

Unterrichtung

durch die Bundesregierung

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2000

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Auftrag und Zusammenfassung	5
1. Auftrag	5
2. Zusammenfassung	5
II. Natürliche Strahlenexposition	7
III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition	7
1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten	7
2. Radon in Wohngebäuden	9
3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus	11
3.1 Umgebungsüberwachung an den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH	11
3.2 Ermittlung der aus bergbaulicher Tätigkeit stammenden Umweltradioaktivität	11
4. Berufliche Strahlenexposition durch Radonzerfallsprodukte	13
5. Strahlenexposition des Flugpersonals	13
IV. Zivilisatorische Strahlenexposition	13
1. Kerntechnische Anlagen	13
1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen	13
1.2 Jahresableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen	14
1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kern- technischer Anlagen	14
2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin	20
2.1 Röntgendiagnostik	21
2.2 Nuklearmedizinische Diagnostik	21
2.3 Therapie mit ionisierender Strahlung	22

	Seite
2.4 Therapie mit offenen radioaktiven Stoffen	22
2.5 Bewertung der medizinischen Strahlenexposition	23
3. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt	24
3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen	24
3.2 Störstrahler	24
4. Berufliche Tätigkeit	24
4.1 Personendosisüberwachung	24
4.2 Inkorporationsüberwachung	25
5. Besondere Vorkommnisse	25
6. Fall-out von Kernwaffenversuchen	25
V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl	39
Anhang A Messgrößen der Umweltradioaktivität und der Strahlenbelastung	40
Anhang B Erläuterung der benutzten Fachausdrücke	41
Anhang C Strahlendosis und Strahlenwirkung	43

		Seite
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen		
Abbildung I.1	Mittlere effektive Jahresdosis durch ionisierende Strahlung im Jahr 2000 (Gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands)	6
Abbildung I.2	Mittlere Jahres-Personendosis strahlenexponierter Personen in Deutschland im Jahr 2000 in bestimmten Tätigkeitsbereichen	6
Abbildung II.1	Mittlere externe Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland im Freien 2000	8
Tabelle III.1	Radonkonzentration in der Bodenluft und in Gebäuden Deutschlands	9
Abbildung III.1	Übersichtskarte der Radonkonzentration in der Bodenluft ..	10
Abbildung III.2	Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Abwettern bzw. der Abluft in die Atmosphäre im Jahr 2000	12
Abbildung III.3	Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Schacht- bzw. Abwässern in die Oberflächengewässer im Jahr 2000	12
Abbildung IV.1	Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 2000 – Aerosole und Jod-131	15
Abbildung IV.2	Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 2000 – $^{14}\text{CO}_2$, Tritium und Edelgase	15
Abbildung IV.3	Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken im Jahr 2000 – Alphastrahler, Summenwerte und Tritium	16
Abbildung IV.4	Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren im Jahr 2000 – Aerosole, Jod-131 und Jod-129, $^{14}\text{CO}_2$, Tritium und Edelgase	16
Abbildung IV.5	Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Forschungszentren im Jahr 2000 – Alphastrahler, Summenwerte und Tritium	17
Abbildung IV.6	Ableitung radioaktiver Stoffe (Alphaaktivität) mit Abluft und Abwasser aus Kernbrennstoff verarbeitenden Betrieben im Jahr 2000	17
Abbildung IV.7	Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft	18
Abbildung IV.8	Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser	19
Abbildung IV.9	Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Forschungszentren durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft	19
Abbildung IV.10	Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Kernbrennstoff verarbeitenden Betrieben durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft	20
Abbildung IV.11	Vergleich der Häufigkeiten von Röntgenuntersuchungen 1994 und 1997 – Medizinische Röntgenuntersuchungen für die ambulante und stationäre Patientenversorgung, einschließlich Zahnmedizin	23
Abbildung IV.12	Prozentualer Anteil der Röntgenuntersuchungen und ihr Anteil an der kollektiven effektiven Dosis in Deutschland für 1997	24

	Seite	
Abbildung IV.13	Prozentualer Anteil der nuklearmedizinischen Untersuchungen und ihr Anteil an der kollektiven effektiven Dosis in Deutschland für 1997	25
Abbildung IV.14	Mit Personendosimetern überwachte Personen in Deutschland (ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer)	26
Abbildung IV.15	Häufigkeitsverteilung der Personendosen beruflich Strahlenexponierter im Jahr 2000	26
Abbildung IV.16	Entwicklung der jährlichen Kollektivdosis und Verteilung auf Strahlenanwendungsbereiche (ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer)	27
Abbildung IV.17	Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken	27
Abbildung IV.18	Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken	28
Tabelle IV.1	Grenznahe kerntechnische Anlagen im benachbarten Ausland	28
Tabelle IV.2	Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser aus dem Endlager Morsleben im Jahr 2000	29
Tabelle IV.3	Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen im Jahr 1997 in Deutschland (82,05 Mio. Einwohner)	29
Tabelle IV.4	Bereiche mittlerer Werte für die effektive Dosis für häufige Röntgenuntersuchungen an Standardpatienten 70 ± 5 kg Körpergewicht	30
Tabelle IV.5	Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe	31

I. Auftrag und Zusammenfassung

1. Auftrag

Das Strahlenschutzvorsorgegesetz vom 19. Dezember 1986 (BGBl. I S. 2610), zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes vom 24. Juni 1994 (BGBl. I S. 1416), sieht die jährliche Berichterstattung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit an den Deutschen Bundestag und den Bundesrat über die Entwicklung der Radioaktivität in der Umwelt vor. Der vorliegende Bericht enthält die Daten aus dem Jahr 2000. Er umfasst die wichtigsten Informationen und Änderungen im Bereich der Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung gegenüber den Vorjahren. Ausführlicheres Datenmaterial wird jeweils in den Jahresberichten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit über „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ wiedergegeben.

2. Zusammenfassung

Der Bericht behandelt

- die natürliche Strahlenexposition
- die zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition
- die zivilisatorische Strahlenexposition
- die Strahlenexposition durch den Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl.

Abbildung I.1, S. 6, gibt einen Überblick über die mittlere effektive Jahresdosis dieser vier Bereiche.

Die natürliche Strahlenexposition setzt sich aus der kosmischen und der terrestrischen Komponente sowie aus der Exposition durch die Aufnahme (Ingestion und Inhalation) natürlich radioaktiver Stoffe in den Körper zusammen (siehe Abbildung I.1).

Veränderungen der Umwelt des Menschen durch technische Entwicklungen, die eine unbeabsichtigte Anreicherung natürlich radioaktiver Stoffe zur Folge haben, führen zu einer zivilisatorisch bedingten Erhöhung der natürlichen Strahlenexposition. Insbesondere Radon in Gebäuden und natürlich radioaktive Stoffe aus Bergbau- und Verarbeitungsprozessen können zur Erhöhung beitragen.

Die zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung resultiert aus Beiträgen kerntechnischer Anlagen, aus der Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in Medizin, Forschung, Technik und Haushalt sowie aus dem Fall-out von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre. Der Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl, der am 26. April 1986 stattfand, verursachte auch im Jahr 2000 noch eine geringfügige Erhöhung der zivilisatorischen Strahlenexposition. Dies wird in einem gesonderten Kapitel behandelt.

Die Daten der beruflichen Strahlenexposition (siehe Abbildung I.2, S. 6) werden entsprechend ihrer Ursache in den jeweiligen Kapiteln (III oder IV) aufgeführt.

Einzelergebnisse für das gesamte Bundesgebiet im Jahr 2000 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Natürliche Strahlenexposition

Die effektive Dosis der natürlichen Strahlenexposition betrug im Mittel ca. 1,2 mSv pro Jahr. Neben der direkten kosmischen Komponente von 0,3 mSv und der direkten terrestrischen Komponente von 0,4 mSv trägt die Aufnahme natürlich radioaktiver Stoffe mit der Nahrung 0,3 mSv zur Strahlenexposition bei. Auch ein Teil der Exposition durch die radioaktiven Edelgase Radon (Rn-222) und Thoron (Rn-220) und ihre kurzlebigen Folgeprodukte von etwa 0,2 mSv ist unvermeidbar und deshalb nicht zivilisatorisch bedingt.

Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

Radon- und Thoronzerfallsprodukte liefern über Inhalation den Hauptbeitrag zum zivilisatorisch erhöhten Teil der natürlichen Strahlenexposition mit einer durchschnittlichen effektiven Dosis von etwa 0,9 mSv pro Jahr.

Die wesentlichen beruflichen Bereiche, in denen die natürliche Strahlenexposition zivilisatorisch erhöht ist, sind die Exposition des Flugpersonals durch Höhenstrahlung und die Exposition durch Radonfolgeprodukte an Arbeitsplätzen.

Zivilisatorische Strahlenexposition

Die effektive Dosis der zivilisatorischen Strahlenexposition lag bei ca. 2 mSv pro Einwohner und Jahr. Der größte Beitrag wurde durch die Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin, insbesondere durch die Röntgendiagnostik, verursacht. Diese Strahlenexposition betrifft vor allem ältere Menschen, bei denen das Strahlenrisiko geringer und die medizinische Untersuchung von großer Bedeutung für die Verbesserung des Gesundheitszustandes ist.

Der Beitrag der Strahlenexposition durch Atomkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung blieb auch im Jahr 2000 deutlich unter 1% der zivilisatorischen Strahlenexposition. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe lagen bei allen kerntechnischen Anlagen unterhalb, bei den meisten weit unterhalb der genehmigten Jahreswerte.

Bei der beruflichen Strahlenexposition hat sich der Beitrag gegenüber dem Vorjahr nicht verändert. Die Zahl der beruflich strahlenexponierten Personen betrug im Jahr 2000 ca. 330 000. Die mittlere Jahresdosis der Überwachten mit von Null verschiedenen Jahrespersonendosiswerten (42 064 Personen) beläuft sich auf 1,19 mSv.

Der Anteil an der effektiven Dosis durch die in den vergangenen Jahrzehnten in der Atmosphäre durchgeführten Kernwaffenversuche ist weiterhin rückläufig. Er betrug 2000 weniger als 0,01 mSv. Seit 1981 wurden keine Kernwaffenversuche mehr in der Atmosphäre durchgeführt.

Abbildung I.1

Mittlere effektive Jahresdosis durch ionisierende Strahlung im Jahr 2000
(Gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands)

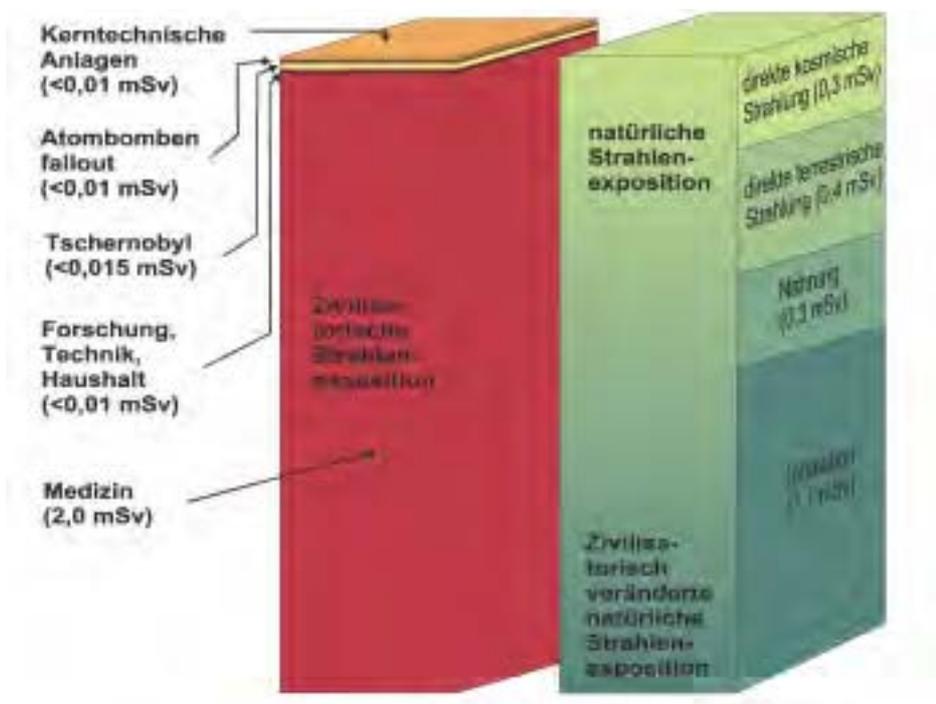
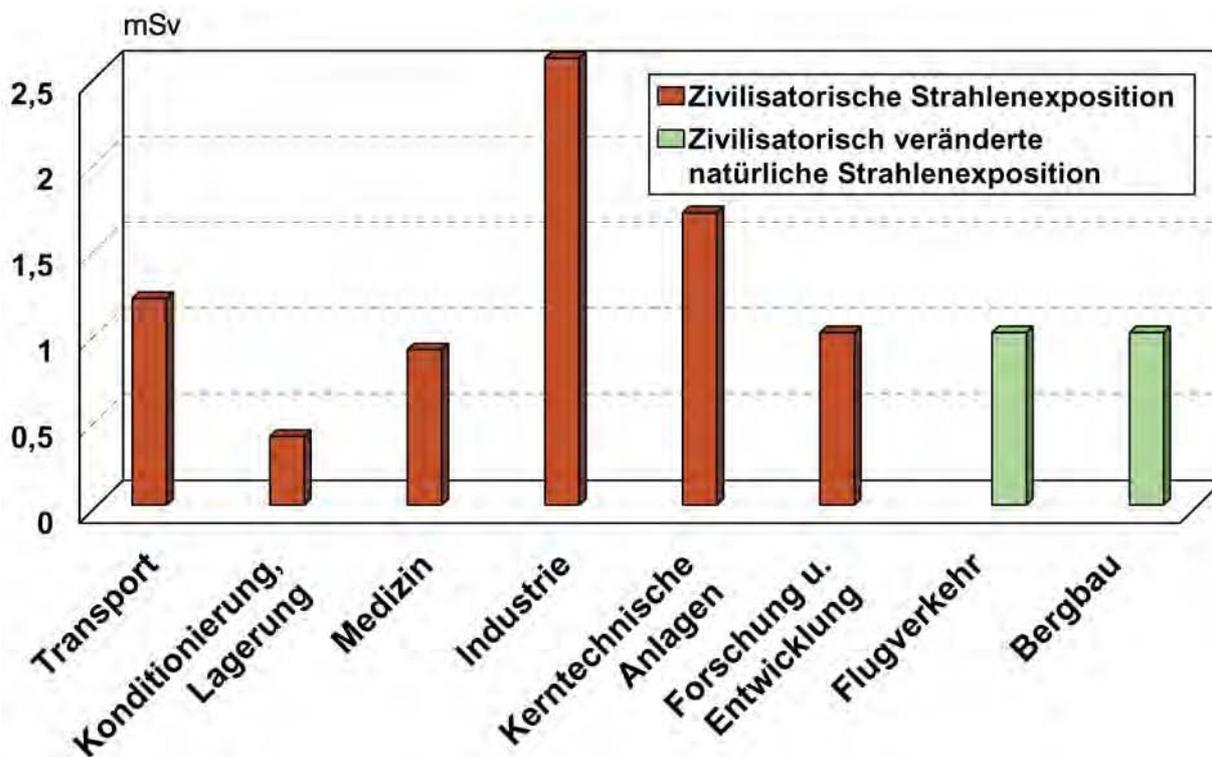


Abbildung I.2

Mittlere Jahres-Personendosis strahlenexponierter Personen in Deutschland im Jahr 2000
in bestimmten Tätigkeitsbereichen



Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl

Die durch den Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl resultierende mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung ging zwar von 0,11 mSv im Jahr 1986 auf weniger als 0,015 mSv im Jahre 2000 zurück, dennoch finden sich in Lebensmitteln aus Waldgebieten vereinzelt noch stark erhöhte Cäsium-137-Werte. Regional treten Expositionen auf, die bis zu einer Größenordnung höher liegen.

Gesamtbewertung

Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung durch die natürliche und die zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition beträgt zusammengenommen zwischen 2 und 3 mSv pro Jahr. Unter Verwendung der in den EURATOM-Grundnormen festgelegten Dosisfaktoren ergibt sich ein nomineller Wert von 2,1 mSv. Bei der zivilisatorischen Strahlenbelastung konnte der Dosisbeitrag durch die Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin im Jahr 2000 auf etwa 2 mSv pro Jahr abgeschätzt werden. Die Beiträge der anderen Strahlenquellen sind sehr gering. Eine Abschätzung der Gesamtexposition ist mit dem im Vorjahr ermittelten Wert von etwa 4,5 mSv verträglich.

II. Natürliche Strahlenexposition

Je nach Höhenlage des Aufenthaltsortes und der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes unterliegt die natürliche Strahlenexposition starken Schwankungen.

Die natürliche Strahlenexposition setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, wobei zwischen der äußeren Exposition durch Höhen- und Bodenstrahlung (kosmische und terrestrische Komponente, siehe Anhang Abschnitt B) und der internen Strahlenexposition durch Inkorporation radioaktiver Stoffe über Inhalation und Ingestion unterschieden wird.

Die effektive Dosis aus der äußeren Strahlenexposition beträgt im Mittel 0,7 mSv pro Jahr und wird etwa zu gleichen Teilen durch die kosmische und die terrestrische Strahlung verursacht.

Abbildung II.1, S.8, zeigt die ortsabhängige Verteilung der externen Strahlenexposition im Freien in der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2000.

Die kosmische Komponente der Strahlenexposition entsteht im Wesentlichen durch Gammastrahlung. Für den Aufenthalt in Meereshöhe wird dafür eine effektive Dosis von 0,24 mSv pro Jahr berechnet. Die durch Neutronen (0,03 mSv pro Jahr) und kosmische Radionuklide (0,01 mSv pro Jahr) verursachten Beiträge zur kosmischen Strahlenexposition sind von untergeordneter Bedeutung.

Die terrestrische Komponente der äußeren Strahlenexposition wird im Wesentlichen durch die Gammastrahlung des Kalium-40 sowie durch die Strahlung der Radionuklide aus den natürlichen Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232 verursacht. Im Boden liegt der Gehalt an Kalium-40 im Bereich von 40 bis 1 000 Bq pro Kilo-

gramm Trockenmasse (TM). Innerhalb der U-238 Zerfallsreihe spielt das Radium-226 die wichtigste Rolle, der Gehalt im Boden liegt in Deutschland zwischen 10 und 200 Bq pro Kilogramm TM, in Ausnahmefällen auch darüber. Der Gehalt an Thorium-232 aus der Thorium-Reihe liegt typischerweise zwischen 8 und 80 Bq pro Kilogramm. Die durch terrestrische Strahlung verursachte effektive Dosis errechnet sich im Mittel zu 0,41 mSv pro Jahr, wobei die effektive Dosis durch Aufenthalt im Freien 0,07 mSv und in Gebäuden 0,34 mSv beträgt. Dabei nimmt man eine Aufenthaltsdauer von 5 Stunden pro Tag im Freien und 19 Stunden in Gebäuden an. Diese Werte leiten sich von einem Wertebereich für die effektive Jahresdosis bei ständigem Aufenthalt im Freien von 0,06 mSv bis 2,2 mSv bzw. bei ständigem Aufenthalt in Gebäuden von 0,09 mSv bis 2,4 mSv ab. Die höheren Werte findet man vor allem über Granitmassiven mit einer erhöhten spezifischen Aktivität der oben genannten Radionuklide.

Die innere Strahlenexposition durch die Inhalation radioaktiver Stoffe bei ständigem Aufenthalt im Freien beträgt ca. 0,2 mSv. Ein weitaus größerer Teil wird durch den Aufenthalt in Häusern verursacht. Er ist zivilisatorisch bedingt und wird im Kapitel III ausführlich behandelt.

Kalium-40 sowie die Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232 werden über Trinkwasser und Nahrung (Ingestion) aufgenommen und rufen eine mittlere effektive Jahresdosis von 0,3 mSv hervor.

