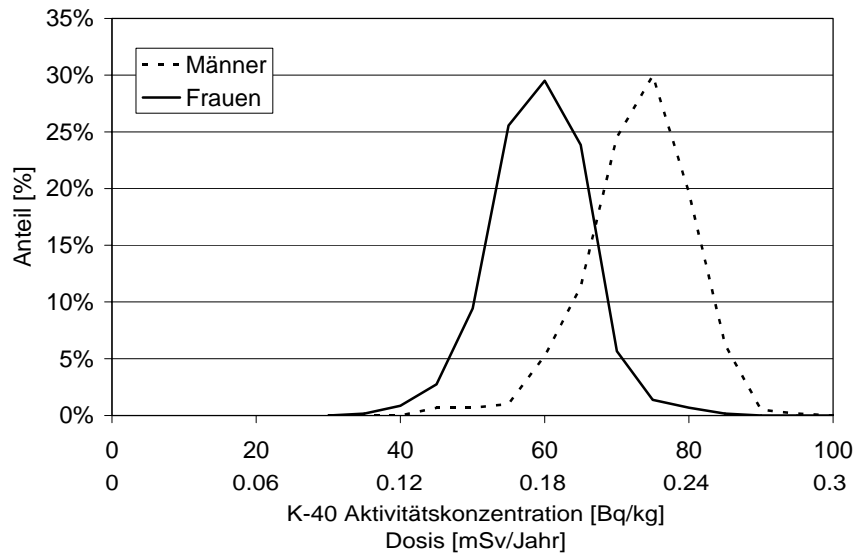
Der grösste Beitrag zur Dosis der Bevölkerung durch in den Körper aufgenommene Radionuklide stammt von Radon und den kurzlebigen Radonfolgeprodukten. Diesem Dosisbeitrag ist deshalb ein eigenes Kapitel gewidmet (s. Kap. 2).

Einen erheblichen Beitrag zur Dosis der Bevölkerung verursacht das Radionuklid  $^{40}\text{K}$ , das zu 0.012 % im natürlichen Kalium und damit in wichtigen Nahrungsmitteln wie Milch und Milchprodukten, Gemüse u.a. vorkommt. Die mittlere tägliche Zufuhr rate von Kalium liegt bei 3.3 g K oder 0.4 mg  $^{40}\text{K}$  pro Tag [2]. Mit der spezifischen Aktivität von  $2.6 \cdot 10^5 \text{ Bq g}^{-1}$  für  $^{40}\text{K}$  ergibt dies für die Bevölkerung eine Zufuhr rate von ca. 100 Bq  $^{40}\text{K}$  pro Tag. Kalium wird im menschlichen Körper vor allem im Muskelgewebe eingebaut und dort homöostatisch reguliert. Die Dosis ist deshalb nicht von der Zufuhr rate sondern nur vom Kaliumgehalt im Körper abhängig. Der typische Kaliumgehalt beträgt ca. 1 – 3 g K pro kg Körpergewicht. Dies entspricht ca. 0.1 – 0.4 mg  $^{40}\text{K}$  pro kg Körpergewicht oder ca. 30 – 90 Bq  $^{40}\text{K}$  pro kg Körpergewicht.

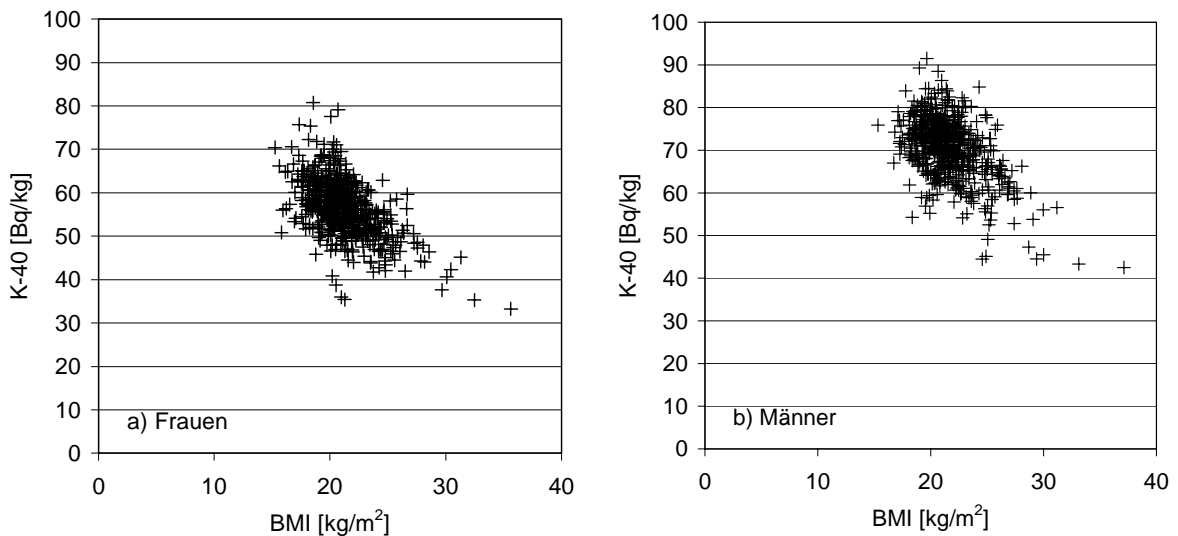
Gemäss UNSCEAR [1] ist die Kaliumkonzentration bei Kindern ca. 10 % höher als bei Erwachsenen und nach [3] nimmt die Kaliumkonzentration bei Erwachsenen im Zeitraum von etwa 20 bis 60 Lebensjahren um rund 10 - 20 % ab. Für die Schweiz liegen langjährige Messreihen an 16 - 20-jährigen Frauen und Männern vor.

In Figur 3.1 sind die Ergebnisse der Jahre 1973 – 2003 für 583 Frauen und 591 Männer aus Genf dargestellt [4]. Die Abhängigkeit der  $^{40}\text{K}$  Konzentration vom Body Mass Index ( $\text{BMI} = \text{Gewicht (kg)} / \text{Grösse}^2 (\text{m}^2)$ ) für diese Personen ist in Figur 3.2 ersichtlich [4].

Mit zunehmendem Body Mass Index nimmt der Fettanteil im Körper zu. Die Aktivität des vorwiegend im Muskelgewebe eingebauten  $^{40}\text{K}$  pro kg Körpergewicht ist deshalb vom Body Mass Index abhängig und nimmt mit zunehmendem BMI ab.



Figur 3.1: Verteilung der Aktivitätskonzentration von  $^{40}\text{K}$  bei 16 - 20-jährigen Frauen und Männern und effektive Dosis pro Jahr unter Annahme eines einheitlichen Dosisfaktors von 3 Mikrosievert pro Jahr pro Bq/kg  $^{40}\text{K}$ .



Figur 3.2: Abhängigkeit der Aktivitätskonzentration von  $^{40}\text{K}$  vom Body Mass Index (BMI) für Frauen (a) und Männer (b)

Zur Berechnung der Dosis durch  $^{40}\text{K}$  wird näherungsweise angenommen, das  $^{40}\text{K}$  sei gleichmässig über den ganzen Körper verteilt und die Umrechnung von der Aktivitätskonzentration auf die Dosis sei unabhängig von Grösse und Gewicht der Person.

Damit kann ein mittlerer Dosisfaktor von 3 Mikrosievert pro Jahr pro Bq kg<sup>-1</sup> verwendet werden [1]. Für die oben angegebene typische Verteilung der Aktivitätskonzentration von <sup>40</sup>K ergibt sich damit ein Streubereich für die Dosis von ca. 0.1 – 0.3 mSv pro Jahr. Die mittlere <sup>40</sup>K Konzentration der in der Schweiz gemessenen Frauen beträgt 57 Bq kg<sup>-1</sup>, resp. 71 Bq kg<sup>-1</sup> für Männer [4]. Die daraus berechneten mittleren Dosen betragen somit 0.17 mSv pro Jahr für die Frauen und 0.21 mSv pro Jahr für die Männer. Ohne Berücksichtigung der Altersstruktur kann die mittlere Jahresdosis der Schweizer Bevölkerung durch <sup>40</sup>K damit auf rund 0.19 mSv geschätzt werden. UNSCEAR gibt für den mittleren Dosisbeitrag von <sup>40</sup>K 0.17 mSv pro Jahr an [1].

Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Uran und Thorium werden über Nahrungsmittel und teilweise über Mineralwässer aufgenommen. Die in der Schweiz im Handel erhältlichen Mineralwässer wurden in mehreren Studien untersucht [5,6]. Typische Werte liegen im Bereich von 10 – 100 mBq pro Liter. Daraus lässt sich ableiten, dass der mittlere Dosisbeitrag durch natürliche Radionuklide in Mineralwässern kleiner als 0.1 mSv pro Jahr ist. Als Summe über alle Zufuhrpfade für Radionuklide der Zerfallsreihen von Uran und Thorium rechnet UNSCEAR mit einem mittleren Wert von 0.14 mSv pro Jahr [1].

Neben den natürlichen Radionukliden terrestrischen Ursprungs gibt es eine grosse Anzahl von Radionukliden, die in der Atmosphäre durch kosmische Strahlung erzeugt werden. Von den kosmogenen Radionukliden liefern nur <sup>3</sup>H, <sup>7</sup>Be, <sup>14</sup>C, und <sup>22</sup>Na nennenswerte Dosisbeiträge. In der Troposphäre schwankt die gesamte Konzentration dieser Radionuklide zeitlich und räumlich im Bereich von 10 - 100 mBq m<sup>-3</sup>. UNSCEAR schätzt den mittleren Dosisbeitrag der kosmogen erzeugten Radionuklide über alle Aufnahmepfade auf 0.01 mSv pro Jahr [1].

### 3.3 Anthropogene Radionuklide

Die weltweit grössten Freisetzungen von Radionukliden erfolgten bei den Atombombentests der Fünfziger- und frühen Sechzigerjahre sowie beim Reaktorunfall in Tschernobyl 1986. Bis heute radiologisch relevant bleiben davon <sup>14</sup>C, <sup>90</sup>Sr und <sup>137</sup>Cs. Weiter können mehrere Pu-Isotope und <sup>241</sup>Am noch immer in Spuren nachgewiesen werden. Der <sup>137</sup>Cs - Gehalt im menschlichen Körper kann durch Direktmessung im Ganzkörperzähler bestimmt werden. In der Schweiz wurden im Jahr 2004 bei 493 Personen Ganzkörpermessungen durchgeführt. Bei 11 Personen wurden <sup>137</sup>Cs Werte zwischen 100 und 300 Bq gefunden. Alle anderen Befunde lagen zumeist deutlich unter 100 Bq <sup>137</sup>Cs [4]. Der <sup>137</sup>Cs-Gehalt im Körper wird auf die Zufuhr über Lebensmittel (z.B. Pilze, Wildfleisch) zurückgeführt. Zur Ermittlung der Dosis wird ein mittlerer Dosisfaktor für eine 70 kg schwere Person von 3 · 10<sup>-5</sup> mSv pro Jahr pro Bq <sup>137</sup>Cs im ganzen Körper angewendet [1]. Die höchste Dosis durch <sup>137</sup>Cs der im Jahr 2004 ausgemessenen Personen war somit kleiner als 0.01 mSv pro Jahr.

Die Aufnahme von <sup>90</sup>Sr mit der Nahrung wird durch Messungen an Lebensmitteln und an Milchzähnen untersucht [7]. Die mittlere Zufuhr von <sup>90</sup>Sr ist heute kleiner als 50 Bq pro Jahr. Unter Verwendung des Dosisfaktors von 2.8 · 10<sup>-8</sup> Sv/Bq ergibt sich damit eine mittlere Dosis von rund 0.001 mSv pro Jahr.

UNSCEAR schätzt den mittleren Dosisbeitrag durch  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{137}\text{Cs}$  zusammen auf 0.002 mSv pro Jahr für die Weltbevölkerung [1].

Abgaben von radioaktiven Stoffen an die Umwelt durch Kernanlagen, Spitäler, Industriebetriebe etc. können zu lokal leicht erhöhten Personendosen führen. Gemäss [5] betrug im Jahr 2003 die höchste (rechnerisch ermittelte) Dosis durch Abgabe radioaktiver Stoffe eines Betriebes 0.006 mSv pro Jahr.

Inkorporationen von radioaktiven Stoffen treten auch bei diagnostischen und therapeutischen Anwendungen in der Nuklearmedizin auf. Diese Dosisbeiträge werden in Kapitel 6 behandelt.

### 3.4 Mittlere Dosis und Wertebereich durch Inkorporation ohne Radon und ohne medizinische Anwendungen

Radionuklide	Mittlere Dosis in mSv pro Jahr	Wertebereich in mSv pro Jahr
$^{40}\text{K}$	0.19	0.1 – 0.3
U und Th Zerfallsreihen	0.14	< 1
$^3\text{H}$ , $^7\text{Be}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{22}\text{Na}$ (kosmogen)	0.01	< 0.2
$^{14}\text{C}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{137}\text{Cs}$ (Bombentest und Tschernobyl)	0.002	0 – 0.01
Abgaben von Betrieben	0	0 – 0.006
Total	0.34	0.1 – 0.5

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der effektiven Dosen durch Inkorporation ohne Radon und ohne medizinische Anwendungen.

