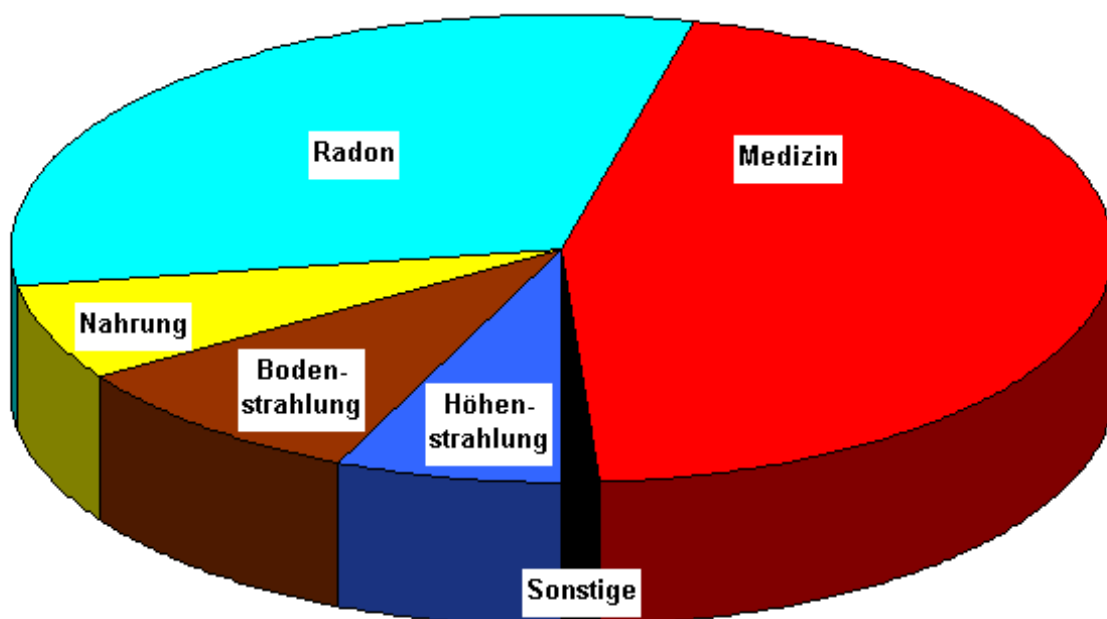


# Die Strahlenexposition des Menschen

Winfried Koelzer  
Forschungszentrum Karlsruhe  
Hauptabteilung Sicherheit



23.03.2001

<b>INHALT</b>	<b>Seite</b>	
<b>1</b>	<b>NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION</b>	<b>1</b>
1.1	Externe Strahlenexposition	1
1.1.1	Kosmische Strahlung	1
1.1.2	Terrestrische Strahlung	4
1.2	Interne Strahlenexposition	9
1.2.1	Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide	10
1.2.2	Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide	11
1.3	Zusammenfassung: Natürliche Strahlenexposition	12
<b>2</b>	<b>ZIVILISATORISCHE STRAHLENEXPOSITION</b>	<b>13</b>
2.1	Strahlenexposition in der Medizin	13
2.1.1	Strahlenexposition durch Röntgendiagnostik	13
2.1.2	Strahlenexposition durch Nuklearmedizin	14
2.2	Ionisierende Strahlung von Bildschirmen und Industrieprodukten	15
2.2.1	Bildschirme	15
2.2.2	Leuchtzifferblätter	15
2.2.3	Phosphat-Industrie	16
2.3	Strahlenexposition bei Flügen und Raumflügen	17
2.4	Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen	19
2.4.1	Einleitung	19
2.4.3	Urananreicherung und Brennelementherstellung	21
2.4.4	Kernkraftwerke	21
2.4.5	Wiederaufarbeitung	23
2.4.6	Global verteilte langlebige Radionuklide	24
2.4.7	Zusammenfassung: Strahlenexpositionen aus kerntechnischen Anlagen	25
2.5	Strahlenexposition durch fossile Energieträger	25
2.5.1	Kohle	25
2.5.2	Erdöl	27
2.5.3	Erdgas	27
2.5.4	Erdwärme	27
2.5.5	Torf	27
2.5.6	Reduktion der Strahlenexposition durch fossile Energieträger	28
2.5.7	Zusammenfassung: Strahlenexposition durch fossile Energieträger	28
2.6	Strahlenexposition durch Kernwaffentests	29
2.7	Strahlenexposition durch Unfälle	30
2.7.1	Unfälle in Kernkraftwerken und kerntechnischen Anlagen	30
2.7.2	Satelliten-Abstürze und Unfälle mit radioaktiven Quellen	31
<b>3</b>	<b>BERUFLICHE STRAHLENEXPOSITION</b>	<b>32</b>
3.1	Deutschland	32
3.2	Welt	33
3.2.1	Kerntechnik	33
3.2.2	Medizin und Industrie	35
3.2.3	Erhöhte natürliche Strahlenexposition im Beruf	36
3.3	Zusammenfassung: Berufsbedingte Strahlenexposition	36
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG: STRAHLENEXPOSITION DES MENSCHEN</b>	<b>37</b>
4.1	Natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung	37
4.2	Zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung	38
4.3	Berufliche Strahlenexposition	39
4.4	Gesamte Strahlenexposition	39
<b>5</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>43</b>

## 1 NATÜRLICHE STRAHLENEXPOSITION

### 1.1 Externe Strahlenexposition

#### 1.1.1 Kosmische Strahlung

Die energiereiche Strahlung, die aus dem Weltraum kommend in die Erdatmosphäre eindringt, bezeichnet man als primäre kosmische Strahlung oder primäre Höhenstrahlung, die entsprechend ihrem Entstehungsort in eine galaktische und eine solare Komponente unterteilt wird. Wechselwirkungsprozesse mit Atomkernen in den hohen Atmosphärenbereichen führen zu Sekundärteilchen und elektromagnetischer Strahlung, die zusammen die sogenannte sekundäre kosmische Strahlung bilden. Entdecker der kosmischen Strahlung sind Hess und Kolhörster, die unabhängig voneinander bereits 1913 eine mit der Höhe zunehmende Ionisation in der Atmosphäre feststellten.

Die galaktische Strahlung besteht überwiegend aus sehr energiereichen Protonen, einem rund zehnprozentigen Anteil von Heliumkernen und einem sehr viel kleineren Anteil von schweren Kernen, zusätzlich auch Photonen und Elektronen. Das Energiespektrum der Protonen reicht von wenigen Millionen Elektronvolt (MeV) bis zu mehr als  $10^{14}$  MeV mit einem Intensitätsmaximum bei  $10^2$  bis  $10^5$  MeV.

Die solare Komponente der kosmischen Strahlung stammt überwiegend aus den Strahlungsausbrüchen bei großen eruptiven Protuberanzen, die Protonenenergien liegen zwischen 1 und 100 MeV. Zwar ist die Fluenz der solaren Partikel im interplanetaren Bereich zeitweise größer als die der galaktischen Partikel, der Beitrag der solaren Komponente der kosmischen Strahlung für die Strahlenexposition des Menschen ist, von besonderen Situationen bei Raumflügen abgesehen, gering, da der größte Teil der solaren Partikelstrahlung wegen der zu geringen Energie das Magnetfeld der Erde nicht durchdringt. Das Magnetfeld der Erde lenkt insbesondere die niederenergetischen geladenen Primärteilchen zurück in den Weltraum. Dieser Effekt ist abhängig von der geomagnetischen Breite, daher ist die Flußdichte der Protonen und anderer Kerne am äußeren Rand unserer Atmosphäre an den magnetischen Polen größer als in der Äquatorregion.

Beim Eindringen der primären kosmischen Strahlung in die Atmosphäre erzeugen die energiereichen Partikel über Kernreaktionen Neutronen, Protonen, Kaonen, Pionen sowie eine Vielzahl von Reaktionsprodukten durch Spallationsprozesse. Energieärmere Primärteilchen geben ihre Energie durch Ionisationsprozesse ab. Viele der aus den ersten Kernreaktionen erzeugten Sekundärteilchen haben so hohe Energien, daß durch weitere Kernreaktionen die Anzahl der Sekundärteilchen kaskadenartig ansteigt. In den oberen Atmosphärenschichten tragen Protonen und Neutronen der sekundären kosmischen Strahlen am meisten zur Dosisleistung in diesen Bereichen bei. Durch Ionisationsprozesse und Zusammenstöße mit anderen Nukleonen verlieren sie rasch an Energie, und ihre Flußdichte sinkt so stark, daß der Dosisanteil durch Protonen und Neutronen in Meereshöhe nur noch wenige Prozent zur gesamten effektiven Dosis durch die kosmische Strahlung beiträgt. Der überwiegende Beitrag der Strahlendosis stammt hier von den Elektronen, die aus Ionisationsereignissen, Kaskadenprozessen oder dem Myonenzerfall hervorgegangen sind.

Die Anzahl der pro Volumen- und Zeiteinheit frei in Luft erzeugten Ionen ist ein Maß für die Flußdichte geladener Teilchen aus der kosmischen Strahlung. Messungen in Meereshöhe ergeben eine Ionenproduktionsrate von  $2,1 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$  für mittlere Breiten. Bei einem mittleren Energiebedarf von 33,7 eV zur Erzeugung eines Ionenpaares in Luft errechnet sich eine Energiedosisleistung in Luft von 0,28 mGy pro Jahr in Meereshöhe im Freien in mittleren Breiten. Für äquatornahe Gebiete ist die Dosisleistung der ionisierenden Komponente geringer. So wurde in Shenzhen, China,  $22,6^\circ \text{ N}$ , ein Wert von 0,25 mGy pro Jahr gemessen. Mit einem Zahlenwert von eins für den Strahlenwichtungsfaktor der ionisierenden Komponente der kosmischen Strahlung, einem Aufenthaltsanteil von 80 % in Häusern und 20 % im Freien und einem mittleren Abschirmfaktor der Häuser von 0,8 ergibt sich ein Beitrag der ionisierenden Komponente zur effektiven Dosis von 0,24 mSv pro Jahr in Meereshöhe in mittleren Breiten.

Die Neutronenflußdichte in Meereshöhe und für mittlere Breiten beträgt im Mittel  $8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  angenommen werden. Daraus errechnet sich eine mittlere Energiedosisleistung von 0,0035 mGy pro Jahr. Der Beitrag der Neutronenkomponente zur effektiven Dosis beträgt unter Berücksichtigung der Strahlungswichtungsfaktoren für das Neutronenenergiespektrum und unter Vernachlässigung eines Abschirmfaktors der Häuser für die Neutronenstrahlung 0,03 mSv pro Jahr. Insgesamt beträgt daher die effektive Dosis durch die kosmische Strahlung in Meereshöhe knapp 0,3 mSv pro Jahr. Mit zunehmender Höhe über dem Meer steigt die Dosis durch kosmische Strahlung an (Abb. 1). Der Anteil der ionisierenden Komponente an der gesamten effektiven Dosis steigt dabei langsamer an als der Anteil durch die Neutronenkomponente. In 500 m Meereshöhe beträgt der Anteil der ionisierenden Komponente 0,26 mSv und der der Neutronenkomponente 0,05 mSv pro Jahr; für 1000 m entsprechend 0,31 mSv und 0,08 mSv pro Jahr. Und ständiger Aufenthalt auf der Zugspitze führt mit über 1,2 mSv pro Jahr - davon 0,74 mSv pro Jahr durch die ionisierende Komponente 0,49 mSv pro Jahr durch die Neutronenkomponente - zu einer mehr als viermal höheren Exposition als auf Helgoland.

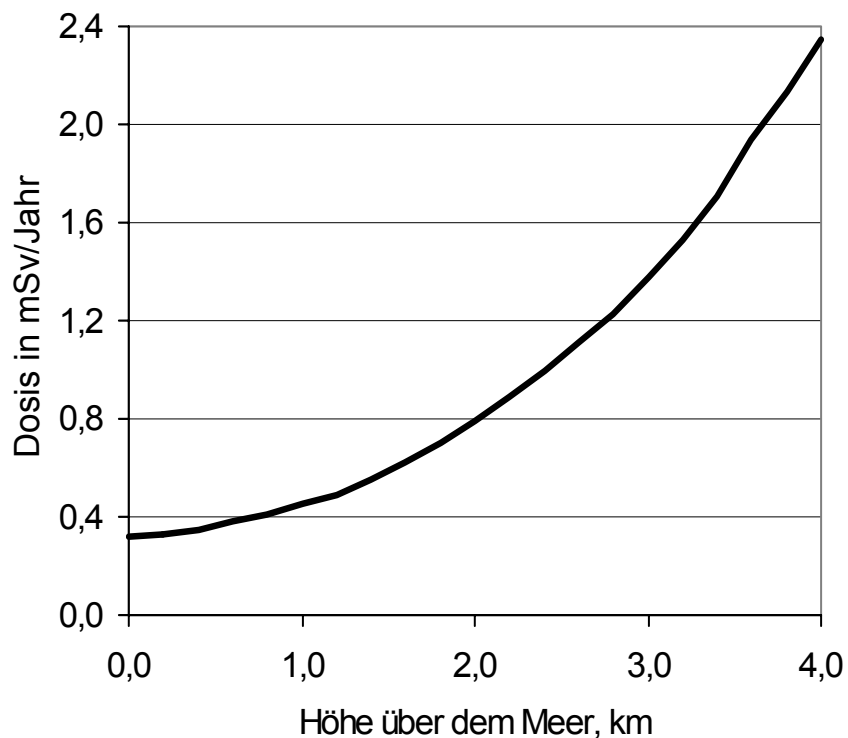


Abb. 1: Dosisleistung durch kosmische Strahlung, mittlere Breiten

Zur Berechnung der Höhenabhängigkeit der effektiven Dosis durch die kosmische Strahlung können bis zu Höhen von einigen Kilometern die folgenden Formeln benutzt werden. Mit der Formel (1) läßt sich der Beitrag der ionisierenden Komponente, mit den Formeln (2) und (3) der der Neutronenkomponente berechnen. Die Höhe  $h$  ist in Kilometer anzugeben, die Rechnung liefert als Ergebnis die Effektivdosis in mSv pro Jahr. Die Formeln berücksichtigen für die ionisierende Komponente den Abschirmfaktor der Häuser unter Berücksichtigung einer Aufenthaltszeit von 80 % in Häusern.

$$E_{\text{ion}}(h) = 0,05 \cdot e^{-1,6 \cdot h} + 0,19 \cdot e^{0,45 \cdot h} \quad (1)$$

$$E_{\text{n}}(h) = 0,03 \cdot e^h \quad \text{für } h < 2 \text{ km} \quad (2)$$

$$E_{\text{n}}(h) = 0,06 \cdot e^{0,7 \cdot h} \quad \text{für } h > 2 \text{ km.} \quad (3)$$

UNSCEAR hat aus geographischen und demographischen Daten die jährliche kollektive Dosis der Weltbevölkerung durch die kosmische Strahlung zu  $2 \cdot 10^6$  Personen-Sievert berechnet, das ergibt einen Mittelwert von 0,38 mSv pro Jahr pro Person. Dabei wird die Hälfte der Kollektivdosis von den drei Fünftel der Bevölkerung erhalten, die bis zu 500 m Meereshöhe lebt, während das eine Fünfzigstel der Bevölkerung, das oberhalb von 3 km wohnt, überproportional mit einem Zehntel zur Kollektivdosis beiträgt. Die Tab. 1 enthält Daten der kosmischen Strahlenexposition für einige hochgelegene Großstädte.

Ort	Einwohner Millionen	Höhe m	effektive Dosis mSv/Jahr
La Paz	1,0	3900	2,0
Lhasa	0,4	3600	1,7
Quito	1,3	2840	1,1
Mexiko Stadt	18,8	2240	0,82
Nairobi	1,1	1660	0,58
Denver	1,6	1610	0,57
Teheran	7,5	1180	0,44

Tab. 1: Kosmische Strahlenexposition in hochgelegenen Städten

Die Abb. 2 zeigt die Verteilung der kosmischen Strahlenexposition für die Schweiz.

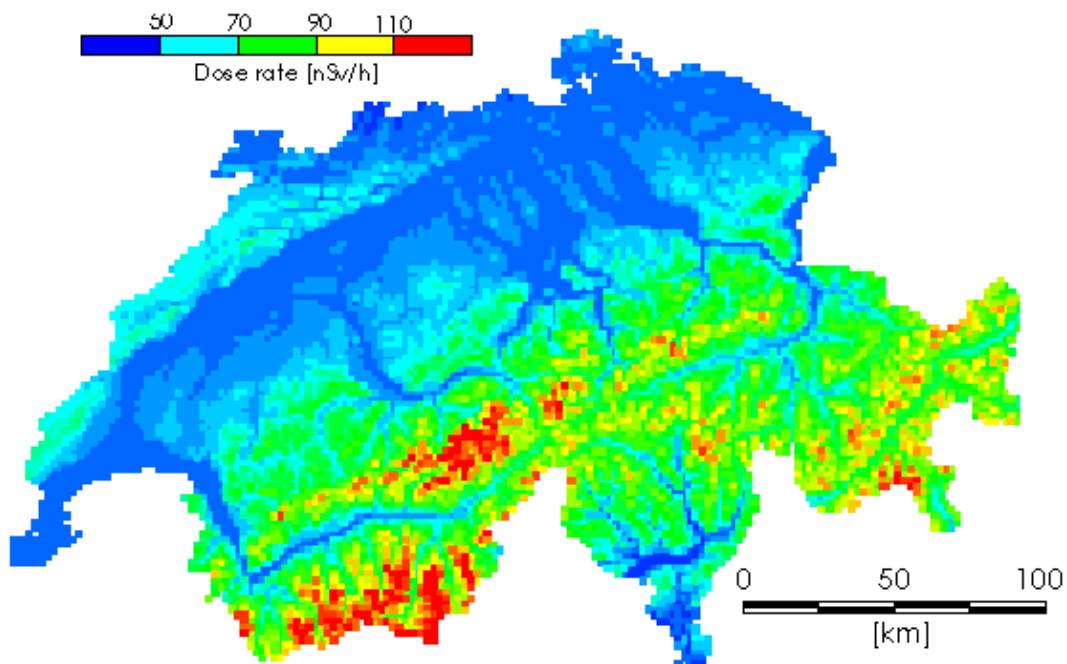


Abb. 2: Kosmische Strahlenexposition in der Schweiz

## 1.1.2 Terrestrische Strahlung

Unsere Erdkruste enthält in unterschiedlicher Konzentration und in regional großer Variation eine Vielzahl natürlich radioaktiver Stoffe. Die beim Zerfall emittierten ionisierenden Strahlen - insbesondere die Beta- und Gammastrahlung ist hier von Bedeutung - wird terrestrische Strahlung genannt. Die meisten natürlich radioaktiven Stoffe entstammen einer der drei Zerfallsreihen, deren Anfangsglieder U-238, Th-232 und U-235 eine gegenüber der Zeit seit der Entstehung der Elemente lange Halbwertszeit besitzen. Neben den 47 Radionukliden, die einer der drei Zerfallsreihen angehören, gibt es 25 primordiale ("von Anfang an" vorhandene) Radionuklide mit zum Teil extrem langen Halbwertszeiten, z. B. Tellur-128 mit  $7,2 \cdot 10^{24}$  Jahren (Tab. 2). Von den primordialen Nukliden außerhalb von Zerfallsreihen kommt insbesondere dem Kalium-40 bezüglich der externen Strahlenexposition des Menschen Bedeutung zu.