Wenn man die Komponenten der effektiven Dosis durch natürliche Strahlenquellen von 0,7 mSv für die äußere Strahlenexposition, 0,3 mSv für die Ingestion und 0,2 mSv für die Inhalation aufsummiert, ergeben sich im Mittel 1,2 mSv pro Jahr.

III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

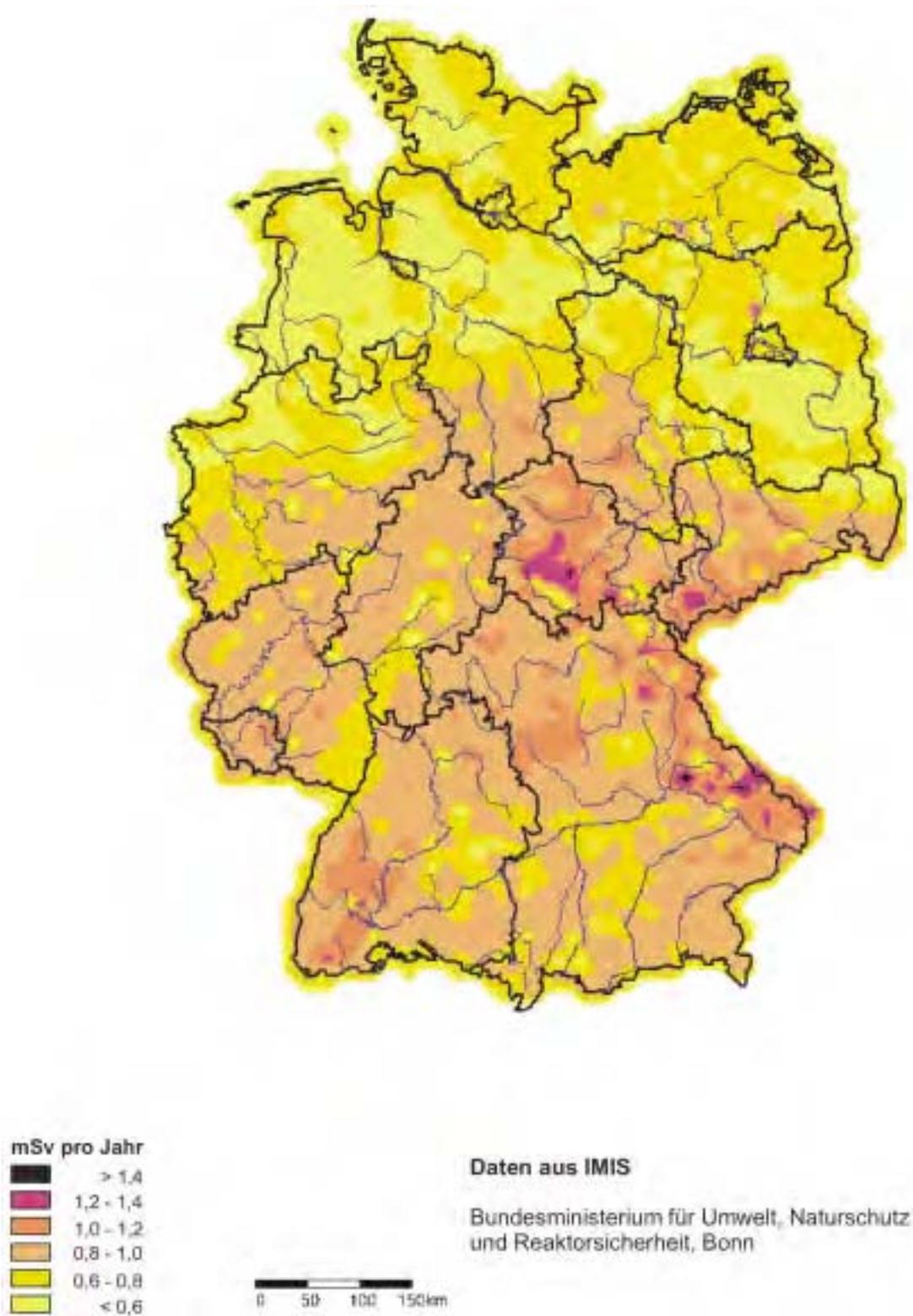
1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten

Zum Schutz der Bevölkerung gegen ionisierende Strahlen werden seit mehr als 20 Jahren in der Bundesrepublik Deutschland Untersuchungen und Bewertungen der Strahlenexposition durch radioaktive Stoffe in Baumaterialien sowie industriellen Rest- und Abfallstoffen durchgeführt. In mehr als 1 500 Proben von Natursteinen, Baustoffen und Industrieprodukten wurden die spezifischen Aktivitäten des Radium-226, Thorium-232 und Kalium-40 bestimmt (s. Tabelle III.1 im Bericht für das Jahr 1999).

Die spezifischen Aktivitäten natürlicher Radionuklide weisen von Material zu Material große Unterschiede auf und zeigen auch innerhalb der Stoffarten eine große Variationsbreite. Unter den Natursteinen besitzen kieselsäurereiche Magmageschiebe, insbesondere Granite, vergleichsweise hohe Konzentrationen an natürlichen Radionukliden.

Abbildung II.1

Mittlere externe Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland im Freien, 2000



Der Mittelwert der von den Baustoffen ausgehenden Gamma-Ortsdosisleistung (ODL) in Gebäuden Deutschlands beträgt rund 80 nSv/h. Werte der ODL über 200 nSv/h sind selten.

Das durch radioaktiven Zerfall aus Radium-226 entstehende Radon-222 ist aus der Sicht des Strahlenschutzes von besonderem Interesse. In den wichtigen in Deutschland verwendeten Baustoffen Beton, Ziegel, Porenbeton und Kalksandstein wurden Radium-226-Konzentrationen gemessen, die in der Regel so gering sind, dass sie nicht die Ursache für Überschreitungen der von der Europäischen Kommission empfohlenen Richtwerte für die Radonkonzentration in Wohnungen darstellen.

In einigen Rückständen aus industriellen Verarbeitungsprozessen haben sich die natürlichen radioaktiven Stoffe angereichert. Bei unkritischer Verwendung dieser Rückstände, z. B. ihrem Einsatz als Sekundärrohstoffe im Bauwesen, können dadurch erhöhte Strahlenexpositionen der Bevölkerung hervorgerufen werden. So wurden z. B. in Häusern, die früher aus Kupferschlackesteinen des Mansfelder Gebietes errichtet worden sind, Werte der ODL bis ca. 700 nSv/h gemessen. Um dies zu vermeiden, wird heute solchen Materialgruppen besondere Aufmerksamkeit gewidmet, vor allem unter dem Aspekt der Nutzung von Rohstoffen aus aller Welt. Bei der überwiegenden Menge mineralischer Rückstände wurden Radionuklidkonzentrationen in dem Niveau gemessen, wie sie auch in konventionellen Baustoffen vorkommen.

In Deutschland wird zunehmend die Verwendungsfähigkeit von Rückständen in der Baustoffindustrie untersucht. Unter Beobachtung der Entwicklungstendenzen in der Baumaterialproduktion und spezieller Gebäudeparameter ist bei Materialien mit einer überdurchschnittlich hohen spezifischen Aktivität radioaktiver Stoffe auf eventuell bestehende Probleme bezüglich des vorsorgenden Strahlenschutzes hinzuweisen. Das Bundesamt für Strahlenschutz wird deshalb vom Deutschen Institut für Bautechnik in das Prüfverfahren der Umweltverträglichkeit von neuen Baustoffen, Bauteilen und Bauarten einbezogen.

In den Mitgliedstaaten der Europäischen Union darf ein Bauprodukt nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn es unter anderem die wesentlichen Anforderungen an Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz erfüllt. In der 1999 von der Europäischen Kommission verabschiedeten Empfehlung „Radiation Protection 112 – Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials“ werden Rahmenbedingungen für die Kontrolle der Radioaktivität von Baumaterialien veröffentlicht.

2. Radon in Wohngebäuden

Bis Ende 2000 wurden in über 50 000 Häusern (ca. 0,3 % des Bestandes an Wohnhäusern) Messungen der Radonkonzentration durchgeführt. Gebäude mit erhöhten Radonkonzentrationen kommen vor allem in Regionen mit geologisch bedingt erhöhter Radonkonzentration in der Bodenluft vor. Sehr hohe Werte wurden in einigen Gebieten gemessen, die durch Bergbau und seine Hinterlassenschaften geprägt sind. Dort ist vor allem Radon aus bergmännischen Auffahrungen zu beachten, das über Klüfte und Risse im Deckgebirge in die Häuser gelangen kann.

Die Radonkonzentration in der Luft im Erdboden ist ein Maß dafür, wieviel Radon im Untergrund zum Eintritt in ein Gebäude zur Verfügung steht. Sie wurde im Rahmen bundesweiter Untersuchungen bisher an insgesamt 1 781 Messorten gemessen und kartographisch dargestellt. Durch eine sich an den geologischen Verhältnissen orientierende Dichte der Messpunkte sind mit den Ergebnissen nun repräsentative Bewertungen großer Gebiete möglich. Trotzdem gibt es Areale, die auf Grund ihrer geologischen Inhomogenität noch nicht ausreichend untersucht wurden. Die in Abb. III.1, S. 10, dargestellte Karte ist deshalb nicht für die Bewertung von einzelnen Gebäudestandorten geeignet, sondern kann ausschließlich orientierenden Zwecken dienen.

Tabelle III.1 zeigt einige statistische Kenngrößen der Radonkonzentration in der Bodenluft und in Gebäuden.

Im Allgemeinen liegt das Verhältnis der Radonkonzentration in der Raumluft zu der in der Bodenluft bei ca. 1 bis

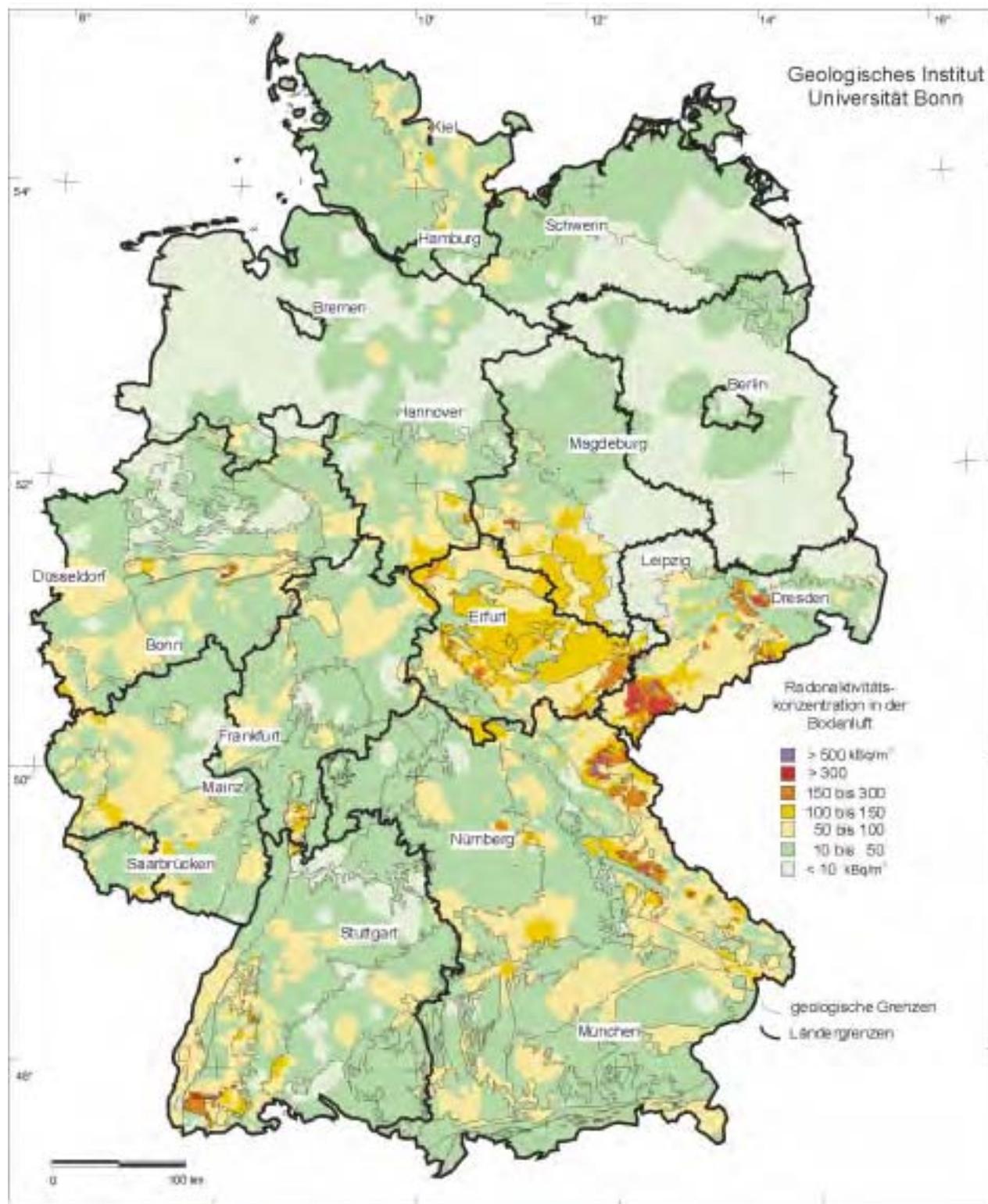
Tabelle III.1

Radonkonzentration in der Bodenluft und in Gebäuden Deutschlands

Messort	Anzahl der Messwerte	Mittelwert	Median	95. Perzentil	99. Perzentil
		in Bq/m ³			
Bodenluft	1 781	36 000	25 000	104 000	154 000
Keller	3 373	91	52	265	679
Erdgeschoss	10 692	53	39	129	292
1. Etage	5 994	43	34	102	177
Höhere Etage	3 182	36	30	78	119

Abbildung III.1

Übersichtskarte der Radonkonzentration in der Bodenluft



5%. Das heißt bei einer Aktivitätskonzentration von 100 kBq/m³ in der Bodenluft können Werte im Bereich von 100 bis 500 Bq/m³ in der Raumluft des Gebäudes erwartet werden. Die große Spannweite beruht darauf, dass die Radonkonzentration der Raumluft entscheidend von der Ankopplung der Gebäude an den Baugrund, also von der Gründungstiefe, Isolation der Häuser, Bauweise und dem Alter der Gebäude abhängt. Darüber hinaus spielen auch die Nutzung der Räume und das Lüftungsverhalten der Bewohner eine Rolle.

Die Situation in den durch erhöhte Radonkonzentrationen in der Bodenluft charakterisierten Gebieten soll in den nächsten Jahren durch zielgerichtete Radonmessungen in Häusern weiter untersucht und schließlich gemeindebezogen bewertet werden. In einzelnen bekannten Gebieten mit besonders hohen Radonkonzentrationen im Boden und in bestehenden Häusern sollten allerdings bereits jetzt vorsorglich besondere Radon Schutzmaßnahmen beim Neubau erwogen werden.

3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus

3.1 Umgebungsüberwachung an den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH

Die Sanierungsbetriebe der Wismut GmbH ermitteln unter Kontrolle der zuständigen Landesbehörden die Ableitungen radioaktiver Stoffe und die durch die bergbaulichen Tätigkeiten insgesamt verursachte radioaktive Kontamination der Betriebsflächen und des Umlandes. Für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abwässern und Abwettern wurden durch die zuständigen Landesbehörden Genehmigungswerte festgelegt.

Die für das Jahr 2000 ermittelten Werte der Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abwässern und Abluft bzw. Abwettern zeigen, dass die festgelegten Genehmigungswerte für radioaktive Stoffe eingehalten wurden (Abbildungen III.2 und III.3, S. 12.).

Wie die Überwachungsmessungen in der Umgebung der Sanierungsbetriebe zeigten, führte die Ableitung von Uran und Radium-226 mit den Abwässern in den großen Vorflutern der Bergbaugebiete (Elbe, Mulde, Weiße Elster und Pleiße) wie schon in den Vorjahren zu keinen oder nur geringfügigen Konzentrationserhöhungen der Uran- und Radium-226-Aktivitätskonzentrationen gegenüber dem natürlichen, bergbaulich unbeeinflussten Niveau. Dagegen treten aufgrund der geringeren Abflussmenge in den unmittelbar von Ableitungen betroffenen kleineren Zuflüssen zu den o. a. Gewässern Uran- und Radium-226-Konzentrationen auf, die im Vergleich zum natürlichen Niveau deutlich erhöht sind. Das Wasser dieser Gewässer wird jedoch nicht zu Trinkwasserzwecken genutzt.

Auch bei den Ableitungen von Radon-222 aus Abwitterschächten und Wetterbohrlöchern ergaben sich keine Überschreitungen der Genehmigungswerte. Im Vergleich zu den Vorjahren wurden diese Ableitungen weiter ver-

ringert. Auf Betriebsflächen und in der unmittelbaren Nähe von Abwitterschächten, industriellen Absetzanlagen und einigen großflächigen Halden wurden insbesondere bei ungünstigen atmosphärischen Bedingungen (z. B. Inversion in Tallagen) Spitzenwerte bis zu 500 Bq/m³ Radon-222 festgestellt. Wie durch Messungen und Modellrechnungen nachgewiesen wurde, liegen in Entfernungen von meist einigen hundert Metern, höchstens aber einigen Kilometern von diesen Objekten die Werte der Radonkonzentration bereits wieder in der für das Gebiet typischen Spannweite von 25 bis 80 Bq/m³. Vergleichbare Werte wurden in bergbaufreien Gebieten im Süden der neuen Bundesländer festgestellt, die ähnliche geologische Verhältnisse wie die Bergbauregionen aufweisen.

3.2 Ermittlung der aus bergbaulicher Tätigkeit stammenden Umweltradioaktivität

Nach § 11 Abs. 8 des Strahlenschutzvorsorgegesetzes obliegt dem Bund im Bereich der neuen Bundesländer die Ermittlung der Umweltradioaktivität aus bergbaulicher Tätigkeit in Gegenwart natürlicher radioaktiver Stoffe. Das für die Aufgabe zuständige Bundesamt für Strahlenschutz hat hierzu von 1991 bis 1999 das Projekt „Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten (Altlastenkataster)“ durchgeführt. Mit dem Projekt wurden die Hinterlassenschaften des Altbergbaus und diejenigen Hinterlassenschaften des Uranbergbaus, die sich nicht mehr im Besitz der Wismut GmbH befinden, systematisch untersucht und bewertet.