### 3.5 Schlussfolgerungen

Die mittlere Dosis der Bevölkerung durch inkorporierte Radionuklide (ohne Radon und medizinische Anwendungen) wird fast ausschliesslich verursacht durch  $^{40}\text{K}$  sowie die Zerfallsreihen von Uran und Thorium und beträgt 0.34 mSv pro Jahr. Die Verteilung der Dosen durch Ingestion von Radionukliden der Zerfallsreihen von Uran und Thorium für die Bevölkerung der Schweiz ist bisher nicht bekannt. Auch die Altersverteilung der Dosen durch  $^{40}\text{K}$  wurde in der Schweiz noch nicht untersucht. Zur vollständigen Darstellung der Dosen der Bevölkerung wäre es interessant, diese Dosisverteilungen zu ermitteln. Dies würde aber kaum einen Einfluss auf die in der Tabelle 3.1 erwähnten Dosen haben.

### 3.6 Referenzen

- [1]. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR Report 2000
- [2]. Report of the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23, 1975
- [3]. Estimated potassium content in Hanford workers. T.P. Lynch et. al. Radiat. Prot. Dosim. Vol. 111, No. 3, pp. 319-322, 2004
- [4]. Nicht veröffentlichte Daten. Messungen von M. Cosandey (SCCI-Genf), A. Donath, J.-C. Corminboeuf, S. Namy (HUG, Genf), J. Hitz, M. Boschung, J. Eikenberg (PSI). Datensammlung von H. Völkle, BAG. Darstellung PSI.
- [5]. Deflorin, O., Natürliche Radionuklide in Grundwässern des Kantons Graubünden, Dissertation, Univ. de Neuchâtel, 2004
- [6]. The Analysis of Naturally Occurring Radionuclides from Uranium and Thorium Decay Series in Table Mineral Waters. T.C. Aellen, O. Umbricht and W. Goerlich. The Science of the Total Environment, 130/131 (1993) 253-259.
- [7]. Modelisation du comportement du strontium-90 dans l'environnement. F. Carlone, J.-J. Geering, J.-F. Valley. Tagungsberichte SGSMP, Wissenschaftliche Tagung 1994, La Chaux-de-Fonds, 27. und 28. Oktober 1994.

## 4 Beitrag der kosmischen Strahlung

### 4.1 Einleitung

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung nahm ihren Anfang zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts. Der Schweizer A. Gockel (1860-1927) gehörte dabei zu den Pionieren. 1910 nahm er Messungen mit einem neuartigen, speziell für Ballonflüge konzipierten Gerät vor, dem "Wulf'schen Strahlungsapparat". Falls sich die Strahlungsquelle, welche die in der Luft verteilten Ionen produziert, in der Erdrinde befand, wie er dies aufgrund von Messungen in Zermatt im Jahr 1908 vermutete, musste die Konzentration der Ionen mit zunehmender Höhe zurückgehen. Die neuen Messungen bis in eine Höhe von 4500 m ergaben tatsächlich eine leichte Abnahme, die aber weit weniger substanziell war, als dies im Falle einer Strahlungsabgabe der Erdrinde hätte der Fall sein müssen. Gockel war wie immer sehr kritisch und vorsichtig. Er beschränkte sich auf die Aussage, dass nicht ausgeschlossen werden könne, dass es eine Strahlungsquelle gebe, die in die höheren Schichten der Erdatmosphäre vordringt. 1936 erhielten der Österreicher V. Hess (1883-1964) und C.D. Anderson [1] gemeinsam den Nobel-Preis für die Entdeckung der kosmischen Strahlung.

Heute steht fest, dass die kosmische Strahlung aus zwei Komponenten besteht. Einerseits trifft kosmische Strahlung ständig und voraussehbar aus der Galaxis und aus dem Weltraum ausserhalb unserer Galaxie ein (galaktische kosmische Strahlung, GCR). Sie besteht aus hochenergetischen Teilchen (bis zu  $10^{20}$  eV, abgegeben von Sternen und Supernovae), hauptsächlich aus Protonen (~ 87%) und Heliumionen (~ 12%), daneben aber auch aus anderen Kernen bekannter Elemente und aus Elektronen. Diese Teilchen treten mit der Erdatmosphäre in Wechselwirkung und erzeugen dabei eine Sekundärstrahlung, deren Intensität zusammen mit der primären Teilchenstrahlung innerhalb der Atmosphäre mit sinkender Höhe bis zum Meeresspiegel abnimmt. Die Dosis hängt auch ab von den geomagnetischen Koordinaten (Länge und Breite) – in Polnähe ist sie grösser, in Äquatornähe geringer – sowie von der Sonnenaktivität, die einem 11-jährigen Zyklus folgt.

Die andere Komponente der kosmischen Strahlung geht von der Sonne aus (solare kosmische Strahlung, SCR). Dieser so genannte Sonnenwind wird von sporadischen, unvorhersehbaren Erscheinungen der Sonnenatmosphäre (Sonneneruptionen oder Flares) sowie durch koronale Massenauswürfe (CME) erzeugt. Die Intensität dieser Ereignisse solaren Ursprungs (SEP) schwankt stark – die Teilchenfluenz kann von einem Sonnenereignis zum nächsten um mehrere Grössenordnungen variieren – die Häufigkeit ist jedoch mit einem Ereignis pro Monat gering [2]. Die Dosisleistung steigt dann rasch an (während einiger Minuten) und kann einige Stunden bis mehrere Tage andauern. Am Boden können diese Ereignisse mit Neutronen-Monitoren beobachtet werden, ihr Beitrag bleibt jedoch vernachlässigbar.

Die kosmische Strahlung ist auch verantwortlich für die Entstehung radioaktiver Elemente in höheren Schichten der Atmosphäre, zum Beispiel  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  und  $^{22}\text{Na}$ . Diese können entsprechend ihrer Rolle im Stoffwechsel des menschlichen Körpers einen schwachen Dosisbeitrag leisten (siehe Kapitel 3).



Die Erde wird also konstant von ionisierender Strahlung bombardiert, welche ihren Ursprung im interstellaren Raum hat. Die Intensität dieser Strahlung wird zum Teil durch das mit dem Sonnenwind zusammenhängende Magnetfeld und das Erdmagnetfeld beeinflusst. Die wichtigsten Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre umfassen die Ionisierung von Atomen und Molekülen und Interaktionen mit Atomkernen. Dies führt zu einer selektiven Verminderung der Primärstrahlung, wobei die schwersten Teilchen am stärksten absorbiert werden. So dringen lediglich Protonen in die tiefen Schichten der Atmosphäre vor. Aus diesen Interaktionen resultiert an der Erdoberfläche einerseits eine Strahlenkomponente der geladenen Teilchen und Photonen und andererseits eine Neutronenkomponente.

In Abbildung 4.1. sind diese Beiträge in Form der effektiven Dosis und des betroffenen Bevölkerungsanteils in der Schweiz in Abhängigkeit der Höhe dargestellt.

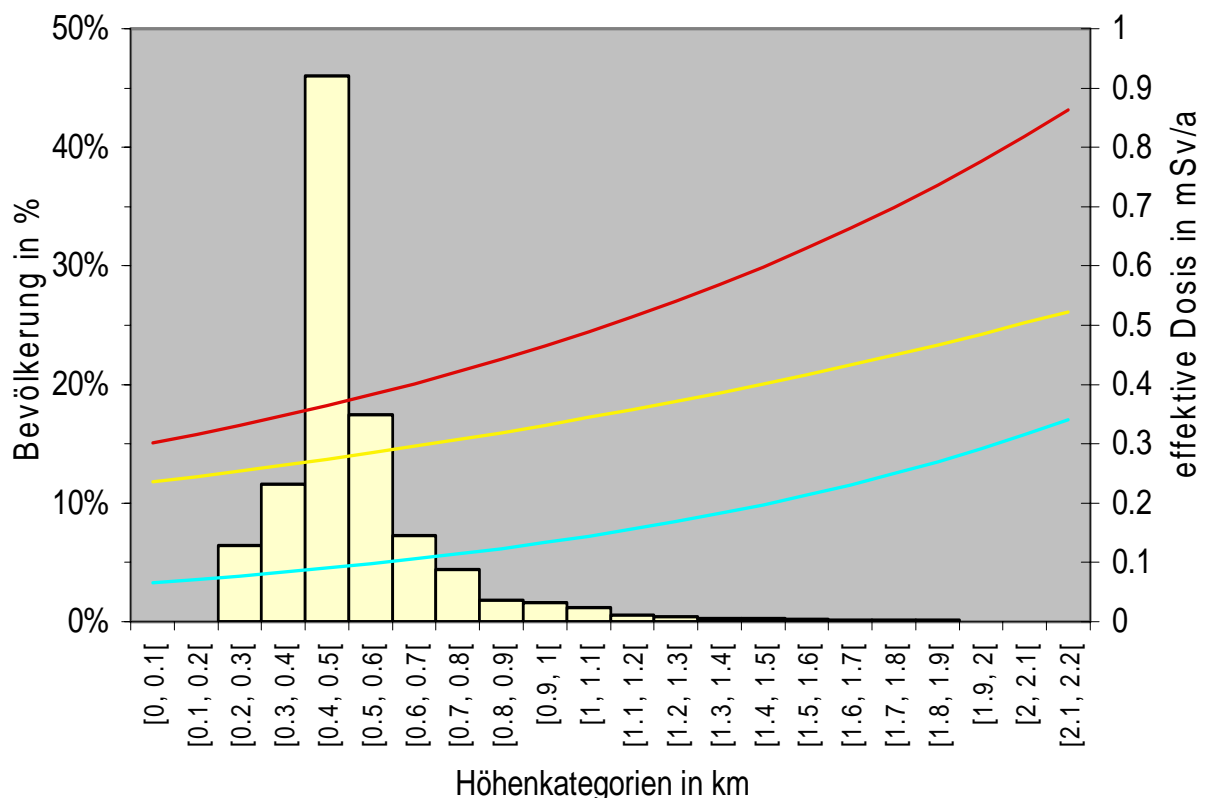


Abb. 4.1: Höhe, Bevölkerung und effektive Dosis

Dargestellt sind die höhenabhängige effektive Dosis, die sich aus dem Beitrag der Neutronen ergibt (untere Kurve), die auf geladene Teilchen und Photonen zurückzuführen ist (mittlere Kurve) und die aus der Summe dieser beiden Beiträge resultiert (obere Kurve), sowie der Bevölkerungsanteil in den verschiedenen Höhenkategorien (in %).

Die Methoden zur Bestimmung dieser Dosen und der Verteilung sind Gegenstand der Abschnitte 4.2 und 4.3.

## 4.2 Methode zur Dosisbestimmung

Zu bestimmen sind die effektive Jahresdosis  $E$  (mSv/Jahr) der kosmischen Strahlung sowie die Verteilung in der Bevölkerung. Diese Grösse, mit der sich das Risiko im Zusammenhang mit den stochastischen Wirkungen der ionisierenden Strahlung auf den Menschen quantifizieren lässt, ist jedoch nicht direkt messbar. Somit wurde ausgehend von den Messungen die in derselben Einheit ausgedrückte Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  in Einklang mit der Schweizer Gesetzgebung bestimmt. Es wurde dazu ein Umrechnungsfaktor von 1 zwischen den beiden Grössen angenommen. Bei der Dosisberechnung werden zwei Komponenten unterschieden: die Komponente der geladenen Teilchen und Photonen einerseits und die Neutronenkomponente andererseits.

### **Komponente der geladenen Teilchen und Photonen $E_c$**

Ein Proton der Primärstrahlung erzeugt durch Auslösung einer Teilchenkaskade rund eine Million Sekundärteilchen. Die beim Zerfall der Protonen entstehenden Myonen interagieren selten und stellen somit den Hauptbeitrag der auf der Erdoberfläche eintreffenden Teilchen. Die entsprechende Umgebungs-Äquivalentdosisleistung im Zusammenhang mit den geladenen Teilchen und den Photonen hängt vor allem von der Höhe und nur unwesentlich von der Breite ab (10% geringer am Äquator als in hohen Breitengraden). Die in der Schweiz mittels einer Ionisationskammer in einem Ballon durchgeführten Messungen (Abb. 4.2) zeigen eine gute Übereinstimmung ( $\pm 10\%$ ) mit den Referenzwerten [3].