Nuklid	Halbwertszeit Jahre	Nuklid	Halbwertszeit Jahre
K-40	$1,3 \cdot 10^9$	La-138	$1,1 \cdot 10^{11}$
V-50	$1,4 \cdot 10^{17}$	Nd-144	$2,3 \cdot 10^{15}$
Ge-76	$1,5 \cdot 10^{21}$	Nd-150	$1,7 \cdot 10^{19}$
Se-82	$1,0 \cdot 10^{20}$	Sm-147	$1,1 \cdot 10^{11}$
Rb-87	$4,8 \cdot 10^{10}$	Sm-148	$7,0 \cdot 10^{15}$
Zr-96	$3,9 \cdot 10^{19}$	Gd-152	$1,1 \cdot 10^{14}$
Mo-100	$1,2 \cdot 10^{19}$	Lu-176	$2,6 \cdot 10^{10}$
Cd-113	$9,0 \cdot 10^{15}$	Hf-174	$2,0 \cdot 10^{15}$
Cd-119	$2,6 \cdot 10^{19}$	Ta-180	$1,2 \cdot 10^{15}$
In-115	$4,4 \cdot 10^{14}$	Re-187	$5,0 \cdot 10^{10}$
Te-123	$1,2 \cdot 10^{13}$	Os-186	$2,0 \cdot 10^{15}$
Te-128	$7,2 \cdot 10^{24}$	Pt-190	$6,5 \cdot 10^{11}$
Te-130	$2,7 \cdot 10^{21}$		

Tab. 2: Primordiale Radionuklide

Die Strahlenexposition im Freien ist von der jeweiligen spezifischen Aktivität im Boden abhängig. Generell ist der Radioaktivitätsgehalt im Urgestein höher als in Sedimentgestein, wobei allerdings manche Schiefer ähnlich hohe spezifische Aktivitäten aufweisen wie Granit (vgl. Tab. 3).

Gesteinsart	spezifische Aktivität in Bq/kg		
	K-40	Th-232	U-238
Granit	1000	80	60
Tonschiefer	700	50	40
Diorit	700	30	20
Sandstein	350	10	20
Basalt	250	10	10
Kalkstein	90	7	30

Tab. 3: Typische spezifische Aktivitäten in Gesteinen

Infolge des geologischen Untergrundes und insbesondere durch die obersten Bodenschichten bedingt sind die Werte der terrestrischen Strahlung von Ort zu Ort sehr unterschiedlich. Die Abb. 3 zeigt dies am Beispiel der Schweiz, die Abb. 4 für die USA.

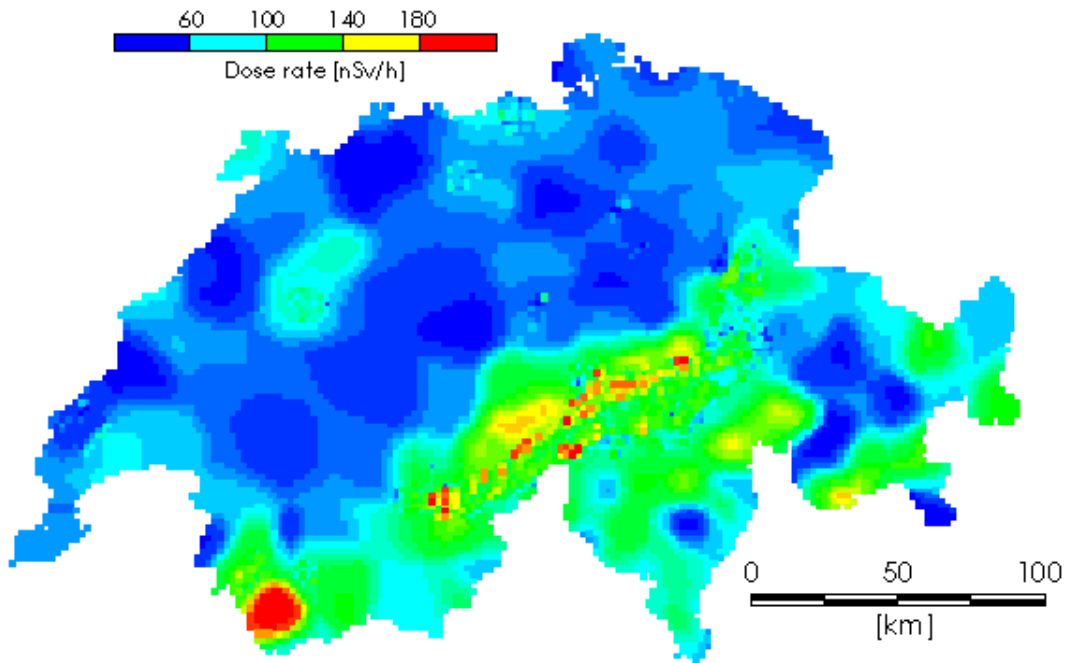


Abb. 3: Terrestrische Strahlenexposition in der Schweiz

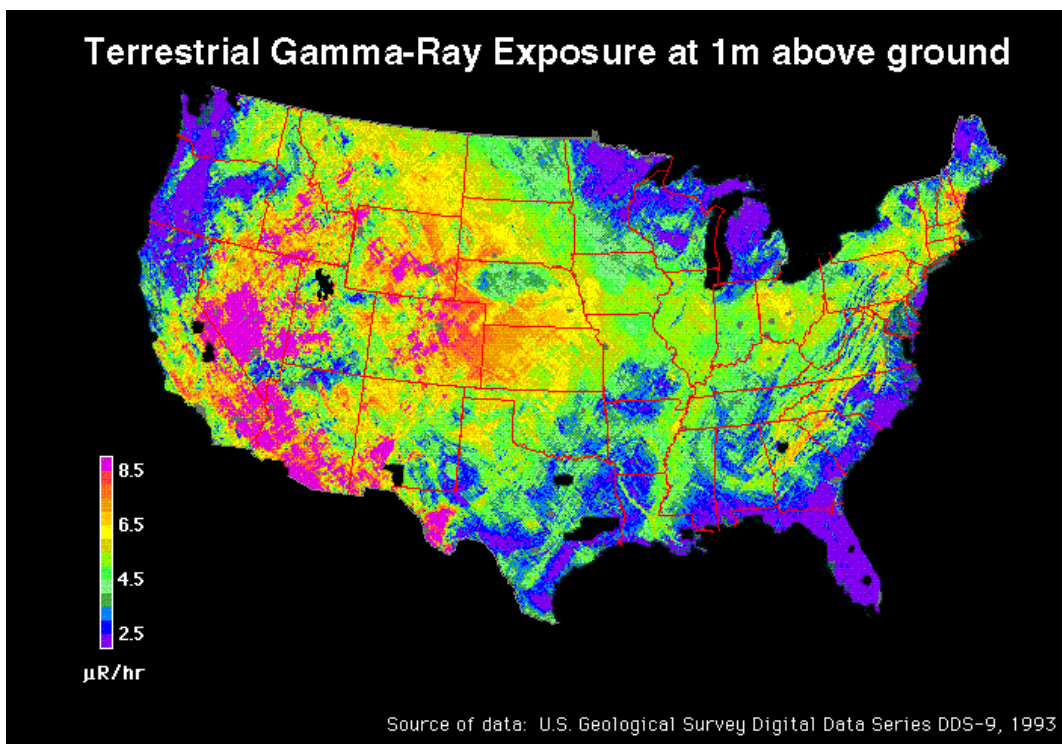


Abb. 4: Terrestrische Strahlenexposition in den USA

Bei einer in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1972 bis 1974 durchgeführten Untersuchung variierten die Meßwerte im Freien von 0,045 bis 4 mGy pro Jahr (siehe Abb. 5). Der der Einwohnerdichte entsprechend gewichtete Mittelwert der Dosisleistung ergab sich zu 0,55 mGy pro Jahr. Dabei lagen für 80 % der Bevölkerung die Dosisleistungswerte zwischen 0,3 und 0,7 mGy pro Jahr, 1 % der Bevölkerung war einer Exposition oberhalb 1 mGy pro Jahr ausgesetzt. Um diese Ergebnisse auf Gesamtdeutschland ausweiten zu können, wurden in den Jahren 1994 bis 1996 flächendeckende Messungen der Ortsdosisleistung im Freien für das Gebiet der ostdeutschen Bundesländer durchgeführt. Die Ergebnisse beider Meßkampagnen sind in der Tab. 4 als Mittelwerte der Ortsdosisleistung im Freien für die einzelnen Bundesländer zusammengefaßt. Als Mittelwert für Deutschland erhält man für die terrestrische Strahlenexposition im Freien einen Wert von 0,5 mGy pro Jahr. Die Abb. 6 zeigt die aus diesen beiden Meßreihen sich ergebende Darstellung der terrestrischen Strahlenexposition im Freien für das gesamte Gebiet Deutschlands.

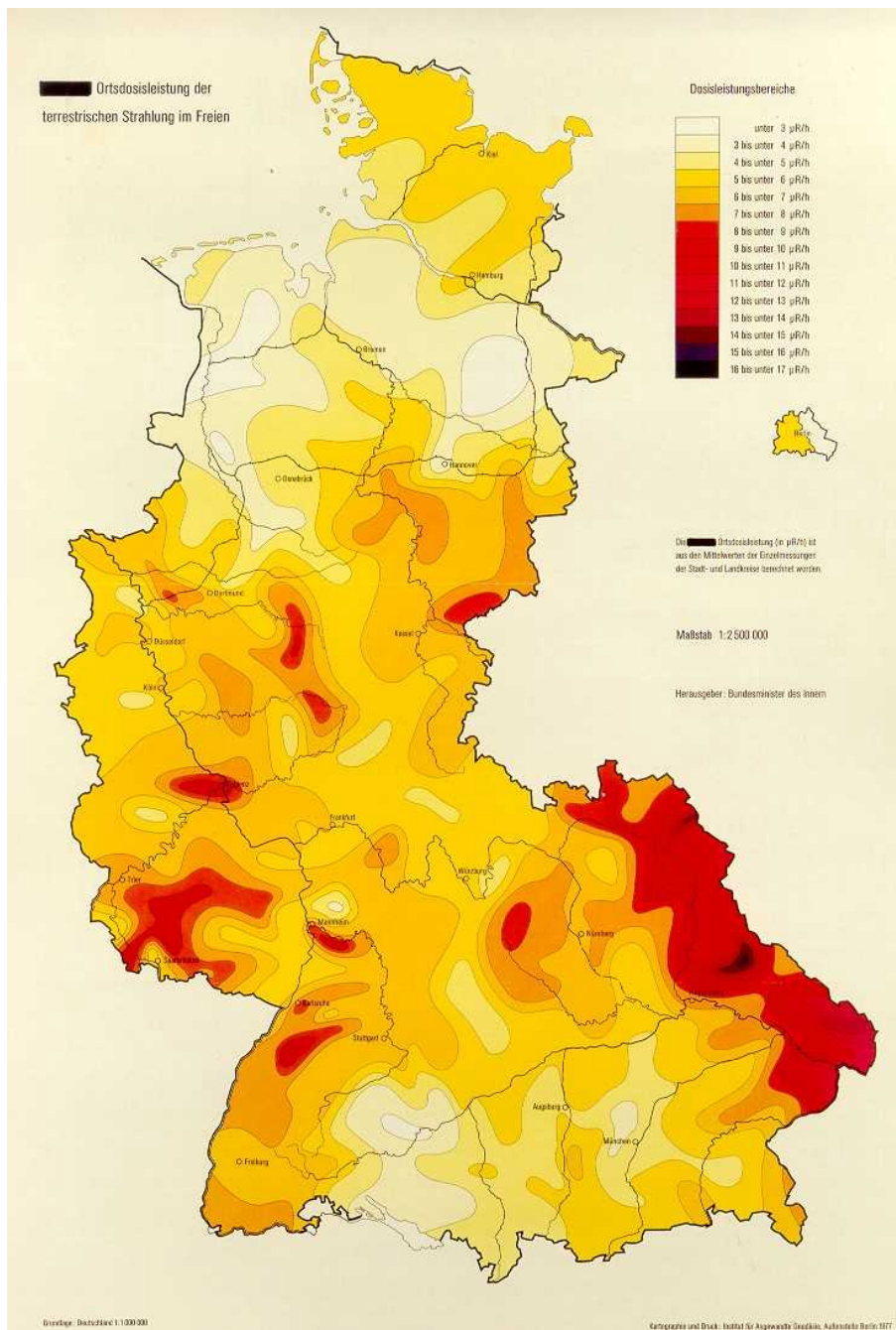


Abb. 5: Terrestrische Strahlenexposition im Freien, Messungen in Deutschland in den Jahren 1972 bis 1974



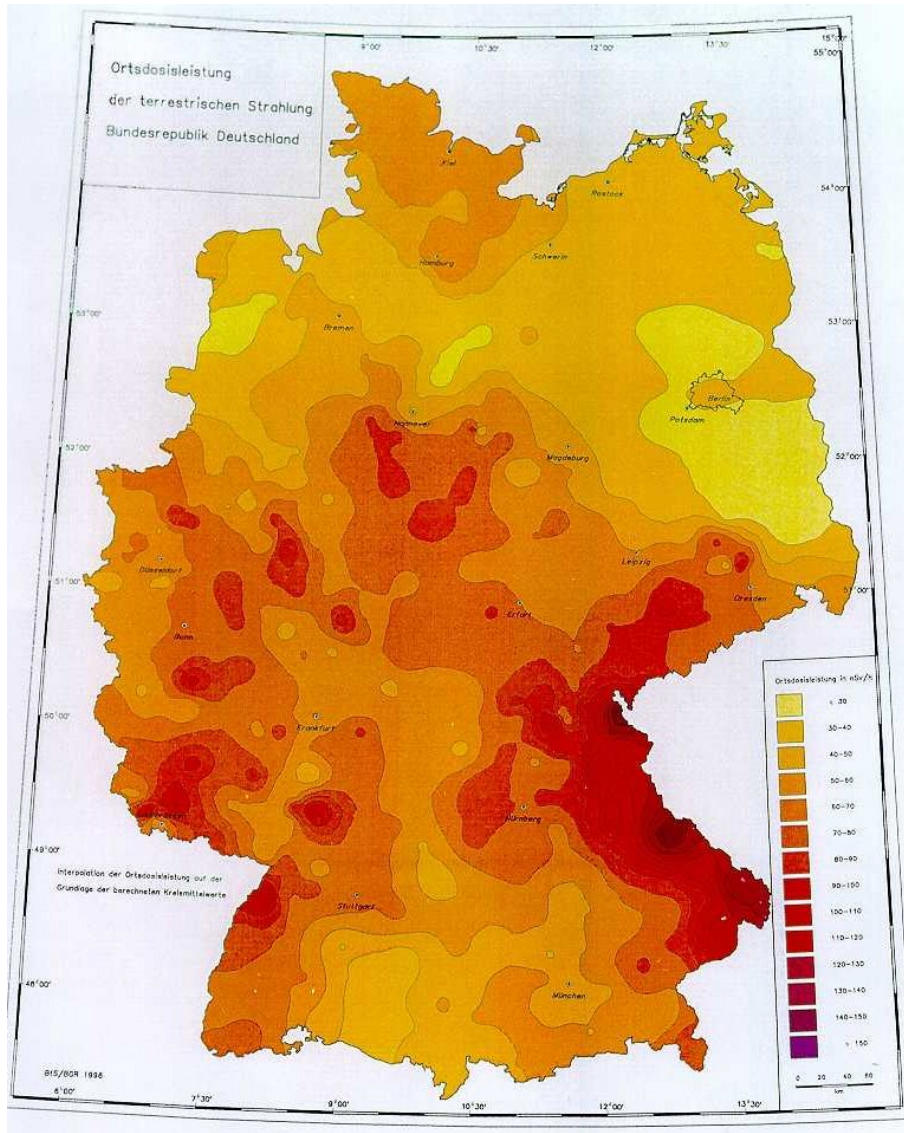


Abb. 6: Terrestrische Strahlenexposition im Freien in Deutschland

Bundesland	Ortsdosis mGy/Jahr	Bundesland	Ortsdosis mGy/Jahr
Baden-Württemberg	0,54	Niedersachsen	0,42
Bayern	0,60	Nordrhein-Westfalen	0,52
Berlin	0,27	Rheinland-Pfalz	0,60
Brandenburg	0,25	Saarland	0,60
Bremen	0,37	Sachsen	0,50
Hamburg	0,49	Sachsen-Anhalt	0,38
Hessen	0,53	Schleswig-Holstein	0,46
Mecklenburg-Vorpommern	0,32	Thüringen	0,55

Tab. 4: Ländermittelwerte der Ortsdosis im Freien

Das zum Hausbau verwendete Baumaterial hat einen nicht unerheblichen Einfluß auf die durch natürlich radioaktive Stoffe hervorgerufene externe Strahlendosis. In der Bundesrepublik Deutschland wurde in den 70er Jahren zur Ermittlung dieses Anteils ein umfassendes Meßprogramm durchgeführt. Zwar wirken Decken und Wände eines Gebäudes einerseits als Abschirmung gegenüber der Strahlung im Freien, andererseits kann der natürliche Radioaktivitätsgehalt in Baustoffen zu einer zusätzlichen externen Strahlenexposition führen. Der über alle Messungen gewichtete Mittelwert für die Energiedosis in Häusern liegt bei 0,6 mGy

pro Jahr, also um 20 % höher als im Freien. Tab. 5 gibt den zusätzlichen Betrag der effektiven Jahresdosis in Häusern für einige wichtige Baustoffe an. Die Abb. 7 zeigt die durch natürliche radioaktive Stoffe im Boden und im Baumaterial bewirkte externe Strahlenexposition in Wohnungen auf der Basis der Messungen in den Jahren 1972 bis 1974.

Baustoff	zusätzliche effektive Dosis mSv/a
Holz	0
Kalkstein, Beton	0,12
Ziegel, Klinker	0,15
Schlackenstein, Bims	0,25

Tab. 5: Einfluß der Baumaterialien auf die Exposition in Wohngebäuden, Deutschland (West)

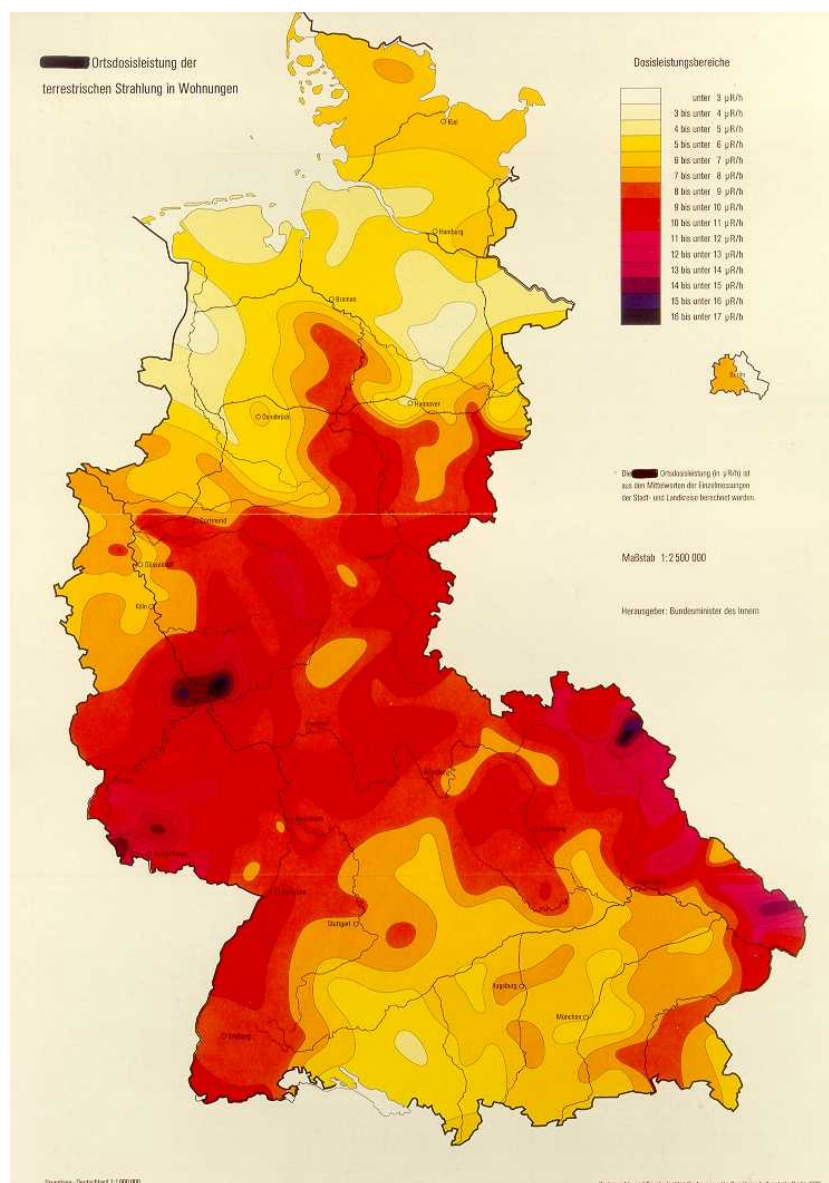


Abb. 7: Terrestrische Strahlenexposition in Wohnungen, Messungen in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1972 bis 1974

Berücksichtigt man einen Aufenthalt von 20 % im Freien und 80 % in Häusern, und benutzt man den von UNSCEAR vorgeschlagenen Konversionsfaktor von 0,7 Sv/Gy zur Umrechnung der Energiedosis durch ter-

restrische Strahlung in effektive Dosis, so errechnet sich die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung in Deutschland durch die terrestrische Strahlung zu 0,41 mSv pro Jahr. UNSCEAR hat für die Weltbevölkerung als Durchschnittswert der terrestrischen 0,46 mSv pro Jahr ermittelt.