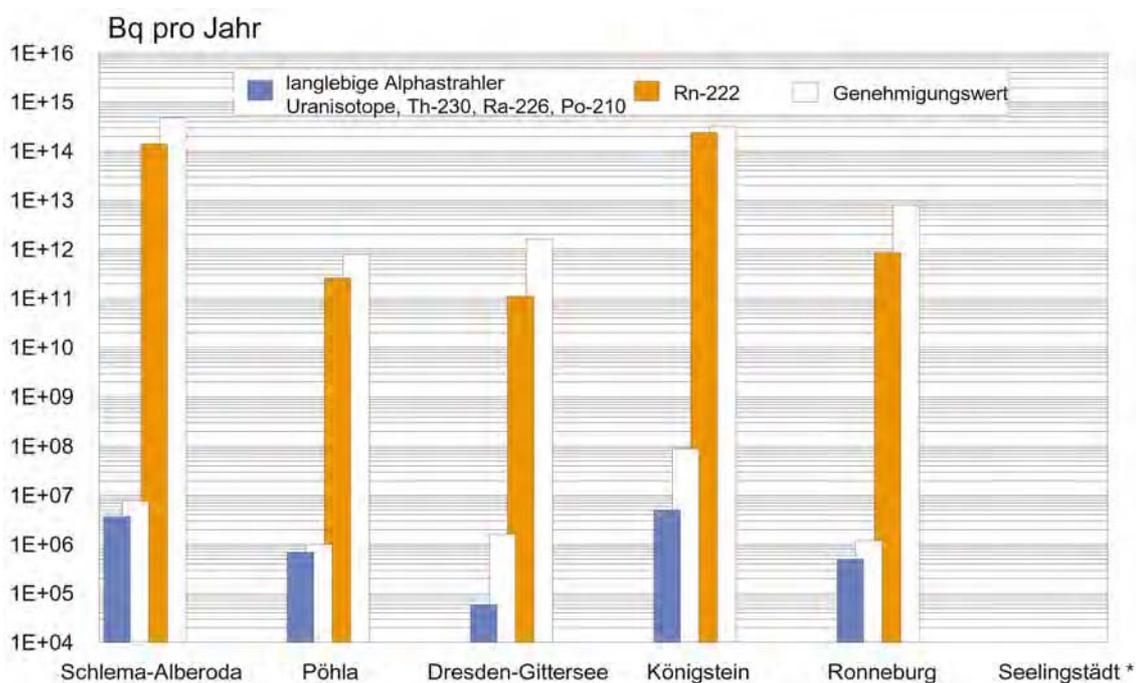
Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeiten, in die ca. 8 000 bergbauliche Objekte und Flächen in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt einbezogen waren, haben wesentlich zur Klärung der Strahlenschutzsituation in den betroffenen Bergbauregionen beigetragen. Die für den Strahlenschutz zuständigen Landesbehörden wurden bereits während der Laufzeit des Projektes über wichtige Ergebnisse unterrichtet. Ein Beispiel sind Informationen über mögliche Expositionsschwerpunkte, die umgehend weitergeleitet wurden, damit erforderlichenfalls kurzfristige Schutzmaßnahmen eingeleitet werden konnten.

Im Ergebnis des Projektes hat sich gezeigt, dass die untersuchten Verdachtsflächen zum weitaus überwiegenden Teil frei von bergbaubedingter radioaktiver Kontamination sind. Von den untersuchten bergbaulichen Objekten, in der Mehrzahl handelt es sich um Halden, müssen lediglich für ca. 20% Sanierungsmaßnahmen oder Nutzungseinschränkungen erwogen werden. Die Entscheidung hierüber muss für jeden Einzelfall auf der Grundlage standortspezifischer Untersuchungen und Expositionspfadanalysen getroffen werden. Die im Projekt gewonnenen Daten und Informationen sind dafür eine wesentliche Grundlage.

Die Daten und Informationen sowie die Ergebnisse der auf der Grundlage von Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) vorgenommenen radiologischen Bewertung wurden in Datenbanksystemen gespeichert, die auch von den Landesbehörden genutzt werden können.

Abbildung III.2

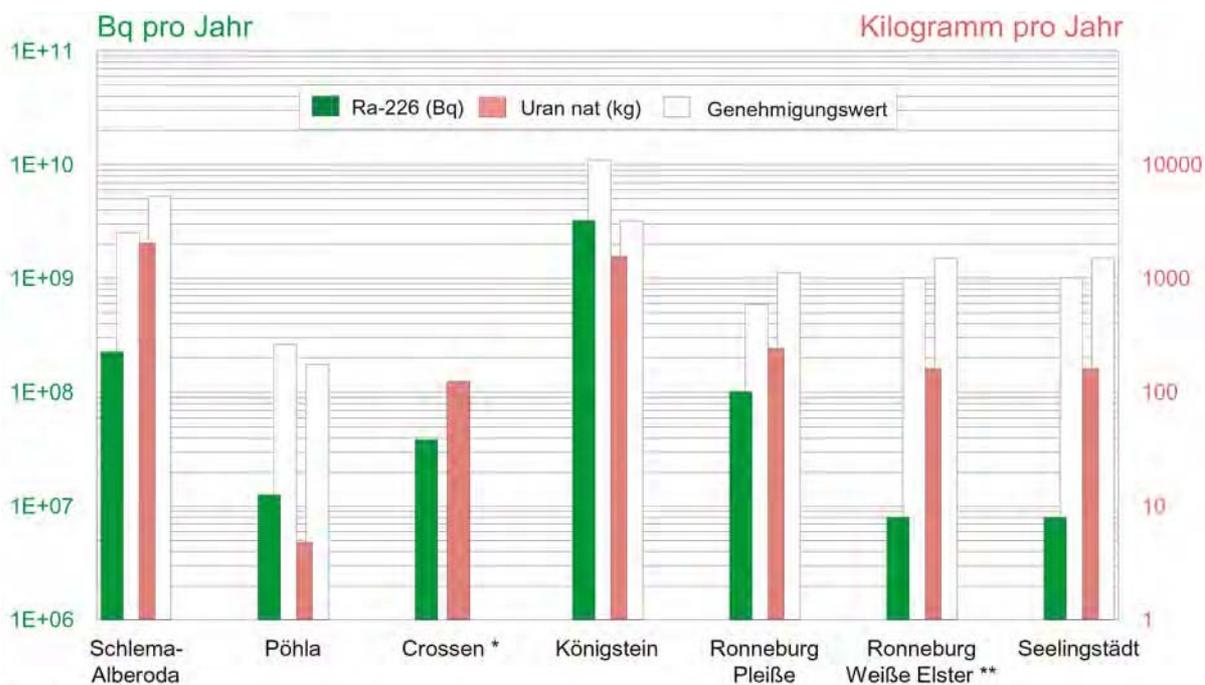
Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Abwettern bzw. der Abluft in die Atmosphäre im Jahr 2000



* Der Betriebsteil Seelingstädt stellte im Jahr 2000 die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abwettern/Abluft ein.

Abbildung III.3

Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Schacht- bzw. Abwässern in die Oberflächengewässer im Jahr 2000



* keine Genehmigungswerte

** Der Betriebsteil Ronneburg stellte die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abwässern im Jahr 2000 ein

Im Jahr 2000 hat das BfS damit begonnen, die Untersuchungsergebnisse in verdachtsflächenbezogenen Berichten den zuständigen Behörden zur Verfügung zu stellen.

4. Berufliche Strahlenexposition durch Radonzerfallsprodukte

In den neuen Bundesländern wird gemäß Einigungsvertrag vom 31. August 1990 nach fortgeltendem Recht der ehemaligen DDR die Strahlenexposition durch Inhalation kurzlebiger Radonzerfallsprodukte im Bergbau und bei anderen Tätigkeiten, die nicht Umgang mit radioaktiven Stoffen oder Anwendung ionisierender Strahlung gemäß Strahlenschutzverordnung sind, überwacht. Im Jahr 2000 wurde diese Überwachung für fast 2 100 Personen vorgenommen, von denen mehr als 75 % Sanierungsarbeiten in den Betrieben der Wismut GmbH ausführten.

Für zwei Drittel der Beschäftigten der Wismut GmbH wurden die Messungen zur Überwachung der Strahlenexposition mit personengebundenen Geräten durchgeführt. Diese am Körper getragenen Messgeräte erfassen die Strahlenexposition durch Radonzerfallsprodukte, langlebige Alphastrahler und externe Strahlung. Für alle anderen überwachten Personen werden die Strahlenexpositionen entweder für vergleichbare Tätigkeiten am gleichen Arbeitsplatz von den individuell ermittelten Expositionen abgeleitet (Wismut GmbH) oder durch repräsentative Konzentrationsmessungen an den Arbeitsplätzen unter Berücksichtigung der entsprechenden unterschiedlichen Aufenthaltszeiten bestimmt. Für die zuletzt genannten Arbeitsplätze liefern die langlebigen Alphastrahler und die externe Strahlung im Allgemeinen nur einen vernachlässigbaren Beitrag, der pauschal mit insgesamt 10 % der ermittelten Dosis berücksichtigt wurde.

Die Kollektivdosis der überwachten Personen betrug im Jahr 2000 einschließlich der Exposition durch langlebige Alphastrahler und äußere Bestrahlung ca. 2,57 Personen-Sv. 1,71 Personen-Sv entfielen auf die Beschäftigten der Wismut GmbH. Für die Berechnung der aus der Strahlenexposition durch Radonzerfallsprodukte resultierenden effektiven Dosis wurde die Dosiskonventionskonvention der ICRP-65 verwendet.

Die mittlere jährliche effektive Dosis aller Überwachten, die beruflich exponiert waren, betrug 1,23 mSv. Sie lag damit weit unter dem Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A von 50 mSv pro Jahr. Die höchste mittlere jährliche effektive Dosis ergab sich für die Beschäftigten bei Gewinnungs- und Sanierungsarbeiten im Nichturanbergbau mit 2,17 mSv, gefolgt von den Beschäftigten in technisch-wissenschaftlichen Einrichtungen und in Radiumbädern mit 2,16 mSv, in Schauhöhlen und Schaubergwerken mit 1,71 mSv, in Bergsicherungsbetrieben mit 1,42 mSv, in Wasserbetrieben mit 1,27 mSv und in der Wismut GmbH mit 1,08 mSv. Die insgesamt 69 Beschäftigten (3,3 %) mit einer nach ICRP 65 ermittelten jährlichen effektiven Dosis von mehr als 6 mSv lieferten einen Beitrag von 24,1 % zur Kollektivdosis. Dies ist der Eingreifwert für beruflich durch Ra-

don und Radonzerfallsprodukte strahlenexponierte Personen nach der neuen Strahlenschutzverordnung.

Im Jahr 2000 gab es keine Grenzwertüberschreitungen bei den beruflich exponierten Überwachten. Die höchsten individuellen effektiven Dosen wurden mit 19,5 mSv bei einem Mitarbeiter der Wismut GmbH und mit 17,9 mSv bei einem Beschäftigten eines Besucherbergwerks festgestellt.

5. Strahlenexposition des Flugpersonals

Die Höhe der Strahlenexposition des Flugpersonals durch kosmische Strahlung wird maßgeblich durch die Flughöhe, Flugdauer, die Aktivität der Sonne und die geomagnetische Breite der Flugroute bestimmt. Die Umgebungs-Äquivalentdosis, die ein konservatives Maß für die effektive Dosis im Flugzeug darstellt, beträgt bei einem Langstreckenflug (Reiseroute nördlich 50° Nord) bei einer Flughöhe zwischen 8,8 und 12,5 km im Mittel 0,0066 mSv pro Stunde. Bei Berücksichtigung der maximalen kosmischen Strahlenexposition und maximaler Nutzung der Aufenthaltszeiten in Reise Flughöhe von 875 Stunden pro Jahr beträgt die Dosis bei Anwendung der Qualitätsfaktoren von ICRP 60 8,3 mSv pro Jahr. Da die Strahlenexposition im Bereich des Äquators am niedrigsten ist und erst mit zunehmender geomagnetischer Breite ansteigt, sind bei Flügen zur Südhalbkugel die Jahresdosen um den Faktor 2 bis 3 geringer. Mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung sind auch Überwachungsmaßnahmen für das fliegende Personal (Kabinen- und Cockpitpersonal) vorgesehen, sobald die effektive Dosis im Kalenderjahr 1 mSv überschreiten kann. Der Grenzwert für die effektive Dosis beträgt zukünftig 20 mSv pro Jahr.

IV. Zivilisatorische Strahlenexposition

1. Kerntechnische Anlagen

1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

Aus den für das Jahr 2000 ermittelten Werten für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen geht hervor, dass die von den zuständigen Behörden festgelegten Höchstwerte für die jährlichen Emissionen in allen Fällen eingehalten wurden. Die tatsächlichen jährlichen Ableitungen liegen im Allgemeinen deutlich unter den Genehmigungswerten, wie beispielsweise für Kernkraftwerke der Vergleich zwischen den Werten der Abbildungen IV.1 bzw. IV.2 und üblichen Genehmigungswerten von ca. 10^{15} Bq für Edelgase, ca. $3 \cdot 10^{10}$ Bq für Aerosole und ca. 10^{10} Bq für Jod-131 zeigt.

Die für 2000 aus den Jahresableitungen nach der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung“ für eine Referenzperson berechneten Werte der Strahlenexposition haben die in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) festgelegten Dosisgrenzwerte

unterschritten und betragen in der Regel bei der effektiven Dosis und bei den einzelnen Organdosen weniger als 10 % des jeweiligen Dosisgrenzwertes.

Der Beitrag der kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland sowie im angrenzenden Ausland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland lag auch 2000 deutlich unter 0,01 mSv pro Jahr.

1.2 Jahresableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen

Die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen werden nach der „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen“ von den Betreibern der einzelnen Anlagen ermittelt und an die zuständigen Aufsichtsbehörden berichtet. Einzelheiten über Umfang der Messungen, Messverfahren, Probeentnahme, Instrumentierung und Dokumentation der Messergebnisse sind in Regeln des Kerntechnischen Ausschusses festgelegt. Die von den Betreibern der Anlagen vorzunehmenden Messungen werden durch Kontrollmessungen behördlich beauftragter Sachverständiger entsprechend der Richtlinie über die „Kontrolle der Eigenüberwachung radioaktiver Emissionen aus Kernkraftwerken“ überprüft.

Die für 2000 ermittelten Jahresableitungen radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken sind in den Abbildungen IV.1 bis IV.3 angegeben und nach Nuklidgruppen aufgeschlüsselt. Sie liegen in der Größenordnung der Ableitungen der Vorjahre und unterschreiten deutlich die entsprechenden Genehmigungswerte. In Abbildung IV.4, S. 16 sind die Daten über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf, Geesthacht und dem Hahn-Meitner-Institut Berlin für das Jahr 2000 zusammengefasst. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus den übrigen Forschungsreaktoren betragen im Mittel nur einige Prozent der Ableitungen von Kernkraftwerken. In Abbildung IV.5, S. 17, sind die entsprechenden Abwasserdaten im Jahr 2000 zusammengestellt. Abbildung IV.6, S. 17, enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus Kernbrennstoff verarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 2000 in Grenznähe, d. h. bis zu einer Entfernung von 30 km zur deutschen Grenze, die in Tabelle IV.1, S. 28, aufgeführten kerntechnischen Anlagen in Betrieb. Das Kernkraftwerk Mühleberg in der Schweiz wurde trotz der größeren Entfernung zur deutschen Grenze ebenfalls aufgeführt, weil es im Einzugsgebiet des Rheins liegt. Über die Jahresemissionen kerntechnischer Anlagen in EU-Ländern informiert die Kommission der Europäischen Union in den Berichten „Radioactive effluents from nuclear power stations and nuclear fuel reprocessing plants in the European Community“. Die Ableitungen der schweizerischen Anlagen werden in den jährlichen Berichten „Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz“ des Bundesamtes für Gesundheit, Bern, veröffentlicht.

1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen

Aus den Ergebnissen der Emissionsüberwachung wird die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung der kerntechnischen Anlagen für die in der Strahlenschutzverordnung definierte Referenzperson nach dem Verfahren ermittelt, das in der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ festgelegt ist. Die in den Abbildungen IV.7 bis IV.10, S. 18f., angegebenen Expositionswerte stellen obere Werte dar, die gemäß § 45 Abs. 2 StrlSchV für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen ermittelt wurden. Die Referenzperson ist eine fiktive Person, für die in der Strahlenschutzverordnung (Anlage XI) Ernährungsgewohnheiten und Aufenthaltszeiten festgelegt sind mit dem Ziel, dass bei deren Anwendung die Strahlenexposition des Menschen nicht unterschätzt wird. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen in der Umgebung einer Anlage, bei denen auf Grund der Verteilung der abgeleiteten radioaktiven Stoffe in der Umgebung durch Aufenthalt oder durch Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchste Strahlenexposition der Referenzperson zu erwarten ist.

Die Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Jahr 2000 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Abluft enthält Abbildung IV.7. Angegeben ist die effektive Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die Schilddrüsendosis für Kleinkinder über sämtliche relevanten Expositionspfade: Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammassubmersion), Gammastrahlung am Boden abgelagerter radioaktiver Stoffe, Inhalation und Ingestion. Abbildung IV.7 zeigt als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene 0,004 mSv (rund 1 % des Dosisgrenzwertes nach Strahlenschutzverordnung) jeweils bei den Kernkraftwerken Isar und Philippsburg und für Kleinkinder 0,007 mSv (rund 2 % des Dosisgrenzwertes) beim Kernkraftwerk Philippsburg. Der größte Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 0,007 mSv (rund 1 % des Dosisgrenzwertes) ebenfalls beim Kernkraftwerk Philippsburg.

In Abbildung IV.8, S. 19, sind die aus den Ableitungen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken resultierenden oberen Werte der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder zusammengestellt. Hierbei wurden ebenfalls ungünstige Verzehr- und Lebensgewohnheiten angenommen, insbesondere für Erwachsene ein hoher Konsum an Flussfisch, der in der Kühlwasserfahne gefangen wurde, und für beide Personengruppen der Aufenthalt von 1 000 Stunden am Flussufer oder auf Wiesen in Flussnähe. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt 0,0004 mSv (entsprechend rund 0,13 % des Grenzwertes) beim Standort des Kernkraftwerkes Emsland.