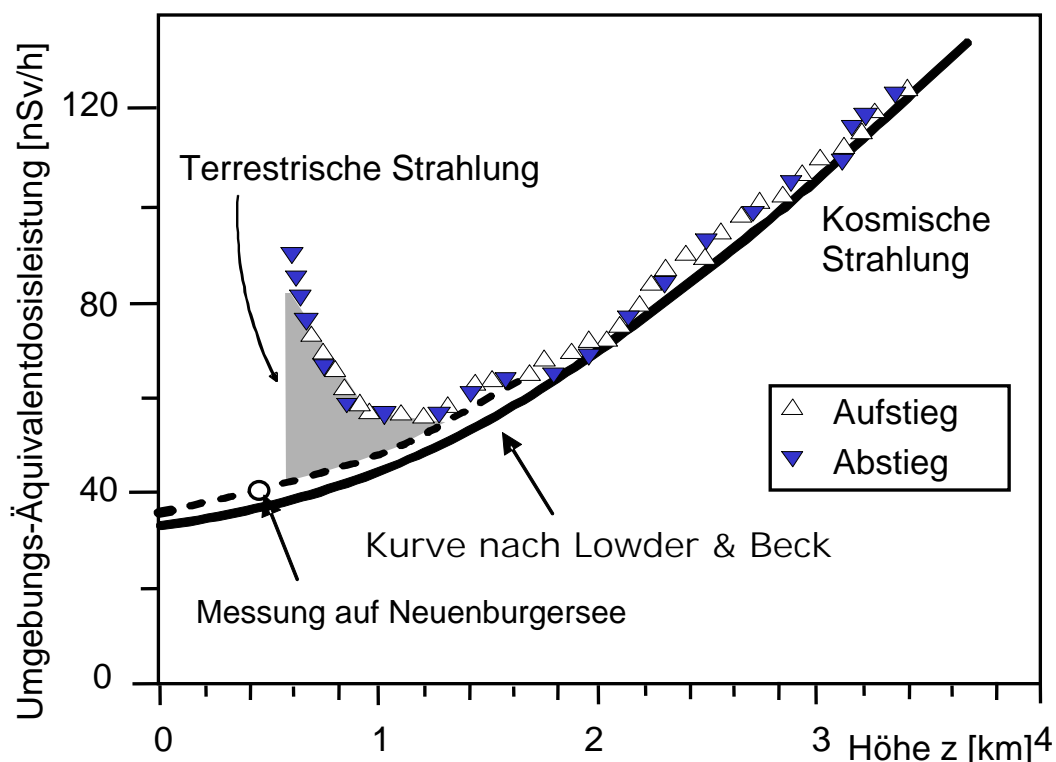


Abb. 4.2: Beitrag der kosmischen Strahlung an der in der Schweiz gemessenen ionisierenden Komponente [4]. Anhand einer Messung auf dem See, wo die terrestrische Komponente absorbiert wird, lässt sich dieser Beitrag in Bodennähe errechnen.

Zur Schätzung der Dosen, die aus geladenen Teilchen und Photonen resultieren, wurden folgende Hypothesen der UNSCEAR [5] verwendet:

- Der mittlere Schwächungsgrad für die Berechnung der Dosisleistung im Innern von Gebäuden gegenüber der Dosisleistung im Freien beträgt 0,8, was einer Reduktion um 20% entspricht.
- Der mittlere Faktor zur Bestimmung der im Innern von Gebäuden zugebrachten Zeit beträgt ebenfalls 0.8 (80%).

Ausgehend von diesen Hypothesen und den Ergebnissen in Abbildung 1 wurde zur Schätzung der Komponente der geladenen Teilchen und Photonen  $E_c$  zwischen 0 und 2'000 m Höhe folgende analytische Formel verwendet:

$$E_c(z) = E_c(0) \cdot e^{0.38 \cdot Z}$$

Z entspricht dabei der Höhe in km;  $E_c(0) = 0.24$  mSv/Jahr entspricht der effektiven Jahresdosis auf Meereshöhe, die auf die geladenen Teilchen und Photonen zurückzuführen ist, wenn angenommen wird, dass sich die Bevölkerung während 20% der Zeit im Freien aufhält und die Strahlung im Inneren von Gebäuden um 20% abgeschwächt wird.

### **Neutronenkomponente $E_n$**

Neutronen entstehen bei Interaktionen zwischen Protonen, Atomen und Molekülen in der Erdatmosphäre. Bei diesen Zusammenstößen kommt es entweder zur Verdampfung der Kerne (niederenergetische Neutronen: ~ 10 MeV) oder zu einer "Knock-on"-Reaktion hochenergetischer Protonen an der Peripherie der Kerne (hochenergetische Neutronen).

Die Dosisleistung der Neutronenkomponente hängt nicht nur wesentlich von der Höhe, sondern auch signifikant vom Breitengrad ab (Faktor 2; Maximalwert am Pol und Minimum am Äquator), da der Neutronenfluss direkt mit dem Protonenfluss zusammenhängt. Ausserdem wird die auf Neutronen zurückzuführende Dosis vom Sonnenzyklus beeinflusst (in 10 km Höhe über der Erdoberfläche ist zwischen dem je nach Sonnenaktivität minimalen und maximalen Wert eine Dosiszunahme um 65% festzustellen, während diese Zunahme am Boden unbedeutend ist).

Im Gegensatz zur Komponente der geladenen Teilchen und Photonen lässt sich die Neutronenkomponente an der Erdoberfläche in der Schweiz nur beschränkt messen. Durchgeführt wurden solche Messungen, die für die Schweizer Breitengrade aussagekräftig sind, in Neuherberg und auf der Zugspitze [6] sowie in Mailand [7]. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde für eine Schätzung der Neutronenkomponente zwischen 0 und 2 km Höhe folgende analytische Formel verwendet:

$$E_n(z) = E_n(0) \cdot e^{0.78 \cdot Z}$$

Z entspricht dabei der Höhe in km;  $E_n(0) = 0.066$  mSv/Jahr entspricht der effektiven Jahresdosis, die auf Meereshöhe auf Neutronen zurückzuführen ist, wenn angenommen wird, dass sich die Bevölkerung während 20% der Zeit im Freien aufhält und die Strahlung im Inneren von Gebäuden um 20% abgeschwächt wird.

### 4.3 Mittlere Dosis und Verteilung

In Tabelle 4 ist die auf kosmische Strahlung zurückzuführende effektive Jahresdosis (mSv/Jahr) in Abhängigkeit der Höhe aufgeführt. Diese wurde auf der Grundlage der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methode berechnet. Diese Werte entsprechen der Summe der Komponente der geladenen Teilchen und Photonen sowie der Neutronenkomponente.

Höhe (m)	(mSv/a)	Höhe (m)	(mSv/a)	Höhe (m)	(mSv/a)
0	0.30	800	0.44	1'600	0.66
100	0.32	900	0.47	1'700	0.70
200	0.33	1'000	0.49	1'800	0.74
300	0.35	1'100	0.51	1'900	0.78
400	0.36	1'200	0.54	2'000	0.82
500	0.38	1'300	0.57	2'100	0.86
600	0.40	1'400	0.60	2'200	0.91
700	0.42	1'500	0.63	2'300	0.96

Tabelle 4: Effektive, höhenabhängige Jahresdosis der kosmischen Strahlung

Die für die Schweizer Bevölkerung resultierende Verteilung ist in Abb. 4.3. dargestellt. Dabei ergibt sich ein Durchschnittswert von 0.38 mSv/Jahr (Medianwert 0.36 mSv/Jahr). Die effektive Jahresdosis liegt für über 95% der Bevölkerung zwischen 0.3 und 0.5 mSv/Jahr. Der Unsicherheitsfaktor bei diesem Durchschnittswert wird auf  $\pm 20\%$  geschätzt.

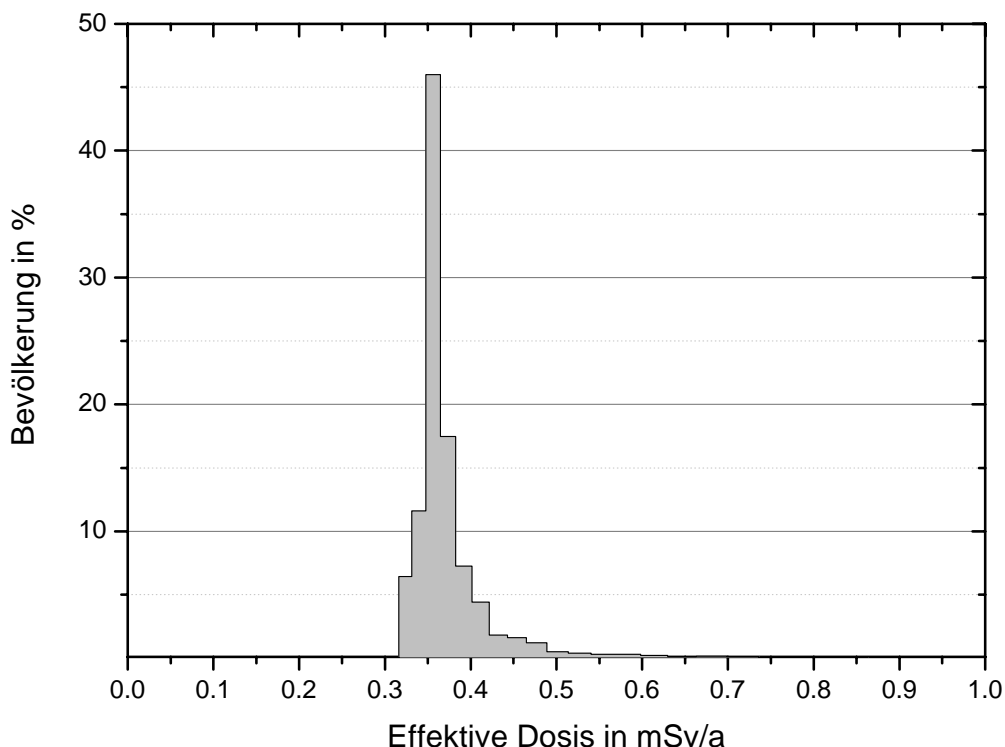


Abb. 4.3: Verteilung der auf kosmische Strahlung zurückzuführenden effektiven Jahresdosis für die Schweizer Bevölkerung.

#### 4.4 Unsicherheiten

Dem im vorliegenden Bericht verwendeten Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass der Umrechnungsfaktor zwischen der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung und der effektiven Dosisleistung 1 beträgt. Tatsächlich lässt eine Durchsicht der Fachliteratur darauf schliessen, dass die Umgebungs-Äquivalentdosis gemäss aktuellem Wissensstand eine aussagekräftige Grösse zur Schätzung der effektiven Dosis ist [8].

Was den Schwächungsgrad (0.8) und die Aufenthaltszeiten (80% im Innern) betrifft, wurden die Hypothesen der UNSCEAR zur Berechnung der effektiven Dosis herangezogen. Damit können die reellen Werte je nach Fall unter- oder überschätzt werden. Es gibt Vergleichsmessungen für die Schweiz zur Komponente der geladenen Teilchen und Photonen im Freien und im Innern von Gebäuden. Anhand dieser Messungen der Gesamtdosisleistung ist es jedoch nicht möglich, die einzelnen Beiträge zur Strahlenexposition im Freien zu bestimmen. Deshalb können damit keine zuverlässigen Angaben zur Reduktion der kosmischen Komponente im Gebäudeinnern und zum Einfluss von Baumaterialien gemacht werden. Zudem liegen keine Messungen zur Neutronenkomponente vor. Gegenwärtig gibt es somit keine eindeutigen Argumente zur Einführung neuer Faktoren.

#### 4.5 Sonderfälle

Personen, die sich während längerer Zeit in höheren Lagen aufhalten, sind einer intensiveren kosmischen Strahlung ausgesetzt.

So liegt die auf kosmische Strahlung zurückzuführende effektive Dosis bei einem ständigen Wohnsitz in Davos (1'537 m) im Bereich von 0.64 mSv/Jahr, in Genf (372 m) hingegen bei 0.36 mSv/Jahr. Ein anderes Beispiel: Eine Person, die sich während 10 Tagen in den Bergen (2'000 m) und während 8 Std. täglich im Freien aufhält, akkumuliert eine effektive Dosis von rund 0.023 mSv, gegenüber lediglich 0.009 mSv im Flachland. Was die Exposition bei Flugreisen betrifft, summiert sich die Belastung bei einer Flugdauer von 20 Std. pro Jahr auf 0.1 mSv/Jahr. Während eines Überseeflugs (retour) beläuft sich die Exposition normalerweise auf rund 0.06 mSv.

Die Strahlenexposition des Flugpersonals [9] lässt sich unter Berücksichtigung der Flugrouten mit Hilfe von Programmen berechnen, für die im Literaturverzeichnis Links angegeben sind [10].

#### 4.6 Schlussfolgerungen

Die kosmische Strahlung umfasst zwei Komponenten: Einerseits erreicht die Erde ständig kosmische Strahlung aus der Galaxis und von ausserhalb unserer Galaxie (hochenergetische Teilchen, die von Sternen und Supernovae stammen). Andererseits trifft in unregelmässigen Abständen auch kosmische Strahlung ein, die auf die Sonnenaktivität zurückzuführen ist (Teilchen, die bei Sonneneruptionen weggeschleudert werden). Die kosmische Strahlung ist auch Ursache dafür, dass in hohen Atmosphäreschichten radioaktive Elemente wie  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  und  $^{22}\text{Na}$  entstehen.

Die Belastung durch kosmische Strahlung steigt grundsätzlich mit zunehmender Höhe. In unserem Land liegt die Strahlendosis zwischen 0.33 mSv/a für Wohnlagen um 200 m und 0.82 mSv/a auf rund 2'000 m. Die effektive mittlere Dosis von 0.38 mSv/Jahr (0.28 mSv/Jahr für die Komponente der geladenen Teilchen und Photonen und 0.10 mSv/Jahr für die Neutronenkomponente) entspricht der durchschnittlichen Wohnlage der Schweizer Bevölkerung von 500 m. Wenn man das Flugpersonal ausklammert, kann man davon ausgehen, dass die Schweizer Bevölkerung einer kosmischen Strahlung von höchstens 1 mSv/Jahr ausgesetzt ist und die Dosis für die meisten Personen zwischen 0.3 und 0.5 mSv/Jahr liegt.