In einigen Gebieten der Erde sind infolge höherer Konzentrationen natürlich radioaktiver Stoffe die Strahlendosen wesentlich größer (siehe Tab. 6). Von besonderer Bedeutung ist hier ein etwa 250 km langer Streifen an der indischen Süd- und Südwestküste in den Tamil Nadu und Kerala. Die Ablagerungen dort sind reich an Monazitsanden, die zum Teil viel Thorium enthalten. Messungen mit Thermolumineszenzdosimetern bei über 8 500 Personen in diesen Bereichen ergaben einen Mittelwert der Personendosis von 4 mSv pro Jahr. 6 % der Einwohner erhalten eine Dosis von über 9 mSv pro Jahr und 1 % der Einwohner von über 20 mSv pro Jahr. An der brasilianischen Atlantikküste der Staaten Espirito Santo und Rio de Janeiro ist ebenfalls thoriumhaltiger Monazit Ursache für sehr hohe Strahlenexpositionen. In Guarapari, 12 000 Einwohner und einige zehntausend Urlauber in der Ferienzeit, wurden am Strand Dosisleistungen bis zu 20 µGy pro Stunde, das sind 175 mGy pro Jahr, gemessen. Messungen mit Thermolumineszenzdosimetern an rund 300 Einwohnern von Guarapari ergaben Werte der Personendosis zwischen 1 und 30 mSv pro Jahr mit einem Durchschnitt von 6 mSv pro Jahr. Ebenfalls hohe Werte der durch die terrestrische Strahlung bedingten Dosiswerte wurden im Nil- und im Gangesdelta mit 3,5 mGy pro Jahr gemessen. Bei Ramsar im Iran am Kaspischen Meer wurden Höchstwerte von bis zu 860 mGy pro Jahr ermittelt.

Gebiet	mittlere effektive Dosis mSv/Jahr	max. Energiedosis im Freien mGy/Jahr
Deutschland	0,4	5
Indien: Kerala, Tamil Nadu	4	55
Brasilien: Espirito Santo	6	175
Iran: Ramsar	6	860

Tab. 6: Terrestrische Strahlung in verschiedenen Gebieten

## 1.2 Interne Strahlenexposition

Die im Durchschnitt im menschlichen Körper vorhandenen Aktivitäten natürlicher Radionuklide sind - bezogen auf eine Person von 75 kg Körpergewicht - in Tab. 7 angegeben.

Nuklid	Aktivität in Bq
H-3	25
Be-7	25
C-14	3.800
K-40	4.200
Rb-87	650
U-238, Th-234, Pa-234m, U-234	4
Th-230	0,4
Ra-226	1
kurzlebige Rn-222-Zerfallsprodukte	15
Pb-210, Bi-210, Po-210	60
Th-232	0,1
Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224	1,5
kurzlebige Rn-220-Zerfallsprodukte	30

Tab. 7: Natürlich radioaktive Stoffe im Menschen

### 1.2.1 Interne Strahlenexposition durch primordiale Radionuklide

Von den natürlich radioaktiven Stoffen bewirkt Kalium-40 eine nicht unbeträchtliche Strahlendosis. Neben einer äußeren Strahlenexposition führt Kalium-40 zu einer inneren Strahlendosis, da Kalium und mit ihm Kalium-40 als lebenswichtiges Element im Körper vorhanden sein muß. Beim erwachsenen Menschen beträgt der Kaliumanteil etwa 2 g pro Kilogramm Körpergewicht; das entspricht einer Kalium-40-Aktivität im Gesamtkörper von 4200 Bq. Das natürliche Radioisotop Kalium-40 führt durch seine interne Bestrahlung zu einer effektiven Dosis von 180 Mikrosievert pro Jahr. Hinzu kommt die Dosis durch externe Bestrahlung von 170 Mikrosievert pro Jahr. Rubidium-87 trägt zur internen effektiven Dosis mit 6 Mikrosievert pro Jahr bei.

Uran-238 ist das Ausgangsnuklid einer Zerfallsreihe, die über neunzehn Zwischenstufen zum stabilen Blei-206 führt. Beim Thorium-232 beginnt eine Zerfallsreihe mit zehn radioaktiven Folgeprodukten, die beim Blei-208 endet. Die vom Uran-235 ausgehende sogenannte Actinium-Reihe schließt nach fünfzehn Radionukliden mit dem Blei-207 ab. Naturgemäß sind nicht alle diese Radionuklide gleichermaßen an der Strahlendosis beteiligt. So kann der Beitrag von U-235 und seiner Folgeprodukte vernachlässigt werden. Wesentlich für den jeweiligen Beitrag eines Nuklides zur gesamten Strahlenexposition sind sein metabolisches Verhalten im menschlichen Organismus und seine Zerfallsart. Die mit der Nahrung aufgenommenen Radionuklide der Zerfallsreihen von Uran und Thorium bewirken in den verschiedenen Organen und Geweben des menschlichen Körpers unterschiedliche Organdosen. In Tab. 8 sind dazu Werte angegeben.

Organ	Organdosen durch Inkorporation, $\mu\text{Sv}/\text{Jahr}$			
	U-238-Reihe ohne Rn-Inhalation	Th-232-Reihe	K-40	Rb-87
Gonaden	120	22	180	10
Leber	120	80	170	4
rotes Knochenmark	130	10	270	7
Knochenoberfläche	1 000	120	140	14
Schilddrüse	120	2	100	3

Tab. 8: Mittlere Organdosen durch primordiale Radionuklide

Die Dosiswerte durch die U-238-Reihe werden dabei überwiegend von Po-210 hervorgerufen. Die beiden natürlichen Radionuklide Rubidium-87 und Kalium-40 führen als einzige von den primordialen Radionukliden außerhalb von Zerfallsreihen zu merklichen Strahlendosen.

Radon-222 und Radon-220 sind natürlich radioaktive, gasförmige Stoffe. Rn-222, kurz auch nur "Radon" genannt, entsteht beim Zerfall von Radium-226, Teil der Uran-Radium-Reihe. Rn-220 entsteht beim Zerfall von Radium-224 aus der Thorium-Reihe und wird deshalb auch mit "Thoron" bezeichnet. Von diesen beiden Radon-Isotopen verursacht insbesondere das Radon-222 durch seine kurzlebigen Folgeprodukte Po-218, Pb-214, Bi-214 und Po-214 den bei weitem größten Beitrag zur natürlichen Strahlenexposition des Menschen. Überall dort, wo Uran im Erdboden vorhanden ist, wird Radon freigesetzt und gelangt in die freie Atmosphäre und in die Häuser. Einen großen Einfluß auf die Radonkonzentration hat neben dem Radiumgehalt des Bodens die Durchlässigkeit des Bodens. Bei lockerem Untergrund wie beispielsweise Sand oder bei Böden mit Spalten und Rissen wandert das Radongas besonders leicht an die Oberfläche, so daß höhere Radonkonzentrationen auftreten.

Daneben bestehen für die Radonkonzentration in der bodennahen Atmosphäre systematische klimatische und jahreszeitliche Schwankungen. In Gebäuden hängt die Radonkonzentration wesentlich von den bauli-

chen Gegebenheiten ab. Die Jahresmittelwerte der Radonkonzentration der bodennahen Luft in Deutschland überdecken den Bereich von 8 bis 30 Bq pro m<sup>3</sup>. Messungen in den alten Bundesländern ergaben einen Jahresmittelwert der Radonkonzentration im Freien von 15 Bq pro m<sup>3</sup>. Für Sachsen und Thüringen wurde ein Jahresmittelwert der Radonkonzentration im Freien von 30 Bq pro m<sup>3</sup> bestimmt. Die Häufigkeitsverteilung der Radonkonzentrationswerte in den Wohnungen folgt weitgehend einer logarithmischen Normalverteilung mit einem Mittelwert von 50 Bq pro m<sup>3</sup>. Untersuchung deutet darauf hin, daß in 10 % der Wohnungen die Radonkonzentration über 80 Bq pro m<sup>3</sup> und in 1 % der Wohnungen über 200 Bq pro m<sup>3</sup> liegt.

Messungen in Finnland, Norwegen, Schweden und der Schweiz ergaben höhere, in England, Japan und den Niederlanden deutlich niedrigere Radonkonzentrationen. Aus den Mittelwerten der Radonkonzentration im Freien in Deutschland von 15 Bq pro m<sup>3</sup> und in Häusern von 50 Bq pro m<sup>3</sup> läßt sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufenthaltsdauer und einem Gleichgewichtsfaktor für die Folgeprodukte von 0,4 die mittlere effektive Dosis durch Radon und seine Zerfallsprodukte zu 1,4 mSv pro Jahr berechnen.

### 1.2.2 Interne Strahlenexposition durch kosmogene Radionuklide

Neben den aufgrund ihrer großen Halbwertszeit noch vorhandenen primordialen Radionukliden oder den wegen ihrer Zugehörigkeit zu Zerfallsreihen ständig nachgebildeten Nukliden kürzerer Halbwertszeiten entstehen durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Atomen der hohen Atmosphärenschichten ständig neue Nuklide. Einen Überblick über diese kosmogenen Radionuklide gibt Tab. 9. Von diesen Radionukliden hat nur Kohlenstoff-14 eine für die Strahlenexposition des Menschen gewisse geringe Bedeutung.

Nuklid	Halbwertszeit	Nuklid	Halbwertszeit
H-3	12,3 a	P-32	14,3 d
Be-7	53,3 d	S-35	87,5 d
Be-10	1,6·10 <sup>6</sup> a	S-38	2,8 h
C-14	5730 a	Cl-34m	32 min
Na-22	2,6 a	Cl-36	3·10 <sup>5</sup> a
Na-24	15 h	Cl-38	37,2 min
Mg-28	20,9 h	Cl-39	56 min
Si-31	2,6 h	Ar-39	269 a
Si-32	101 a	Kr-85	10,7 a

Tab. 9: Kosmogene Radionuklide

Die heutige Tritiumkonzentration in der Umwelt wird überwiegend durch künstliches Tritium aus Kernwaffentests (gesamte freigesetzte Tritiumaktivität 240·10<sup>18</sup> Bq) und aus kerntechnischen Anlagen (freigesetzte Tritiumaktivität zur Zeit rund 0,02·10<sup>18</sup> Bq pro Jahr) bestimmt. Die natürliche Tritiumproduktion beträgt etwa 0,07·10<sup>18</sup> Bq pro Jahr, das weltweite Inventar an natürlichem Tritium rund 1·10<sup>18</sup> Bq. Vor der Entwicklung der Kerntechnik durchgeführte Messungen ergaben Tritiumkonzentrationen in Meerwasser von 100 Bq pro m<sup>3</sup> und in kontinentalen Oberflächengewässern von 400 Bq pro m<sup>3</sup>. Unter der Annahme, daß die spezifische natürliche Tritiumkonzentration im Körpergewebe der von Oberflächenwässern entspricht, errechnet sich eine durch das natürliche Tritium bedingte effektive Dosis von 0,01 Mikrosievert pro Jahr.

Messungen der Be-7-Konzentration in Luft ergaben Werte zwischen 4 mBq pro m<sup>3</sup> im Frühjahr und 1,5 mBq pro m<sup>3</sup> im Spätherbst. Die Konzentration von Be-7 in Regenwasser beträgt im Mittel 700 Bq pro m<sup>3</sup>. Die Gesamtjahreszufuhr an Be-7 beträgt rund 1000 Bq. Daraus resultiert eine effektive Jahresdosis von 0,03 Mikrosievert.

Natürlicher Kohlenstoff-14 entsteht durch Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung in der oberen Atmosphäre über einen (n,p)-Prozeß an Stickstoff-14 (N-14 (n,p) C-14). Die natürliche spezifische C-14-Konzentration in der Atmosphäre ist heutzutage durch zwei gegenläufige Effekte beeinflusst. Die massive Erzeugung und Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch das Verbrennen fossiler und damit C-14-freier Energieträger führt zu einer Vergrößerung des C-12-Anteils und dadurch zu einer Verringerung der natürlichen Gleichgewichtskonzentration von C-12 zu C-14.

Mitte der 70er Jahre ergab sich durch diesen sogenannten Suess-Effekt eine Reduktion der spezifischen C-14-Konzentration in der Atmosphäre um rund fünf Prozent. Kernwaffentests in der Atmosphäre und Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen bedingen andererseits eine Erhöhung des C-14-Anteils in der Atmosphäre. Messungen an Holz von Bäumen aus dem 19. Jahrhundert ergaben 227 Bq Kohlenstoff-14 pro kg Kohlenstoff. Mit diesem Wert errechnet sich aus dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt in den verschiedenen Körpergeweben eine effektive Jahresdosis von 12 Mikrosievert. Die Jahresaktivitätszufuhr an natürlichem C-14 beträgt rund 20 kBq.

Zwar sind die Produktionsrate von Natrium-22 und die Konzentration in der Atmosphäre deutlich niedriger als die von natürlich erzeugtem Tritium, aber das metabolische Verhalten von Natrium-22 im Körper und die größere Zerfallsenergie ergeben einen höheren Dosisbeitrag. Die Jahreszufuhr an Natrium-22 mit Wasser und Nahrungsmitteln wird zu 50 Bq angenommen. Daraus berechnet sich eine resultierende effektive Dosis von 0,15 Mikrosievert pro Jahr.

### 1.3 Zusammenfassung: Natürliche Strahlenexposition

Die effektive Dosis aus allen natürlichen Strahlenquellen ergibt sich zu etwa einem Drittel aus externer und zwei Drittel aus interner Strahlenexposition (Tab. 10). Individuelle, lokale und regionale Abweichungen von diesen mittleren Werten können erheblich sein. In Deutschland wird für die meisten Einwohner die effektive Dosis im Bereich von 1,5 bis 6 mSv pro Jahr liegen mit einem mittleren Wert von 2,4 mSv pro Jahr.

Exposition durch	jährliche effektive Dosis in mSv		
	Bestrahlung von außen	Bestrahlung von innen	gesamt
<b>kosmische Strahlung</b> in Meereshöhe ionisierende Komponente Neutronen	0,24 0,03		} 0,27
<b>kosmogene Radionuklide</b>		0,02	0,02
<b>primordiale Radionuklide</b> K-40 U-238-Reihe U-238 → Ra-226 Rn-222 → Po-214 Pb-210 → Po-210 Th-232-Reihe Th-232 → Ra-224 Rn-220 → Tl-208	0,18  } 0,12  } 0,14	0,17  0,02 1,4 0,05  0,01 0,07	0,35  } 1,6  } 0,2
<b>Summe</b>	<b>0,7</b>	<b>1,7</b>	<b>2,4</b>

Tab. 10: Mittlere natürliche Strahlenexposition in Deutschland

## 2 ZIVILISATORISCHE STRAHLENEXPOSITION

### 2.1 Strahlenexposition in der Medizin

#### 2.1.1 Strahlenexposition durch Röntgendiagnostik

Von allen Anwendungsgebieten ionisierender Strahlen bringt die Röntgendiagnostik den bei weitem größten Beitrag zur zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung. Die Organdosen in Tab. 11 für verschiedenen Untersuchungen sind nur als Orientierungswerte zu werten, da im individuellen Fall erhebliche Abweichungen auftreten können. Das beruht auf der sehr großen Variabilität der Einzeldosis bei jeder Untersuchung, die vom untersuchenden Arzt, der speziellen medizinischen Situation, der genutzten Technik, der Feldgröße bei der Bestrahlung und der Zahl der Aufnahmen je Untersuchung und noch weiteren Faktoren abhängt. Abb. 8 und Abb. 9 zeigen diese Variation anhand von Beispieldaten aus Großbritannien. Die mittlere effektive Dosis pro Einwohner in Deutschland durch die Röntgendiagnostik beträgt 2 mSv pro Jahr. Die durch die Röntgendiagnostik bewirkte Strahlenexposition ist in anderen Industrieländern zum Teil wesentlich geringer; sie beträgt in Großbritannien 0,25, in den USA 0,5 und in der Schweiz 1 mSv pro Jahr.

Untersuchungsart	effektive Dosis mSv
CT Abdomen	30
CT Thorax	20
CT Wirbelsäule	9
CT Kopf	2,5
Dickdarm	20
Arteriographie	20
Dünndarm	16
Magen	9
Harntrakt	5
Lendenwirbelsäule	2
Becken	1
Thorax	0,3
Zahn	0,01

Tab. 11: Effektive Dosis pro Röntgenuntersuchung

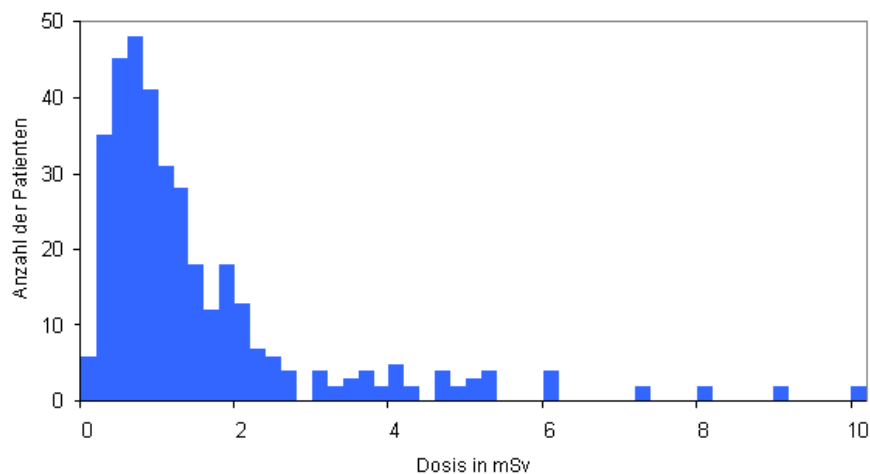


Abb. 8: Variation der Dosis bei Röntgenuntersuchungen der unteren Wirbelsäule bei 350 Patienten (NRPB, UK)



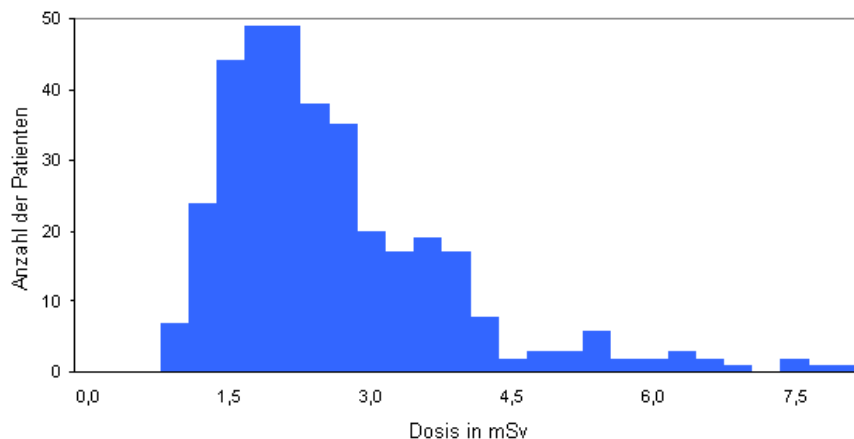


Abb. 9: Dosis bei Röntgenuntersuchungen des Unterleibs bei 360 Patienten in 20 Krankenhäusern (NRPB, UK)

### 2.1.2 Strahlenexposition durch Nuklearmedizin

Der Dosisbeitrag durch die Anwendung radioaktiver Stoffe zur Diagnose ist gegenüber dem durch die Röntgendiagnostik vergleichsweise gering. Effektive Äquivalentdosen durch die Strahlentherapie sind nicht berechenbar, da das Effektivdosiskonzept auf therapeutische Bestrahlungen nicht anwendbar ist. Die für einzelne Organe in der nuklearmedizinischen Diagnostik zu erwartenden Strahlendosen enthält Tab. 12. Die Tabelle kann naturgemäß nur Anhaltswerte liefern; im Einzelfall sind insbesondere bei erkrankungsbedingt verändertem Metabolismus erhebliche Abweichungen möglich. Für die effektive Äquivalentdosis ergibt sich daraus ein Beitrag, der bei wenigen Prozent des Anteils aus der Röntgendiagnostik liegt.