Abbildung IV.1

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 2000
Aerosole und Jod-131**

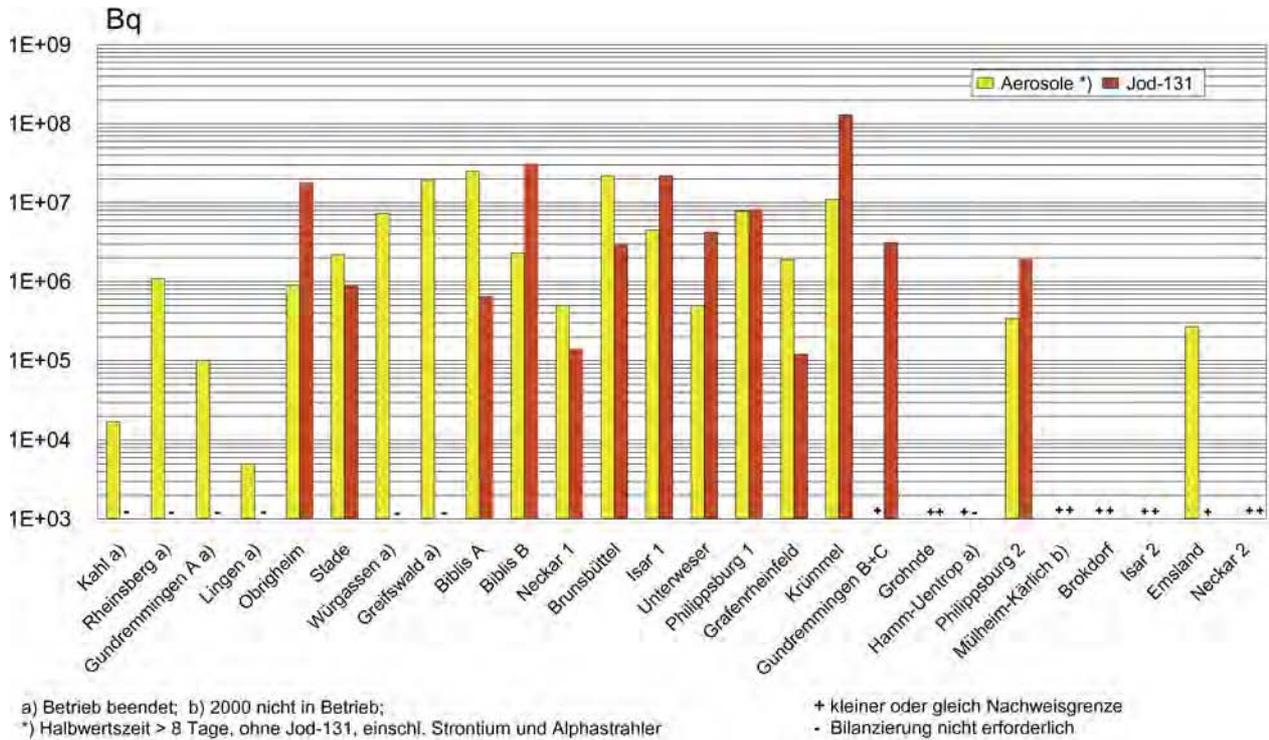


Abbildung IV.2

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 2000
¹⁴CO₂, Tritium und Edelgase**

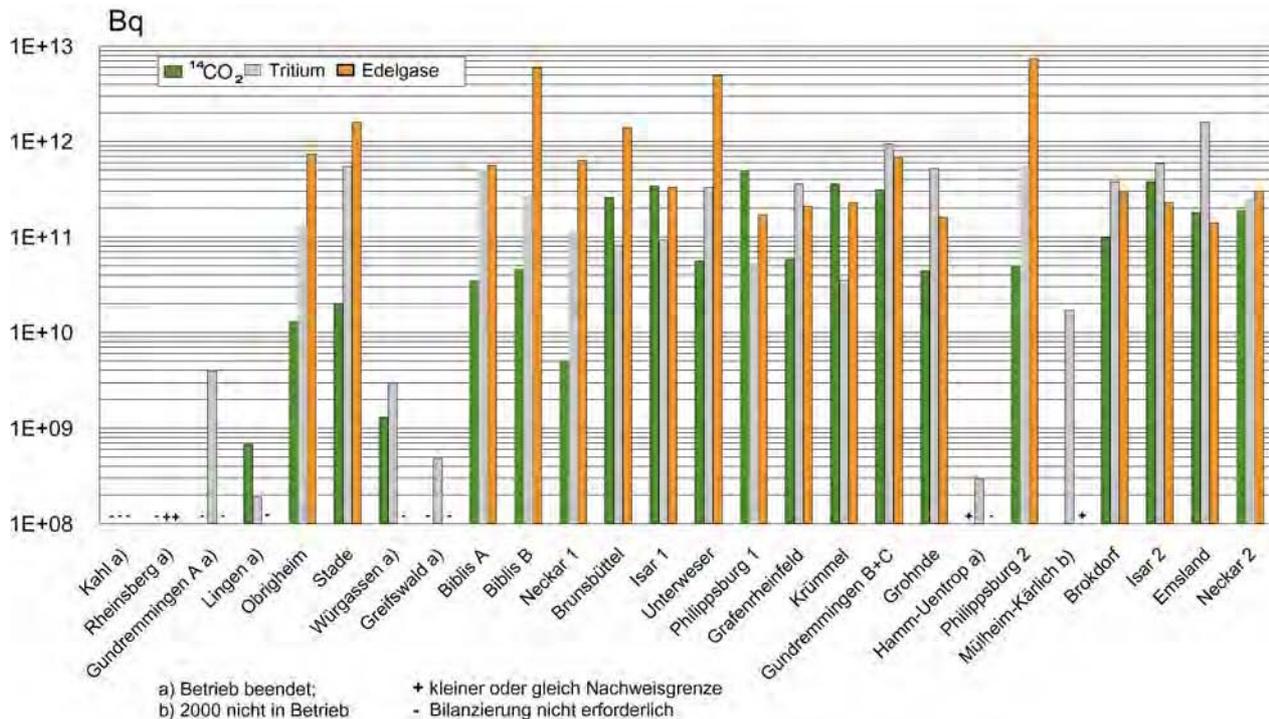


Abbildung IV.3

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken im Jahr 2000
Alphastrahler, Summenwerte und Tritium**

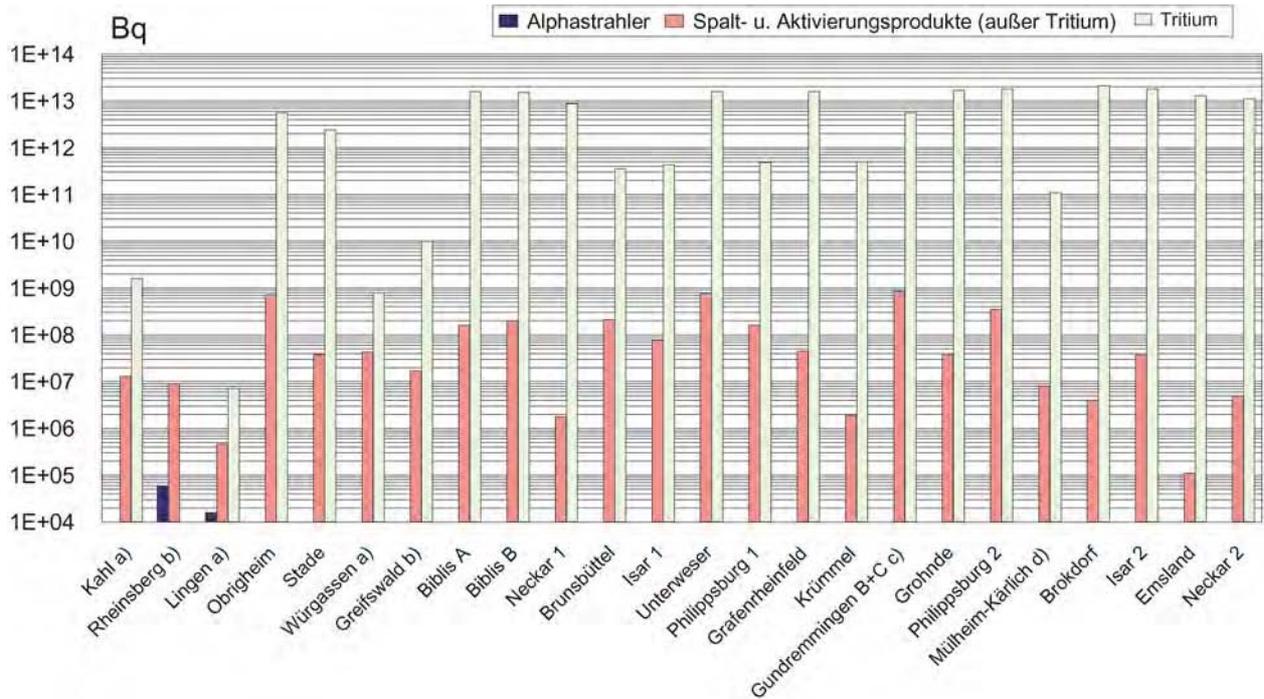
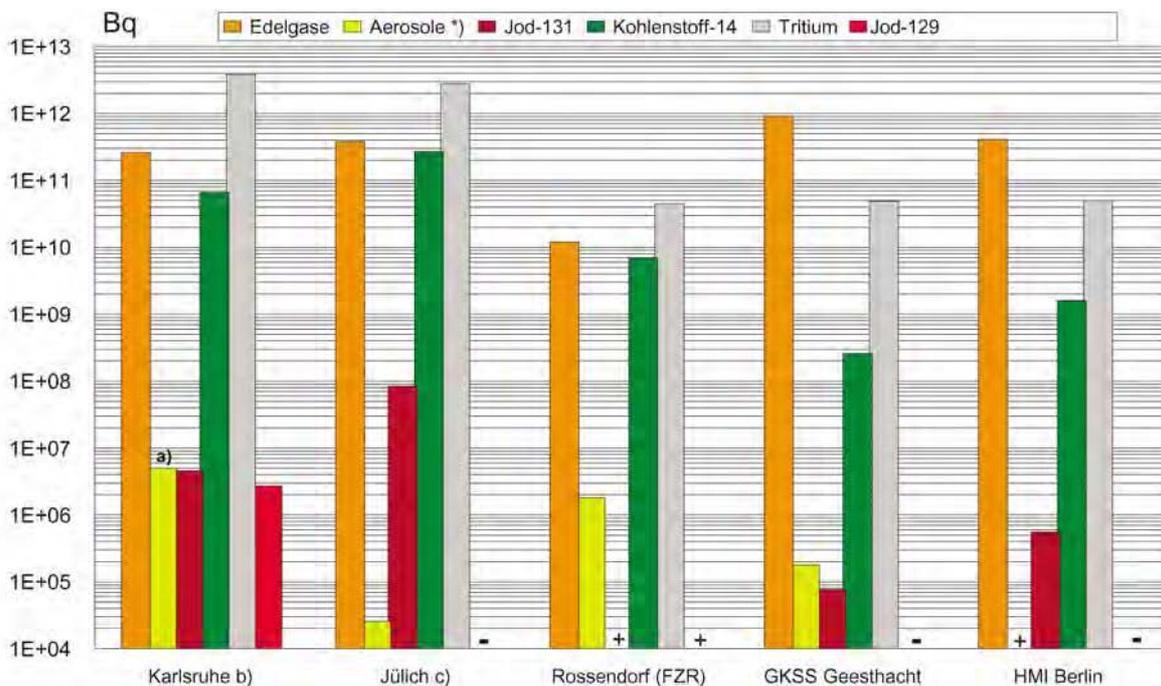


Abbildung IV.4

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren im Jahr 2000
Aerosole, Jod-131 und Jod-129, ¹⁴CO₂, Tritium und Edelgase**



a) davon Alphastrahler: 2,0 E05 Bq
 b) einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage
 c) einschließlich AVR

*) Halbwertszeit > 8 Tage, ohne Jod-131, einschl. Strontium und Alphastrahler
 + kleiner oder gleich Nachweisgrenze
 - Bilanzierung nicht erforderlich

Abbildung IV.5

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Forschungszentren im Jahr 2000
Alphastrahler, Summenwerte und Tritium**

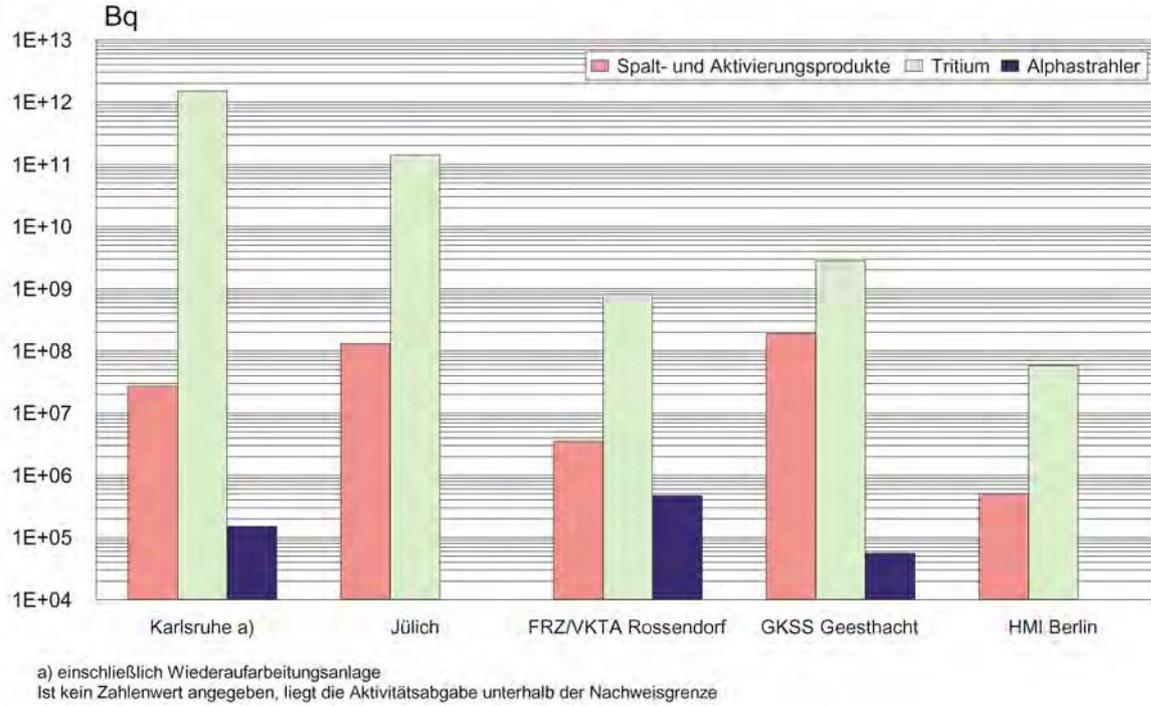
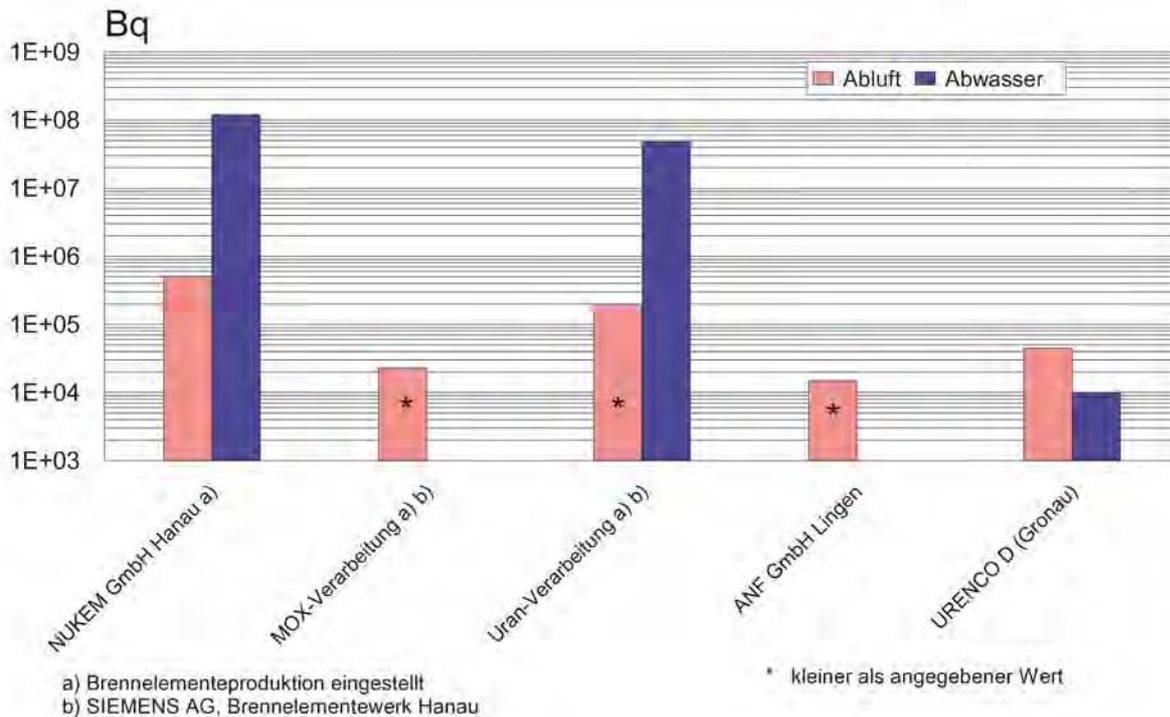


Abbildung IV.6

**Ableitung radioaktiver Stoffe (Alphaaktivität) mit Abluft und Abwasser aus Kernbrennstoff
verarbeitenden Betrieben im Jahr 2000**



Entsprechend der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung wurde die Strahlenexposition am Unterlauf der Flüsse näher betrachtet, wobei jeweils sämtliche Emittenten berücksichtigt wurden. Die höchste effektive Dosis wurde mit etwa 0,001 mSv für Erwachsene und Kleinkinder im Mündungsgebiet des Neckar ermittelt; am Unterlauf der Weser wurden für Erwachsene 0,0003 mSv und für Kleinkinder 0,0003 mSv berechnet. An Rhein und Main liegen die effektiven Dosen bei 0,00015 mSv, an der Donau bei 0,0003 mSv. Zu den höheren Werten trägt vor allem die äußere Bestrahlung auf Überschwemmungsgebieten bei, die im wesentlichen durch Ablagerungen in früheren Jahren bedingt ist.

Die in Abbildung IV.9, S. 19 angegebenen Werte für die entsprechenden Strahlenexpositionen durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren stammen aus den Jahresberichten der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf, Geesthacht und des Hahn-Meitner-Instituts Berlin. Die Abbildung weist für die effektive Dosis im Jahr 2000 als höchsten Wert 0,014 mSv (rund 5 % des Grenzwertes) für Erwachsene und 0,024 mSv (8 % des Grenzwertes) für Kleinkinder beim Forschungszentrum Jülich auf. Der höchste Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 0,025 mSv (rund 3 % des Grenzwertes) ebenfalls beim Forschungszentrum Jülich.

Für die Strahlenexposition über das Abwasser aus Kernforschungszentren ergibt die Abschätzung auf Grund von

Messwerten, die bei radiologischen Untersuchungen ermittelt wurden, einen oberen Wert von 0,040 mSv pro Jahr. Nach Angaben aus den Jahresberichten der Forschungszentren Karlsruhe, Rossendorf und Jülich liegen die oberen Werte für die effektive Dosis für diese Forschungszentren im Jahr 2000 bei 0,005 mSv, 0,003 mSv bzw. 0,0004 mSv.

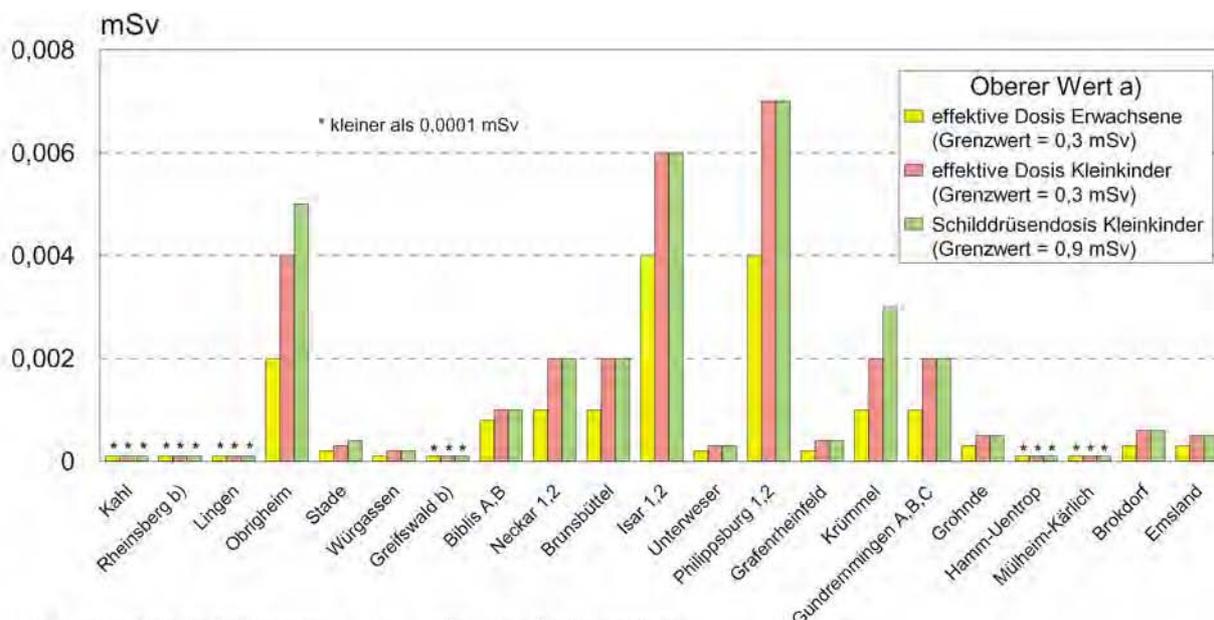
Für die Kernbrennstoff verarbeitenden Betriebe in Hanau, Lingen und Gronau sind in Abbildung IV.10 die für die ungünstigste Einwirkungsstelle berechneten oberen Werte der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die oberen Werte der Lungendosis für Kleinkinder durch die Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft angegeben. Der höchste Wert der effektiven Dosis beträgt für Erwachsene und Kleinkinder 0,0005 mSv (rund 0,2 % des Grenzwertes), der höchste Wert der Lungendosis für Kleinkinder 0,001 mSv (rund 0,1 % des Grenzwertes).