Bei zahlreichen gegenwärtig evaluierten Ansätzen wird die auf kosmische Strahlung zurückzuführende effektive Dosis anhand von Modellen zur Berechnung der Ortsdosisleistung bestimmt, bei denen die Teilchenfluenz in Abhängigkeit von Höhe, geomagnetischer Länge und Breite oder Cut-off und je nach Sonnenzyklus berücksichtigt wird; zusätzlich werden Flugprofile für das Flugpersonal miteinbezogen. Diese Berechnungsmodelle müssen noch durch Messungen bestätigt werden. Die im vorliegenden Kapitel präsentierten Ergebnisse für in der Schweiz vorherrschende Wohnlagen sollten noch präzisiert und gewisse Unsicherheiten ausgeräumt werden. Dazu ist es wichtig, die Harmonisierungsbemühungen zu den Messdaten durch den Einsatz von hinsichtlich der Ortsdosisleistungen  $H^*(10)$  kalibrierten Geräten fortzuführen, die Gültigkeit der Schwächungsgrade für den Aufenthalt in Gebäuden und den Anteil der im Freien verbrachten Zeit in der Schweiz zu analysieren, den Umrechnungsfaktor für die Umwandlung der Ortsdosis in die effektive Dosis zu bestätigen und die Notwendigkeit von Daten zur genaueren Schätzung der Neutronenkomponente zu prüfen. Diese Überlegungen dürften jedoch die auf der Grundlage der aktuell verfügbaren Daten erworbenen Erkenntnisse in Bezug auf die effektive mittlere Dosis und die Dosisverteilung im Zusammenhang mit der kosmischen Strahlung in der Schweiz nicht wesentlich in Frage stellen.

#### 4.7 Referenzen

- [1] Georg Federmann, *Viktor Hess und die Entdeckung der kosmischen Strahlung*, Wien 2003, <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/vfHess.pdf>
- [2] W. Heinrich, S. Roesler and H. Schraube, *Physics of cosmic radiation fields*, Radiation Protection Dosimetry, 1999 86(4): 253-258
- [3] Lowder, W.M. and H.L. Beck, *Cosmic Ray Ionization in the Lower Atmosphere*, J. Geophys. Res. 71, 4661-4668; 1971
- [4] C. Murith et al. *Radioactivity Measurements in the vicinity of Swiss Nuclear Power Plants*, NIM A243 (1986) 549-560
- [5] UNSCEAR-2000, *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly*, Annex A, page 27

- [6] H. Schraube, V. Mares, S. Roesler and W. Heinrich, *Experimental verification and Calculation of Aviation Route Doses*, Radiation Protection Dosimetry, 1999 86(4): 309-315
- [7] Birattari, C., B. Moy, T. Rancati et al., *Neutron measurements at some environmental monitoring stations*. Internal Report, CERN, TIS-RP/IR/96-13 (1996).
- [8] D.T. Bartlett, "Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew" Radiation Protection Dosimetry, 2004 109(4): 349-355.
- [9] Schraube, H., Heinrich, W., Leuthold, G., Mares, V. and Roesler, S. *Aviation Route Dose Calculation and its Numerical Basis*. Tenth International Congress of the international Radiation Protection Association (IRPA-10), Hiroshima, Japan, T-4-4 2000. <http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/01230.pdf>
- [10] Links zu Programmen für die Berechnung der kosmischen Strahlenexposition bei Flügen:

<http://www.sievert-system.org/>;

[http://www.gsf.de/epcard/deu\\_start.php](http://www.gsf.de/epcard/deu_start.php);

<http://www.cami.jccbi.gov/aam-600/Radiation/600radio.html>.

## 5 Beitrag der terrestrischen Komponente

### 5.1 Einführung

In diesem Bericht sind die aktuellen Daten über die terrestrische Strahlendosis in der Schweiz und deren Variationsbereich zusammengestellt. Zuerst wurden die für die Schweiz vorhandenen Datensätze aus den Veröffentlichungen [1], [2], [3] und [4] auf ihre Verwendbarkeit für die hier vorliegende Zusammenstellung überprüft. Die ältesten Dosismessungen mit einer Ionisationskammer in der ganzen Schweiz sind jene von 1962 von Ed. Halm, W. Herbst und A. Mastrocola: "Messung des natürlichen Strahlenpegels in der Schweiz" [1]. Die Ergebnisse des automatischen Dosiswarnnetzes NADAM, bestehend aus Geiger-Müller-Zählrohren, werden seit 1986/87 in den Berichten des BAG veröffentlicht [2]. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden von H.-U. Johner Dosismessungen im Freien und im Hausinnern mit einer Hochdruck-Ionisationskammer vom Typ Reuter & Stokes durchgeführt [3]. Seit 1986 werden systematisch in-situ-Messungen mit tragbarem Ge-Spektrometer durchgeführt [4]. Diese Daten sind in der Datenbank bei der SUER erfasst. Von diesen erwähnten Datensätzen wurden für die terrestrische Komponente im Freien die in-situ Daten [4] verwendet; der Umrechnungsfaktor der im Freien gemessenen Dosen für das Hausinnere stützt sich auf die Ergebnisse von [3]. Die ersten zwei Datensätze konnten nicht verwendet werden, da sie die natürliche Dosiskomponente offensichtlich überschätzen und nur die gesamte Dosis, d.h. kosmische und den terrestrische Komponente zusammen angeben. Bei den Daten von Halm, Herbst und Mastrocola [1] dürften die Überschätzung sowohl messtechnisch, infolge der verwendeten Messgeräte, sowie auch durch die Auswahl der Messpunkte begründet sein, da die letzteren eher nach geologischen Kriterien ausgewählt wurden. Die NADAM-Sonden [2] wurden für einen sehr grossen Messbereich ausgelegt, der bis 50 mSv/h geht, sodass die natürliche Strahlendosis im untersten Teil des Messbereiches liegt, wo die Messunsicherheit grösser ist und die Eigenaktivität des Gerätes zu einer Überschätzung der Dosis von schätzungsweise bis 20% führt.

### 5.2 Methodik

Für die Bestimmung der terrestrischen Komponente werden die Ergebnisse der etwas über 600 in-situ-Spektrometrie-Messungen mit tragbarem Ge(HP)-Detektor in der ganzen Schweiz aus den Jahren 1986 bis 2000 verwendet. Die Messung liefert den Gehalt des Bodens für die beiden natürlichen Zerfallsreihen Uran ( $^{238}\text{U}$ ) und Thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) und für das natürliche Kalium-40 ( $^{40}\text{K}/K_{\text{nat}} = 0.01167\%$ ). Daraus wird die Luft-Kerma in 1 m Höhe über Naturboden berechnet. Hierzu werden die Umrechnungsfaktoren von Aktivität im Erdboden in Luft-Kerma aus [5] verwendet; s. Tabelle 5.1. Dieselben Faktoren sind ebenfalls im UNSCEAR-2000-Bericht [6] veröffentlicht:

Isotop(e)	Umrechnungsfaktor von Aktivität im Boden in Luft-Kerma
$^{238}\text{U}$ + Folgeprodukte	0.46
$^{232}\text{Th}$ + Folgeprodukte	0.60
$^{40}\text{K}$	0.042

Tabelle 5.1: Verwendete Umrechnungsfaktoren in nGy/h pro Bq/kg



Aus diesen Daten wurden kantonale Mittelwerte bestimmt und, durch Gewichtung mit der Bevölkerung der Kantone, ein Schweizer Mittelwert für die terrestrische Komponente der Luft-Kerma von 0.35 mGy pro Jahr berechnet.

Für die Umrechnung von Luft-Kerma, gemessen im Freien auf Naturboden in die effektive Dosis müssen folgende Korrekturen angebracht werden.

- 1) Umrechnung von Luft-Kerma im Freien in Luft-Kerma im Hausinnern. Die Radionuklide in den Baustoffen bewirken eine Erhöhung der Dosis (um den Faktor  $f_{terr}$ ) Dazu wird folgende Formel verwendet (Quelle UNSCEAR 2000 [6]):

$$(K_{indoor})_{terr} = f_{terr} \times K_{terr}$$

UNSCEAR [6] gibt für  $f_{terr} = 1.4$  an (Wertebereich 0.6 bis 2.0). Diese Zahl gilt als Durchschnittswert für die ganze Welt. Vermutlich dürfte der Wert für die Schweiz etwas höher liegen, da die Häuser etwas massiver gebaut sind als im Weltdurchschnitt. Da hierfür jedoch noch keine Daten vorliegen wurde mit dem oben erwähnten UNSCEAR-Wert von 1.4 gerechnet.

- 2) Es muss eine Annahme getroffen werden, wieviel Zeit sich der Durchschnittsschweizer im Freien ( $t_{outdoor}$ ) bzw. im Hausinnern ( $t_{indoor}$ ) aufhält. UNSCEAR-2000 [6] benutzt für die ganze Welt  $t_{outdoor} = 20\%$  resp.  $t_{indoor} = 80\%$ . Dieser Wert wurde für die Schweiz übernommen, da noch keine Daten vorliegen, die eine Verifizierung ermöglichen.
- 3) Die Luft-Kerma muss in effektive Dosis umgerechnet werden. Es wurde für den Energiebereich der Gamma-Linien der natürlichen Radionuklide zwischen 0.1 keV und 2.7 MeV ein Durchschnittswert für den Umrechnungsfaktor von Luft-Kerma in Effektive Dosis von 0.75 mSv pro mGy angenommen [7].

### 5.3 Mittelwerte und Verteilungen

Die Resultate der in-situ-Messungen der letzten Jahre sind in der Tabelle 5.2 zusammengestellt. Bei der effektiven Dosis ist der Aufenthalt von 80 % der Zeit im Hausinnern berücksichtigt. Es ergibt sich für die effektive Dosis so ein mit der Bevölkerungsdichte gewichtetes Mittel von 0.35 mSv pro Jahr. Der Medianwert ist mit 0.32 mSv pro Jahr leicht tiefer, da die Verteilung leicht asymmetrisch ist. Die Zahlenwerte für Luft-Kerma im Freien und effektive Dosis mit Aufenthalt im Hausinnern sind fast gleich, da  $0.75 \cdot (1.4 \cdot 0.8 + 0.2) = 0.99$  ergibt.

Kanton	Einw. x1000	$E_{terr}$ [mSv/a]	Kanton	Einw. x1000	$E_{terr}$ [mSv/a]
AG	508	0.32	NW	33	0.35
AI	14	0.40	OW	29	0.35
AR	52	0.40	SG	428	0.40
BE	958	0.32	SH	72	0.32
BL	233	0.35	SO	232	0.32
BS	199	0.35	SZ	112	0.35
FR	214	0.32	TG	209	0.32
GE	379	0.36	TI	282	0.50
GL	39	0.35	UR	34	0.35
GR	174	0.45	VD	602	0.36
JU	66	0.33	VS	250	0.38
LU	326	0.35	ZG	86	0.32
NE	164	0.30	ZH	1179	0.32
<b>Gewichtetes Mittel für die ganze Schweiz in [mSv/a]:</b>					<b>0.35</b>

Tabelle 5.2: Übersicht der Ergebnisse der in-situ-Messungen

Die Häufigkeitsverteilung der terrestrischen Komponente der effektiven Dosis für die Schweizer Bevölkerung, unter Berücksichtigung des Aufenthaltes im Hausinnern, ist auf der Figur 5.1 dargestellt. Zusammenfassend ergeben sich die folgenden durchschnittlichen Dosiswerte für die Schweiz:

Luft-Kerma in mGy/Jahr			Effektive Dosis in mSv/Jahr	
Im Freien	Im Haus	80% $t_{indoor}$ , 20% $t_{outdoor}$	Mittel	Median
0.35	0.49	0.46	0.35	0.32

Tabelle 5.3: Durchschnittliche Dosiswerte für die Schweiz terrestrische Dosis-Komponente

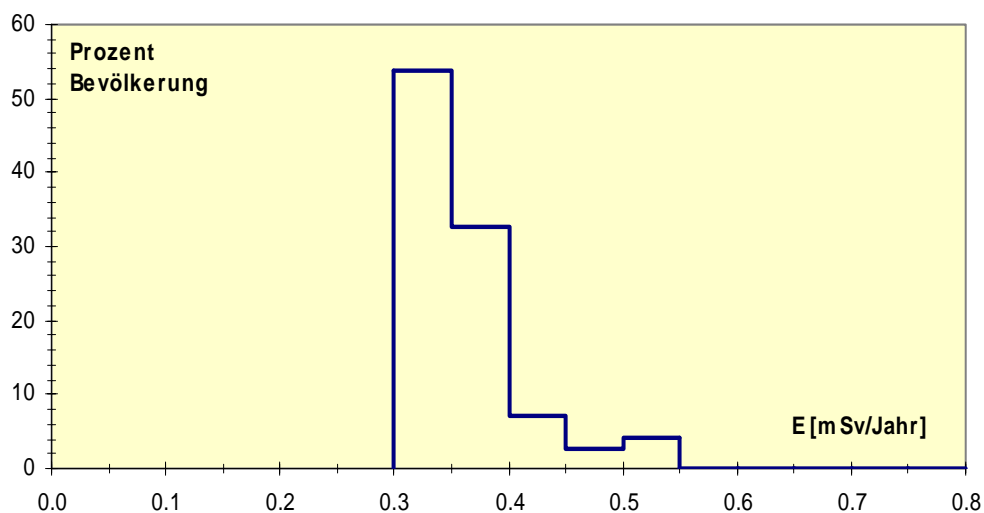


Fig. 5.1: Häufigkeitsverteilung der effektiven Dosis  $E$  in mSv/Jahr durch die terrestrische Komponente, berechnet aus den in-situ-Messungen 1986 - 2000 (Aufenthalt im Hausinnern berücksichtigt); Quelle: [4]

## 5.4 Vergleich der Messungen im Freien mit den Messungen im Hausinnern für die gesamte Luft-Kerma

Für Variationen nach Kantonen bzw. für das Verhältnis der Luft-Kerma im Freien zu derjenigen im Hausinnern wurden die Datensätze von Johner [3] benutzt. Bei diesen Messungen mit einer Hochdruckionisationskammer Reuter & Stokes wurden die beiden Komponenten terrestrische und kosmische Strahlung zusammen erfasst, und dies einerseits im Freien und andererseits im Hausinnern am selben Ort. Für die terrestrische und kosmische Komponente zusammen ergibt sich im Mittel ein Verhältnis Indoor/Outdoor von rund 1.1 - 1.2. Geht man davon aus, dass die terrestrische und die kosmische Komponente annähernd gleich gross sind so erhält man mit  $f_{terr} = 1.4$  und  $f_{cosm} = 0.8$  [6] für das Verhältnis Indoor/Outdoor ( $\frac{1}{2}$ )  $(1.4 + 0.8) = 1.1$ , in Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Die Ergebnisse nach Kantonen geordnet sind in den Figuren 5.2 und 5.3 aufgetragen. Es ist jeweils Mittelwert, Standardabweichung und Wertebereich für die Summe aus terrestrischer und kosmischer Komponente (ohne Neutronen-Anteil) eingezeichnet. Betrachtet man die Wertebereiche, so zeigen die Alpenkantone Graubünden, Tessin und Wallis die höchsten Werte gefolgt von Uri.