Untersuchung	Radionuklid	Energiedosis in mGy		
		Keimdrüsen	Knochenmark	im untersuchten bzw. kritischen Organ
Schilddrüsen-Szintigraphie	Tc-99m	0,1	0,2	1 Schilddrüse
	I-131	0,05	0,2	1000 Schilddrüse
	I-123	0,04	0,1	40 Schilddrüse
Nieren-Szintigraphie	Tc-99m	0,3		5 Nieren 18 Blasenwand
	I-131	0,25	0,5	60 Blasenwand 240 Schilddrüse
Leber-Szintigraphie	Tc-99m	0,1	0,4	5 Leber 3 Milz
	Au-198	0,2	4	60 Leber 20 Milz
Lungen-Szintigraphie	Tc-99m	0,1	3	4 Lungen
	I-131	1,3	1,5	20 Lungen

Tab. 12: Strahlenexposition bei nuklearmedizinischen Untersuchungen

Die mittlere jährliche effektive Dosis der schweizer Bevölkerung durch die Nuklearmedizin beträgt ca. 0,04 mSv pro Jahr und Einwohner. Da das stochastische Risiko der Strahlenexposition mit dem Alter der Person zum Zeitpunkt der Exposition abnimmt, muß in diesem Zusammenhang unbedingt die Tatsache be-



rücksichtigt werden, daß das mediane Alter der Patienten in der Nuklearmedizin um 25 Jahre größer ist als das mediane Alter der Gesamtbevölkerung. Werden die mittleren effektiven Dosen durch die Nuklearmedizin für verschiedene Altersklassen der Bevölkerung gebildet, so zeigt sich eine starke Zunahme mit steigendem Alter. In Abb. 10 ist dieser Sachverhalt nach Geschlechtern getrennt dargestellt. Berücksichtigt man das mit dem Alter abnehmende Strahlenrisiko, so ergibt sich statt des oben angegebenen Wertes der effektiven Dosis von 0,04 mSv pro Jahr und Einwohner eine "effektive" effektive Dosis von nur 0,02 "mSv" pro Jahr und Einwohner.

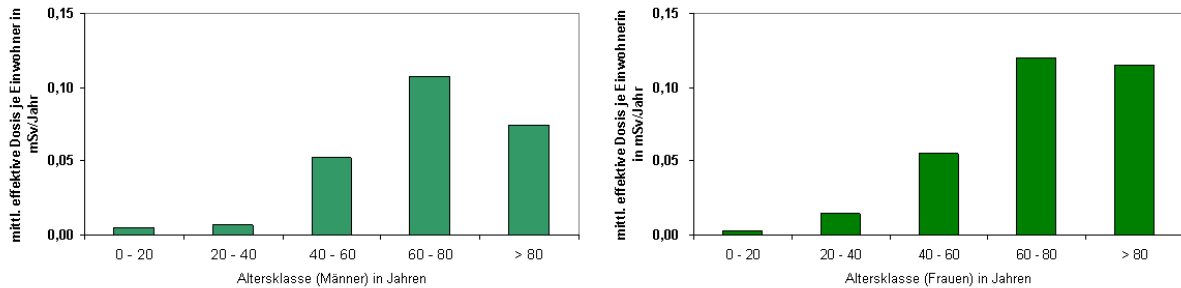


Abb. 10: Mittlere effektive Dosis durch die Nuklearmedizin in der Schweiz

## 2.2 Ionisierende Strahlung von Bildschirmen und Industrieprodukten

### 2.2.1 Bildschirme

Die weitverbreitete Einführung von Bildschirmarbeitsplätzen entfachte die Diskussion über die von Bildröhren ausgehende Röntgenstrahlung und die dadurch hervorgerufene Strahlenexposition. Im Forschungszentrum Karlsruhe wurden an einer Vielzahl von Schwarz-Weiß- und Farb-Monitoren sowie an Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind zusammen mit Meßwerten über die Strahlenexposition durch Zeitschriften infolge der natürlich radioaktiven Stoffe im Papier in Tab. 13 zusammengefaßt.

<b>Natürliche Umgebungsstrahlung</b> (im Mittel)	100 000 pSv/h
<b>Bildschirmgerät</b> (Arbeitsabstand 0,5 m)	
- betriebsbedingte Röntgenstrahlung	6 pSv/h
- Gammastrahlung natürlich radioaktiver Stoffe in Bildröhre und Leuchtstoffen	1 200 pSv/h
<b>Farbfernseher</b> (Betrachtungsabstand 3 m)	
- betriebsbedingte Röntgenstrahlung	2 pSv/h
- Gammastrahlung natürlich radioaktiver Stoffe in Bildröhre und Leuchtstoffen	100 pSv/h
<b>Zeitschriften</b> (Leseabstand 0,35 m)	
- Gammastrahlung von Ra- und Th-Folgeprodukten	30 pSv/h
<b>Mensch</b> (Abstand 0,5 m)	
- Gammastrahlung von K-40	50 pSv/h

Tab. 13: Strahlenexposition durch Bildschirm- und Farbfernsehgeräte

### 2.2.2 Leuchtzifferblätter

Radium wurde lange Zeit als fluoreszenzanregende Substanz für die Leuchtfarben von Zifferblättern und Zeigern eingesetzt. Ra-226 hat den Nachteil, daß durch seine Folgeprodukte ein größerer Anteil sehr durch-

dringender Strahlung emittiert wird. Diese Strahlung trägt zur Lichtemission wenig, zur Strahlendosis aber viel bei. Nachdem durch die kerntechnische Entwicklung geeignete Radionuklide zur Verfügung standen, wurde Radium in Leuchtfarben weitgehend durch Promethium-147 und überwiegend Tritium ersetzt. Die Ra-226-Aktivität in den früher üblichen Leuchtfarben lag zwischen 4 und 100 kBq pro Armbanduhr. Die Strahlendosis für den Träger einer solchen Uhr wird fast ausschließlich durch eine externe Strahlenexposition hervorgerufen. Bei 16stündiger Tragedauer pro Tag konnten Gonadendosen von 1,5 mSv pro Jahr auftreten. Promethium-147 als "Ersatzstoff" für Radium in Leuchtfarben ist ein reiner Betastrahler mit einer maximalen Energie der Betastrahlung von 224 keV. Die Energie dieser Betastrahlung reicht nicht aus, um Uhrgehäuse oder Uhrglas zu durchdringen. Da Pm-147 als Feststoff nicht flüchtig ist, so kann nur die im Gehäuse der Uhr erzeugte Bremsstrahlung zu einer Strahlenexposition des Trägers führen. Bei der üblicherweise eingesetzten Pm-Aktivität von 1,5 MBq pro Uhr läßt sich die jährliche Gonadendosis zu 2 Mikrosievert abschätzen. Der bei weitem größte Teil der heutigen Uhren mit Leuchtzifferblättern benutzt Tritium als fluoreszenzanregende Substanz in der Leuchtfarbe. Aufgrund der sehr geringen Beta-Energie des Tritiums von maximal 18 keV ist die äußere Strahlenexposition völlig vernachlässigbar. Der allmähliche Austritt von Tritium aus dem Leuchtstoff kann eine Tritiuminkorporation zur Folge haben. Erhebungen in der Schweiz haben ergeben, daß eine Tritiumaktivität von 40 MBq pro Uhr in der Leuchtfarbe vorhanden ist. Dies führt dann zu einer jährlichen effektiven Dosis von 0,3 Mikrosievert.

### 2.2.3 Phosphat-Industrie

Der typische Gehalt an U-238 im Phosphormineral liegt mit 1 500 Bq/kg deutlich höher als in üblichen Gesteinen. Weltweit beträgt der Abbau von Phosphormineralien zur Herstellung von Phosphatdünger rund 130 Millionen Tonnen, überwiegend in China, Marokko, GUS und USA. Die Aufbereitung des Gesteins ist mit einer Freisetzung natürlich radioaktiver Stoffe verbunden. Für eine holländische Anlage wurden für die ungünstigste Stelle in der Umgebung bis zu 0,15 mSv pro Jahr ermittelt. Die Gipsableitung in den Rhein führt über den Ingestionspfad, überwiegend durch Po-210, zu einer jährlichen effektiven Dosis für die holländische Bevölkerung von 170 Personen-Sievert. Messungen an US-Anlagen ergaben für die Umwelt deutlich geringere Werte. Rechnet man die US-Daten auf die weltweite Tätigkeit pro Jahr um, so ergibt sich eine kollektive effektive Folgedosis der Bevölkerung von 60 Personen-Sievert.

Weltweit werden etwa 30 Mio. Tonnen  $P_2O_5$  als Phosphatdünger eingesetzt. Der mittlere Einsatz beträgt in den Entwicklungsländern 3,5 kg pro Hektar und in den Industrieländern 11 kg pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche. Die spezifische Aktivität des Düngers variiert abhängig von der Herkunft des Ausgangsmaterials in weiten Bereichen. Insbesondere der Anteil der Nuklide der U-238-Reihe ist gegenüber normalem Boden stark erhöht. Typische Werte für U-238 und Ra-226 sind 4 000 bzw. 1 000 Bq/kg  $P_2O_5$ . Durch das Einbringen des Phosphatdüngers erhöht sich geringfügig der Gehalt des Bodens an Nukliden der U-238-Reihe. Die zusätzliche Dosis resultiert überwiegend von Pb-210. Aus der weltweiten Phosphatdüngerproduktion und Annahmen über den Transfer in Pflanzen läßt sich pro Jahr der Düngernutzung die kollektive effektive Folgedosis zu 10 000 Personen-Sievert abschätzen. Da die Nutzung von Phosphatdünger schon seit längerer Zeit erfolgt, entspricht dieser Wert in etwa der jährlichen Dosis, die sich damit zu 2 Mikrosievert pro Person errechnet.

Als Nebenprodukt der Phosphatdüngerherstellung entstehen rund 100 Mio. t Gips, der Ra-226 mit einer typischen spezifischen Aktivität von 1 kBq pro kg enthält. Der größte Teil des Gipses wird als Abfall gelagert oder über Flüsse ins Meer geleitet. Etwa 1 bis 5 % werden im Hausbau eingesetzt. Durch den Einsatz im Hausbau ergibt sich eine erhöhte externe und über Radon und Folgeprodukte eine interne Exposition. Abschätzungen über die aus diesem jährlichen Einsatz von Gips im Hausbau resultierenden Strahlendosen führen zu einer kollektiven effektiven Folgedosis von 0,2 bis  $1 \cdot 10^5$  Personen-Sievert durch externe und 0,4 bis  $2 \cdot 10^5$  Personen-Sievert durch interne Exposition.

Tab. 14 faßt den Gesamtbeitrag durch die Phosphat-Industrie und deren Produkte hervorgerufene Exposition zusammen. Es ist anzumerken, daß der Dosisbeitrag durch die Verwendung der Nebenprodukte im Hausbau aus Modellrechnungen hergeleitet wurde und noch einer meßtechnischen Verifizierung bedarf.

Quelle	kollektive effektive Folgedosis pro Jahr der Nutzung in Personen-Sievert
Phosphatindustrie	60
Phosphatdünger	10.000
Nebenprodukte	60.000 – 300.000

Tab. 14: Kollektive Folgedosis der Bevölkerung aus der jährlichen Phosphat-Verarbeitung und -Nutzung

### 2.3 Strahlenexposition bei Flügen und Raumflügen

Eine erhöhte Strahlenexposition durch die kosmische Strahlung tritt bei Flügen in größeren Höhen auf. Insbesondere die bei Überschallflügen üblichen Flughöhen um 16 km führen zu relativ hohen Dosisleistungen. Die Messung der Dosisleistung auf einem Concorde-Flug von Paris nach Rio de Janeiro im Februar 1976 zeigt die Abhängigkeit der Dosisleistung von der Flughöhe und der jeweiligen geographischen Breite (Abb. 11). Die Breiten- und Höhenabhängigkeiten der Dosisleistung der kosmischen Strahlung sind in Abb. 12 und Abb. 13 dargestellt. Im kommerziellen Personenluftverkehr werden zur Zeit rund  $2 \cdot 10^{12}$  Passagierkilometer pro Jahr geflogen. Daraus errechnet sich eine Gesamtdosis von rund 10 000 Personen-Sievert. Der größte Teil entfällt auf die nordamerikanische und westeuropäische Bevölkerung, für die sich die mittlere Strahlenexposition durch Flugreisen auf 10 und 5 Mikrosievert pro Jahr abschätzen läßt. Für einzelne Flugstrecken können folgende Werte als Anhaltspunkt dienen:

Frankfurt - New York - Frankfurt	100 $\mu$ Sv
Frankfurt - Singapur - Frankfurt	60 $\mu$ Sv
Frankfurt - Palma de Mallorca - Frankfurt	6 $\mu$ Sv

Die Strahlenexposition durch kosmische Strahlung der Crew von Düsenflugzeugen für die üblichen Flughöhen und die verschiedenen Flugrouten wird zur Zeit intensiv untersucht. Bei Flugrouten in geomagnetischen Breiten von  $50^\circ$  N und mehr, Flugzeiten des Personals von 600 h pro Jahr und durchschnittlichen Flughöhen von 10 km wird eine effektive Dosis von unter 3 mSv pro Jahr abgeschätzt. British Airways gibt für ihre Concorde-Crews für die effektive Dosis durch kosmische Strahlung Mittelwerte von 3 bis 6 mSv pro Jahr und Maximalwerte von 10 mSv pro Jahr an.

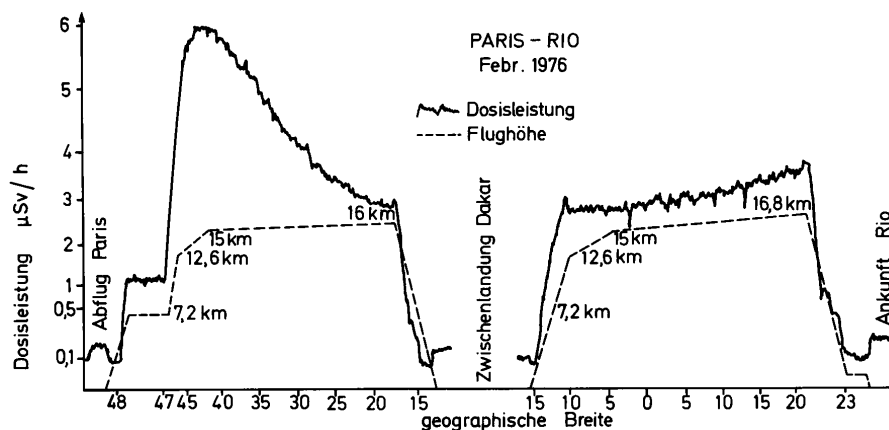


Abb. 11: Verlauf der Dosisleistung bei einem Concorde-Flug Paris - Rio

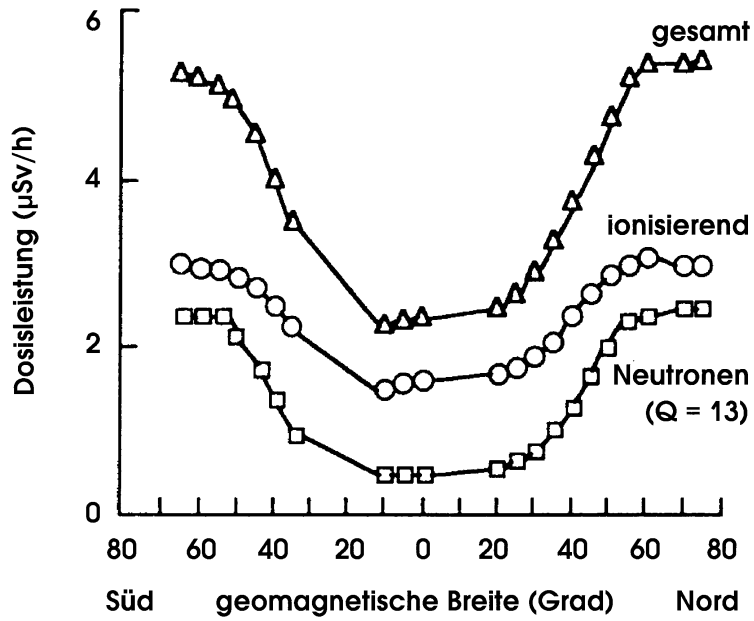


Abb. 12: Beitrag der Komponenten der kosmischen Strahlung zur Gesamtdosisleistung in Abhängigkeit von der geomagnetischen Breite

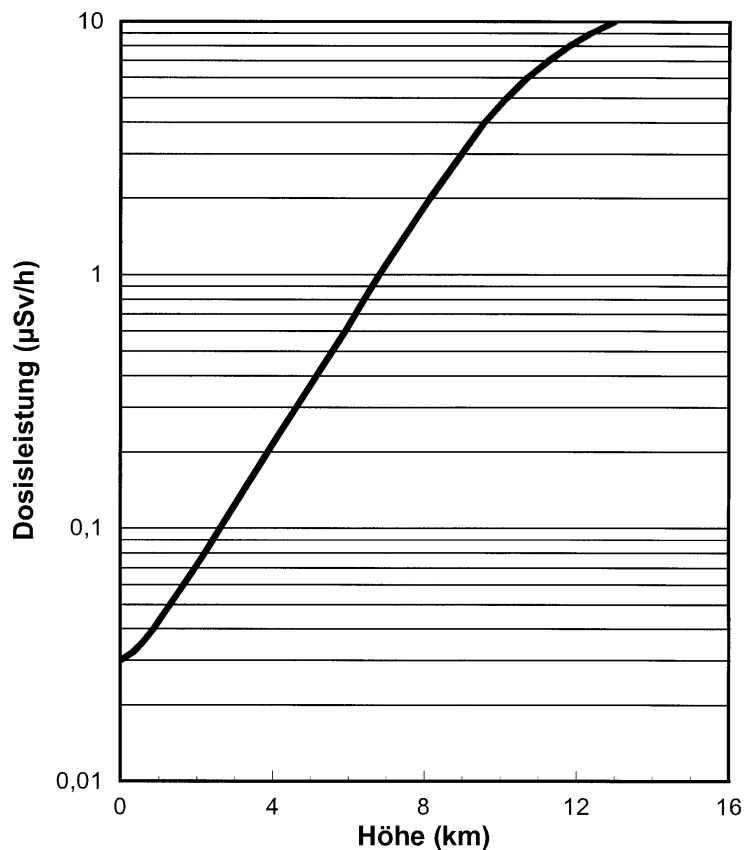


Abb. 13: Dosisleistung für verschiedene Flughöhen in mittleren Breiten

Bei Weltraumflügen sind die Astronauten sowohl der primären galaktischen Strahlung und der solaren Strahlung als auch der intensiven Strahlung in den beiden Strahlungsgürteln, die die Erde umgeben und als Van-Allen-Gürtel bezeichnet werden, ausgesetzt. So ist ein großer Anteil der gesamten Strahlendosis bei den in

Tab. 15 aufgelisteten Mondflügen auf den Dosisbeitrag aus diesen Strahlungsgürteln, die die Erde äquatorial in etwa 8 000 und 50 000 km Entfernung umgeben, zurückzuführen. Messungen hinter einer Aluminiumabschirmung von 3 mm ergaben im inneren Van-Allen-Gürtel bis zu 0,2 Gy/h und im äußeren Strahlungsgürtel bis zu 0,05 Gy/h. So war beispielsweise die höhere Dosis beim Flug von Apollo XIV – verglichen mit dem Flug von Apollo XI - weitgehend durch den Verlauf der Flugbahn durch die Strahlungsgürtel bedingt.