Die durch die Ableitungen von Alphastrahlern mit Abluft und Abwasser (Abbildung IV.6, S. 17) bedingten Werte der effektiven Dosis von Erwachsenen und Kleinkindern in der Umgebung aller Kernbrennstoff verarbeitenden Betriebe liegen wie auch im Vorjahr bei jeweils weniger als 0,0001 mSv.

Die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser aus dem Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist in Tabelle IV.2 aufgeführt. Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe im Jahr 2000 mit der Abluft ermittelte Wert der effektiven Dosis für den

Abbildung IV.7

Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft

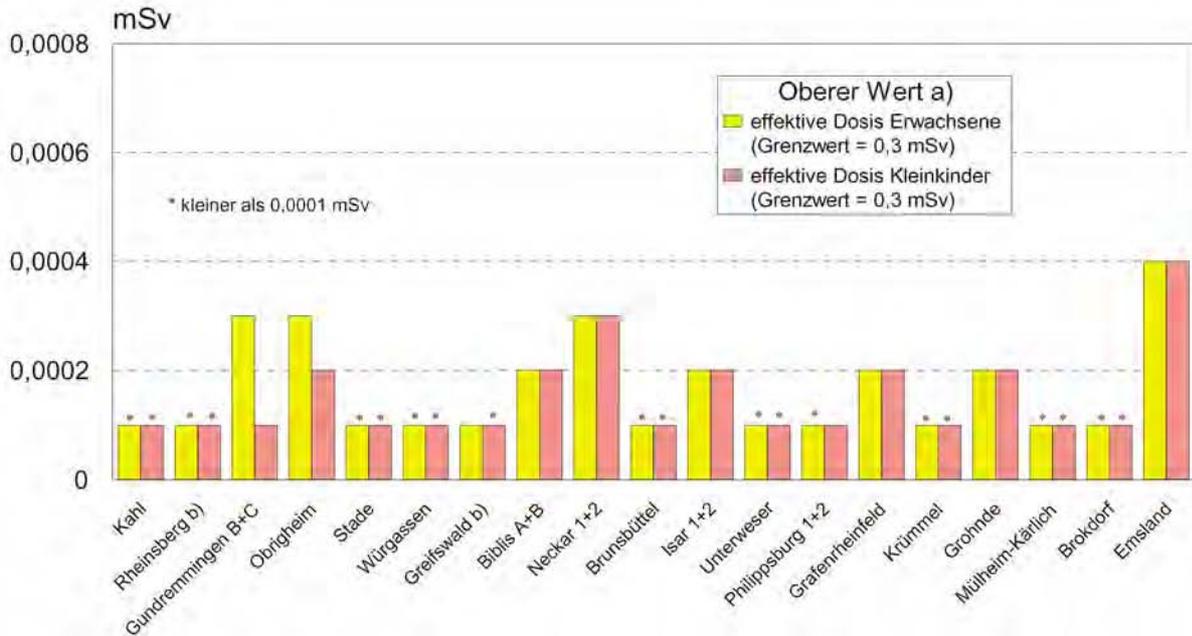


a) berechnet für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen

b) Die Strahlenexposition konnte für Expositionspfade, bei denen Radionuklide in den Vorjahren akkumuliert wurden, nur unvollständig berechnet werden, da bei diesen Kernkraftwerken Werte für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Jahren vor 1990 (Greifswald) bzw. vor 1984 (Rheinsberg) nicht vorliegen.

Abbildung IV.8

Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser



- a) berechnet für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen
- b) Die Strahlenexposition könnte für Expositionspfade, bei denen Radionuklide in den Vorjahren akkumuliert wurden, nur unvollständig berechnet werden, da bei diesen Kernkraftwerken Werte für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus den Jahren vor 1990 nicht vorliegen.

Abbildung IV.9

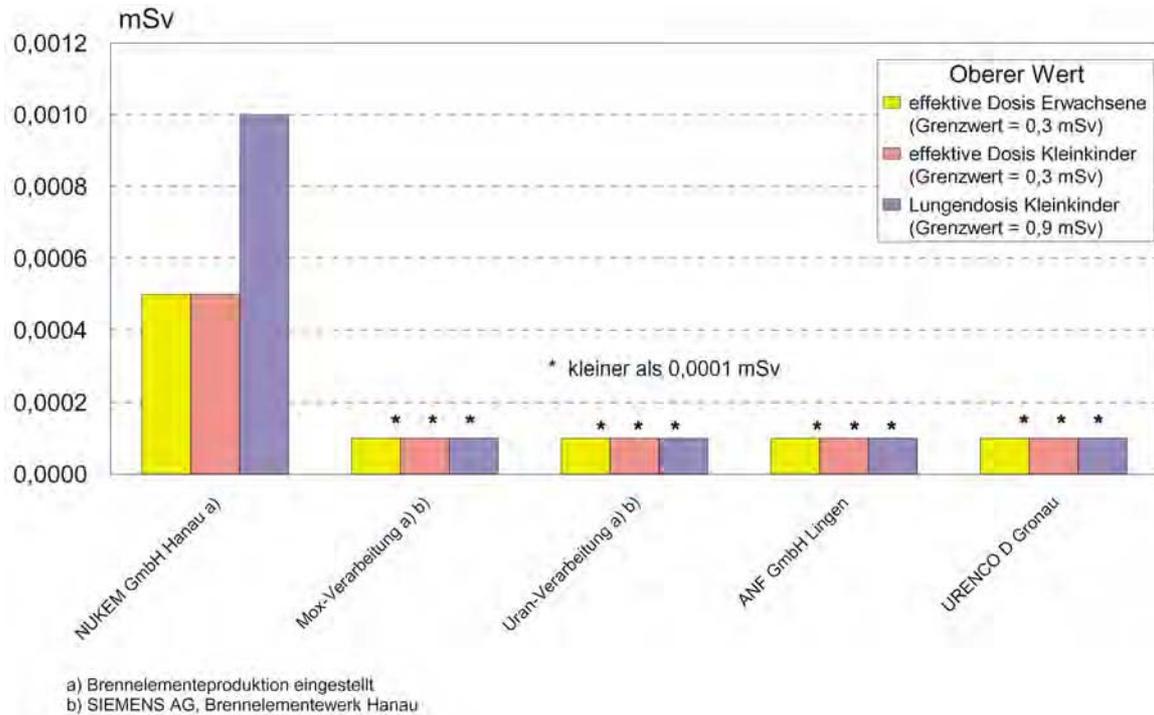
Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Forschungszentren durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft



- *) Entnommen aus den Jahresberichten 2000 der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rosendorf, Geesthacht und HMI-Berlin
- a) einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage
- b) einschließlich Versuchsreaktor AVR

Abbildung IV.10

Strahlenexposition im Jahr 2000 in der Umgebung von Kernbrennstoff verarbeitenden Betrieben durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft



Erwachsenen betrug 0,0004 mSv, für Kleinkinder 0,0007 mSv; dies sind 0,1 % bzw. 0,2 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Die Lungendosis errechnete sich zu 0,0006 mSv für Erwachsene und 0,0012 mSv für Kleinkinder (ca. 0,07 % bzw. 0,14 % des Grenzwertes). Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe im Jahr 2000 mit dem Abwasser ermittelte Wert der effektiven Dosis liegt unterhalb von 0,0001 mSv für Erwachsene und Kleinkinder.

Bei den Kernbrennstoff-Zwischenlagern Ahaus, Gorleben und Nord (bei Greifswald) sowie bei Fasslagern wie z. B. Gorleben, Mitterteich oder Fasslagern innerhalb kerntechnischer Anlagen treten im Normalbetrieb keine nennenswerten Emissionen radioaktiver Stoffe auf; daher ist die hieraus resultierende Strahlenexposition der Bevölkerung vernachlässigbar gering. Messbar ist im Allgemeinen nur die Gammadosisleistung in unmittelbarer Nähe dieser Anlagen. Bei Zwischenlagern wie z. B. Abklingbecken für Brennelemente oder Anlagen zur Abfallkonditionierung, die sich innerhalb von Kernkraftwerken, Kernforschungszentren und sonstigen kerntechnischen Betrieben befinden und in deren Fortluftführung bzw. Abluftplan und ggf. Abwasserbehandlung einbezogen sind, werden die Emissionen in den bilanzierten Ableitungen des jeweiligen Standortes erfasst und bei der Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung berücksichtigt.

Der Betrieb grenznaher kerntechnischer Anlagen in Nachbarländern (Tabelle IV.1, S. 28) führte 2000 unter Anwendung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45

Strahlenschutzverordnung auf Bundesgebiet zu oberen Werten der effektiven Dosis bis zu 0,01 mSv. Für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes über sämtliche relevanten Expositionspfade errechnen sich obere Werte bis zu 0,02 mSv pro Jahr; den größten Beitrag zur Schilddrüsendosis liefert der Weide-Kuh-Milch-Pfad. Bei den im Rahmen der Umgebungsüberwachung durchgeführten Messungen des Radiojodgehaltes von Milchproben aus grenznahen Weidegebieten wurde im Jahr 2000 Jod-131 in Milch nicht nachgewiesen.

2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin

Die medizinische Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung hat in der Bundesrepublik Deutschland einen hohen Stand erreicht. Sowohl hinsichtlich der Indikationsstellung als auch der Qualität der Durchführung werden hohe Anforderungen gestellt. In Anwendung der Strahlenschutzgrundsätze der Strahlenschutzverordnung und der Vorschriften der Röntgenverordnung muss jede Anwendung im Einzelfall gerechtfertigt sein. Darüber hinaus ist die durch ärztliche Untersuchungen bedingte Strahlenexposition soweit einzuschränken, wie dies mit den Erfordernissen der medizinischen Wissenschaft zu vereinbaren ist. Es ist in jedem Fall zu prüfen, ob durch diagnostische oder therapeutische Maßnahmen ohne Anwendung radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlung der gewünschte medizinische Effekt nicht ebenso erzielt werden kann.

2.1 Röntgendiagnostik

Die derzeit aktuellsten Daten über die Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen für Deutschland liegen für das Jahr 1997 vor. Sie sind in Tabelle IV.3 zusammengestellt. Die Erhebung wurde durch das BfS durchgeführt und basiert im Wesentlichen auf Daten der kassenärztlichen und kassenzahnärztlichen Bundesvereinigungen sowie des Verbandes der privaten Krankenversicherungen. Daraus lässt sich eine Gesamtzahl von etwa 136 Millionen Röntgenuntersuchungen einschließlich zahnmedizinischer Untersuchungen pro Jahr in Deutschland abschätzen. Eine grobe Fehlerabschätzung ergibt eine Schwankungsbreite von ca. $\pm 10\%$. Der Vergleich mit den Erhebungen aus dem Jahr 1994 ist nur mit Einschränkung möglich. Zum einen war die damalige Datenlage wegen der Umstellung des Medizinalwesens in den neuen Bundesländern sehr lückenhaft. Zum anderen erfolgte zwischenzeitlich eine Umstellung der Gebührenordnungen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren ergibt sich eine Steigerung der Untersuchungshäufigkeiten zwischen 1994 und 1997 von etwa 3 bis 4%.

Eine Trendanalyse ist in Abbildung IV.11 zusammengestellt. Sie lässt unterschiedliche, zum Teil gegenläufige Änderungen der Häufigkeit einzelner Untersuchungsarten erkennen. So zeigte sich einerseits im Vergleich zu 1994 eine Abnahme der Häufigkeiten von Untersuchungen im Bauchraum einschließlich des Magen-Darm-Trakts, des Gallensystems und des Harntrakts um 10 bis 50%. Dies lässt darauf schließen, dass der bereits früher beschriebene Trend zu Untersuchungsarten ohne die Anwendung ionisierender Strahlen, wie Ultraschall bzw. Endoskopie, weiter anhält. Andererseits zeigt sich eine Zunahme der Röntgenuntersuchungen des Schädels um ca. 24% und der weiblichen Brust um ca. 12%. Hierbei ist die erstere im Wesentlichen durch eine erweiterte Diagnostik im Rahmen der Zahnmedizin bedingt, während die Zunahme der Mammographien die Bedeutung dieser Methode bei der Brustkrebsfrüherkennung unterstreicht. Weitere Zunahmen finden sich bei der Computertomographie (CT) um ca. 11% und der Arteriographie einschließlich interventioneller Eingriffe um ca. 67%.

Bereiche mittlerer Werte der effektiven Dosis für häufige Röntgenuntersuchungen sind in Tabelle IV.4, S. 30 dargestellt. Sie basieren sowohl auf stichprobenartigen Messungen des BfS in Krankenhäusern und Arztpraxen als auch auf Dosiserhebungen im Rahmen von Forschungsvorhaben, die vom Bundesumweltministerium gefördert wurden. Die Mehrzahl der Untersuchungsverfahren ist mit einer relativ niedrigen Strahlenexposition verbunden. Das sind im Wesentlichen die Untersuchungen, bei denen nur Röntgenaufnahmen angefertigt werden. Dabei wird ein kurzer „Röntgenblitz“ von einigen Millisekunden Dauer auf den zu untersuchenden Körperteil des Patienten gerichtet und die den Körper durchdringende Strahlung mit einem Film-Folien-System oder einem digitalen Speichermedium in ein Schattenbild umgewandelt.

Zur Untersuchung von Bewegungsvorgängen oder zur genaueren Beurteilung von sich überlagernden Strukturen ist bei einigen Untersuchungen zusätzlich eine Röntgen-

durchleuchtung notwendig. Dabei durchdringt eine schwache, kontinuierliche oder gepulste Röntgenstrahlung den Körper des Patienten und erzeugt auf einem Leuchtschirm ein Bild, das mittels elektronischer Bildverstärkung auf einen Fernsehmonitor übertragen und dort betrachtet wird. Zu diesen Untersuchungsverfahren gehört auch die Arteriographie und die interventionelle Radiologie. Letzteres ist ein Verfahren, bei dem unter Durchleuchtungskontrolle Heilmaßnahmen, hauptsächlich die Aufdehnung verengter oder verschlossener Blutgefäße, durchgeführt werden.

Die Computertomographie (CT), bei der der Röntgenstrahler und ein gegenüberliegender Strahlendetektor kreis- oder spiralförmig um den Körper des Patienten fährt, liefert überlagerungsfreie Querschnittsbilder. Diese mit einer relativ hohen Strahlenexposition verbundene Methode hat eine sehr große diagnostische Aussagekraft, die außer mit der Magnetresonanztomographie mit keinem anderen Diagnoseverfahren erreicht wird. Bei der Bewertung der Strahlenexposition ist zu berücksichtigen, dass ein daraus resultierendes Risiko gegenüber dem Nutzen einer gezielt durchgeführten Untersuchung für den Patienten in den Hintergrund tritt.

Für die Abschätzung der kollektiven effektiven Dosis wurde das Produkt von Untersuchungshäufigkeit und Untersuchungsdosis für die verschiedenen Untersuchungsregionen bzw. -arten berechnet. Die rein rechnerisch ermittelte effektive Dosis pro Kopf der Bevölkerung in Deutschland liegt für das Jahr 1997 bei etwa 2 mSv. Eine grobe Fehlerabschätzung ergibt eine Unsicherheit von ca. $\pm 25\%$. Den prozentualen Anteil der verschiedenen Untersuchungsarten an der kollektiven effektiven Dosis zeigt Abbildung IV.12. Im Vergleich zu den für das Jahr 1994 vom BfS angegebenen Daten fällt insbesondere der Anstieg bei der Arteriographie und interventionellen Radiologie von etwa 18% auf jetzt 28% auf. Demgegenüber bleibt der Anteil der CT mit 37% weitgehend unverändert. Es kann vermutet werden, dass die Zunahme der Untersuchungshäufigkeit durch eine Dosisersparung je CT-Untersuchung aufgrund neuer Gerätetechniken ausgeglichen worden ist. Der prozentuale Anteil der verschiedenen Untersuchungsarten an der Häufigkeit ist ebenfalls in Abbildung IV.12 dargestellt. Obwohl CT und Arteriographie mit Intervention zusammen nur ca. 6% der Röntgenuntersuchungen ausmachen, liegt ihr gemeinsamer Anteil an der kollektiven effektiven Dosis bei ca. 65%. Eine strenge klinische Indikationsstellung vorausgesetzt, bieten aber gerade diese Techniken – wie oben bereits dargelegt – einen großen diagnostischen und therapeutischen Nutzen für die Patienten.

2.2 Nuklearmedizinische Diagnostik

In der nuklearmedizinischen Diagnostik werden den Patienten offene radioaktive Arzneimittel verabreicht, die sich je nach ihren chemischen Eigenschaften im Stoffwechsel des Menschen unterschiedlich verhalten und in entsprechenden Organen oder Geweben des Menschen anreichern. Sie sind aufgrund ihrer Radioaktivität mit geeigneten Messgeräten, z. B. einer Gammakamera, von

außen in ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung im Patienten nachweisbar und bildlich darstellbar. Die diagnostische Anwendung von Radiopharmaka ermöglicht die Untersuchung nahezu sämtlicher Organsysteme des Menschen. Sie liefert Aussagen zur Funktion interessierender Organsysteme sowohl hinsichtlich allgemeiner Stoffwechselstörungen als auch örtlich umschriebener Krankheitsherde in einzelnen Organen und ist daher eine wichtige Ergänzung zur vorwiegend morphologisch ausgerichteten, sonstigen bildgebenden Diagnostik. Aufgrund seiner günstigen physikalischen Eigenschaften und der guten Verfügbarkeit hat sich das Isotop Technetium-99m in der konventionellen In-vivo-Diagnostik als optimal herausgestellt und durchgesetzt.

Mit Einführung emissions-computertomographischer Verfahren in Verbindung mit neu entwickelten radioaktiven Arzneimitteln, wie z. B. der Fluor-18-Desoxyglukose (FDG) ist es möglich geworden, insbesondere mittels der Positronenemissionstomographie (PET) Teilfunktionen des Körpers auch auf zellulärer bzw. molekularer Ebene in hoher räumlicher Auflösung bildgebend darzustellen.

In der nuklearmedizinischen Diagnostik wurden in Deutschland 1997 ca. 4 Millionen Radionuklidapplikationen bei ambulanten und stationären Patienten durchgeführt, was einer Anwendungshäufigkeit von 49 Untersuchungen pro 1 000 Einwohner entspricht. Am häufigsten wurden bei den ambulanten Patienten Szintigraphien der Schilddrüse und des Skeletts durchgeführt (Abbildung IV.13, S. 25). Insgesamt wurde für die im Jahr 1997 durchgeführten nuklearmedizinischen Untersuchungen eine kollektive effektive Dosis von ca. 11 600 Personen-Sv und eine jährliche effektive Dosis pro Einwohner von 0,14 mSv ermittelt. Die Skelettszintigraphie liefert mit 43 % den größten Beitrag zur kollektiven effektiven Dosis, gefolgt von der Myokardszintigraphie mit 22 % und der Schilddrüsenszintigraphie mit 10 % (Abbildung IV.13).

Die ermittelten mittleren effektiven Dosen nuklearmedizinischer Untersuchungen waren bei der Positronenemissionstomographie (PET) mit Fluor-18-FDG mit 8,6 mSv am höchsten, gefolgt von der Myokardszintigraphie mit 7,0 mSv, der Hirnszintigraphie mit 5,8 mSv und der Skelettszintigraphie mit 5,1 mSv. Die am häufigsten angewendete Schilddrüsenszintigraphie weist nur eine sehr niedrige effektive Dosis von 0,8 mSv auf. Die bei Kindern relativ häufig durchgeführten Nierenuntersuchungen sind auch durch eine niedrige Strahlenbelastung gekennzeichnet (0,8 mSv).

Im Vergleich zu 1994 ist ein Anstieg der Häufigkeit nuklearmedizinischer Untersuchungen zu verzeichnen, wobei insbesondere die Häufigkeit von PET-Untersuchungen stark zugenommen hat. Andererseits wurden neue Radiopharmaka eingesetzt, die zu einer Verringerung der Strahlenexposition bei einzelnen Untersuchungsarten führten durch den Ersatz von Thallium-201-Chlorid durch Technetium-99m-MIBI z. B. lässt sich der Beitrag der Myokardszintigraphie zur Strahlenexposition erheblich reduzieren.