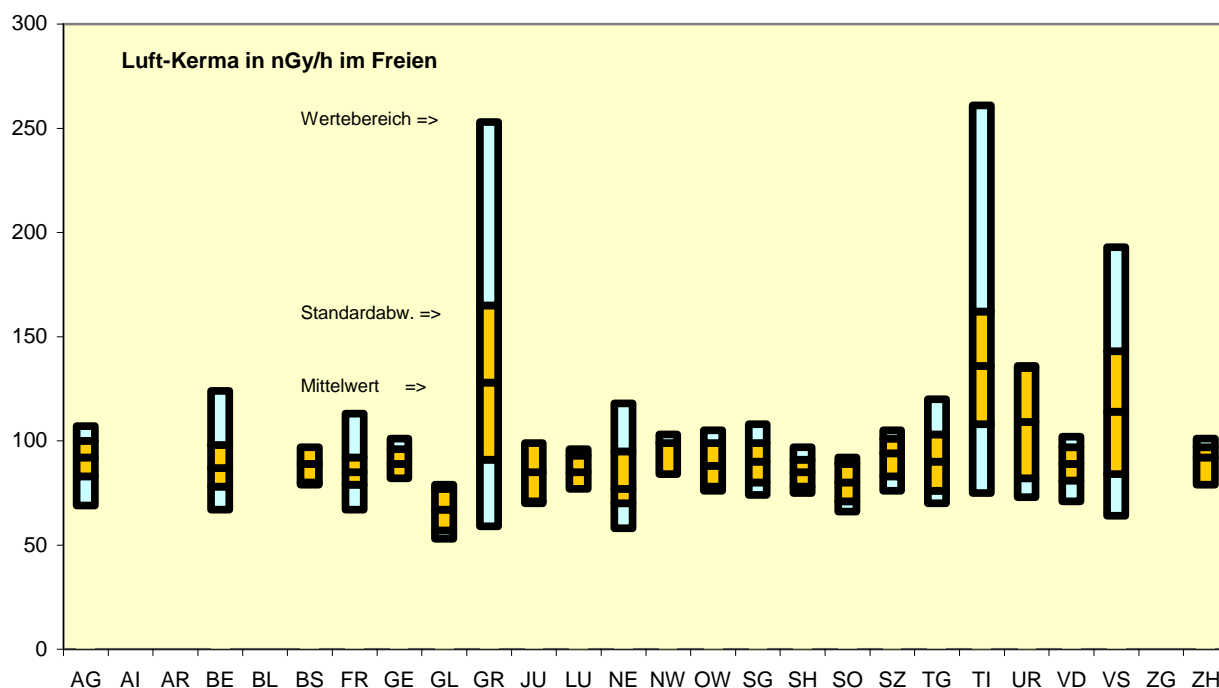


Fig. 5.2: Messungen der Luft-Kerma im Freien mit Ionisationskammer; Quelle [3]  
Terrestrische + kosmische Komponente: Mittelwert, Standardabweichung, Wertebereich

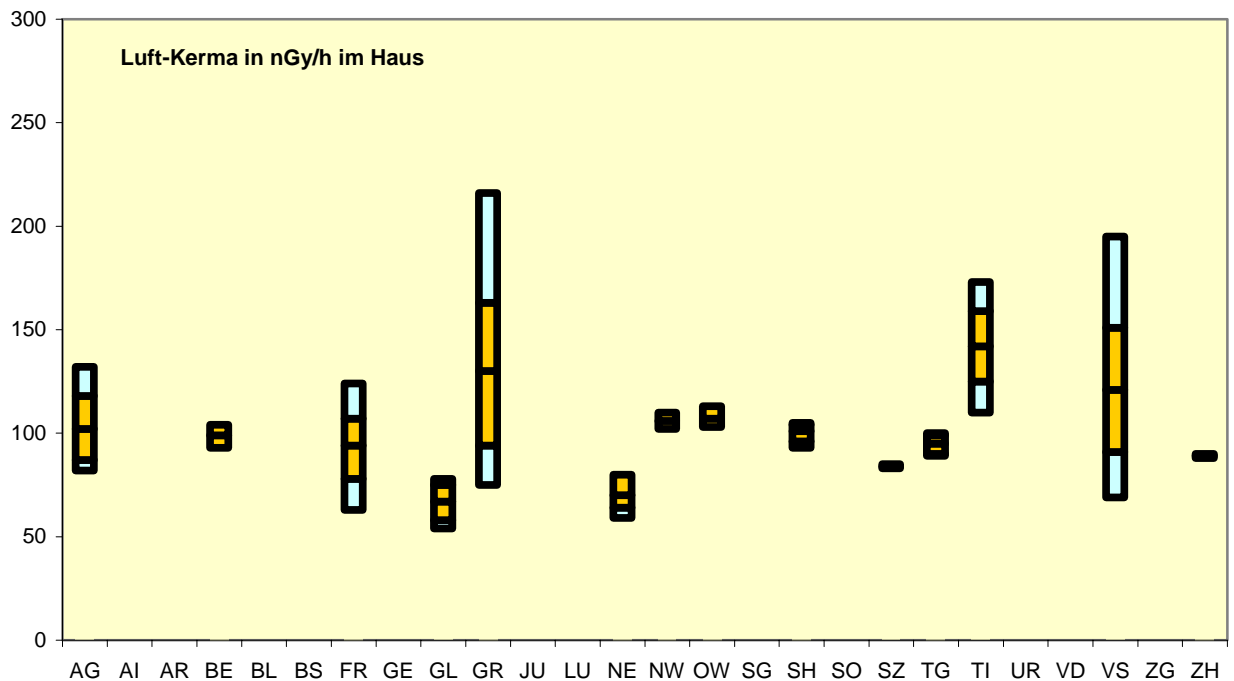


Fig. 5.3: Messungen der Luft-Kerma im Hausinnern mit Ionisationskammer; Terrestrische + kosmische Komponente: Mittelwert, Standardabweichung, Wertebereich; Quelle [3]

## 5.5 Unsicherheiten und Bewertung der Resultate

Für die Messunsicherheit der in-situ-Messungen bzw. der Dosismessungen mit Ionisationskammern kann von einem Wert von  $\pm 25\%$  ausgegangen werden. Dies ist einerseits aus der Kalibrierung der Geräte und aus Vergleichsmessungen abzuleiten.

Aus den Messungen der gesamten Luft-Kerma (terrestrisch und kosmisch zusammen) von [3] in den einzelnen Kantonen lassen sich folgende Schlüsse im Bezug auf die geographischen Variationen ziehen:

- 1) In den Alpenkantonen Graubünden, Tessin, Wallis und Uri gehen die höchsten Einzelwerte bis zum Doppelten des kantonalen Mittelwertes, gefolgt von den Kantonen Bern und Neuenburg mit knapp über 40 %. Das Mittel für die Luft-Kerma für diese Kantone liegt über 100 nGy/h;
- 2) In den Kantonen Graubünden, Tessin und Wallis beträgt die Standardabweichung der gemessenen Dosen 20 bis 30 %, bei den übrigen 8 bis 16 Prozent, im Mittel 11 %;
- 3) Bei den Messwerten im Hausinnern sind diejenigen von Graubünden, Tessin und Wallis die höchsten; sie liegen rund 50 % über denjenigen der übrigen Kantone;
- 4) Die Dosiswerte im Hausinnern sind im Durchschnitt etwa 10 bis 20 % höher als im Freien;
- 5) Es besteht eine einigermaßen gute Korrelation (Korrelationskoeffizient von 0.82) zwischen den Messwerten im Freien vor dem Haus bzw. denjenigen im Hausinnern.

## 5.6 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

In-situ-Messungen werden in der Regel auf Naturboden durchgeführt, da damit einerseits der Radionuklidgehalt im Boden bzw. nach einem Unfall die Aktivitätsflächenbelegung auf der Bodenoberfläche ermittelt werden soll. Für die Strahlenexposition der Bevölkerung sind jedoch solche Messungen auch auf geteerten bzw. gepflasterten Strassen und Plätzen, bzw. im Hausinnern nötig. Es sind deshalb auch In-situ-Messungen an solchen Orten und in Häusern geplant. Diese würden auch die Bestimmung der  $f_{terr}$  und  $f_{cosm}$  - Faktoren ermöglichen und weiter auch mehr Informationen über die Verteilung sowie den Einfluss von Haustyp und Baumaterialien liefern. Ein solches Messprogramm, als Pilotprojekt für die Agglomeration von Freiburg, ist im Rahmen einer Dissertation an der Universität Freiburg im Gang.

## 5.7 Referenzen

- [1] Ed. Halm, W. Herbst und A. Mastrocola: "Messung des natürlichen Strahlenpegels in der Schweiz", Sonderdruck aus Beilage B, Nr. 6/1962 zum Bulletin des Eidg. Gesundheitsamtes vom 22. Dezember 1962.
- [2] Die Daten der NADAM-Sonden, bei denen an 58 Stationen die ODL mit GM-Zählrohr alle 10 Minuten erfasst werden. Diese Daten werden regelmässig veröffentlicht in den BAG-Jahresberichten zur Umweltradioaktivität.
- [3] H.-U. Johner: "Die natürliche Strahlung in der Schweiz" in: Jahresbericht Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz"; [BAG 1996, pp. B.3.3.1 - B.3.3.6.] und "Natürliche Strahlung in der Schweiz" in: Jahresbericht Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz"; [BAG 1998, pp. B.3.4.1 - B.3.4.4].
- [4] In-situ-Datenbank, 1986 - 2002 (Ch. Murith et al.; unveröffentlicht)
- [5] K. Saito and P. Jacob: "Gamma Ray Fields in the Air due to Sources in the Ground". Rad. Prot. Dos. 58 (1), 1995, pp. 29 – 45
- [6] UNSCEAR-2000-Bericht: Sources and Effects of Ionizing Radiation; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, United Nations, New York, 2000: Volume I, Annex A: Dose assessment methodologies.
- [7] K. Saito, N. Petoussi-Henss and M. Zankl: "Calculation of the Effective Dose and its Variation from Environmental Gamma Ray Sources", in Health Physics 74/6, (1998), pp. 689 - 706.

## 6 Beitrag der Medizin

### 6.1 Einleitung

Die Strahlenexposition der Bevölkerung im Zusammenhang mit diagnostischen und therapeutischen Massnahmen im medizinischen Bereich ist für den grössten Anteil der künstlichen Strahlungsexposition verantwortlich. Sie spielt jedoch eine sehr spezifische Rolle: einerseits ist die medizinische Strahlenexposition in gewissen Fällen beabsichtigt, und andererseits trägt sie wesentlich zur Betreuung von kranken oder verunfallten Personen bei. Aus diesem Grund gilt es bei der Betrachtung dieser Art von Strahlenexposition im Auge zu behalten, dass gleichzeitig ein substantieller Nutzen für den Patienten besteht. Dieser Tatsache wird auch in der Gesetzgebung Rechnung getragen: Für medizinische Strahlenanwendungen werden keine Dosisgrenzwerte festgelegt (Art. 15 StSG). Den Schutz der Patienten gewährleisten Faktoren wie eine begründete, klar definierte Indikation für Untersuchungen sowie eine optimierte Durchführung und eine möglichst niedrige Dosis. Gegenwärtig laufen Bemühungen, die darauf abzielen, der Ärzteschaft Referenzpunkte für die bei Untersuchungen abgegebenen Strahlendosen zu geben. Dazu wird für jeden Untersuchungstyp ein diagnostisches Referenzniveau festgelegt. Falls dieses Niveau für einen durchschnittlichen Patienten systematisch überschritten wird, muss der Arzt seine Praxis überprüfen und die Dosis reduzieren.