Flug		Flugdauer h	Dosis mSv
Erdumkreisung	Apollo VII	260	3,6
Erdumkreisung	Saljut 6/IV	4 200	55
Mondumkreisung	Apollo VIII	147	5,7
Mondlandung	Apollo XI	195	6
Mondlandung	Apollo XIV	209	15

Tab. 15: Strahlendosis bei Raumflügen

## 2.4 Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen

### 2.4.1 Einleitung

Kernkraftwerke sind nur ein, wenn auch der bekannteste Teil einer ganzen Reihe von kerntechnischen Anlagen des Brennstoffkreislaufs, die in ihrer Aufeinanderfolge die Nutzung der Kernenergie ermöglichen. Dazu gehören (siehe Abb. 14): Uranbergbau und Uranerzaufbereitung, Urananreicherung und Brennelementherstellung, Kernkraftwerk, Wiederaufarbeitung oder endlagergerechte Konditionierung der Brennelemente, Endlagerung radioaktiver Abfälle oder konditionierter Brennelemente. Soweit durch deutsche Anlagen Erfahrungen vorliegen, werden die daraus resultierenden Dosiswerte neben den international gemittelten Werten angegeben. Allgemein wird zur Vergleichbarkeit der Beiträge der Stationen des Brennstoffkreislaufes untereinander und zu den Strahlenexpositionen durch nicht-nukleare industrielle Tätigkeiten auf Daten der Berichte des „Wissenschaftlichen Komitees über die Effekte ionisierender Strahlung der Vereinten Nationen“, UNSCEAR, Bezug genommen. Für eine Bewertung der Umweltauswirkungen kerntechnischer Anlagen sind die resultierenden Strahlendosen für Einzelpersonen, der lokalen und regionalen Bevölkerung und der Weltbevölkerung von Bedeutung. Da einige der von den Anlagen emittierten radioaktiven Stoffe aufgrund ihrer Halbwertszeit und ihres Verhaltens in der Umwelt längere Zeit in unserer Biosphäre verbleiben und nicht nur im Jahr der Emission zur Strahlendosis beitragen, werden neben den typischen Jahresdosiswerten für Einzelpersonen in der Umgebung der Anlage für die Strahlenexposition der auch Werte der normierten, kollektiven effektiven Folgedosis angegeben. Normiert wird dabei auf die mit der zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 Gigawatt-Jahr (1 GWa = 8,76 Milliarden kWh) verbundene Emission radioaktiver Stoffe und der resultierenden Folgedosis. Folgedosis ist die Dosis, die eine Person als Folge der Emission radioaktiver Stoffe integriert über einen "unendlich" langen Zeitraum erhält. Dieser "unendliche" Zeitraum wird einerseits durch den radioaktiven Zerfall und andererseits durch die Transfermöglichkeit des radioaktiven Stoffes in der Umwelt begrenzt. Die kollektive Folgedosis ist die über die jeweilige Bevölkerungsgruppe summierte Dosis.

### 2.4.2 Uranbergbau und Uranerzaufbereitung

Uranbergbau, der sowohl im Tagebau als auch im Untertagebergbau erfolgt, ist mit dem Abbau großer Erzmengen, die zwischen einem zehntel Prozent bis zu einigen Prozenten  $U_3O_8$  enthalten, verbunden. An radioaktiven Stoffe sind dabei neben Uran auch alle Folgeprodukte der Uran-Zerfallsreihe vorhanden. Der



Tätigkeit	normierte kollektive effektive Folgedosis Personen-Sievert pro GWa
Bergbau	1,1
Aufbereitung	0,05
Halden	0,3
Summe, gerundet	1,5

Tab. 16: Normierte kollektive effektive Folgedosis der regionalen Bevölkerung durch Uranbergbau, Erzaufbereitung und Rückstandshalden

#### 2.4.3 Urananreicherung und Brennelementherstellung

Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus Konversions-, Anreicherungs- und Brennelementfabrikationsanlagen sind gering. In Deutschland stehen Fabrikationsstätten zur Brennelementherstellung in Lingen sowie die Urananreicherungsanlage in Gronau. Aus den gemessenen Aktivitätsableitungen lassen sich Dosiswerte im Bereich von weniger als 0,1 Mikrosievert pro Jahr für die höchstexponierten Stellen in der Umgebung ermitteln. UNSCEAR hat für die Ableitungen einer Modellanlage (Konversion, Anreicherung, Brennelementfertigung) die normierte kollektive effektive Dosis zu 0,003 Personen-Sievert pro GWa berechnet.

#### 2.4.4 Kernkraftwerke

Der für die kerntechnische Sicherheit und den Strahlenschutz zuständige Bundesminister veröffentlicht jährlich die Aktivitätsabgaben aller deutschen Kernkraftwerke. Die auf 1 GWa bezogenen Emissionen aus allen Kernkraftwerken Deutschlands im Jahre 1995 enthält Tab. 17. Ihr sind die aus internationalen Daten durch UNSCEAR ermittelten spezifischen Ableitungen gegenübergestellt. Die Daten beziehen sich auf die entsprechend der Stromerzeugung gewichteten Ableitungen aus den weltweit betriebenen Reaktortypen.

Nuklid/ Nuklidgruppe	Aktivitätsableitungen ( $10^9$ Bq pro GWa)	
	Deutschland 1995	weltweit nach UNSCEAR im Mittel 1985 – 1989
mit Abluft		
H-3	545	30 000
C-14	177	520
I-131	0,03	2
Aerosole	0,01	4
Edelgase	5 500	330 000
mit Abwasser		
H-3	8 400	40 000
alle anderen	0,2	80

Tab. 17: Normierte Aktivitätsableitungen aus Kernkraftwerken

Die Emissionsdaten konnten durch verbesserte Anlagentechnik deutlich reduziert werden. So waren die Emissionsraten pro GWa nach Daten von UNSCEAR im Mittel der Jahre 1980 bis 1984 gegenüber 1985 bis 1989 für Edelgase und Aerosole etwa viermal und für Iod-131 etwa fünfmal höher. Die aus den Ableitungen mit Abluft und Abwasser der deutschen Reaktoren für den ungünstigsten Punkt in der Umgebung berechneten Strahlendosen für 1998 sind in Abb. 15 und Abb. 16 wiedergegeben. Abb. 17 zeigt einige der für die Berechnung der Strahlenexposition in Deutschland anzuwendenden Expositionspfade.

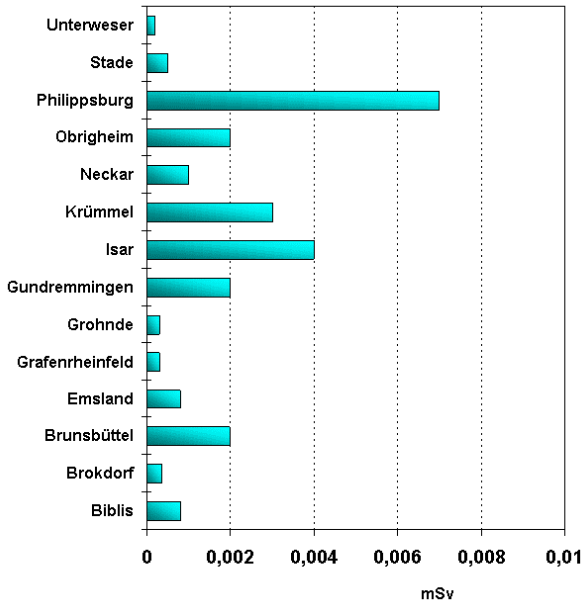


Abb. 15: Strahlendosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken mit der Abluft 1999

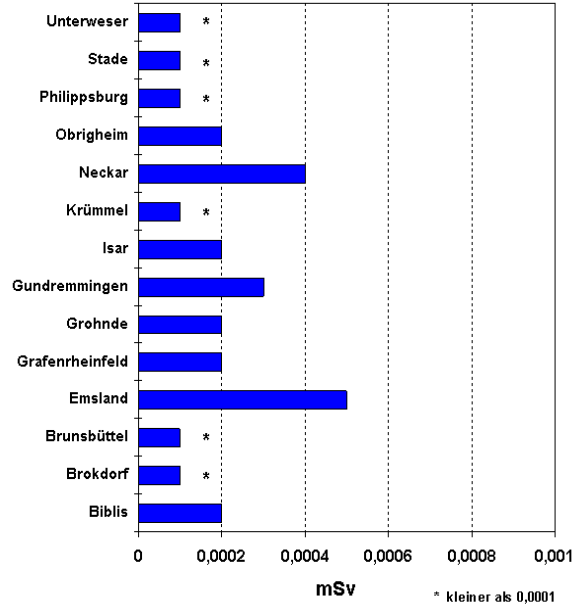


Abb. 16: Strahlendosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken mit dem Abwasser 1999

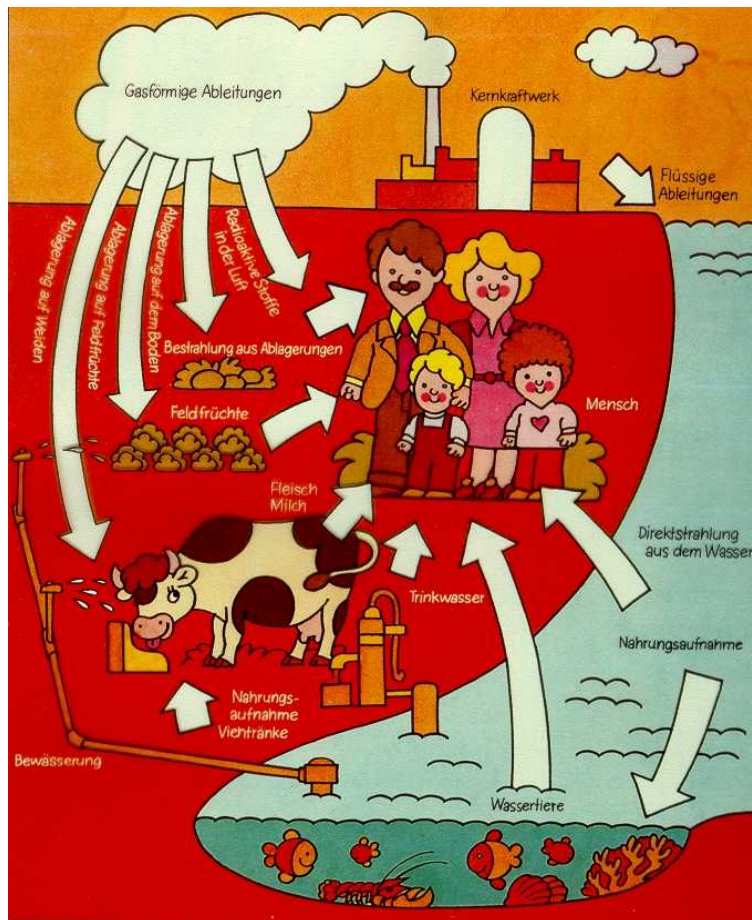


Abb. 17: Einige Expositionspfade zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser



Aus den Aktivitätsableitungen läßt sich auch die kollektive effektive Folgedosis der Bevölkerung berechnen. Hier wird Bezug genommen auf das von UNSCEAR beschriebene Modell zur Dosisberechnung für die regionale Bevölkerung. Dabei wird eine Bevölkerungsdichte von 400 Einwohnern pro km<sup>2</sup> bis zu einer Entfernung von 50 km und eine Gesamtbevölkerung von 200 Mio. bis zu 2 000 km Entfernung angenommen.

Unter Anwendung dieses Modells ergeben sich unter Berücksichtigung der Daten der Tab. 17 die normierten kollektiven effektiven Folgedosen in Tab. 18. Dabei sind unter der Spalte "deutsche Anlagentechnik" die sich aus den Emissionsdaten der Anlagen in Deutschland ergebenden Folgedosiswerte pro GWa errechnet. In der Spalte "internationale Anlagen" sind die von UNSCEAR veröffentlichten Daten angegeben.

Nuklide		kollektive effektive Dosis Personen-Sievert pro GWa	
		deutsche Anlagentechnik	internationale Anlagen
Luftpfad	H-3	0,006	0,33
	C-14	0,4	0,94
	Iod	0,00001	0,001
	Aerosole	0,0001	0,02
	Edelgase	0,002	0,04
Wasserpfad	H-3	0,006	0,03
	alle anderen	0,00002	0,004
Summe, gerundet		0,4	1,4

Tab. 18: Normierte kollektive effektive Folgedosis der regionalen Bevölkerung durch Kernkraftwerke, gewichtet nach dem Anteil der Reaktortypen an der Stromerzeugung

#### 2.4.5 Wiederaufarbeitung

Wiederaufarbeitungsanlagen werden in Sellafield (Großbritannien) und La Hague (Frankreich) betrieben. Angaben über normierte Aktivitätsableitungen aus Wiederaufarbeitungsanlagen und die daraus resultierenden regionalen Strahlendosen enthält Tab. 19.

Nuklid		normierte Emission 10 <sup>12</sup> Bq pro GWa	effektive Dosis Personen-Sievert
Abluft	H-3	40	0,11
	C-14	2	0,81
	Kr-85	12 300	0,09
	I-129	0,006	0,25
	Cs-137	0,002	0,02
Abwasser	C-14	0,54	0,21
	Sr-90	11	0,13
	Ru-106	39	2,8
	I-129	0,03	-
	Cs-137	13	1,1
Summe, gerundet			5,5

Tab. 19: Emissionswerte der Jahre 1985 bis 1989 und normierte kollektive effektive Dosis der regionalen Bevölkerung durch Wiederaufarbeitung

## 2.4.6 Global verteilte langlebige Radionuklide

Von den bei Reaktorbetrieb und Wiederaufarbeitung abgeleiteten Radionukliden werden einige wegen ihres Verhaltens und Transfers in Umweltmedien und aufgrund ihrer langen physikalischen Halbwertszeit weltweit verteilt. Sie können so über den regionalen Bereich hinaus zu einer Exposition der Gesamtbevölkerung führen. Von den Ableitungen aus Reaktoren ist dies C-14, von den bei der Wiederaufarbeitung freigesetzten Radionukliden sind es C-14, Kr-85 und I-129. Die Tab. 20 enthält die Folgedosisbeiträge aus Reaktorbetrieb und Wiederaufarbeitung durch die radiologisch global interessanten Radionuklide. Da zur Zeit weltweit nur rund 4 % des abgebrannten Kernbrennstoffs wiederaufgearbeitet werden, sind die Expositionswerte für zwei Szenarien angegeben.

Nuklid	normierte Emission $10^{12}$ Bq/GWa		effektive Dosis Personen-Sievert pro GWa	
	Reaktor	Wieder- aufarbeitung	100 % Wieder- aufarbeitung	4 % Wieder- aufarbeitung
C-14	0,5	2,5	250	50
Kr-85	-	12 300	2,5	0,1
I-129	-	0,04	0,15	0,006

Tab. 20: Normierte Emissionen global sich verteilender langlebiger Radionuklide und resultierende kollektive Dosis im Zeitraum von 10 000 Jahren

C-14 verbleibt lange in den Kohlenstoffverbindungen der Biosphäre. Das in UNSCEAR beschriebene Modell für C-14 ergibt unter der Berücksichtigung einer Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen eine kollektive effektive Folgedosis von 120 Sv pro  $1 \cdot 10^{12}$  Bq freigesetztes C-14. Diese Folgedosis ergibt sich im Laufe von einigen zehntausend Jahren (3 % innerhalb der ersten zehn Jahre, 10 % in 100 Jahren, 20 % in 1 000 Jahren und 70 % innerhalb von 10 000 Jahren). Die entsprechend dem Beitrag zur gesamten nuklearen Stromerzeugung gewichtete C-14-Freisetzung aus den verschiedenen Reaktortypen beträgt  $0,5 \cdot 10^{12}$  Bq pro GWa. C-14-Ableitungen aus Wiederaufarbeitungsanlagen betragen im gewichteten Durchschnitt  $2,5 \cdot 10^{12}$  Bq pro GWa.

Krypton-85 kann als Edelgas nicht in Filtern abgeschieden werden. Wegen seiner Halbwertszeit von 10,8 Jahren ist eine Rückhaltung in Verzögerungsstrecken, wie sie beispielsweise für kurzlebige Spaltedelgase an Reaktoren zur Emissionsreduzierung erfolgreich genutzt wird, nicht möglich. Andererseits bedeutet aber diese für die Rückhaltung nachteilige Edelgaseigenschaft auch, daß über Stoffwechselforgänge keine Anreicherungseffekte in der Umwelt eintreten können. Für die üblichen Abbrandwerte des Kernbrennstoffs im Reaktorbetrieb läßt sich eine Kr-85-Produktion von  $12 \cdot 10^{15}$  Bq für eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWa errechnen. Unterstellt man für den Fall der Wiederaufarbeitung realistischere eine vollständige Freisetzung dieser Aktivität, so folgt für die Weltbevölkerung eine kollektive effektive Folgedosis von 2,5 Sv pro GWa. Diese Dosis wird zur Hälfte in den ersten zehn Jahren und fast vollständig in den 50 Jahren, die auf die Freisetzung in die Atmosphäre folgen, erhalten.

Iod-129 (Halbwertszeit 15,7 Millionen Jahre) ist von den bei der Kernspaltung entstandenen Radioiodisotopen langfristig von radiologischer Bedeutung. Die Iod-129-Erzeugung liegt bei einem mittleren Abbrand in Leichtwasserreaktoren je GWa erzeugter elektrischer Energie bei  $60 \cdot 10^9$  Bq. Messungen bei Wiederaufarbeitungsanlagen ergeben eine Freisetzung von  $38 \cdot 10^9$  Bq pro GWa. Aufgrund seiner hohen Mobilität in der Umwelt wird Iod-129 relativ schnell global verteilt und gelangt letztlich ins Meer. Da allein die oberen Meeresschichten 1 Milliarde Tonnen stabiles Iod enthalten, kommt es dadurch zu einer enormen Isotopenver-

dünnung. Der mit einer Verzögerungszeit von 100 bis 200 Jahren angesetzte Austausch mit den tiefen Ozeansichten vergrößert die Mischkapazität nochmals um einen Faktor 50. UNSCEAR hat unter Berücksichtigung einer Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen eine kollektive effektive Folgedosis von 14 Sv für eine Freisetzung von  $1 \cdot 10^9$  Bq Iod-129 ermittelt.

Der größte Teil dieser Folgedosis fällt zwischen 10 Millionen und 40 Millionen Jahre nach der Freisetzung an, so daß dieser Wert sehr spekulativ ist. Von größerem Interesse sind da kürzere Integrationszeiten. 0,003 % der Gesamtdosis ergeben sich in den ersten hundert Jahren.

Nicht zu den globalen radiologischen Auswirkungen, sondern zu möglichen regionalen Langzeitauswirkungen sind die Freisetzungen aus den Rückstandshalden der Uranerzaufbereitung (siehe Kap. 2.4.2) zu zählen. Ursache ist die Freisetzung von Radon, das sich aus Th-230 (Halbwertszeit 80 000 Jahre) nachbildet. Die Freisetzungsraten von Radon sind in hohem Maße von der Abdeckung der Rückstandshalde abhängig. Die Exhalationsrate läßt sich z. B. durch Überdeckung mit 3 m Ton und einem Erosionsschutz aus Kies und Gestein auf ein Millionstel gegenüber einer unabgedeckten Halde reduzieren. Entsprechend reduziert sich die kollektive effektive Folgedosis in der Region z. B. für einen Zeitraum von 10 000 Jahren von 7 800 Sv auf weniger als 0,01 Sv.

#### 2.4.7 Zusammenfassung: Strahlenexpositionen aus kerntechnischen Anlagen

Die Tab. 21 faßt die Daten der Strahlenexposition durch die Anlagen des Kernbrennstoffkreislaufs für die regionale Bevölkerung zusammen. Die Dosis wurde dabei auf den Durchsatz an Kernbrennstoff, der zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 Gwa (entspricht 8,76 Milliarden kWh) erforderlich ist, und die damit verbundene Aktivitätsfreisetzung bezogen. Nicht berücksichtigt sind die in Kapitel 2.4.6 genannten Dosisbeiträge.