Die jährliche effektive Dosis pro Einwohner durch nuklearmedizinische Untersuchungen liegt mit 0,1 mSv deutlich unter der durch die Röntgendiagnostik erzeugten jährlichen effektiven Dosis pro Einwohner von ca. 2 mSv.

2.3 Therapie mit ionisierender Strahlung

In der Strahlentherapie muss angestrebt werden, dass der zu bestrahlende Tumor die therapeutisch erforderliche Strahlendosis erhält, um so krankes Gewebe zu zerstören. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit von Strahlentherapeuten und Medizinphysik-Experten. Ständige Qualitätssicherung und -kontrolle sind in der Strahlentherapie von zentraler Bedeutung.

Die Fortschritte in der Strahlentherapie basieren auf Entwicklungen in der Diagnostik, der Medizinischen Strahlenphysik, der Strahlenbiologie und der Informatik sowie dem Zusammenwirken dieser Bereiche. Die Integration der Strahlentherapie in komplexe Therapieschemata, z. B. kombinierte Radiochemotherapieansätze, stellt neue Herausforderungen an eine interdisziplinäre Zusammenarbeit auf wissenschaftlicher und klinischer Ebene.

Die am häufigsten in der Strahlentherapie eingesetzte Anlage ist der Linearbeschleuniger, mit dem hoch energetische Photonen oder schnelle Elektronen erzeugt werden. Derzeit werden in Deutschland jährlich etwa 220 000 Patienten mit ionisierender Strahlung behandelt. Davon entfallen 200 000 auf die Teletherapie und 20 000 auf die Brachytherapie.

Ziel ist es, das Tumorgewebe unter möglicher Schonung des umgebenden gesunden Gewebes zu zerstören. Dies wird zunehmend durch dreidimensionale, tumorkonforme Bestrahlung unter Einsatz von dynamischen Multileaf-Kollimatoren und Kompensatoren erreicht.

Röntgenstrahlen werden beim Eindringen in den Körper stärker abgeschwächt als z. B. die Photonenstrahlung eines in der Strahlentherapie heute üblichen Linearbeschleunigers, sodass eine ausreichende Dosis im tiefer liegenden Tumorgewebe nicht erreicht wird. Die Therapie mit Röntgenstrahlen wird daher fast nur noch zur Behandlung von Hautkrankheiten sowie von entzündlichen oder degenerativen Skeletterkrankungen eingesetzt.

2.4 Therapie mit offenen radioaktiven Stoffen

In der Radionuklidtherapie wird die Möglichkeit genutzt, durch die Wahl geeigneter radioaktiver Arzneimittel direkt in bzw. an der Tumorzelle zu bestrahlen. Als bekanntestes Beispiel sei hier das Radionuklid Jod-131 angeführt, das sich größtenteils im Schilddrüsengewebe anreichert und dort mit seiner Strahlung z. B. Tumorzellen vernichtet. Im Jahr 1999 wurden etwa 60 000 derartige Behandlungen durchgeführt. Weitere wichtige Anwendungen sind die Radiosynoviorthese, d. h. die Behandlung besonders schmerzhafter Gelenkerkrankungen, sowie die palliative Behandlung schmerzhafter Knochenmetas-

tasen. Zunehmend an Bedeutung gewinnt die Radioimmuntherapie. Dabei werden spezifisch gegen maligne Tumorzellen gerichtete Antikörper radioaktiv markiert, um diese Krebszellen nach Möglichkeit gezielt durch Strahlung zu zerstören.

Wesentlich für den Langzeiterfolg einer Strahlentherapie ist die sorgfältige Durchführung und Koordinierung der Nachsorge. Da in der Strahlentherapie sehr hohe Dosen notwendig sind, um die gewünschte deterministische Wirkung zu erzielen, ist das in der Diagnostik angewendete Konzept der effektiven Dosis nicht geeignet, um eine therapeutische Exposition zu charakterisieren.

2.5 Bewertung der medizinischen Strahlenexposition

Die Bewertung der medizinischen Strahlenexposition muss davon ausgehen, dass sich die Dosis sehr ungleichmäßig auf die Bevölkerung verteilt. Betroffen ist der Bevölkerungsanteil, der aus der Exposition einen unmittelbaren diagnostischen oder therapeutischen Nutzen zieht. Wesentlich größer ist daher die Anzahl älterer Personen, die eine deutlich geringere Strahlenempfindlichkeit auf-

weist als jüngere. Die Daten der Strahlenexposition durch die Strahlentherapie werden zur Bewertung der Exposition der Normalbevölkerung nicht herangezogen. Voraussetzung für eine umfassende strahlenhygienische Bewertung der medizinischen Strahlenexpositionen ist somit die Ermittlung der Geschlechts- und Altersverteilung der Patienten sowie der Indikationsstellung bei den erbrachten Röntgenleistungen. Diese Angaben sind aus Gründen des Datenschutzes nur mit großen Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten zu erfassen, da hier eine Einsichtnahme in personenbezogene Krankenakten erforderlich ist. Erste Erkenntnisse brachte eine durch das BfS erhobene repräsentative Stichprobe aus Akutkrankenhäusern über die Altersverteilung stationärer Patienten bei sieben Untersuchungsarten der Röntgendiagnostik, die zusammen etwa 86 % der kollektiven effektiven Dosis der stationären Röntgendiagnostik ausmachen. Unter Berücksichtigung der Altersverteilung sowie der damit verbundenen Strahlenempfindlichkeit ergibt sich bei vorsichtiger Abschätzung für das untersuchte Patientenkollektiv ein Reduktionsfaktor von 0,6 bis 0,7 für die mittlere jährliche Strahlenexposition im Vergleich zu einer Abschätzung, die die unterschiedlichen Altersverteilungen nicht berücksichtigt.

Abbildung IV.11

Vergleich der Häufigkeiten von Röntgenuntersuchungen 1994 und 1997
Medizinische Röntgenuntersuchungen für die ambulante und stationäre Patientenversorgung, einschließlich Zahnmedizin

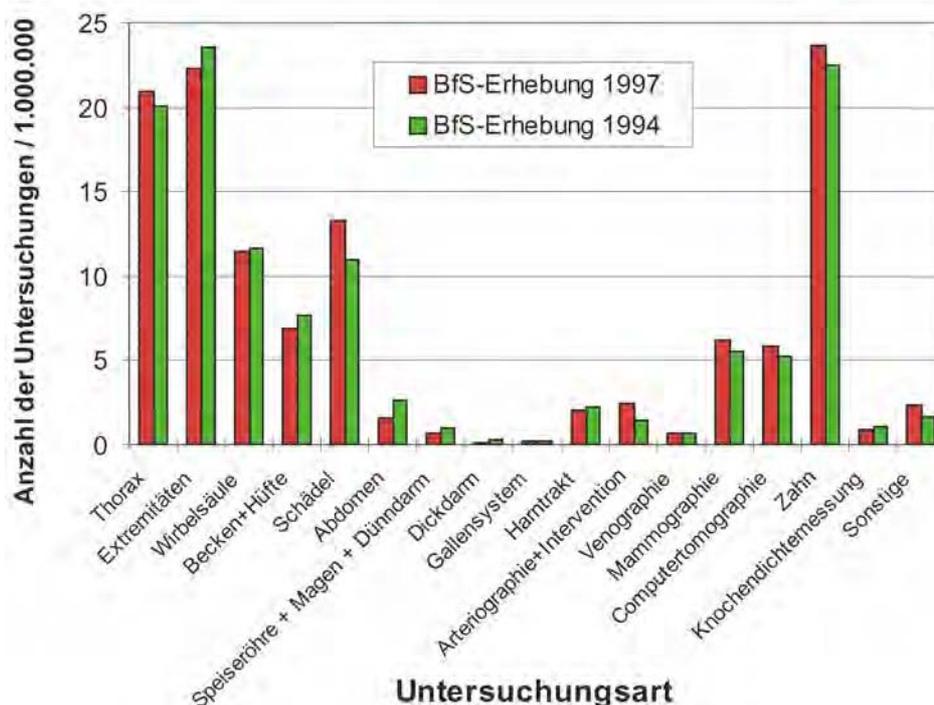
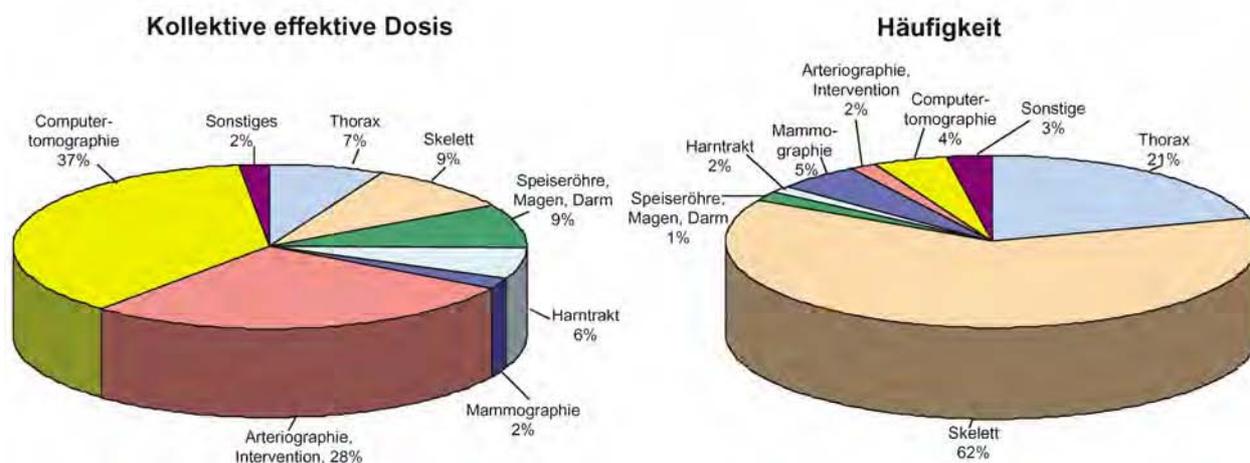


Abbildung IV.12

Prozentualer Anteil der Röntgenuntersuchungen und ihr Anteil an der kollektiven effektiven Dosis in Deutschland für 1997



3. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt

3.1 Industrierzeugnisse und technische Strahlenquellen

Bestimmte Industrierzeugnisse wie z. B. wissenschaftliche Instrumente, elektronische Bauteile, Leuchtstoffröhren, Ionisationsrauchmelder, Gasglühstrümpfe, Schweißelektroden und keramische Gegenstände enthalten radioaktive Stoffe verschiedener Art und Aktivität. Der Umgang mit diesen Erzeugnissen wird durch ein differenziertes Anzeige- und Genehmigungssystem geregelt, das auch einen genehmigungsfreien Umgang, z. B. nach einer Bauartzulassung oder bei Unterschreiten festgelegter Aktivitätswerte vorsieht.

Bei einigen technischen Prozessen werden Strahlenquellen zur Messung und Steuerung (z. B. Füllstand-, Dichte- und Dichtemessung) oder zur Qualitätskontrolle bei der zerstörungsfreien Materialprüfung eingesetzt. Der Umgang mit diesen technischen Strahlenquellen bedarf in der Regel der Genehmigung oder einer Bauartzulassung.

Die Strahlenschutzverordnung regelt den Umgang mit diesen Industrierzeugnissen und die Röntgenverordnung den Einsatz von Röntengeräten, um – neben den Arbeitnehmern – die Bevölkerung vor unnötiger Strahlenexposition zu schützen. Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung, die aus der Anwendung der entsprechenden radioaktiven Stoffe resultiert, liegt unter 0,01 mSv pro Jahr.

3.2 Störstrahler

Störstrahler sind Geräte oder Einrichtungen, die Röntgenstrahlen erzeugen, ohne dass sie zu diesem Zweck betrieben werden (z. B. Elektronenmikroskope und Hochspan-

nungsgleichrichter); sie unterliegen einer Genehmigungspflicht, sofern eine Bauartzulassung nicht vorliegt. Zu den Störstrahlern gehören auch Kathodenstrahlröhren in Bildschirmgeräten, wie z. B. in Fernsehgeräten. Die Grenzwerte der Ortsdosisleistung der Störstrahler sind in der Röntgenverordnung geregelt.

Der Beitrag von Störstrahlern zur Strahlenexposition der Bevölkerung führt zu einer effektiven Dosis von weniger als 0,01 mSv pro Jahr.

4. Berufliche Tätigkeit

4.1 Personendosisüberwachung

Alle beruflich strahlenexponierten Personen, bei denen die Möglichkeit einer erhöhten Strahlenexposition von außen besteht, werden mit Personendosimetern überwacht, die von den sechs zuständigen amtlichen Personendosismessstellen ausgegeben und ausgewertet werden. Die Zahl der überwachten Personen betrug im Jahr 2000 insgesamt 328 532, davon im Bereich Medizin 246 817. Abbildung IV.14, S. 26 zeigt den Verlauf seit 1981 für die alten und ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer. Da bei Arbeitskräften mit wechselndem Arbeitsplatz Mehrfachzählungen möglich sind, ist diese Zahl größer als die zugrunde liegende Anzahl natürlicher Personen.

Die nachstehenden Dosisangaben beziehen sich auf Photonenstrahlen, da diese in nahezu allen Kontrollbereichen die Dosis bestimmen. Dosisbeiträge durch Neutronen- und Betastrahler sind nur in wenigen Fällen von Bedeutung. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,15 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, dass bei dem größten Teil aller Überwachten (88%) während des ganzen Jahres die untere Messbereichsgrenze des Personendosimeters von

0,2 mSv unterschritten wird, was im Bereich Medizin auf 90 %, in den nicht medizinischen Bereichen auf 78 % der Überwachten zutrifft (siehe Abbildung IV.15). Bei den verbleibenden Personen ergibt sich eine ausgeprägte Häufung bei kleinen Dosiswerten. Bildet man einen Mittelwert nur für diese Überwachten (42 064 Personen), so ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 1,19 mSv.

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) im Jahr 2000 betrug 50,2 Personen-Sv. Die Beiträge typischer Tätigkeitszweige zur Kollektivdosis zeigt die Abbildung IV.16. Einige Angaben über die berufliche Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken sind in den Abbildungen IV.17 und IV.18 enthalten.

4.2 Inkorporationsüberwachung

Beruflich strahlenexponierte Personen, bei denen während ihrer Tätigkeit eine Aktivitätszufuhr oberhalb 10 % der Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr nicht ausgeschlossen werden kann, werden in der Regel durch Aktivitätsmessungen in Ganz- und Teilkörperzählern bzw. durch Analysen ihrer Ausscheidungen überwacht. Nach den Erkenntnissen der zuständigen Aufsichtsbehörden der Länder werden bei diesen Inkorporationsmessungen nur geringfügige, beruflich bedingte Körpergehalte radioaktiver Stoffe ermittelt – ausgenommen in Fällen besonderer Vorkommnisse (siehe Kapitel IV. 5).

5. Besondere Vorkommnisse

Eine Übersicht über besondere Vorkommnisse im Anwendungsbereich der Strahlenschutzverordnung (beim

Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe) im Jahr 2000 enthält Tabelle IV.5, S. 31ff. Die Übersicht dient dazu, mögliche Fehlerquellen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aufzuzeigen, um vergleichbare Vorkommnisse zu vermeiden. Die Anmerkungen zum radiologischen Gefährdungspotenzial beziehen sich auf die Umstände des Einzelfalls, vor allem auf die Beschaffenheit des radioaktiven Stoffs (mit oder ohne Umhüllung bzw. undicht, Aktivität, Eindringtiefe und biologische Wirksamkeit der Strahlung) und die Art der Handhabung oder Nutzung.

Die Übersicht beruht auf den Feststellungen der für den Strahlenschutz zuständigen Behörden der Bundesländer beim Vollzug der Strahlenschutzverordnung und stellt keinen Bericht über die im Rahmen der Bekämpfung des illegalen Handels oder der Nuklearkriminalität gewonnenen Erkenntnisse dar.

Fälle erhöhter Radioaktivität in Metallschrott sind in der Übersicht aufgeführt, soweit radioaktive Quellen gefunden wurden.

6. Fall-out von Kernwaffenversuchen

In den Jahren 1945 bis 1980 wurde eine große Anzahl von oberirdischen Kernwaffenversuchen durchgeführt; seit 1981 gab es nur noch unterirdische Kernwaffenversuche. Im Jahr 2000 wurden keine Atomtests durchgeführt.

Der allgemeine Pegel der Umweltradioaktivität durch die früheren Kernwaffenversuche in der Atmosphäre ist in den letzten 36 Jahren stetig zurückgegangen. Ihr Anteil an der gesamten Strahlenexposition des Menschen beträgt zurzeit weniger als 0,01 mSv pro Jahr.

Abbildung IV.13

Prozentualer Anteil der nuklearmedizinischen Untersuchungen und ihr Anteil an der kollektiven effektiven Dosis in Deutschland für 1997

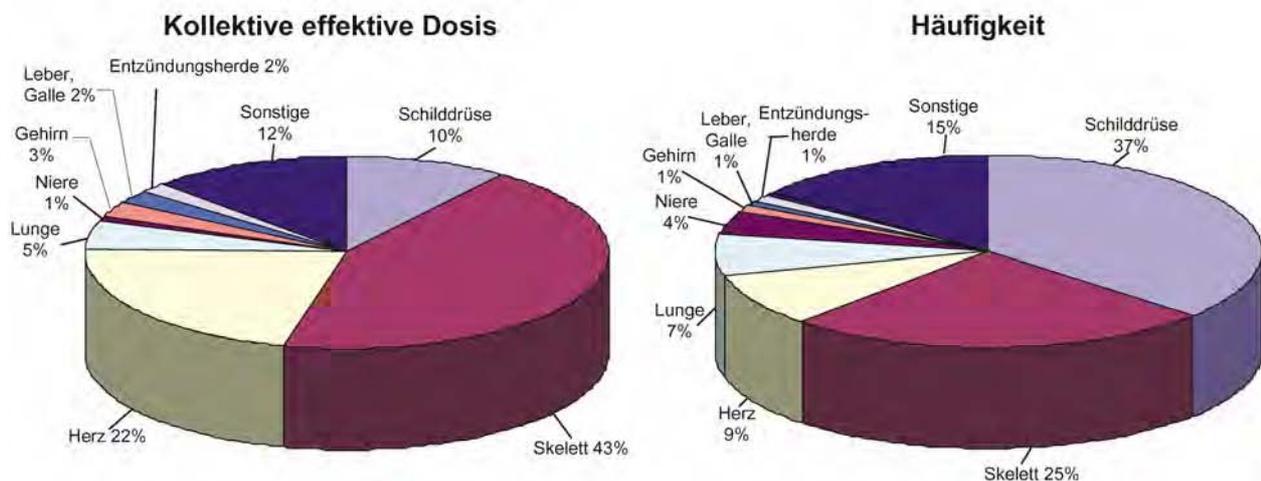


Abbildung IV.14

**Mit Personendosimetern überwachte Personen in Deutschland
(ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer)**

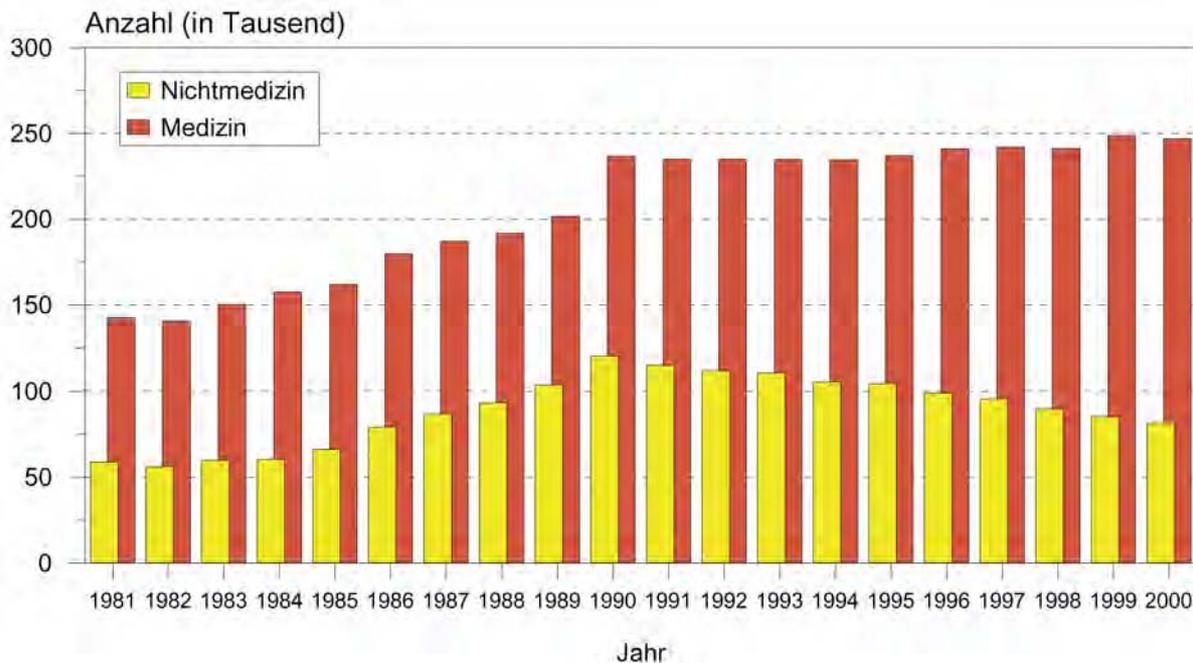


Abbildung IV.15

Häufigkeitsverteilung der Personendosen beruflich Strahlenexponierter im Jahr 2000