Beim Einsatz medizinischer Strahlung werden drei Bereiche unterschieden:

- Röntgendiagnostik: Diese Methode kommt häufig zum Einsatz und ist für den grössten Teil der medizinischen Strahlenexposition verantwortlich. Im Laufe der vergangenen Jahre sind invasivere Röntgenverfahren entwickelt worden, bei denen diagnostische Angiographie-Verfahren gleichzeitig genutzt werden, um lokale Eingriffe vorzunehmen (Freilegen von Gefässen, Einlegen von Stents usw.). Diese neue Disziplin, die interventionelle Radiologie, entwickelt sich rasch. Sie bietet zwar aus Patientensicht beträchtliche Vorteile (anstelle einer Operation ist ein wenig invasiver, häufig ambulant durchgeführter Eingriff möglich), führt beim Patienten jedoch zu einer relativ hohen Strahlenexposition und damit zu signifikanten stochastischen Risiken. Es wurden sogar Fälle dokumentiert, in denen die Grenzwerte für deterministische Wirkungen in Bezug auf die Haut überschritten wurden und es zu Verbrennungen oder sogar Nekrosen kam.
- Nuklearmedizin: Dabei handelt es sich um die (häufig intravenöse) Verabreichung von Radiopharmazeutika. Die Diagnose erfolgt, indem mit einer Kamera die Verteilung der Aktivität im Körper gemessen wird. Die Methode wird in Spitälern und Röntgeninstituten eingesetzt. Die effektiven Dosen pro Untersuchung liegen im Bereich der Röntgendiagnostik, die Zahl der Untersuchungen ist jedoch weniger gross. Die Nuklearmedizin wird auch als Behandlung eingesetzt, insbesondere in der Onkologie. Hier sind die Aktivitäten und die damit zusammenhängenden Dosen relativ hoch; die Häufigkeit dieser Behandlungsart ist jedoch relativ gering.
- Strahlentherapie: Diese Methode wird im Bereich der Onkologie eingesetzt. Das Ziel besteht in der Zerstörung von Tumorzellen. Hier ist die Bestrahlung das Hauptziel, und die abgegebenen Dosen sind hoch. Das Risikopotenzial ist relativ hoch, insbesondere in Bezug auf die Verursachung eines neuen Tumors. Dem

steht jedoch ein hoher Nutzen der Behandlung – gemessen an der Heilungsquote nach 5 Jahren – gegenüber.

## 6.2 Methode zur Dosisbestimmung

Zur Bestimmung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Rahmen von medizinischen Anwendungen kann man sich entweder auf Angaben der Leistungserbringer oder der Leistungsempfänger stützen. Meistens wird auf die Angaben der Leistungserbringer abgestellt. Dabei wird auf der Grundlage von Erhebungen für die einzelnen Untersuchungstypen die Häufigkeit und die damit verbundene Strahlenexposition bestimmt. Die Aufrechnung der Dosen ergibt die Kollektivdosis, und mittels Division durch die Bevölkerungszahl wird die mittlere Dosis pro Person errechnet. Diese Grösse wurde häufig mit dem Argument als nicht aussagekräftig kritisiert, dass die Dosismengen der einzelnen Personen weit von diesem Mittelwert entfernt liegen.

Betrachtet man ein einzelnes Jahr, dann muss sich der Grossteil der Bevölkerung keiner solchen Untersuchung unterziehen, während einige wenige weit überdurchschnittlichen Dosen ausgesetzt sind. Trotzdem sind die Durchschnittswerte, unabhängig von der Verteilung, interessant. Geht man zudem davon aus, dass das Verhältnis zwischen Risiko und Dosis linear ohne Grenzwert ist, dann ist die Kollektivdosis und folglich auch die mittlere Dosis ein guter Indikator für das Gesamtrisiko der Bevölkerung. Der andere Ansatz zur Schätzung der im Rahmen medizinischer Anwendungen applizierten Dosen besteht darin, bei der Bevölkerung eine Umfrage durchzuführen. Mit dieser Methode erhält man nicht nur Zugang zur mittleren Dosis, sondern auch zur Verteilung in der Bevölkerung. Diese Methode wurde jedoch bisher selten gewählt [1,2]. Sie ist nicht nur aufwändig, da eine repräsentative und umfangreiche Stichprobe erhoben werden muss, sondern auch nicht sehr zuverlässig, da die von den Einzelpersonen über die erhaltenen Behandlungen erteilten Auskünfte ungenau sind.

## 6.3 Situation betreffend in der Schweiz durchgeführter Erhebungen

### ***Röntgendiagnostik***

Im Bereich der Arbeiten zur Röntgendiagnostik, welche den grössten Anteil der Strahlenexposition der Bevölkerung ausmacht, hat die Schweiz eine lange Tradition. Zwischen 1957 und 1977 wurden Umfragen von der Abteilungen Radiologie und Radiophysik des Inselspitals Bern durchgeführt.

Die letzte Umfrage auf nationaler Ebene wurde 1998 unter der Federführung des Bundesamtes für Gesundheit vom Institut für angewandte Radiophysik und vom Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Lausanne [6] durchgeführt. Diese Erhebung, in die alle Leistungserbringer – Spitäler, Röntgeninstitute, private Arzt- und Zahnarztpraxen – einbezogen wurden, erfasste zwei Millionen



Untersuchungen, die in 250 Untersuchungstypen und 6 Hauptkategorien eingeteilt wurden. Für jeden Untersuchungstyp wurde ein dosimetrisches Modell erstellt, mit dem sich anhand der Untersuchungsparameter die Organdosen und somit die effektiven Dosen bestimmen liessen. Diese Erhebung ermöglichte die Bestimmung der mittleren Strahlendosis der Bevölkerung sowie eine Aufschlüsselung nach Alter, Geschlecht und Art der Untersuchung. Keine Rückschlüsse waren damit auf die Verteilung der Dosis in der Bevölkerung möglich.

Zur Erhebung entsprechender Daten wurde 2003 eine patientenorientierte Umfrage organisiert. Finanziert wurden diese vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) und vom Bundesamt für Gesundheit (BAG). Es wurden 4'000 Haushalte telefonisch kontaktiert und über die Zahl und Art der im Vorjahr erhaltenen Untersuchungen befragt, mit Ausnahme der zahnärztlichen Röntgenuntersuchungen. Obwohl mit dieser Methode nicht die gewünschte wissenschaftliche Genauigkeit erreicht wird und auf Grund falscher Erinnerungen beträchtliche Verzerrungen möglich sind, konnte so die Dosisverteilung innerhalb der Bevölkerung durch eine Abstimmung der ermittelten Daten auf die bekannte Gesamtzahl der Untersuchungen rekonstruiert werden.

### ***Nuklearmedizin***

Eine erste Umfrage zur Strahlenexposition durch nuklearmedizinische Anwendungen in der Schweiz wurde 1989/1990 von der Abteilung Radiologische Physik des Universitätsspitals Basel [7] durchgeführt. Während eines Monats wurden alle in der Schweiz durchgeführten Untersuchungen erfasst und die Kollektivdosen sowie die mittleren Dosen der Bevölkerung bestimmt, wie auch die Aufschlüsselung nach Alter und Geschlecht sowie nach Art der eingesetzten Radioelemente. Eine Erhebung wurde von derselben Gruppe 2004 durchgeführt. Die Evaluation liegt noch nicht vor, bestimmte Informationen werden jedoch im vorliegenden Bericht dargestellt [8].

### ***Strahlentherapie***

Zu diesem Behandlungsbereich wurden in der Schweiz bisher keine Erhebungen durchgeführt. Auf der Grundlage des aktuellsten Berichts der UNSCEAR [9] wird die Häufigkeit auf 2 Behandlungen pro Jahr pro 1'000 Personen geschätzt. Die UNSCEAR verzichtet gegenwärtig auf eine Schätzung der effektiven Dosis pro Untersuchung. Aufgrund des aktuellen Wissensstands scheint daher eine Evaluation der effektiven Dosis im Zusammenhang mit einer Strahlentherapie nicht sinnvoll.

## **6.4. Ergebnisse**

### ***Röntgendiagnostik***

Die Häufigkeit von diagnostischen Röntgenuntersuchungen liegt gemäss der Befragung von 1998 bei 1.34 Untersuchungen pro Person. Die mittlere Dosis beträgt 1.0 mSv ( $\pm 20\%$ ). Die Verteilung der Häufigkeit dieser Untersuchungen und der Dosis je nach Untersuchungskategorie ist in Abb. 6.1 dargestellt.



Bei den zahnärztlichen Untersuchungen fällt auf, dass diese zwar sehr häufig (43.3%), aber nur für einen geringen Teil der Dosis verantwortlich sind (1%). Bei den Computertomographien verhält es sich gerade umgekehrt: nur gerade 3.4% aller Untersuchungen entfallen auf diese Behandlungsart, sie ist aber für 27.8% der Kollektivdosis verantwortlich.

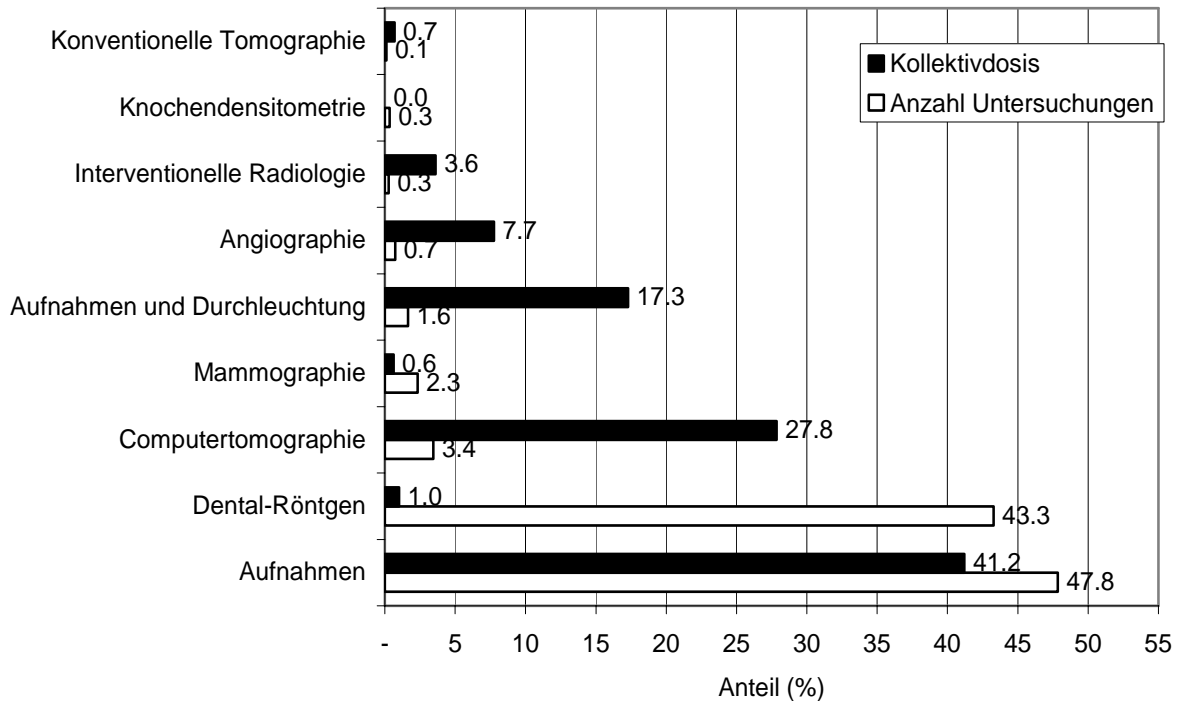


Abb. 6.1: Verteilung der Anzahl Untersuchungen und der Kollektivdosis nach Kategorie der diagnostischen Röntgenuntersuchungen (in %)

Die altersspezifische Verteilung der Untersuchungen geht aus Abb. 6.2 hervor.