Tätigkeit	normierte kollektive effektive Folgedosis Personen-Sievert pro Gwa
Bergbau	1,1
Erzaufbereitung	0,05
Halden	0,3
Brennelementfertigung	0,003
Reaktorbetrieb	1,4*
Wiederaufarbeitung	0,25

\*0,4 bei deutscher Technik

Tab. 21: Normierte kollektive effektive Folgedosis für die regionale Bevölkerung durch die Emissionen radioaktiver Stoffe von kerntechnischen Anlagen, bezogen auf eine erzeugte elektrische Energie von 1 Gwa

## 2.5 Strahlenexposition durch fossile Energieträger

### 2.5.1 Kohle

Steinkohle und Braunkohle enthalten je nach Art und Herkunft in unterschiedlichen Konzentrationen natürlich radioaktive Stoffe, die bei der Verbrennung in die Biosphäre freigesetzt werden und so durch externe Bestrahlung und durch Inkorporation zu einer zusätzlichen, durch zivilisatorische Einflüsse bedingten Strahlenexposition durch natürliche Radioaktivität führen.

Aus der spezifischen Kohleaktivität, der Staubemissionsrate und dem Anreicherungsfaktor läßt sich für die Verhältnisse in Deutschland unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Kraftwerks für eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWh die emittierte Aktivität langlebiger alphastrahlender Aerosole auf  $10^{10}$  Bq bei einem Steinkohlekraftwerk und auf  $10^9$  Bq bei einem Braunkohlekraftwerk abschätzen. Für ein Steinkohlekraftwerk ergibt sich für eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWh am ungünstigsten Ort in der Umgebung eine effektive Dosis von 0,5 bis 2 Mikrosievert durch Inhalation der emittierten radioaktiven Stoffe. Die Dosisbeiträge durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung - relevant sind hier die Nuklide Blei-210 und Polonium-210 - und durch äußere Bestrahlung betragen am ungünstigsten Ort in der Umgebung des Kraftwerks jeweils rund 50 % der Inhalationsdosis, so daß sich - normiert auf eine erzeugte 1 elektrische Energie von 1 GWh - eine effektive Dosis von insgesamt 1 bis 4 Mikrosievert errechnet. Aufgrund der geringeren Emission radioaktiver Stoffe und einer anderen Nuklidzusammensetzung ist der entsprechende Wert für Braunkohlekraftwerke geringer.

UNSCEAR hat in den Berichten von 1988 und 1993 Berechnungen über die Strahlenexposition durch die Kohlenutzung aus internationalen Daten veröffentlicht. Die Weltproduktion an Kohle beträgt rund  $3 \cdot 10^{12}$  kg pro Jahr; 40 % davon werden zur Stromerzeugung, 50 % zur Koksproduktion und 10 % in Haushalten eingesetzt. Zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWh sind etwa  $3 \cdot 10^9$  kg Kohle erforderlich. Bei einer weltweiten Betrachtung der Strahlenexposition durch die Stromerzeugung in Kohlekraftwerken ist zu berücksichtigen, daß ein großer Teil des Stroms in Kraftwerken mit nicht sehr effizienter Flugascherückhaltung erzeugt wird. Bezogen auf eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWh beträgt die Dosis in der unmittelbaren Nähe solcher Anlagen durch Inhalation, Ingestion und externe Bestrahlung durch auf dem Boden abgelagerte Radionuklide 40 Mikrosievert pro Jahr. Für moderne Anlagen wurden 2 Mikrosievert pro Jahr berechnet. (Bei einem Vergleich mit den für deutsche Kohlekraftwerke berechneten Individualdosen ist zu berücksichtigen, daß UNSCEAR reale Expositionsbedingungen unterstellt, während bei den deutschen Berechnungsvorschriften auch potentielle Expositionsbedingungen berücksichtigt wurden). Die kollektive effektive Folgedosis ermittelt sich für moderne Kraftwerke zu 0,5 Sv pro GWh, für "alte" Anlagen zu 6 Sv pro GWh. Besondere Umstände (höhere Aktivitätskonzentration, größere Bevölkerungsdichte und geringere Filterwirkungsgrade) führen bei Kohlekraftwerken in der Volksrepublik China zu einem deutlich höheren Wert von 50 Sv pro GWh. Je Jahr der Nutzung ergibt sich eine globale kollektive effektive Dosis von 8 000 Personen-Sievert.

Die mittlere spezifische Aktivität der Asche (Flugasche und Asche aus Bodenabzug) beträgt für U-238 und Th-232 jeweils rund 150 Bq pro kg. Kraftwerksasche wird u. a. für die Zementproduktion, im Straßenbau und als Düngemittel eingesetzt. Über den Zement kann dies in Häusern zu einer externen Exposition und Radonfreisetzung aus dem Baumaterial führen. Messungen ergaben, daß im wesentlichen nur die erhöhte externe Bestrahlung durch den höheren Gehalt an Ra-226 und Th-232 zu einem jährlichen Dosisbeitrag von 30 bis 70 Mikrosievert führt. Da rund 5 % der jährlich anfallenden Asche über Zement und Beton zum Hausbau verwendet werden, errechnet sich pro Jahr der Verwendung solcher Baustoffe global eine kollektive effektive Dosis von 50 000 Personen-Sievert.

UNSCEAR schätzt, daß durch den Kohleinsatz im privaten Bereich über den Rauch jährlich jeweils 0,3 bis  $6 \cdot 10^{12}$  Bq jedes der Radionuklide der U-238- und der Th-232-Zerfallsreihe freigesetzt werden. Daraus errechnet sich pro Jahr der Kohlenutzung im privaten Bereich global die kollektive effektive Folgedosis zu 2 000 bis 40 000 Personen-Sievert.

Die gesamte Strahlenexposition durch Kohlenutzung in Industrie und Haushalt einschließlich der Dosis durch die industrielle Nutzung der Nebenprodukte ist in der Tab. 22 zusammengefaßt. Es ist zu berücksichtigen, daß die Dosisangaben infolge der Kohlenutzung im Haushalt und der resultierenden Exposition der Umwelt aus Modellrechnungen ermittelt wurden und, wie schon die große Schwankungsbreite der angegebenen Werte zeigt, mit Unsicherheiten verbunden sind, die durch Messungen bereinigt werden müßten.

Quelle	kollektive effektive Folgedosis pro Jahr der Nutzung in Sievert
Kohlebergbau	0,5 bis 10
Kohlekraftwerke	8 000
Nutzung der Asche	50 000
Kohle, häuslicher Bereich	2 000 bis 40 000

Tab. 22: Schätzungen der kollektiven Folgedosis der Bevölkerung aus dem jährlichen Kohleinsatz (UNSCEAR 1993)

### 2.5.2 Erdöl

Die Emissionen an natürlich radioaktiven Stoffen aus Erdölkraftwerken betragen (bezogen auf eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWa) rund  $300 \cdot 10^6$  Bq Ra-226,  $200 \cdot 10^6$  Bq U-238 und  $150 \cdot 10^6$  Bq Th-232. Die resultierende jährliche effektive Dosis für Personen in der Umgebung eines solchen Kraftwerks beträgt etwa 1 Mikrosievert. Die kollektive effektive Folgedosis durch die Verbrennung von Erdöl zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWa beträgt 0,5 Personen-Sievert. Da rund 15 % der jährlichen Erdölproduktion von  $3 \cdot 10^{12}$  kg in Kraftwerken zur Stromerzeugung eingesetzt werden und für 1 GWa rund  $2 \cdot 10^9$  kg Öl erforderlich sind, ergibt sich dadurch eine gesamte kollektive effektive Folgedosis von 100 Personen-Sievert.

### 2.5.3 Erdgas

Die Radon-Konzentration in Erdgas variiert von nicht nachweisbaren Werten bis zu 50 kBq pro  $m^3$ . Ein typischer Wert ist 1 kBq pro  $m^3$ . Da zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 GWa rund  $2 \cdot 10^9$   $m^3$  Erdgas verbrannt werden müssen, beträgt die Radon-Emission entsprechend  $2 \cdot 10^{12}$  Bq pro GWa. Dies ergibt eine zusätzliche effektive Dosis durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten in der Nähe eines solchen Kraftwerks von 1 bis 2 Mikrosievert pro Jahr. Die weltweite Erdgasproduktion beträgt etwa  $10^{12}$   $m^3$ . Bei einem geschätzten Einsatz von 15 % dieser Menge zur Stromerzeugung in Kraftwerken läßt sich die dadurch bedingte kollektive effektive Folgedosis zu 3 Personen-Sievert abschätzen. Der Dosisbeitrag durch den Einsatz von Erdgas zum Kochen und zur Raumheizung durch Einzelfeuerung ist schwer abzuschätzen; es ist davon auszugehen, daß dieser Dosisbeitrag den durch die Kraftwerke weit übersteigt.

### 2.5.4 Erdwärme

Erdwärme wird in Island, Italien, Japan, Neuseeland, der Russischen Föderation und USA genutzt. Zur Zeit ist die Nutzung zur Stromerzeugung noch unbedeutend, aber die relative Bedeutung könnte in der Zukunft ansteigen. Die bei der geothermalen Energieumwandlung genutzten heißen Dämpfe oder Wässer enthalten natürliche radioaktive Stoffe, überwiegend aus der U-238-Zerfallsreihe. Von besonderer Bedeutung für eine Strahlenexposition ist das freigesetzte Radon. Für das 400-MW-Kraftwerk in Larderello (Italien) wird die Rn-Emission auf  $110 \cdot 10^{12}$  Bq pro Jahr abgeschätzt; für die elf Blöcke des Geysers-Kraftwerks (502 MW elektrische Leistung) in den USA wurde eine mittlere jährliche Freisetzung von  $21 \cdot 10^{12}$  Bq ermittelt. Aus diesen Daten läßt sich eine durchschnittliche Freisetzung von  $150 \cdot 10^{12}$  Bq pro GWa herleiten. Dies führt in der Umgebung eines solchen Kraftwerkes zu einer effektiven Dosis von 100 Mikrosievert pro Jahr infolge der Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten. Die durch Nutzung der Erdwärme bedingte globale jährliche kollektive effektive Folgedosis beträgt zur Zeit 3 Personen-Sievert.

### 2.5.5 Torf

Torf wird in einigen Ländern zur Stromerzeugung eingesetzt. Messungen in Schweden ergaben einen durchschnittlichen Gehalt von U-238 im Torf von 40 Bq pro kg, Werte bis zu 500 Bq pro kg treten auf. In

Finnland wurden in dem für die Stromerzeugung eingesetzten Torf spezifische Aktivitäten von 16 Bq pro kg für U-238, 30 Bq pro kg für Pb-210 und 5 Bq pro kg für Ra-228 gemessen. Mengenmäßig ist die Torfverbrennung zur Stromerzeugung ohne Bedeutung. Rechnerisch ergeben sich aus den genannten spezifischen Aktivitäten - gleiche Flugascherückhaltung wie bei großen Kohlekraftwerken vorausgesetzt - effektive Individualdosen in der Kraftwerkumgebung von 2 bis 4 Mikrosievert für eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWh. Die kollektive effektive Folgedosis errechnet sich pro Jahr der Nutzung zu 2 Personen-Sievert pro GWh. Längerfristig könnte die Lagerung der uranreichen Kraftwerksasche zu einem höheren Beitrag führen.

#### 2.5.6 Reduktion der Strahlenexposition durch fossile Energieträger

Es ist anzumerken, daß durch die Verbrennung von Kohle und anderen fossilen Brennstoffen die spezifische Aktivität des natürlichen C-14 reduziert wird. Natürlicher Kohlenstoff-14 entsteht durch Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung in der Atmosphäre über einen (n,p)-Prozeß an Stickstoff-14 mit einer Aktivität von rund  $1 \cdot 10^{15}$  Bq pro Jahr. Messungen an Holz von Bäumen aus dem 19. Jahrhundert ergaben 227 Bq Kohlenstoff-14 pro kg Kohlenstoff. Benutzt man diesen Wert, so errechnet sich aus dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt in den verschiedenen Körpergeweben eine effektive Jahresdosis durch C-14 von 12 Mikrosievert. Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> durch das Verbrennen fossiler und damit C-14-freier Energieträger führt zu einer Vergrößerung des C-12-Anteils in der Biosphäre und dadurch zu einer Verringerung der natürlichen Gleichgewichtskonzentration von C-12 zu C-14. Mitte der 70er Jahre ergab sich durch diesen sogenannten Suess-Effekt eine Reduktion der spezifischen C-14-Konzentration in der Atmosphäre um rund fünf Prozent. Zur Erzeugung von 1 GWh elektrischer Energie müssen rund  $3 \cdot 10^9$  kg Kohle verbrannt werden. Würde diese Kohle den natürlichen C-14-Gehalt aufweisen, so ergäbe das eine Freisetzung von knapp  $6 \cdot 10^{11}$  Bq C-14. Daraus errechnet sich eine kollektive effektive Folgedosis von 70 Sv pro GWh. Da aber diese Aktivität nicht freigesetzt wird, reduziert sich wegen der Verringerung der spezifischen C-14-Aktivität die Folgedosis entsprechend. Zu berücksichtigen ist, daß diese Reduktion sich erst im Verlauf von einigen zehntausend Jahren auf den genannten Wert aufaddiert.

#### 2.5.7 Zusammenfassung: Strahlenexposition durch fossile Energieträger

In Tab. 23 sind die Dosiswerte durch die Nutzung nicht-nuklearer Energieträger zur Stromerzeugung zusammengefaßt, Werte für Kernkraftwerke zum Vergleich.

Energieträger	Individualdosis in der Umgebung µSv pro GWh	Folgedosis Personen-Sv pro GWh	Folgedosis pro Jahr der Nutzung* Personen-Sv
Kohle	1 bis 40	20	8 000
Erdöl	1	0,5	100
Erdgas	1 bis 2	0,03	3
Erdwärme	100	2	3
Torf	2 bis 4	2	-
Kernenergie	1 bis 10	1,4 (0,4)	300

( ) deutsche Anlagentechnik

\* entsprechend Anteil an der Stromerzeugung des Jahres 1989

Tab. 23: Effektive Dosis der Bevölkerung durch den Einsatz verschiedener Energieträger zur Stromerzeugung

## 2.6 Strahlenexposition durch Kernwaffentests

Kernwaffenexplosionen erzeugen sehr große Radioaktivitätsmengen an Spalt- und Aktivierungsprodukten. Neben diesen Spalt- und Aktivierungsprodukten haben für die Strahlenexposition auch noch die bei der Explosion aus dem Uran-238 entstehenden Plutoniumisotope Pu-239, Pu-240 und Pu-241 sowie der Teil des ungespalten gebliebenen Bombenmaterials Pu-239 eine Bedeutung. Aus den Messungen der Plutoniumkonzentrationen im Boden läßt sich die auf diese Weise weltweit verteilte Pu-239-Menge auf rund drei Tonnen berechnen. Bis heute wurden 423 Kernwaffen oberirdisch, d. h. mit einer Freisetzung der radioaktiven Stoffe in die Atmosphäre, gezündet. Die nach Zahl und Sprengkraft größten Versuchsserien wurden in den Jahren 1961/62 durch die USA und die Sowjetunion mit 128 Explosionen durchgeführt. Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch den radioaktiven Fallout folgt aus einer externen Bestrahlung durch die auf dem Boden abgelagerte Radioaktivität und durch die interne Strahlendosis infolge Inhalation oder den Verzehr von kontaminierten Nahrungsmitteln. Den zeitlichen Verlauf der Exposition in Mitteleuropa gibt Abb. 18 wieder. Die Abb. 19 zeigt die Ergebnisse von Messungen des Cs-137-Gehalts im Körper, die an einer Referenzpersonengruppe im Ganzkörperzähler des Forschungszentrums Karlsruhe ermittelt werden.

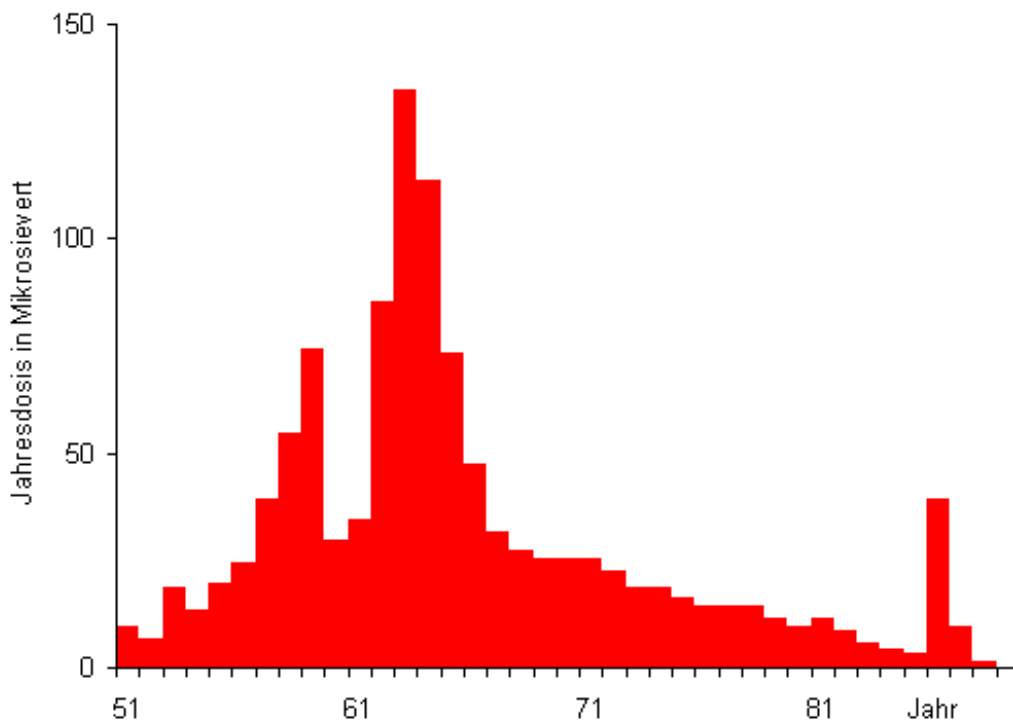


Abb. 18: Jährliche Dosis durch Kernwaffentests und Tschernobyl (NRPB, UK)

Für Personen in Mitteleuropa ergibt sich für den Zeitraum von 1960 bis 2050 im Mittel eine effektive Dosis von rund 2 mSv; rund 80 % dieser Dosis sind in den Jahren von 1960 bis 1970 angefallen. Die globale kollektive effektive Folgedosis (berechnet für einen Zeitraum von 10 000 Jahren und eine Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen) wird auf rund 22 Millionen Personen-Sievert geschätzt (siehe Tab. 24). Neben der Strahlenexposition durch den weltweiten Fallout haben die Kernwaffentests in den jeweiligen Testgebieten zu regionalen Expositionen geführt. Ihr Beitrag zur kollektiven weltweiten Folgedosis ist zwar gering, die Individualdosen der Bevölkerung waren aber zum Teil sehr hoch; für die Nevada-Test-Site wurden Schilddrüsensendosiswerte bis zu 1 Sv, für Bewohner des Rongelap-Atolls im Pazifik bis zu 200 Sv abgeschätzt. Regional führten auch die Aktivitätsableitungen aus den Kernwaffenproduktionsanlagen (Hanford, USA; Chelyabinsk, UdSSR) zu erheblichen Strahlenexpositionen (siehe Tab. 24).