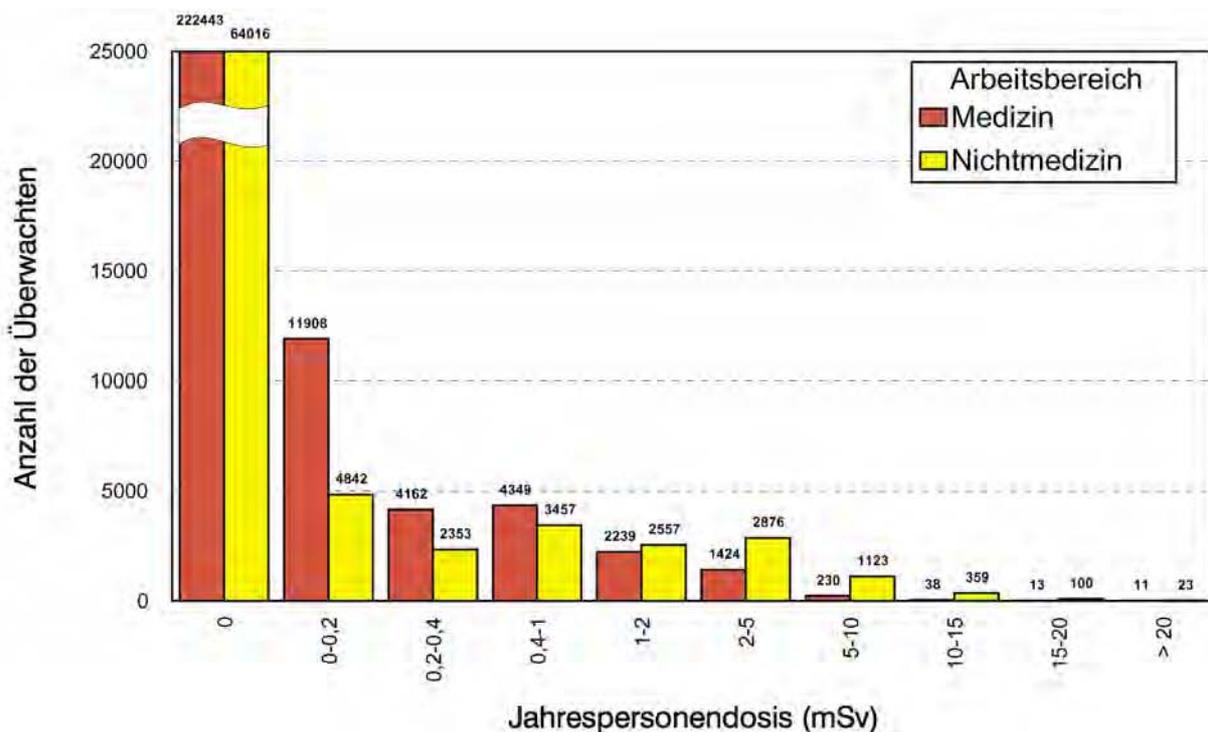


Abbildung IV.16

**Entwicklung der jährlichen Kollektivdosis und Verteilung auf Strahlenanwendungsbereiche
(ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer)**

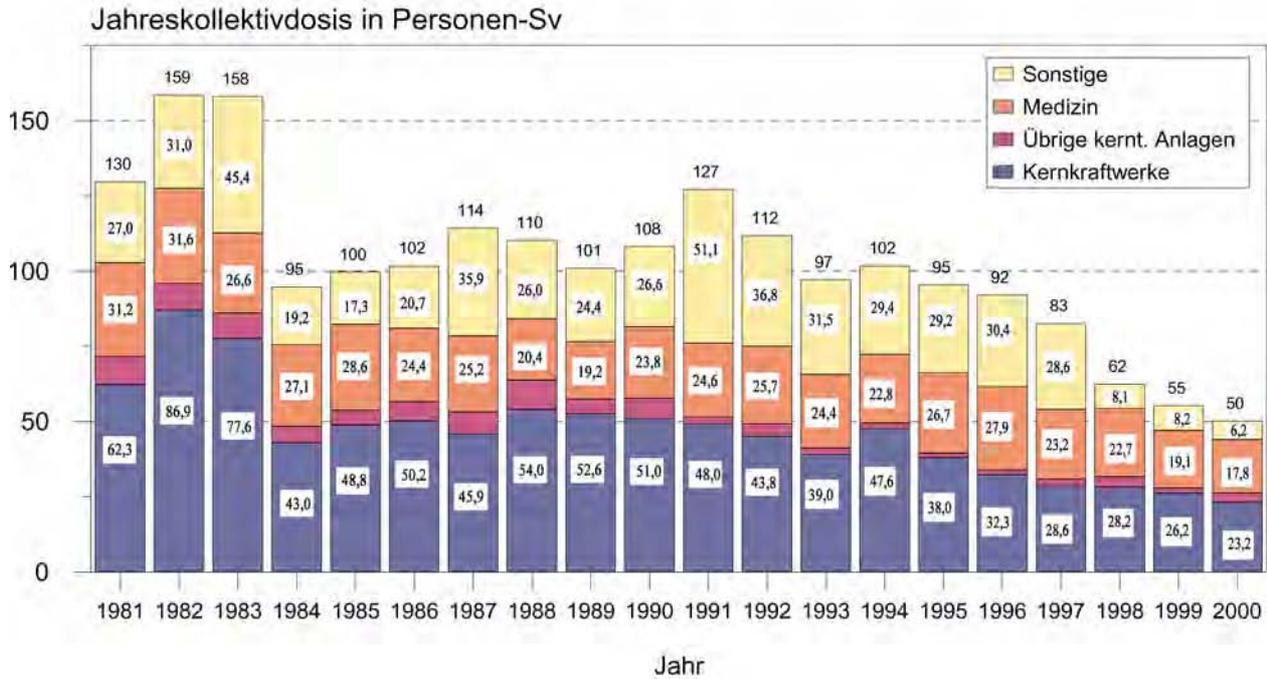


Abbildung IV.17

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

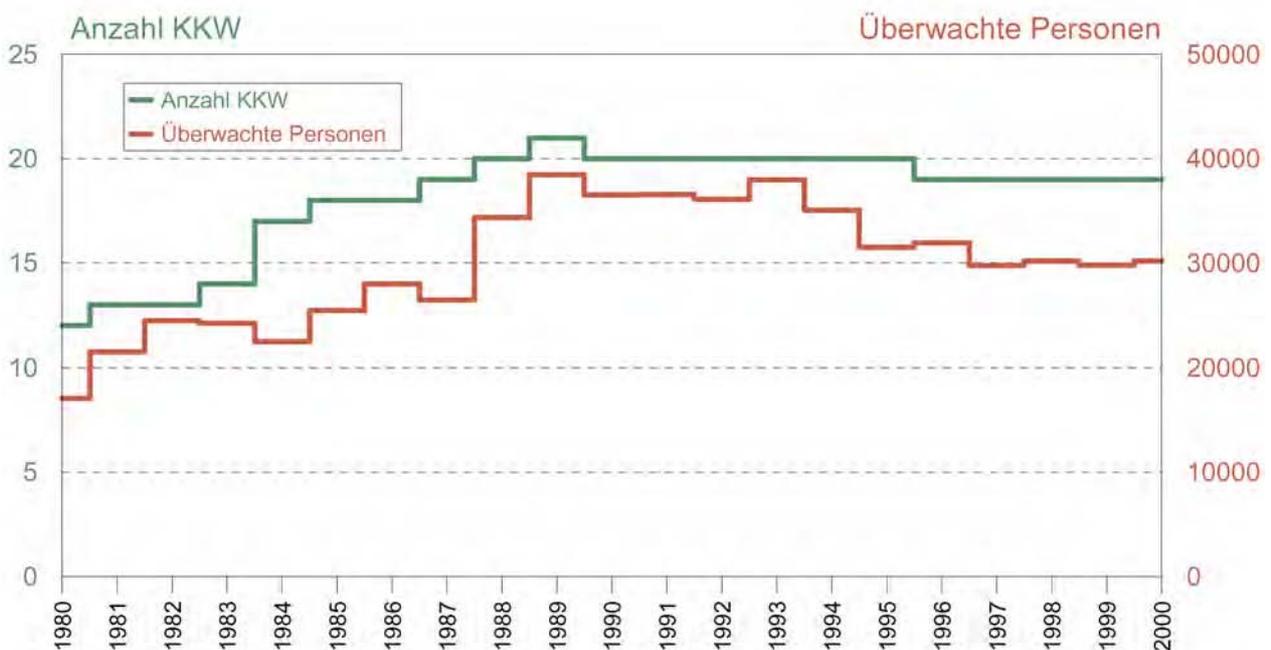


Abbildung IV.18

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

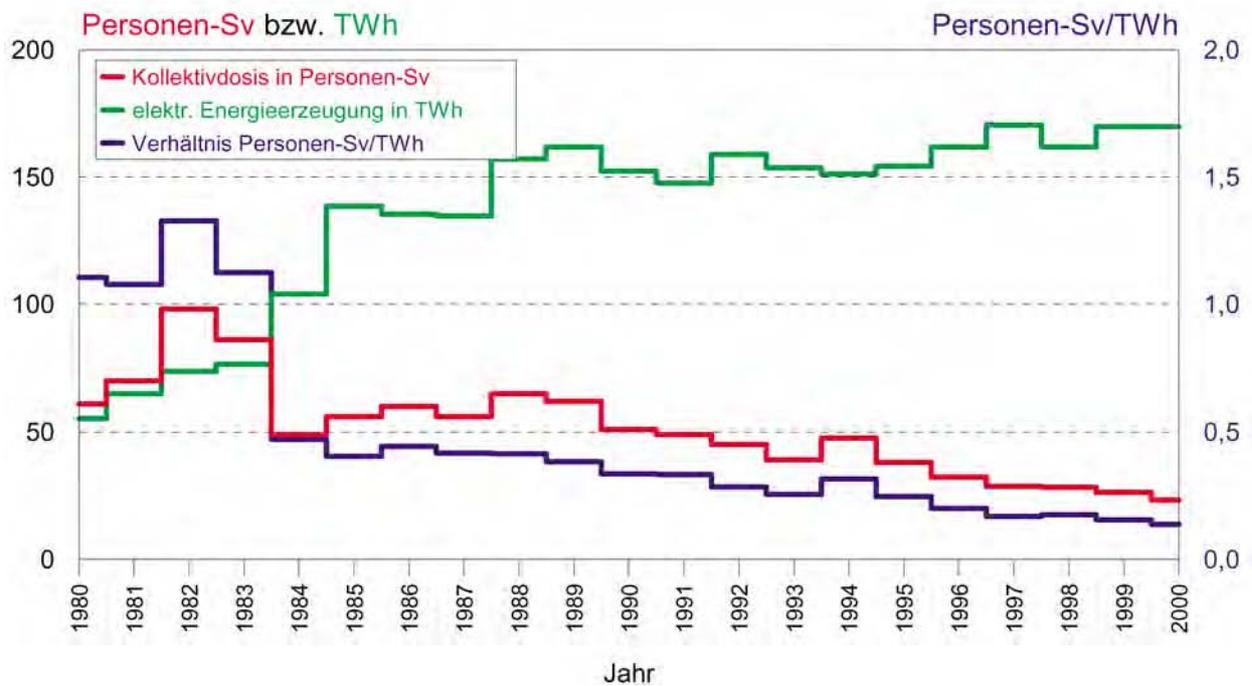


Tabelle IV.1

Grenznahe kerntechnische Anlagen im benachbarten Ausland

Land	Anlage/Standort	Entfernung zur deutschen Grenze
Schweiz	Kernkraftwerk Beznau (2 Blöcke)	ca. 6 km
	Paul Scherrer Institut Villigen/Würenlingen	ca. 7 km
	Kernkraftwerk Mühleberg	ca. 70 km
	Kernkraftwerk Gösgen-Däniken	ca. 20 km
	Kernkraftwerk Leibstadt	ca. 0,5 km
Frankreich	Kernkraftwerk Fessenheim (2 Blöcke)	ca. 1,5 km
	Kernkraftwerk Cattenom (4 Blöcke)	ca. 12 km
Niederlande	Kernkraftwerk Dodewaard (Betrieb beendet)	ca. 20 km
	Urananreicherungsanlage Almelo	ca. 15 km

Tabelle IV.2

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser aus dem
Endlager Moorsleben im Jahr 2000**

	Abluft/Bq	Abwasser/Bq
Tritium	2,8 E+10	9,0 E+03
Kohlenstoff-14	2,2 E+09	---
langlebige Aerosole	1,8 E+06	---
Radonfolgeprodukte	8,7 E+09	---
Nuklidgemisch außer Tritium	---	3,2 E+04

Tabelle IV.3

Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen im Jahr 1997 in Deutschland (82,05 Mio. Einwohner)

Organ/Untersuchung	Ambulant		Stationär^d		Gesamt in Tausend	je tausend Einwohner
	in Tausend	Anteil in %^a	in Tausend	Anteil in %^a		
Brustkorb	9 508	13	15 460	49	24 968	304
Gliedmaßen	18 877	26	3 430	11	22 307	272
Wirbelsäule	10 067	14	1 430	4	11 497	140
Becken und Hüfte	5 725	8	1 240	4	6 965	85
Schädel	12 007	16	1 600	5	13 607	166
Bauchraum (leer)	965	1	640	2	1 605	20
Speiseröhre/Magen/ Dünndarm	741	1	180	1	921	11
Dickdarm	634	1	270	1	904	11
Galle	68	0	90	0	158	2
Harntrakt	1 397	2	640	2	2 037	25
Arteriendarstellung und Intervention	439	1	1 950	6	2 389	29
Venendarstellung	356	0	300	1	656	8
Mammographie	5 840	8	380	1	6 220	76 ^b
Computertomographie	3 198	4	2 580	8	5 778	70
Knochendichtemessung	902	1	?	-	902	11
nicht klassifizierte Röntgenuntersuchungen	3 031	4	1 560	5	4 591	56
sonstige Untersuchungsstellen ^c					6 598	80
Zwischensumme	73 755	100	31 750	100	112 103	1 366
Zahnuntersuchungen	23 624		20		23 644	288
Gesamt	97 379		31 770		135 747	1 654

^a Die Prozentangaben sind auf die Humanmedizin ohne Zahnmedizin bezogen

^b entspricht 199 je 1 000 Frauen im Alter ab 25 Jahren (31,29 Mio.)

^c z. B. Gesundheitsämter, Justizvollzugsanstalten u.a. Diese Untersuchungsstellen sind weder ambulant noch stationär zugeordnet

^d Die Unsicherheit der Abschätzung wirkt sich besonders bei den sehr häufigen Untersuchungen des Brustkorbs (Thorax) auf die angegebene Häufigkeit aus.

Tabelle IV.4

**Bereiche mittlerer Werte für die effektive Dosis für häufige Röntgenuntersuchungen
an Standardpatienten 70 ± 5 kg Körpergewicht**

Untersuchungsart	effektive Dosis E [mSv]
Untersuchungen mit Röntgenaufnahmen	
Zahnaufnahme	≤ 0,01
Gliedmaßen (Extremitäten)	0,01 – 0,1
Schädelaufnahme	0,03 – 0,1
Halswirbelsäule in 2 Ebenen	0,09 – 0,15
Brustkorb (Thorax), 1 Aufnahme	0,02 – 0,05
Mammographie beidseits in je 2 Ebenen	0,4 – 0,6
Brustwirbelsäule in 2 Ebenen	0,5 – 0,8
Lendenwirbelsäule in 2 Ebenen	0,8 – 1,8
Beckenübersicht	0,5 – 1,0
Bauchraum (Abdomenübersicht)	0,6 – 1,1
Röntgenuntersuchungen mit Aufnahmen und Durchleuchtung	
Magen	6 – 12
Darm (Dünndarm bzw. Kolonkontrasteinlauf)	10 – 18
Galle	1 – 5
Harntrakt (Urogramm)	2,5 – 7
Bein-Becken-Phlebographie	0,5 – 2
Arteriographie und Interventionen	10 – 20
CT-Untersuchungen	
Kopf	2 – 4
Wirbelsäule/Skelett	3 – 10
Brustkorb (Thorax)	6 – 10
Bauchraum (Abdomen)	10 – 25

CT: Computertomographie

Tabelle IV.5

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe**

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
04.01.00	Fund eines Kampfstoffdetektors ausländischer Gaststreitkräfte (Am-241 925 kBq) in einem Wertstoffhof	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering, Gerät unversehrt	Rückgabe an die Gaststreitkräfte
06.01.00	Sicherstellung eines beschädigten Frachtstückes mit radioaktiven Stoffen (I-125 111 kBq) auf einem Flughafen	Unbekannt	Gefährdungspotenzial gering	Kontaminationsmessungen, ordnungsgemäße Entsorgung
18.01.00	Kontamination eines Kundendienstraumes einer Firma durch einen undichten zur Entsorgung anstehenden Strahler (Kr-85 1,85 GBq)	Strahler 10 bis 12 Jahre alt	Gering, max. Teilkörperdosis (Haut) 120 µSv	Ordnungsgemäße Entsorgung
25.01.00	Störung der Strahlerrückführung an einem Afterloadinggerät in einer Klinik beim Selbsttest des Gerätes	Defekter Endschalter	Keine	Reparatur durch Servicefirma, Sachverständigenprüfung
03.02.00	Verlust eines RIA-Kits (I-125 1,48 MBq) bei einer Transportfirma	Vermutlich Diebstahl	Gefährdungspotenzial gering	Behördliche Ermittlungen
04.02.00	Verlust von zwei Prüfstrahlern (Kr-85 56 kBq und Na-22 11 kBq) in einer Universität	Unbekannt	Gefährdungspotenzial gering	Behördliche Ermittlungen
07.02.00	Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90 3,7 MBq) bei einer Gesellschaft für Abfallwirtschaft	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering, Strahler unversehrt	Sicherstellung des Strahlers, keine Kontaminationen bei 3 beteiligten Beschäftigten nachweisbar, Feststellung des Eigentümers, weitere Untersuchungen
22.02.00	Brand einer Kunststoffabdeckung an einem Messkopf (Pm-147 18,5 -GBq) einer Papiermaschine in einer Papierfabrik	Ausfall einer Übertemperatursicherung	Keine, Messkopf unversehrt	Dichtheitsprüfung, Erneuerung der Kunststoffabdichtung
23.02.00	Fund von zwei Strahlern (Cs-137 max. 20 mSv/h und Co-60 max. 0,94 mSv/h) bei Aufräumarbeiten in einer Firma	Unterlassene Entsorgung bei Stilllegung der Geräte	Keine, da Strahler in Strahlenschutzbehälter	Ordnungsgemäße Entsorgung
24.02.00	Registrierung von Strahlung bei Aufräumarbeiten einer Assistentin im Röntgenraum durch den akustischen Warnton nach Ablauf der Uhr	Defekt am Fußschalter durch verkeilte Schraube	Keine, da Blende geschlossen, Leistung heruntergeregelt und kein Aufenthalt im Direktstrahl	Sofortauswertung des Dosimeters ergab keinen Nachweis einer Exposition