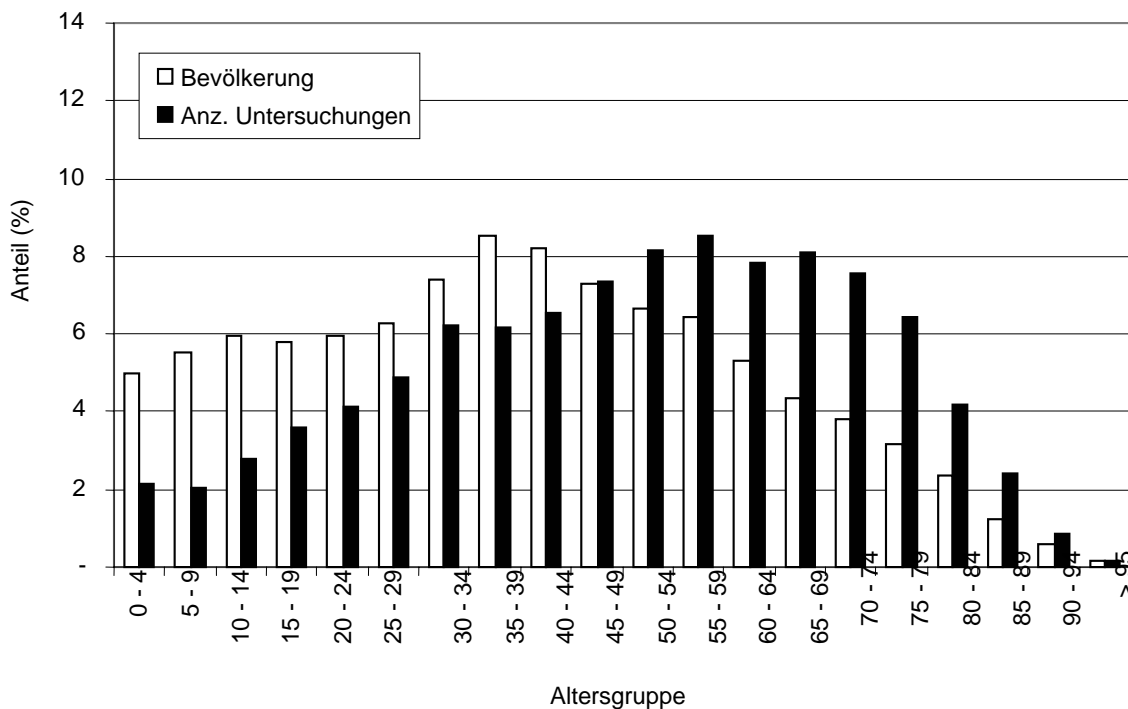


Abb. 6.2: Altersspezifische Verteilung der diagnostischen Röntgenuntersuchungen

In dieser Grafik, in der auch der Anteil der verschiedenen Alterskategorien an der Gesamtbevölkerung dargestellt ist, kommt zum Ausdruck, dass sich ältere Personen häufiger solchen Untersuchungen unterziehen. Die Verschiebung gegenüber dem Altersdurchschnitt der Gesamtbevölkerung beträgt dabei 11 Jahre. Auf der Grundlage der Modelle verschiedener Strahlenschutzinstanzen [10, 11, 12] wurde eine altersbereinigte effektive Dosis berechnet, obwohl eine solche Korrektur umstritten ist. Die resultierende Dosis beläuft sich auf rund 0.65 mSv. Die Dosisverteilung in der Bevölkerung auf der Grundlage der Befragung von 2003 ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Dabei sind die zahnärztlichen Untersuchungen wie erwähnt nicht berücksichtigt. Die Analyse zeigt, dass 2 von 3 Personen in einem bestimmten Jahr keine Untersuchung durchführen lassen, und dass der Anteil der Personen, welche eine Dosis von über 10 mSv erhalten, 1.3% beträgt.

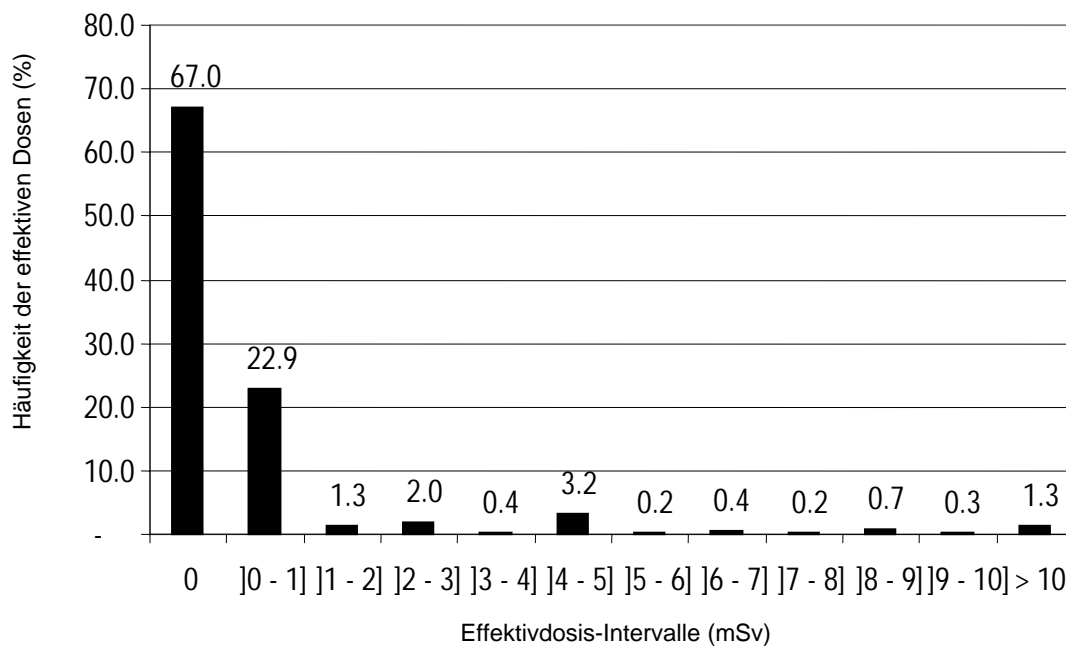
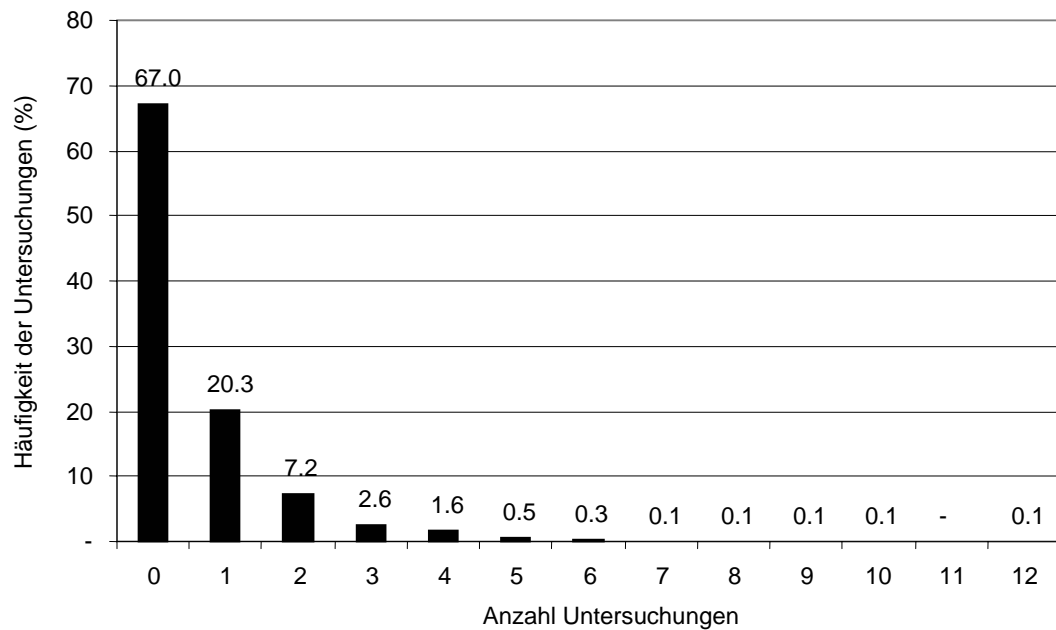


Abb. 6.3: Verteilung der medizinischen Strahlenexposition in der Bevölkerung

## Nuklearmedizin

Die Häufigkeit nuklearmedizinischer Untersuchungen liegt gemäss der Erhebung von 1989/1990 bei 0.01 Untersuchungen pro Person und Jahr. Die mittlere Dosis beträgt 0.04 mSv.

Bei der Umfrage 2004 resultierte eine etwas höhere Untersuchungshäufigkeit (0.013 Untersuchungen/Person/Jahr). Es ist somit kein wesentlicher Anstieg der damit verbundenen mittleren Dosis zu erwarten.

Die Verteilung der Untersuchungshäufigkeit und der damit verbundenen Dosis auf die einzelnen Untersuchungstypen ist für die beiden Befragungen 1989/1990 und 2004 in Abbildung 6.4 dargestellt.

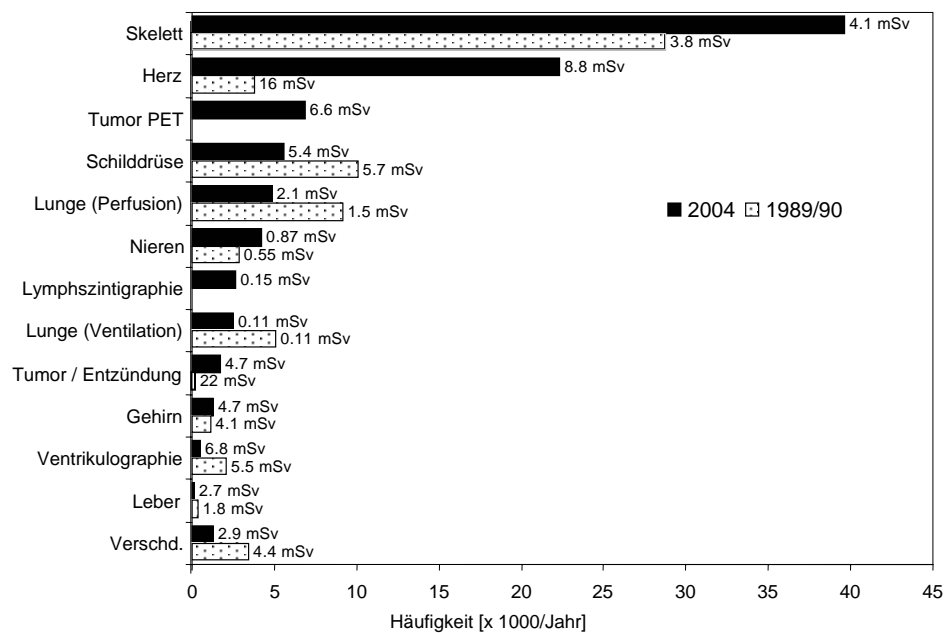


Abb. 6.4: Verteilung der Anzahl Untersuchungen pro Person nach Untersuchungstyp in der Nuklearmedizin mit Angabe der effektiven Dosis pro Untersuchung

Demnach handelt es sich bei einem grossen Teil der Untersuchungen um Szintigraphien des Skeletts mit einer mittleren Dosis von 3.8 mSv (Erhebung 1989/1990) bzw. 4.1 mSv (Erhebung 2004) [8].

Die altersspezifische Verteilung der Untersuchungen geht aus Abb. 6.5 hervor.

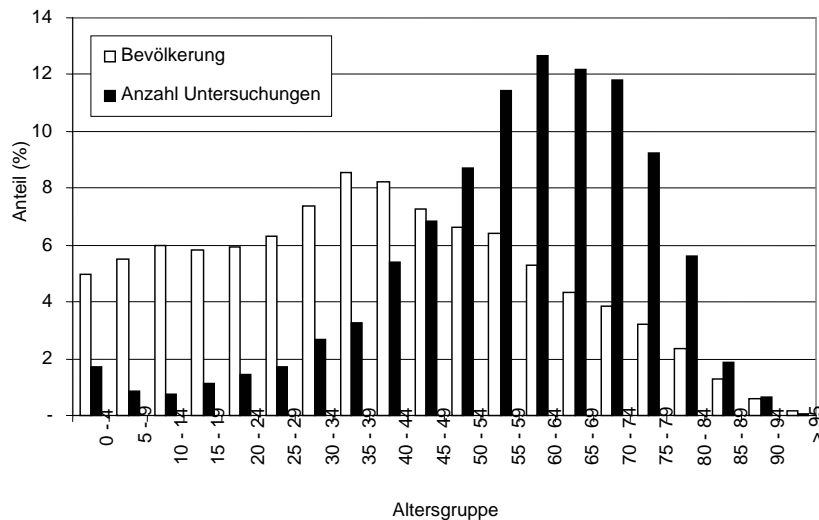


Abb. 6.5: Altersspezifische Verteilung der nuklearmedizinischen Untersuchungen

### Gesamtergebnis

Die mittlere Gesamtdosis im Zusammenhang mit medizinischen Anwendungen ohne Berücksichtigung der Radioonkologie beträgt 1.04 mSv/Jahr. Der Unsicherheitsfaktor bei diesem Durchschnittswert wird auf  $\pm 20\%$  geschätzt. Die Verteilung dieser mittleren Dosis auf die verschiedenen Untersuchungskategorien ist in Tabelle 6.1 ersichtlich.

Untersuchungskategorie	Mittlere Dosis nach Untersuchungskategorie (mSv/a)	Mittlere Dosis nach Untersuchungsbereich (mSv/a)
Röntgendiagnostik		1.0
Aufnahmen	0.41	
Fluoroskopie	0.17	
Angiographie	0.08	
Interventionelle Radiologie	0.04	
Computertomographie	0.28	
Mammographie	0.006	
zahnärztliche Röntgenologie	0.01	
konventionelle Tomographie	0.007	
Knochendensitometrie	$6 \cdot 10^{-6}$	
Nuklearmedizin (Wert von 1989/1990)	-	0.04
Total	-	1.04

Tab. 6.1: Verteilung der mittleren Dosis auf die verschiedenen Untersuchungskategorien

Für die diagnostischen Röntgenuntersuchungen wurde die Verteilung dieser Dosis auf die einzelnen Personen bestimmt.

Bei den zahnärztlichen Untersuchungen ist die Häufigkeit hoch (rund jede zweite Person pro Jahr). Die Dosen bei den einzelnen Untersuchungen sind jedoch niedrig, und selbst wenn die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass dieselbe Person von mehreren Untersuchungen betroffen ist, wird der niedrigste Dosisbereich (0 bis 1'000  $\mu\text{Sv}$ ) nicht überschritten. Aus diesem Grund wurde die Zahnmedizin bei der Tabelle nicht berücksichtigt.