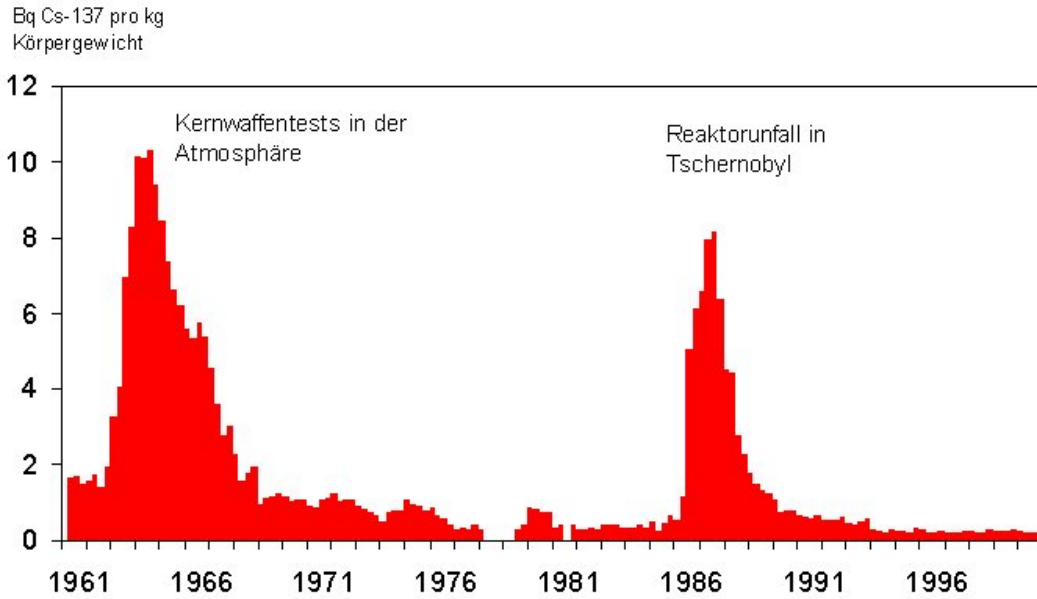


Abb. 19: Cs-137-Körperaktivität der Karlsruher Referenzgruppe, 1961 bis 2000

Tätigkeit	kollektive effektive Dosis in den nächsten 10 000 Jahren Personen-Sievert	
	regional	global
Kernwaffentests		
Semipalatinsk	4 600	22.300.000
Australien	700	
Nevada	500 *	
Pazifik	160 *	
Kernwaffenproduktion		
Hanford	8 000 **	10.000
Chelyabinsk	15 000	
Radon aus Halden	30 000	
zum Vergleich: Dosis durch natürliche Strahlen- exposition in 10 000 Jahren		240.000.000.000

\* nur externe Dosis   \*\* nur Dosis durch I-131

Tab. 24: Kollektive effektive Folgedosis durch Kernwaffenproduktion und Kernwaffentests

## 2.7 Strahlenexposition durch Unfälle

### 2.7.1 Unfälle in Kernkraftwerken und kerntechnischen Anlagen

Die aus dem Tschernobyl-Unfall resultierenden individuellen und kollektiven Strahlendosen für einzelne Regionen der nördlichen Hemisphäre sind jeweils für das erste Jahr nach dem Unfall und alle Folgejahre in Tab. 25 (nach UNSCEAR 1988) aufgelistet. Rund 70 % der effektiven Folgedosis ergibt sich durch Cs-137, 20 % durch Cs-134 und 6 % durch Iod-131. Die restlichen 4 % der Gesamtdosis wurden durch verschiedene kurzlebige Nuklide unmittelbar nach dem Unfall verursacht.



Region	effektive Folgedosis der Gesamtbevölkerung Sv	
	1. Jahr	total
UdSSR	72 000	226 000
Europa	100 000	300 000
Asien (ohne UdSSR)	18 200	49 000
Afrika	5 000	13 700
Amerika	600	1 600
nördliche Hemisphäre	200 000	600 000

Tab. 25: Strahlenexposition durch den Reaktorunfall in Tschernobyl

Wie sehr die Freisetzungen bei Reaktorunfällen variieren, zeigt die Tab. 26 für die Reaktorunfälle von Windscale, Harrisburg und Tschernobyl.

Nuklid	freigesetzte Aktivität in $10^{15}$ Bq		
	Windscale	Harrisburg	Tschernobyl
Sr-90	0,00007	-	8
I-131	0,74	0,001	330
Cs-134	0,01	-	35
Cs-137	0,02	-	70
Edelgase	12,5	310	1 750

Tab. 26: Aktivitätsfreisetzungen bei Reaktorunfällen

In der militärischen Plutonium-Produktionsanlage Kyshtym (Südrural) überhitzte sich nach Kühlungsausfall ein Lagertank mit 70 bis 80 t hochaktivem Flüssigabfall und explodierte. Rund  $10^{17}$  Bq - Ce/Pr-144 (66 %), Zr/Nb-95 (25 %), Sr/Y-90 (5 %) - wurden aus dem Anlagenbereich nach außen freigesetzt. Die durch die radioaktive Wolke betroffene Fläche wurde auf rund 20 000 km<sup>2</sup> abgeschätzt mit einer betroffenen Bevölkerung von rund 270 000 Personen. Rund 10 000 Personen wurden evakuiert. Die mittlere effektive Individualdosis der – evakuierten - Bevölkerung aus den höchstbelasteten Gebieten wurde auf rund 500 mSv abgeschätzt, die gesamte effektive Kollektivdosis auf 2 500 Personen-Sievert. Im Plutonium-Produktionsreaktor Windscale (England) kam es im Oktober 1957 zu einer partiellen Kernschmelze.  $740 \cdot 10^{12}$  Bq I-131,  $22 \cdot 10^{12}$  Bq Cs-137 und  $9 \cdot 10^{12}$  Bq Po-210 wurden freigesetzt. I-131 führte trotz des sofortigen Verzehrverbots für Milch lokal zu Schilddrüsendosen bis zu 10 mSv für Erwachsene und bis zu 100 mSv für Kleinkinder. Die gesamte effektive Dosis in Europa - überwiegend in Großbritannien - wurde zu 2 000 Personen-Sievert abgeschätzt (je 35 % von I-131 und Po-210, und 15 % von Cs-137).

### 2.7.2 Satelliten-Abstürze und Unfälle mit radioaktiven Quellen

Zwei Satelliten-Abstürze mit Radionuklidbatterien bzw. Kernreaktoren als Energiequelle führten zu einer geringen globalen Strahlenexposition. 1964 verglühte über der südlichen Hemisphäre beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre ein US-militärischer SNAP-9A-Satellit mit  $6 \cdot 10^{14}$  Bq Pu-238. Daraus errechnet sich eine effektive Dosis durch Inhalation für die Bewohner der südlichen Hemisphäre von 1,6 Mikrosievert, für die der nördlichen von 0,4 Mikrosievert. Die effektive Kollektivdosis ergibt sich zu 2 100 Personen-Sievert.

Im Januar 1978 stürzte über Kanada der militärische sowjetische Satellit Kosmos 954 mit einem 100-kW-Reaktor ab. Die dabei überwiegend in der nördlichen Hemisphäre freigesetzten Radionuklide führten überwiegend durch Cs-137 und Pu-239 zu einer kollektiven effektiven Dosis von 20 Personen-Sievert.

Drei Unfälle mit Bestrahlungsquellen führten lokal und regional zu hohen Individualdosen und Kontaminationen von über tausend Personen. 1983 wurde in Ciudad Juarez (Mexiko) eine medizinische Bestrahlungsanlage mit  $17 \cdot 10^{12}$  Bq Co-60 an einen Schrotthändler verkauft. Einzelne Personen erhielten eine Dosis bis zu 3 Sv; die Gesamtdosis der rund tausend bestrahlten Personen wurde auf 150 Personen-Sievert abgeschätzt.

1984 ging in Mohammedia (Marokko) eine Ir-192-Quelle für industrielle Radiographie verloren. Der Finder bewahrte sie zu Hause auf. Acht Personen - die ganze Familie - starben an einer Überexposition mit Dosen von 8 bis 25 Sv. In Goiania (Brasilien) wurde 1987 eine medizinische Bestrahlungsanlage mit  $50 \cdot 10^{12}$  Bq Cs-137 gestohlen, an einen Schrotthändler verkauft und dort zerlegt. Über 100 Personen wurden kontaminiert, vier Personen starben. Die Gesamtdosis wurde auf 60 Personen-Sievert abgeschätzt (Tab. 27).

Tätigkeit	kollektive effektive Dosis in den nächsten 10.000 Jahren Personen-Sievert	
	regional	global
Kernwaffenproduktion Kyshtym (1957) Windscale (1957)	2 500 2 000	
Kernkraftwerke Three Mile Island (1979) Tschernobyl (1986)	40	600 000
Satellitenabstürze SNAP 9A (1964) Kosmos 954 (1978)		2 100 20
Radionuklidquellen Ciudad Juarez (1983) Mohammedia (1984) Goiania (1987)	150 80 60	
zum Vergleich: Dosis durch natürliche Strahlen- exposition in 10 000 Jahren		240.000.000.000

Tab. 27: Kollektive effektive Folgedosis durch Unfälle

### 3 BERUFLICHE STRAHLENEXPOSITION

#### 3.1 Deutschland

Im Jahr 1999 wurden in Deutschland 334 091 Personen während ihrer beruflichen Tätigkeit mit Personendosimetern überwacht. Davon waren rund 74 % im medizinischen Arbeitsbereich tätig. Die Summe der Jahresdosis aller Überwachten betrug rund 55 Personen-Sievert. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug im Jahr 1998 0,17 mSv. Bei 87 % der überwachten Personen lagen die ermittelten Werte unter der kleinsten feststellbaren Dosis (0,2 mSv/Jahr). Bildet man einen Mittelwert nur für die Überwachten mit

einer von Null verschiedenen Jahresdosis, so ergibt sich für diesen Personenkreis eine mittlere Jahres-Personendosis von 1,3 mSv. Eine detaillierte Aufstellung der beruflichen Strahlenexpositionen in verschiedenen Tätigkeitsbereichen für das Jahr 1994 gibt Tab. 28 wieder.

Bereich	kollektive Dosis Personen-Sievert
Medizin	22,35
davon	
Zahnarztpraxen	0,11
Arztpraxen	7,25
Krankenhäuser	15,39
Forschung	0,63
industrielle Radiographie	7,80
Kerntechnik	69,54
davon	
Reaktorbetrieb	23,70
andere Einrichtungen einschl. Wartung und Instandhaltung in KKW	45,84
behördliche Überwachung, Gutachter	0,98

Tab. 28: Kollektive Strahlenexposition beruflich strahlenexponierter Personen in verschiedenen Tätigkeitsbereichen, Deutschland 1994

Die Kollektivdosis der überwachten beruflich durch Radonzerfallsprodukte strahlenexponierten Personen betrug 1999 einschließlich der Exposition durch langlebige Alphastrahler und äußere Bestrahlung ca. 5,1 Personen-Sv. 2,6 Personen-Sv entfielen auf die Beschäftigten der Wismut GmbH. Die mittlere effektive Jahresdosis aller durch Radonzerfallsprodukte beruflich exponierten Überwachten betrug 2,3 mSv. Die höchste mittlere effektive Jahresdosis ergab sich für die Beschäftigten bei Förderung und Sanierung im Nichturanbergbau mit 6,0 mSv, gefolgt von den Beschäftigten in Schauhöhlen und Schaubergwerken mit 5,9 mSv, in technisch-wissenschaftlichen Einrichtungen und in Radiumbädern mit 3,9 mSv, in Bergsicherungsbetrieben mit 3,8 mSv, in Wasserbetrieben mit 3,0 mSv und in der Wismut GmbH mit 1,5 mSv.

## 3.2 Welt

### 3.2.1 Kerntechnik

Beschäftigte im Uranbergbau und der Uranerzaufbereitung sind einer Exposition durch Radon und Folgeprodukte und durch externe Strahlung ausgesetzt. Für Bergarbeiter im Untertagebergbau ergibt sich weltweit ein Mittelwert der effektiven Dosis von 4,5 mSv pro Jahr, der entsprechende Wert für den Tagebau ist 1,6 mSv pro Jahr. Unter Berücksichtigung des Anteils an Untertage- und Übertagebergbau ergibt sich die normierte kollektive effektive Dosis für die Berufstätigen im Uranerzbergbau zu 4,3 Personen-Sievert pro GWa. Die Erzaufbereitung führt zu durchschnittlichen Expositionen der Beschäftigten von rund 6 mSv pro Jahr und einer normierten Kollektivdosis von 0,4 Personen-Sievert pro GWa. Die berufliche Strahlenexposition in Anlagen zur Anreicherung, Konversion und Brennelementfabrikation ist gering. UNSCEAR berechnet aus den veröffentlichten Daten eine normierte kollektive effektive Dosis von 0,07 Personen-Sievert pro GWa für die Herstellung von LWR-Brennelementen (siehe Tab. 29).

Zeitraum	überwachte Personen Tausend	mittlere effektive Dosis mSv/a	mittlere kollektive Dosis Sv/a	normierte kollektive Dosis Sv/GWa	
Bergbau	1975–1979	240	5,5	1 300	5,7
	1980–1984	310	5,1	1 600	5,5
	1985–1989	260	4,4	1 100	4,3
Erzaufbereitung	1975–1979	12	10	124	0,52
	1980–1984	23	5,1	117	0,41
	1985–1989	18	6,3	116	0,44
BE-Herstellung	1975–1979	20	1,8	36	0,6
	1980–1984	21	1,0	21	0,2
	1985–1989	28	0,8	22	0,1

Tab. 29: Weltweite berufliche Strahlenexposition, Uranerzbergbau, Uranerzaufbereitung und Brennelementherstellung

UNSCEAR ermittelte für die Strahlenexposition der Beschäftigten beim Betrieb von Kernkraftwerken unter Berücksichtigung des jeweiligen Beitrags einzelner Reaktortypen an der Stromerzeugung einen durchschnittlichen Wert von 6 Personen-Sievert für eine erzeugte elektrische Energie von 1 GWa. Zu berücksichtigen ist, daß die Strahlenexposition der Beschäftigten für die verschiedenen Reaktortypen recht unterschiedlich ist (Tab. 30).

Die durchschnittliche jährliche effektive Dosis der Beschäftigten in Wiederaufarbeitungsanlagen lag in den Jahren 1985 bis 1989 bei 1,4 mSv. Berücksichtigt man die Wiederaufarbeitungsleistung und die Zahl der Beschäftigten, so ergibt sich ein auf das Energieäquivalent des wiederaufgearbeiteten Brennstoffs bezogener Wert von knapp 0,65 Personen-Sievert pro GWa. Nach Inbetriebnahme der neuen Anlage UP3 in La Hague ist dort der Wert der normierten Dosis auf 0,2 Personen-Sievert pro GWa zurückgegangen. Eine Zusammenfassung der beruflichen Strahlenexposition in den einzelnen Stationen des Kernbrennstoffkreislaufes enthält Tab. 31.

Zeitraum	überwachte Personen Tausend	mittlere effektive Dosis mSv/a	mittlere kollektive Dosis Sv/a	normierte kollektive Dosis Sv/GWa
1975 – 1979	150	4,1	600	11
1980 – 1984	290	3,5	1 000	10
1985 – 1989	430	2,5	1 100	6
Details 1985 - 1989				
DWR	230	2,2	500	4,3
SWR	140	2,4	330	7,9
CANDU	18	3,4	60	6,2
RBMK	13	13	170	17
GGR/AGR	31	0,8	24	3,2

Tab. 30: Weltweite berufliche Strahlenexposition, Reaktorbetrieb

Zeitraum	überwachte Personen Tausend	mittlere effektive Dosis mSv/a	mittlere kollektive Dosis Sv/a	normierte kollektive Dosis Sv/GWa
1975 – 1979	560	4,1	2 300	19
1980 – 1984	800	3,7	3 000	18
1985 – 1989	880	2,9	2 500	13
Details 1985 – 1989				
Urannerzbergbau	260	4,4	1 100	4,3
Urannerzaufbereitung	18	6,3	120	0,44
Anreicherung	5	0,1	0,4	0,01
BE-Herstellung	28	0,8	22	0,1
Reaktorbetrieb	430	2,5	1 100	6
Wiederaufarbeitung*	4	1,4	6	0,7
Forschung	130	0,8	100	1

\*nur oxidischer Brennstoff

Tab. 31: Weltweite berufliche Strahlenexposition, Brennstoffkreislauf

### 3.2.2 Medizin und Industrie

Die weltweite berufliche Strahlenexposition durch Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in der Humanmedizin ist in Tab. 32 wiedergegeben. Beachtenswert ist, daß im letzten Jahrzehnt die Zahl der überwachten Personen sich fast verdoppelt hat, die Kollektivdosis demgegenüber aber nur geringfügig angestiegen ist. Die geographische Verteilung der im medizinischen Bereich beruflich exponierten Personen ist sehr inhomogen. Etwa ein Drittel aller überwachten Personen entfällt auf die USA, ebenfalls ein Drittel auf die restlichen OECD-Staaten und 20 % auf Osteuropa einschließlich GUS. Andererseits entfallen auf Lateinamerika und Planwirtschaftsländer in Asien, die nur jeweils 4 % der überwachten Personen stellen, jeweils 20 % der kollektiven Dosis.

Zeitraum	überwachte Personen Tausend	mittlere effektive Dosis mSv/a	kollektive Dosis Sv/a
1975–1979	1 280	0,8	993
1980–1984	1 890	0,6	1 140
1985–1989	2 220	0,5	1 030
Details 1985 – 1989			
Röntgendiagnostik	1 400	0,56	760
Zahnmedizin	480	0,05	25
Nuklearmedizin	90	0,95	85
Strahlentherapie	110	0,87	100

Tab. 32: Weltweite berufliche Strahlenexposition, medizinische Strahlenanwendung

Die berufliche Strahlenexposition durch Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in der Industrie ergibt sich überwiegend aus dem Bereich der industriellen Radiographie - weltweit etwa 110 000 überwachte Personen, Kollektivdosis pro Jahr 160 Personen-Sievert -, und der Herstellung von Radioisoto-

pen für industrielle und medizinische Zwecke - 88 000 überwachte Personen, Kollektivdosis pro Jahr 100 Personen-Sievert (Tab. 33). UNSCEAR weist im Bericht von 1993 darauf hin, daß, obwohl die absolute Zahl mit rund 100 Fällen nicht sehr hoch ist, im Bereich der industriellen Radiographie Dosisgrenzwertüberschreitungen (mehr als 50 Millisievert pro Jahr) bezogen auf die Anzahl der Beschäftigten die in allen anderen Tätigkeitsbereichen, in denen mit ionisierender Strahlung und radioaktiven Stoffen umgegangen wird, erheblich überschreiten.

Zeitraum	überwachte Personen Tausend	exponierte Personen Tausend	mittlere effektive Dosis mSv/a	mittlere eff. Dosis pro exp. Person mSv	kollektive Dosis Sv/a
1979–1979	530	290	1,65	3,0	870
1980–1984	690	300	1,35	3,2	940
1985–1989	560	250	0,90	2,0	510

Tab. 33: Weltweite berufliche Strahlenexposition, industrielle Strahlenanwendung außerhalb des Kernbrennstoffkreislaufs

### 3.2.3 Erhöhte natürliche Strahlenexposition im Beruf

Der Kohleabbau bedingt eine Freisetzung von Radon. Bergarbeiter sind daher infolge der Inhalation von Radon und Folgeprodukten einer berufsbedingten erhöhten natürlichen Exposition ausgesetzt. Messungen lassen den Schluß zu, daß im weltweiten Durchschnitt die effektive Dosis der Bergleute etwa 0,9 mSv pro Jahr beträgt und sich die kollektive effektive Dosis - bezogen auf den erforderlichen Kohleabbau zur Erzeugung einer elektrischen Energie von 1 Gigawattjahr - zu 8,5 Personen-Sievert ergibt. Da die globale Stromerzeugung aus Kohle rund 400 GWh beträgt, ergibt sich pro Jahr der Tätigkeit weltweit eine kollektive effektive Dosis für die Kohlebergleute von 3 400 Personen-Sievert. Der Dosisbeitrag durch andere bergbauliche Tätigkeiten, ausgenommen Uranbergbau, wird - ebenfalls infolge der Exposition durch Radon und Radonfolgeprodukte - weltweit auf 4 100 Personen-Sievert geschätzt.

Die Strahlenexposition des fliegenden Personals berechnet sich auf der Basis von US-Daten (115 000 Personen, mittlere effektive Dosis 3,5 mSv pro Jahr) und Lufthansa-Berechnungen (12 000 Personen, mittlere effektive Dosis 2,5 mSv pro Jahr) weltweit zu einer kollektiven Dosis von 800 Personen-Sievert. Die Aufbereitung des Phosphatgesteins zur Düngemittelherstellung ist für die Arbeitskräfte mit einer externen Exposition und einer möglichen Inhalationsdosis verbunden. Nach deutschen Messungen beträgt die Individualdosis 0,2 mSv pro Jahr, holländische Daten ergeben bis zu 2,2 mSv pro Jahr. Für die Arbeiter wird weltweit pro Jahr der Tätigkeit in diesem Industriezweig die kollektive effektive Folgedosis auf 20 Personen-Sievert abgeschätzt. Der berufliche Umgang mit Phosphatdünger führt bei Transport, Lagerung und Ausbringung des Düngers zu zusätzlicher externer Bestrahlung. Werte von 20 bis 800 Nanosievert pro Stunde wurden gemessen. Zum Vergleich: Die mittlere terrestrische Dosisleistung im Freien beträgt 60 Nanosievert pro Stunde. Eine grobe Abschätzung aus diesen Werten führt weltweit jährlich zu einer kollektive effektive Folgedosis von 50 Personen-Sievert.

### 3.3 Zusammenfassung: Berufsbedingte Strahlenexposition

In Tab. 34 sind alle berufsbedingten Strahlenexpositionen - Kerntechnik, Verteidigung, Industrie, Medizin und erhöhte natürliche Strahlendosis im Beruf - zusammengefaßt. Der bei weitem größte Anteil der gesamten jährlichen Kollektivdosis von 13 000 Personen-Sievert ergibt sich aus allen Bergbautätigkeiten mit insge-

samt 8 600 Personen-Sievert, davon 1 100 Personen-Sievert aus dem Uranbergbau. Der Beitrag aus den Bereichen Reaktorbetrieb, Medizin und Flugverkehr trägt mit jeweils rund 1 000 Personen-Sievert bei.

Tätigkeit	überwachte/ tätige Personen Tausend	mittlere effektive Dosis mSv/a	kollektive Dosis Sv/a
<b>Kernbrennstoffkreislauf</b>			
Bergbau, Erzaufbereitung	278	4,4	1 220
Anreicherung, BE-Herstellung	33	0,7	22
Reaktorbetrieb	430	2,5	1 100
Wiederaufarbeitung (oxidische BE)	4	1,4	6
Forschung	130	0,8	100
<b>1. Zwischensumme</b>	<b>875</b>	<b>2,8</b>	<b>2 450</b>
<b>Verteidigung</b>	<b>380</b>	<b>0,7</b>	<b>250</b>
<b>Industrie</b>	<b>560</b>	<b>0,9</b>	<b>510</b>
<b>Medizin</b>	<b>2 200</b>	<b>0,5</b>	<b>1 000</b>
<b>2. Zwischensumme</b>	<b>3 140</b>	<b>0,6</b>	<b>1 760</b>
<b>natürliche berufliche Strahlenexposition</b>			
Kohlebergbau	3 900	0,9	3 400
sonstiger Bergbau	700	6	4 100
fliegendes Personal	250	3	800
sonstige Tätigkeiten	300	1	300
<b>3. Zwischensumme</b>	<b>5 200</b>	<b>1,7</b>	<b>8 600</b>
<b>SUMME</b>	<b>9 200</b>	<b>1,4</b>	<b>13 000</b>

Tab. 34: Weltweite berufliche Strahlenexposition, 1985-1989

## 4 ZUSAMMENFASSUNG: STRAHLENEXPOSITION DES MENSCHEN

### 4.1 Natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung

Die natürliche Strahlenexposition des Menschen setzt sich aus der externen Exposition durch die kosmische und terrestrische Strahlung und der internen Exposition durch inkorporierte Radionuklide zusammen. Für die Gegebenheiten in Deutschland ergeben sich dabei folgende mittleren jährlichen Werte der effektiven Dosis:

- kosmische Strahlung: 0,3 mSv pro Jahr  
  in Meereshöhe: 0,27 mSv pro Jahr  
  in 1 000 m Höhe: 0,38 mSv pro Jahr
- terrestrische Strahlung: 0,4 mSv pro Jahr  
  im Freien: 0,32 mSv pro Jahr  
  in Häusern: 0,43 mSv pro Jahr
- inkorporierte Radionuklide: 1,7 mSv pro Jahr  
  Radon und seine Folgeprodukte: 1,4 mSv pro Jahr  
  Kalium-40: 0,18 mSv pro Jahr  
  Uran-238, Thorium-232 und andere: 0,12 mSv pro Jahr

Die gesamte mittlere effektive Dosis durch die natürliche Strahlenexposition beträgt in Deutschland 2,4 mSv pro Jahr. Die große Variation der terrestrischen Komponente und insbesondere der Exposition durch Radon und seine Folgeprodukte führt zu lokal/regional großen Unterschieden der Dosis, typischerweise im Bereich von 1 bis 10 mSv pro Jahr.

#### 4.2 Zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung

Die zivilisatorische Strahlenexposition wird fast ausschließlich durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin – überwiegend durch die Röntgendiagnostik – bestimmt. Weitere Beiträge stammen von nuklearen Unfällen, Kernwaffentests, Flugreisen, beruflicher Strahlenexposition, Kernkraftwerken, fossilen Energieträgern und Industrieprodukten. Für Deutschland ergeben durch die zivilisatorische Strahlenexposition pro Einwohner folgende Werte der mittleren effektiven Dosis:

- Medizin 2,0 mSv pro Jahr,
- Tschernobyl 0,010 mSv pro Jahr,
- Kernwaffentests 0,005 mSv pro Jahr,
- Flugreisen 0,005 mSv pro Jahr,
- fossile Energieträger 0,002 mSv pro Jahr,
- Kernkraftwerke 0,001 mSv pro Jahr,
- Industrieprodukte 0,001 mSv pro Jahr.

Weltweit ergeben sich für die Bevölkerung aus Flugreisen, den nuklearen und nicht-nuklearen industriellen Tätigkeiten und der Medizin die in Tab. 35 zusammengestellten Strahlenexpositionen. Angegeben ist die Gesamtdosis bezogen auf ein Jahr der Nutzung im heutigen Umfang. Auch wenn die Daten für die Dosisbeiträge durch Kohlenutzung im häuslichen Bereich und insbesondere den Einsatz von Phosphatgips im Hausbau aufgrund der Modellberechnung nicht exakt abgesichert sind, so beträgt dennoch die zivilisationsbedingte Gesamtdosis aus allen technischen Bereichen einschließlich der Kerntechnik nur rund 2 % der jährlichen natürlichen Strahlenexposition.

Tätigkeit	effektive Folgedosis pro Jahr der Tätigkeit Personen-Sv
Flugreisen	10 000
Stromerzeugung Kernenergie Kohle	3 000 8 000
Kohle im häuslichen Bereich und industrielle Aschenutzung	50 000 bis 90 000
Phosphatdünger, Phosphatgips	70 000 bis 300 000
Medizin	1 600 000
Summe	1 800 000
zum Vergleich: Natur	13 200 000

Tab. 35: Strahlenexposition der Weltbevölkerung (UNSCEAR 1993)



#### 4.3 Berufliche Strahlenexposition

Nach Berechnungen von UNSCEAR sind weltweit etwa 4 Millionen Menschen als beruflich strahlenexponierte Personen eingestuft, mehr als die Hälfte davon im medizinischen Bereich. Die jährliche Gesamtdosis dieses Personenkreises beträgt rund 4 200 Personen-Sievert, das entspricht einer mittleren Individualdosis von etwa 1 mSv pro Jahr. Daneben sind weitere 5,2 Millionen Personen (Bergleute, Flugzeugbesatzungen) durch ihren Beruf einer erhöhten natürlichen Strahlenexposition ausgesetzt. Die Kollektivdosis dieses Personenkreises beträgt rund 8 600 Personen-Sievert, entsprechend einer mittleren Strahlenexposition von 1,7 mSv pro Jahr (siehe Tab. 36).

Tätigkeit	überwachte/ tätige Personen Tausend	mittlere effektive Dosis mSv/a	kollektive Dosis Sv/a
<b>zivilisat. berufl. Strahlenexposition</b>			
Kernbrennstoffkreislauf	875	2,8	2 450
Verteidigung	380	0,7	250
Industrie	560	0,9	510
Medizin	2 200	0,5	1 000
<i>1. Zwischensumme</i>	4 015	1,3	4 210
<b>natürliche berufl. Strahlenexposition</b>			
Bergbau	4 600	1,6	7 500
fliegendes Personal	250	3	800
sonstige Tätigkeiten	300	1	300
<i>2. Zwischensumme</i>	5 200	1,7	8 600
<b>SUMME</b>	9 200	1,4	13 000

Tab. 36: Weltweite berufliche Strahlenexposition, 1985-1989 (UNSCEAR 1993)

#### 4.4 Gesamte Strahlenexposition

Die effektive Dosis aus allen natürlichen und künstlichen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel rund 4,5 mSv im Jahr (Tab. 37, Abb. 20). Diese Dosis stammt zu 55 % aus der natürlichen Strahlenexposition und zu knapp 45 % aus der medizinischen Exposition durch die Röntgendiagnostik. Gegenüber den Beiträgen zur Strahlendosis durch natürliche Exposition und Medizin und insbesondere unter Berücksichtigung der nicht unerheblichen Streuung dieser Dosiswerte sind alle anderen Dosisbeiträge faktisch zu vernachlässigen. Entsprechende Werte der Strahlenexposition für die Schweiz, USA und Großbritannien enthalten Abb. 21, Abb. 22 und Abb. 23.

Die Kollektivdosis der Weltbevölkerung bei einer Fortsetzung der Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe im heutigen Umfang für weitere 50 Jahre beträgt in diesem 50-Jahre-Zeitraum rund  $200 \cdot 10^6$  Personen-Sievert. Diese Dosis stammt überwiegend aus der Anwendung ionisierender Strahlung in der Medizin (Tab. 38).

Ursache der Strahlendosis	effektive Dosis in mSv/Jahr	
	Mittelwert für die Bevölkerung	typ. Wertebereich für exponierte Einzelpersonen
Natur		
kosmische Strahlung	0,3	0,3 bis 0,5
terrestrische Strahlung	0,4	0,2 bis 3
innere Bestrahlung	1,7	0,5 bis 8
Natur gesamt	2,4	1 bis 10
Zivilisation		
Medizin	2,0	0,1 bis 20
Erhöhung der natürlichen Dosis durch industrielle Tätigkeit	0,01	0,1 bis 2
Tschernobyl-Unfall	0,01	0,005 bis 0,04
Kernwaffentests	0,005	0,002 bis 0,01
Flugreisen	0,005	0,01 bis 5
Beruf	0,002	0,5 bis 5
fossile Energieträger	0,002	0,001 bis 0,01
Kernkraftwerke	0,001	0,001 bis 0,01
Industrieprodukte	0,001	0,1 bis 2
Zivilisation gesamt	2,1	0,1 bis 20
gesamt	4,5	

Tab. 37: Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland

Quelle	Annahmen	kollektive Dosis $10^6$ Sv
Natur	wie heute für weitere 50 a	650
Medizin	wie heute für weitere 50 a	165
Kernwaffentests	keine weiteren Tests	30
Kerntechnik	1945 bis 1992 wie heute für weitere 50 a	0,5 2
Unfälle	1945 bis 1992	0,6
berufliche Exposition	wie heute für weitere 50 a	0,6

Tab. 38: Kollektive Folgedosis der Weltbevölkerung bei Fortsetzung der heutigen Tätigkeiten über 50 Jahre oder durch die Ereignisse von 1945 bis 1992

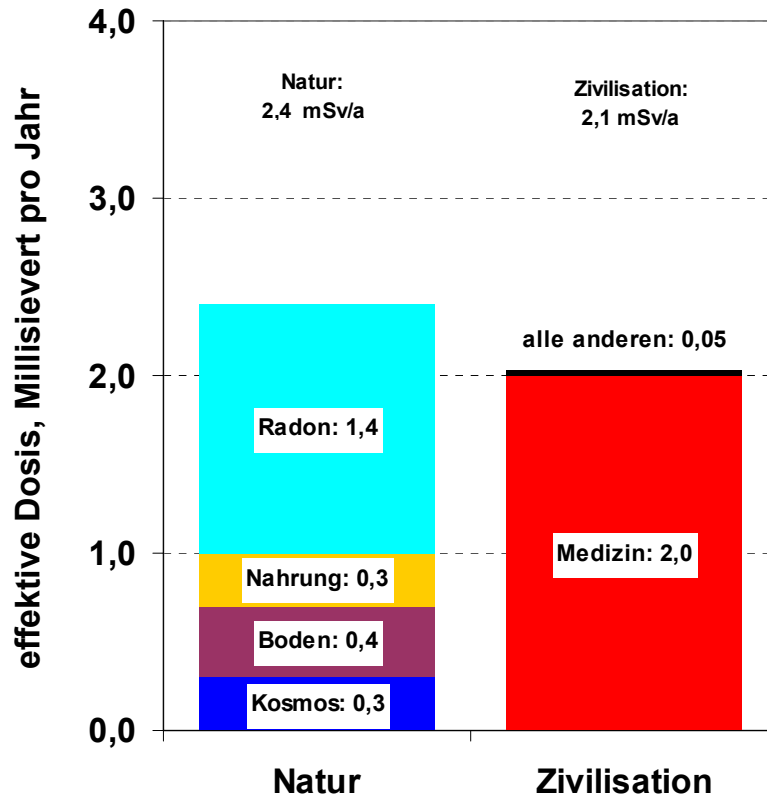


Abb. 20: Mittlere natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition in Deutschland

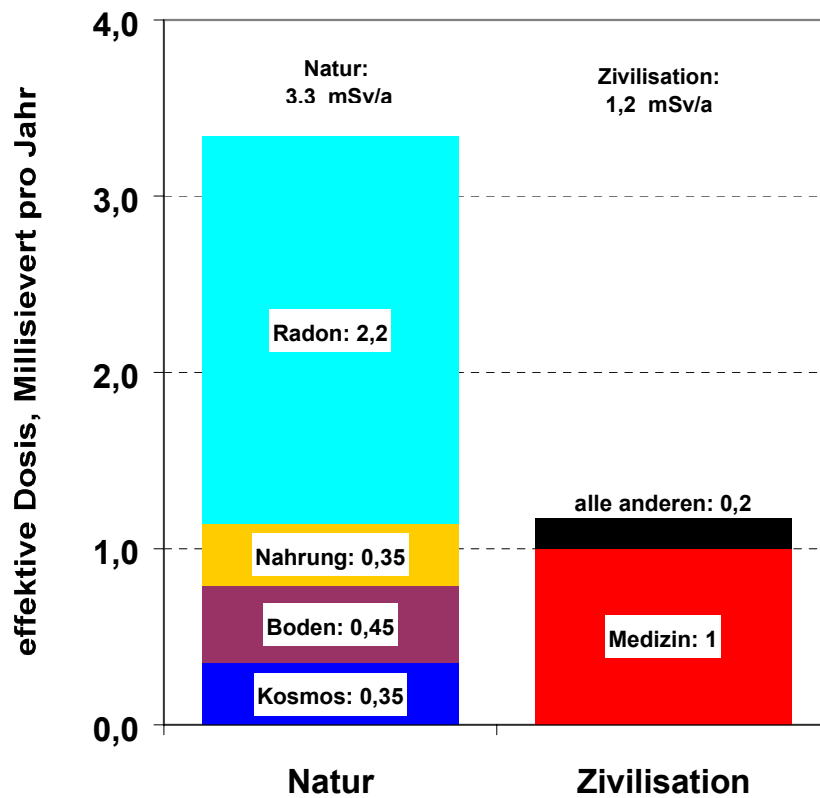


Abb. 21: Mittlere natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition in der Schweiz

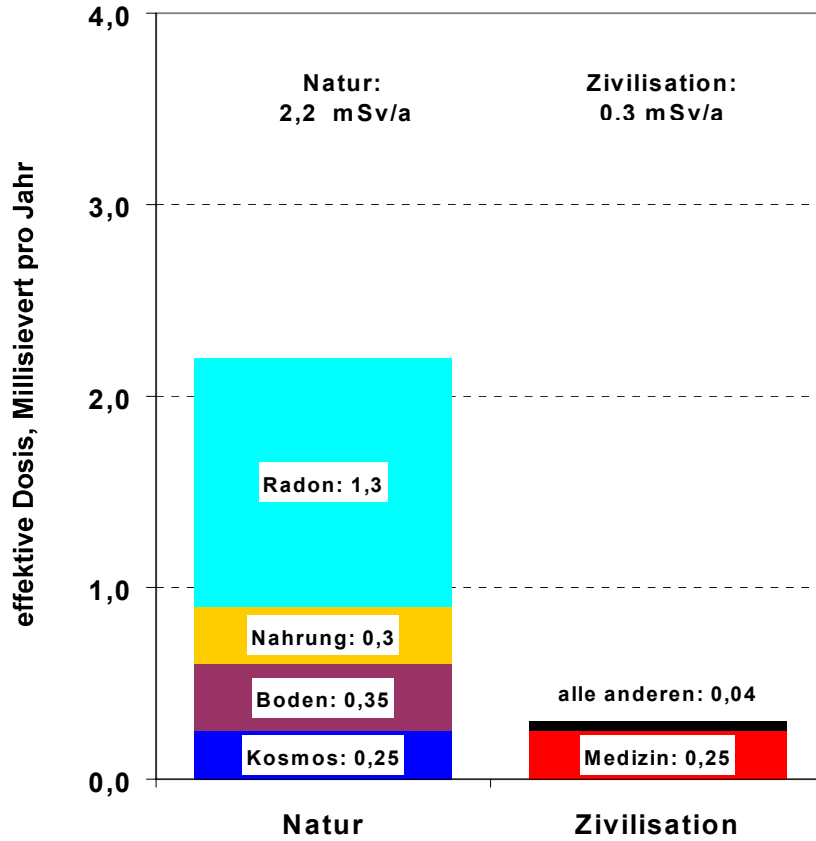


Abb. 22: Mittlere natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition in Großbritannien

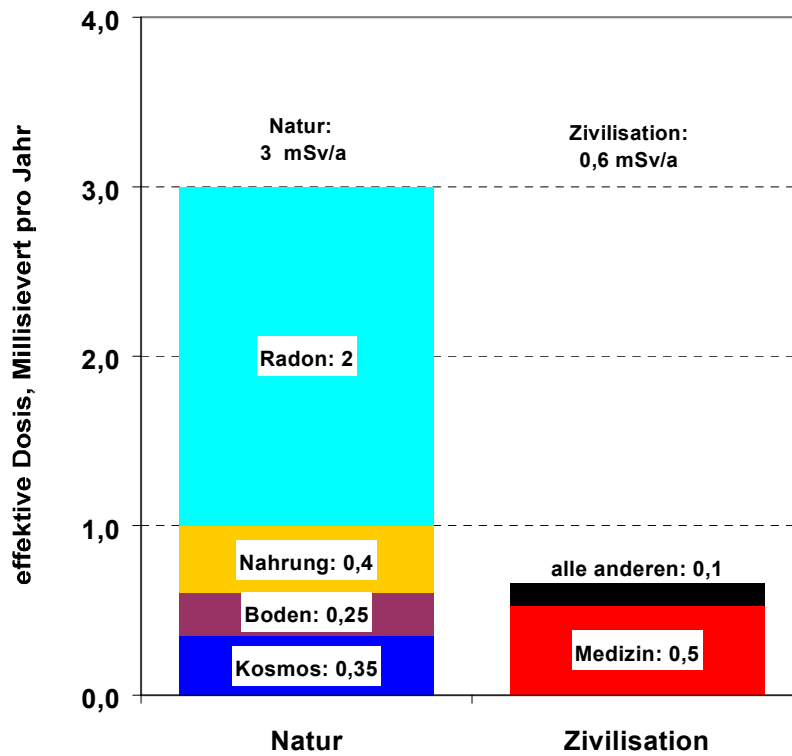


Abb. 23: Mittlere natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition in den USA

## 5 LITERATUR

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation;  
Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (UNSCEAR 1988),  
United Nations, New York, 1988

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation;  
Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (UNSCEAR 1993),  
United Nations, New York, 1993

Ladislaus Rybach, Georg F. Schwarz, Fausto Medici, Construction of radioelement and dose-rate baseline maps by combining ground and airborne radiometric data, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Eidgenössische Technische Hochschule

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1994,  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1995

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1995,  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1996

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1996,  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1997

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1997,  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1998

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1998,  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1999

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1999,  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2000