Bei den nuklearmedizinischen Untersuchungen ist die Häufigkeit gering und die Wahrscheinlichkeit vernachlässigbar, dass an einer Person mehrere Untersuchungen durchgeführt werden. Deshalb entspricht die Verteilung der resultierenden Dosen der Verteilung der Dosen der verschiedenen Untersuchungen. Die Verteilung der Dosen im Zusammenhang mit medizinischen Strahlenanwendungen ist in Abbildung 6.6 wiedergegeben.

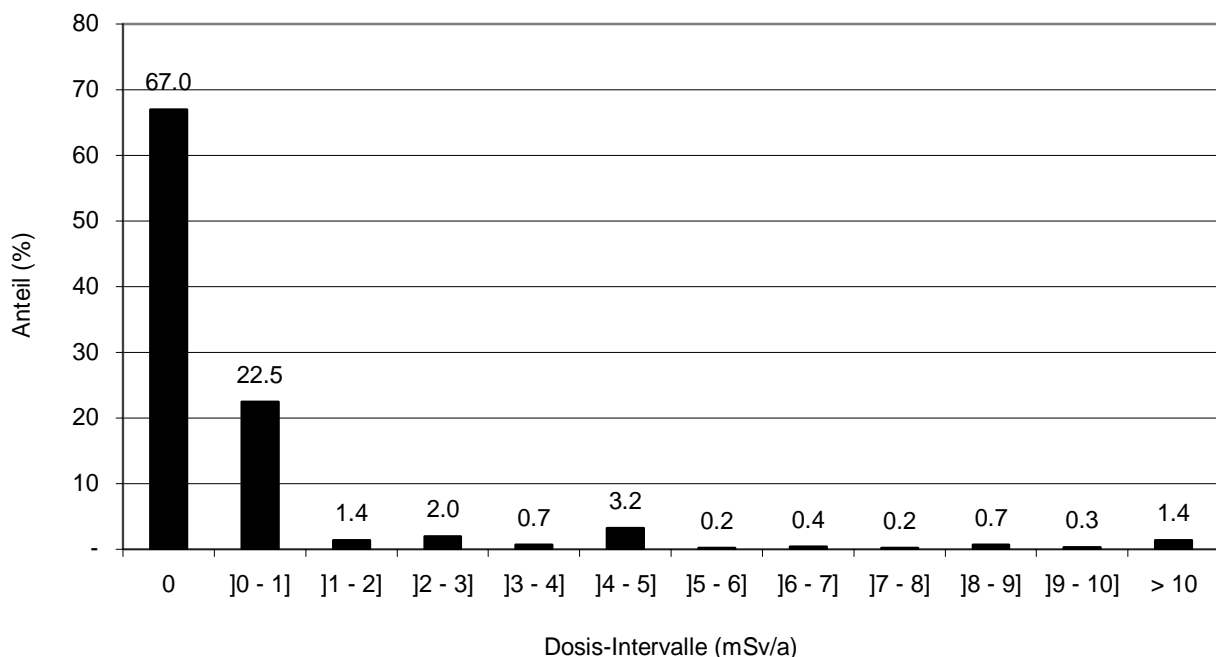


Abb. 6.6: Verteilung der Strahlendosis im Zusammenhang mit medizinischen Untersuchungen

## 6.5 Schlussfolgerungen

Der Beitrag der medizinischen Anwendungen zur Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung ist beträchtlich. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, diese Komponente genauer zu bestimmen und die weitere Entwicklung zu beobachten. In den vergangenen Jahren wurden substantielle Anstrengungen zur Evaluation dieser Dosis unternommen. Auf der Grundlage der Erhebung von 1998 liegen nun repräsentative Daten zu den Durchschnittswerten und zur Verteilung vor. Die für das Jahr 2003 durchgeführte, leicht überarbeitete Erhebung weist auf einen Anstieg der mittleren Dosis um 20% hin (von 1.0 mSv auf 1.2 mSv). Diese Entwicklung steht in Zusammenhang mit dem häufigeren Einsatz von Computertomographien (+70%) und der dabei pro Untersuchung abgegebenen Dosis (+20%).

Folgende Bemühungen laufen gegenwärtig:

Fertigstellung der Umfrage zur Nuklearmedizin, was eine Aktualisierung der oben erwähnten Werte ermöglichen wird.

Beobachten der Trends in der Röntgendiagnostik. Dies drängt sich im Hinblick auf die rasche Entwicklung im Bereich der Röntgenverfahren auf (Übergang zu digitalen Methoden, steigende Bedeutung der Computertomographie und der interventionellen Radiologie).

Die Methodologie zur Abschätzung des Risikos aufgrund der Strahlenbelastung im Rahmen von Strahlentherapien ist Gegenstand zahlreicher laufender Studien und eine Übertragung auf die Situation in der Schweiz von Interesse.

Schliesslich wäre es sinnvoll, ein Modell zu entwickeln, das gleichzeitig eine Aufschlüsselung der mittleren Dosis sowohl nach Untersuchungstyp als auch nach Einzelperson (Alter und Geschlecht) ermöglichen würde.

## 6.6 Referenzen

- [1] Maccia, C., Rommens, C., Pagès, P. and Brenot, J. How can a phone survey help in a retrospective assessment of the medical exposure of the population? In: Proc. Xth Congress of the International Radiation Protection Association, IRPA-10, Hiroshima 2000.
- [2] Aroua, A., Valley, J.-F., Vader, J.-P. Radiation Exposure by Radio-Diagnostics in Switzerland: A Pilot Patient-Oriented Survey. Radiat. Prot. Dosim. 109(3):211-215 (2004).
- [3] Zuppinger, A., Minder, W., Sarasin, R. and Schär, M. Die Strahlenbelastung der schweizerischen Bevölkerung durch röntgendiagnostische Massnahmen, Radiol. clin. 30 (1961).
- [4] Poretti, G., Ionesco, R. and Lanz, W. Erhebung über die Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung infolge röntgendiagnostischer Untersuchungen, Hrsg., Schweiz. Vereinigung für Atomenergie (1971).
- [5] Mini, R. and Poretti, G. Die Bestimmung der Strahlenbelastung einer Bevölkerungsgruppe gemäss ICRP26, Tagungsbericht der Schweizerischen Gesellschaft für Strahlenbiologie und Strahlenphysik SGSP (1984).
- [6] Aroua, A., Buchillier-Decka, I., Vader, J.P. and Valley, J.F. Nation-wide survey on radiation doses in diagnostic and interventional radiology in Switzerland in 1998. Health Phys., 83(1), 46-55 (2002).
- [7] Roser, H.W. und Roth, J. Die Strahlenexposition infolge nuclearmedizinischer Untersuchungen in der Schweiz. Z. Med. Phys. 8:41-48 (1998).
- [8] Persönliche Mitteilung. Roser, HW. und Roth, J.

- [9] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, New York (2000).
  
- [10] International Commission on Radiological Protection, ICRP Committee 3, Minutes of the Würzburg Meeting (1995).
  
- [11] Stather, J. W. and Wall, B.F., Risks Associated with the Medical Use of Ionising Radiation at Various Ages, Proceedings of the ICRP Würzburg Meeting (1995).
  
- [12] Kaul, A., Bauer, B., Bernhardt, J.H., Nosske, D. and Veit, R., Effective Doses to Members of the Public from the Diagnostic Application of Ionising Radiation in Germany, Eur. Radiol. 7: 1127-1132 (1997).

## 7 Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Studie wurden insgesamt die gesteckten Ziele erreicht, d.h. für den Grossteil der Fälle die Verteilung der Dosis der einzelnen Strahlungsbeiträge in der Bevölkerung beschrieben. Zusätzlich wurden die verwendeten Basisdaten, Modelle und Umrechnungsfaktoren explizit festgelegt.

Nicht realisiert werden konnte hingegen das Ziel, die Dosisverteilung in der Bevölkerung unter Berücksichtigung sämtlicher Strahlenkomponenten zu bestimmen. Der Grund dafür liegt darin, dass die relativen Beiträge sehr unterschiedlich sind: Während die Beiträge aus natürlicher Strahlung zwischen 0 und 1 mSv liegen, erreichen sie beim Radon und den medizinischen Anwendungen teilweise wesentlich höhere Werte von bis zu 10 mSv. Da die Auflösung zwischen 0 und 1 mSv nicht sehr fein ist und ausserdem für die einzelnen Komponenten sehr unterschiedliche Verteilungen resultierten, ist es nicht sinnvoll, eine einzige Verteilung anzugeben. Mit der Ausnahme des Beitrags von  $^{40}\text{K}$  im Körper sind die Verteilungen sehr ungleichmässig. Aus diesem Grund sollte nach Ansicht vieler Fachpersonen zur Beschreibung der Verteilung nicht in erster Linie der Durchschnittswert herangezogen werden, sondern der Medianwert. Geht man allerdings für das Verhältnis zwischen Risiko und Dosis von einem linearen Verlauf ohne Grenzwert aus, ist die Durchschnittsdosis der Gesamtbevölkerung der Indikator für das Gesamtrisiko.

Tabelle 7.1 fasst die Beiträge der verschiedenen Strahlungsquellen zusammen, denen die Bevölkerung ausgesetzt ist. Der jeweilige Beitrag lässt sich in Form des Mittelwertes, des Medianwerts und der Variationsbreite ausdrücken. Ausserdem möchten wir darauf hinweisen, dass sich die Werte weitgehend bestätigten, die in den jährlich vom BAG erstellten Berichten zur Umweltradioaktivität und zu den Strahlendosen in der Schweiz präsentiert wurden.

Beitrag	Mittelwert (mSv/a)	Medianwert (mSv/a)	Wertebereich (mSv/a)
Radon	1.6	1.2	0.1 – 100
Inkorporation	0.34		0.1 – 0.5
Kosmische Strahlung	0.38	0.36	0.3 – 0.5
Terrestrische Strahlung	0.35	0.32	0.3 – 0.6
Medizinische Strahlung	1.0	< 0.01	0 - 10

Tab. 7.1: Beiträge zur Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung

Dass der grösste Teil der Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung auf Radon zurückgeht, ist seit Jahren bekannt. Das BAG wendet einen substanziellen Teil seiner Mittel zur Erfassung und Sanierung von Wohngebäuden auf, in denen die radioaktive Konzentration von Radon bei über  $1'000 \text{ Bq/m}^3$  liegt. Die erste Phase des Radon-Programms mit dem Hauptziel einer Bestandesaufnahme zu den Radonkonzentrationen in den Wohngebäuden der Schweiz wurde Ende 2004 abgeschlossen. Die KSR hat für 2005 die Analyse dieser Ergebnisse und die Ausarbeitung einer Stellungnahme geplant.



Der Beitrag der Inkorporation natürlicher oder anthropogener Radionuklide ist gering. Es ist jedoch bedauerlich, dass zu diesem Bereich kaum Daten verfügbar sind und deshalb die Dosisverteilung in der Bevölkerung nicht bestimmt werden konnte. Es ist nicht nur wenig über den Gehalt an Radionukliden in den verschiedenen Lebensmitteln bekannt, sondern auch über die Ernährungsweise und deren Variationsbreite. Solche Daten wären im Übrigen auch von grossem Interesse für Prognosen zur Strahlenexposition der Bevölkerung im Falle eines schweren Strahlenunfalls.

Die Beiträge der kosmischen und der terrestrischen Strahlung im Freien sind genügend genau bekannt. Die entsprechenden Werte im Innern von Gebäuden sind weniger zuverlässig, und aufgrund der aktuell verfügbaren Daten lässt sich der relative Anteil dieser beiden Strahlungsquellen im Innern von Wohngebäuden nicht zuverlässig bestimmen. Gegenwärtig beschäftigt sich eine aktuelle Doktorarbeit in der Sektion Überwachung der Radioaktivität mit diesem Thema. Die resultierenden Daten sollten die vorhandenen Lücken in diesem Bereich schliessen.

Ein Anliegen bleibt die Strahlenexposition des Flugpersonals bei Langstreckenflügen. Die KSR prüft gegenwärtig, ob eine Anpassung der schweizerischen Gesetzgebung an die europäischen Bestimmungen in Betracht zu ziehen ist.

Was die Strahlungsexposition im Zusammenhang mit medizinischen Anwendungen betrifft, konnte anhand aktueller Erhebungen der Stand in den Bereichen Röntgendiagnostik und Nuklearmedizin bestimmt werden. Im Bereich der Röntgendiagnostik, die den zweitgrössten Beitrag zur Strahlenexposition der Bevölkerung leistet, entwickelt das BAG gegenwärtig ein umfassendes Programm, mit dem die Untersuchungen mit den höchsten Strahlenbelastungen – Fluoroskopie und Computertomographie – optimiert werden sollen. Die KSR beobachtet und unterstützt diesen Ansatz.

Was die Strahlentherapie betrifft, verfolgt die KSR mit Interesse die Entwicklung von Methoden, mit denen sich der Beitrag dieser Behandlungen zur Strahlenexposition der Bevölkerung messen lässt. Sie empfiehlt den Einsatz solcher Methoden in der Schweiz, sobald entsprechende Ansätze zur Verfügung stehen.

Das vorliegende Dokument wurde von der KSR am 8. September 2005 im Plenum genehmigt.

Die Subkommission für Umweltüberwachung dankt allen an dieser Analyse Beteiligten ganz herzlich.