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
25.02.00	Fund eines Prüfstrahlers (Cs-137 16 MBq) in einer verpackten Messapparatur bei Aufräumarbeiten in einem übertägigen Gebäude des Endlagers für radioaktive Stoffe	Unterlassene ordnungsgemäße Einlagerung vor vielen Jahren	Gefährdungspotenzial gering	Sicherstellung
02.03.00	Fund von zwei Prüfstrahlern (Sr-90/Y-90 je 0,6 MBq) und einem Ionisationsrauchmelder (Pu-239 18,5 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
03.03.00	Fund von einem Prüfstrahler (Sr-90/Y-90 0,6 MBq) und einem Meßgerät mit Strahler (Sr-90/Y-90 0,6 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
06.03.00	Fund von einer Ampulle Übungsstaub (Co-60, Ba-133, Eu-152)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
14.03.00	Abbruch des Transportes eines Typ-A-Versandstückes (Am-241 296 GBq, Cs-137 55,5 GBq) in einem ausländischen LKW durch die Polizei	keine Beförderungsgenehmigung, unvollständige Beförderungspapiere	keine	Ordnungswidrigkeitsverfahren, Weitertransport durch autorisierte Spedition
15.03.00	Sicherstellung eines Radium-Emanationsapparates (Ra-226 ca. 1 MBq) zur Trinkwasserbereitung	Fund in einem Nachlass	Keine, da Apparat unversehrt und unbe-nutzt auf einem Dachboden gelagert	Kontaminationskontrolle, ordnungsgemäße Entsorgung
16.03.00	Fehlpositionierung des Strahlers eines Afterloadinggerätes während einer Patientenbehandlung	Elektromagnetische Einstrahlung von außen	Therapiedosis in einer von sieben Sitzungen statt 3,45 Gy nur 2,71 Gy	Austausch der Steuerungssoftware durch den Hersteller
20.03.00	Fund eines Prüfstrahlers (Pu-239 4 kBq)	Unzureichende Räumung eines ehemals militärisch genutzten Bereiches	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
24.03.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (I-131 3 µSv/h an der Fahrzeugwand) bei einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage, Verursacher ermittelt

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
24.03.00	Verdacht auf kontaminiertes Abwasser in einem Installationschacht einer nuklearmedizinischen Therapiestation	Ablagerung radioaktiver Stoffe durch zu geringe Spülung	Keine	Erhöhung des Spülwassereinsatzes, weitere Untersuchungen
24.03.00	Fund von zwei Prüfstrahlern (Co-60 je 0,4 MBq)	Unzureichende Räumung eines ehemals militärisch genutzten Bereiches	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
27.03.00	Fund eines Strahlers (Cs-137 778 kBq) eines zerstörten Flüssigszintillationsmeßgerätes in einer Elektronikschrottlieferung bei einem Schrotthändler	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Sicherstellung, Feststellung des früheren Besitzers
27.03.00	Fund eines Behälters mit Strahlenzeichen bei einer Hausdurchsuchung	Unterlassene Entfernung des Strahlenwarnzeichens bei Entleerung des Behälters	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
31.03.00	Kontamination eines Mitarbeiters beim Umgang mit einer H-3-haltigen Flüssigkeit in einem Labor einer Universität	Unachtsamkeit	Gefährdungspotenzial gering, max. Inhalationsdosis 3µSv	Unverzügliche Dekontamination, Ausscheidungsanalyse
04.04.00	Kontamination einer Stuhlsitzfläche mit P-32 (max. 1,11 MBq), obwohl offiziell kein Umgang mit P-32 stattfand	Unbekannt	Exposition eines Mitarbeiters (ca. 30 mSv Personendosis, ca. 120 mSv Gonadendosis)	Staatsanwaltschaftliche Ermittlungen, Dekontamination, ärztliche Untersuchung
05.04.00	Fund von 2 Kunststoffflaschen mit je 500 ml Uranylacetat in einer Hausmüllsortieranlage	Unzulässige Entsorgung	Keine, Behältnisse unversehrt und kontaminationsfrei	Ordnungsgemäße Entsorgung
05.04.00	Kurzzeitige Exposition eines Patienten außerhalb des Zielvolumens während der Behandlung durch freistrahlen den Ir-192- Strahler (486 GBq) eines Afterloadinggerätes	Defekte Kuppelung	Zusätzliche Strahlenexposition des Patienten kleiner 1 mSv	Reparatur des Gerätes, Sachverständigenprüfung, Durchführung zusätzlicher patientennaher Ortsdosimetrie und Videoüberwachung der Strahlerführung
08.04.00	Verkehrsunfall eines LKW mit radioaktiven Versandstücken (verbrauchte Mo-99/Tc-99-Generatoren)	Fahrfehler eines Pkw-Fahrers	Keine, Versandstücke unversehrt	Kontaminationsmessungen

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
11.04.00	Fund von radioaktiv kontaminiertem Schrott, Betonabrisssmaterial und Erdreich nach Abriss eines ehemaligen Isotopenbunkers	Unterlassene Information, unzulässige Entsorgung	Kontamination von Teilen des Betriebsgeländes	Ordnungsgemäße Entsorgung
13.04.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Hausmüllcontainer (I-131 0,9 µSv/h an der Fahrzeugwand) bei einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage, Verursacher ermittelt
14.04.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (Tl-201 0,8 µSv/h an der Fahrzeugwand) bei einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage, Verursacher ermittelt
20.04.00	Fehlanzeige über Strahlerposition an einem Afterloadinggerät (Ir 192 370 GBq) während einer Patientenbehandlung in einer Klinik	Unbekannt	Keine, da Strahler ordnungsgemäß eingefahren	Überprüfung der Anlage
25.04.00	Sicherstellung eines Herzschrittmachers (Pu-238 96 GBq) bei einer verstorbenen Patientin	Unterlassene Entsorgung		Ordnungsgemäße Entsorgung
02.05.00	Fund eines Ra-226-Strahlers (ca. 10-20 kBq) in einem Aluminiumschrottballen bei einer Recyclingfirma	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
11.05.00	Fund von Strahlenschutzbunkern anhand der Beschilderung bei Abrissarbeiten einer alten Kaserne	Unterlassene Entfernung von Strahlenwarnzeichen	Keine Strahler, keine Kontaminationen	
15.05.00	Verkehrsunfall eines PKW mit radioaktivem Versandstück (Mo-99/Tc-99m Generator)	Auffahren eines anderen PKW	keine, Verpackungsinhalt unversehrt	
17.05.00	Fund eines Radium-Strahlers aus einem Radium-Trinkbecher in einer Schrottladung bei einem Schrotthändler	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
17.05.00	Fund von zwei Radium-Emanationsapparaten (Ra-226 ca. 0,9 und 2 MBq) auf dem Dachboden eines Wohnhauses	Unzulässige Lagerung	Keine, Apparatur seit 25 Jahren nicht genutzt	Ordnungsgemäße Entsorgung
20.05.00	Sicherstellung eines Radiumbechers (Ra-226 ca. 200 kBq) auf einem Flohmarkt	Ungenehmiger Umgang	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
22.05.00	Wiederholtes Auftreten einer Fehlanzeige über die Strahlerpositionierung an einem Afterloadinggerät (Ir-192 370 GBq) während einer Patientenbehandlung in einer Klinik	Unbekannt	Keine, Therapiesitzung nur unterbrochen	Stilllegung der Anlage bis zur Klärung der Ursache
24.05.00	Nichtabschalten einer Telekobalt-Therapie-Anlage nach Ablauf der geplanten Bestrahlungszeit in einer Klinik	Ursache nicht feststellbar	Patientenbestrahlung (1,68 Gy) im Bereich der therapeutisch vorgesehenen Tagesdosis bei drei verschiedenen Einfallrichtungen	Austausch der Bestrahlungsuhr
08.06.- 23.06.00	Fehlbestrahlung von ca. 110 Patienten mit einer Röntgentherapieeinrichtung bei der Schmerztherapiebehandlung	Verwendung eines falschen Filters	Hautrötungen und Verbrennungen 1. und 2. Grades	Staatsanwaltschaftliche und behördliche Ermittlungen
27.06.00	Fund eines Strahlers (Co-60 1,1 GBq) einer radiometrischen Messeinrichtung eines Verbrennungsofens in einer LKW-Ladung durch ein Zollamt	Unterlassener Ausbau des Strahlers bei Abbau des Ofens	Keine	Behördliche Ermittlungen
Juli 2000	Fund eines Strahlers (Co-60) aus einer Füllstandsmessanlage im Schrott bei einem Stahlwerk	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Feststellung des Eigentümers, behördliche Ermittlungen, ordnungsgemäße Entsorgung
04.07.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (Ra-226 ca. 200 kBq) auf einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung, Herkunft ermittelt
10.07.00	Feststellung erhöhter Ortsdosisleistung (Co-60-Strahler, 10 cm über Oberfläche der Ladung max. 185 µSv/h) an einem LKW mit Buntmetallschrott durch ein Zollamt	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Einfuhrverbot
14.07.00	Fund von drei Prüfstrahlern (Pu-Gemisch je 37 MBq)	Unzureichende Räumung eines ehemals militärisch genutzten Bereiches	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
18.07.00	Verlust eines in Folie eingeschweißten Strahlers (Ba-133 ca. 400 kBq) bei einem Therapiepatienten	Unterlassene Entfernung des Strahlers nach einer Messung	Gefährdungspotenzial erhöht bei Kontakt mit dem Strahler (in 1 cm 0,25 mSv/h)	Umfangreiche Suche, auch unter Einschalten der Presse erfolglos

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
18.07.00	Feststellung erhöhter Ortsdosisleistung an einem mit Stahlschrott beladenen Güterwagen (zwei Co-60-Strahler, max. 90 µSv/h an Waggonaußenseite) durch ein Zollamt	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Einreiseerlaubnis nach ordnungsgemäßer Entsorgung der Strahler in das Nachbarland
28.07.00	Störung der Strahlerrückführung an einem Afterloadinggerät (Ir-192 444 GBq) in einer Klinik während der Patientenbehandlung	Defekter Endschalter	Geringfügige Patientenüberexposition (0,5 µSv am Rumpf und 5 µSv an den Füßen)	Reparatur durch Servicefirma, Sachverständigenprüfung
07.08.00	Freisetzung von 520 MBq O-15 in die Abluft beim Betrieb einer Zyklotronanlage in einer Klinik	Defektes Target	Keine Exposition von Personen, Freisetzung direkt in die Abluft	Austausch des Targets
18.08.00	Fund eines Strahlers (Co-60) im angelieferten Schrott in einem Stahlwerk	Unterlassene Information über eingebaute radiometrische Messeinrichtung mit zwei Strahlern vor Demontage von Anlagen einer Gießerei	Gefährdungspotenzial gering	Erfolgreiche Suche nach dem zweiten Strahler; ordnungsgemäße Entsorgung; Ermittlungsverfahren
28.08.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (I-131 0,5 µSv/h an der Fahrzeugwand) bei einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Keine
30.08.00	Aufenthalt eines Hausmeisters im Bestrahlungsraum einer Klinik beim Einschalten eines medizinischen Beschleunigers zu Messzwecken	Unachtsamkeit	Strahlenexposition des Hausmeisters kleiner 1 mSv	Vorstellung des Hausmeisters beim ermächtigten Arzt, Maßnahmen gegen Strahlenschutzbeauftragten eingeleitet
30.08.00	Feststellung der Undichtheit eines Strahlers (C-14 9, 25 MBq) eines Schichtdickenmessgerätes bei einer Dichtheitsprüfung	Unbekannt	Keine	Strahler sichergestellt, vom Hersteller ausgetauscht und entsorgt, Dichtheitsprüfung für 6 weitere Strahler dieses Typs empfohlen
07.09.00	Verkehrsunfall eines Lieferwagens mit 24 Typ-A-Versandstücken (Radiopharmaka)	Überschlagen des Fahrzeugs infolge unangepasster Geschwindigkeit	keine, Verpackungsinhalt unversehrt	
08.09.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (I-131 0,5 µSv/h an der Fahrzeugwand) auf einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Keine, Herkunft ermittelt

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
20.09.00	Fund radioaktiver Stoffe (H-3 18,5 GBq) bei Aufräumarbeiten in einer Forschungseinrichtung	Unterlassene Entsorgung	Keine	Ordnungsgemäße Weitergabe
26.09.00	Fund eines Strahlers (Sr-90 37 MBq) im Metallschrott bei einem Schrotthändler	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
27.09.00	Fund von thorium- und uranhaltigen Materialien (Th-nat 32,6 MBq, U-nat 2,3 MBq) auf einem Privatgrundstück	Ungenehmigte Lagerung	Gefährdungspotenzial gering, da zugriffssichere Lagerung	Ordnungsgemäße Entsorgung, polizeiliches Ermittlungsverfahren
Oktober 2000	Verlust von 6 Ionisationsrauchmeldern (Am-241) bei Umbauarbeiten eines Gebäudes	Unzulässige Entsorgung mit Bau-schutt	Gefährdungspotenzial gering	
06.10.00	Fund eines Strahlers (Ortsdosisleistung 1,5 mSv/h) im Tresor einer Privatwohnung	Unzulässige Lagerung	Gefährdungspotenzial bei Kontakt erhöht	Ordnungsgemäße Entsorgung
07.10.00	Verlust eines Metallanalysegerätes mit drei Strahlern (Cd-109 185 MBq und 370 MBq, Fe-55 1,67 GBq) in einer Firma	Diebstahl	Gefährdungspotenzial gering bei sachgerechter Handhabung	Polizeiliches Ermittlungsverfahren
23.10.00	Überschwemmung von Labors im Kontrollbereich eines Forschungsinstituts	Öffnung eines Kühlwasseranschlusses durch Sabotage	Keine Kontaminationen nachweisbar	Kontaminationsmessungen
26.10.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (I-131 0,8 µSv/h an der Fahrzeugwand) auf einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage
26.10.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (Tc-99m 0,2 µSv/h an der Fahrzeugwand) auf einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage, Herkunft ermittelt
30.10.00	Fund eines Flächenstrahlers (Ra-226 17,4 MBq) in einem Metallschrottcontainer einer Rohstoffverwertungsfirma	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
02.11.00	Fund radioaktiver Stoffe (Ra-226 88,8 MBq) in einem Kunststoffbehälter mit Kupferschrott bei einem Schrotthändler	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
08.11.00	Fund von 4 Strahlern (Cs-137 844 und 245 MBq, Am-Be-241 3,2 und 1,48 GBq) in verschlossenem Lagerraum einer Firma	Unterlassene Entsorgung nach Beendigung des genehmigten Umgangs	Gefährdungspotenzial gering, da Strahler im Abschirmbehälter in verschlossenem Stahlschrank	Ordnungsgemäße Entsorgung
14.11.00	Verkehrsunfall eines Kleintransporters mit radioaktivem Typ-B-Versandstück (Ir-192 Prüfstrahler)	Kollision des Kleintransporters mit PKW	keine, Verpackungsinhalt unversehrt	
21.11.00	Fund eines Ionisationsrauchmelders (Pu-239 18,5 MBq) und von zwei Prüfstrahlern (Cs-137 72 kBq, Sr-90/Y-90 0,6 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotenzial gering	Sicherstellung
23.11.00	Fund radioaktiver Stoffe (Thoriumnitrat ca. 2 MBq) in einem Futterphosphatwerk	Unzulässige Lagerung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
27.11.00	Verkehrsunfall eines Kleintransporters mit 7 Typ-A-Versandstücken (Radiopharmaka)	Kollision des Kleintransporters mit PKW	keine, Verpackungsinhalt unversehrt	
27.11.00	Verkehrsunfall eines Fahrzeugs mit radioaktiven Versandstücken	Fahrfehler	Keine; Versandstücke blieben unversehrt	
28.11.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (Ra-226 1,5 µSv/h an der Fahrzeugwand) auf einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
30.11.00	Fund eines kontaminierten Stahlstabes in einer Schrottladung (Co-60 ca. 7 MBq) bei einem Schrotthändler	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
05.12.00	Fund eines Transportbehälters mit Strahler (Cs-137 1,5 MBq) in einer Garage auf einem Privatgrundstück	Unzulässige Lagerung	Gefährdungspotenzial gering, Strahler im Abschirmbehälter	Polizeiliche Ermittlungen
05.12.00	Zerstörung und Verlust des Strahlers (Am-241 90,55 MBq) eines Ionisationsrauchmelders bei Demontearbeiten	Ungenügende Sorgfalt	Gefährdungspotenzial gering	Behördliche Ermittlungen
12.12.00	Verlust von zwei Prüfstrahlern (Am-241/Sr-90 1,85 kBq und Cs-137 333 kBq) beim Transport	Unbekannt	Gefährdungspotenzial gering	Am-241/Sr-90-Strahler gefunden, behördliche Ermittlungen

noch Tabelle IV.5

Datum	Vorkommnis	Ursache	Folgen	Maßnahmen
14.12.00	Fund radioaktiver Stoffe in einem Müllcontainer (Tc-99m 2,8 µSv/h an der Fahrzeugwand) auf einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage
15./16.12.00	Verlust einer Feuchtemesssonde (Am-241 1,48 GBq) bei einer Firma	Diebstahl	Gefährdungspotenzial gering bei sachgerechter Handhabung	Behördliche Ermittlungen
18.12.00	Fund eines Radium-Emanators (Ra-226 740 kBq) in einem Presscontainer mit Hausmüll auf einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotenzial gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

Die mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung durch den Reaktorunfall von Tschernobyl wurde 2000 fast ausschließlich durch die Bodenstrahlung des im Jahr 1986 deponierten Radiocäsium verursacht, andere Radionuklide spielen keine Rolle mehr. Aufgrund seiner physikalischen Halbwertszeit von 30 Jahren liegen noch 74 % der 1986 deponierten Aktivität vor. Bei ausschließlicher Berücksichtigung des physikalischen Zerfalls nahm die äußere Strahlenexposition gegenüber dem Vorjahr um 2,3 % ab. Unter Berücksichtigung von Abschirmeffekten durch den Boden sowie durch den Aufenthalt in Gebäuden ergibt sich eine mittlere effektive Dosis der Bevölkerung durch Bodenstrahlung von weniger als 0,01 mSv pro Jahr (zum Vergleich: 1986 0,07 mSv). Südlich der Donau und in einigen Gebieten des Bayerischen Waldes und Ostdeutschlands kann die Bodenstrahlung infolge örtlich und zeitlich begrenzter starker Regenfälle zurzeit des Durchzugs der radioaktiven Wolke, die zu einer erhöhten Ablagerung des Radiocäsiums am Boden geführt haben, um bis zu einer Größenordnung höher sein. Im Vergleich dazu beträgt die mittlere äußere Strahlenexposition durch terrestrische Strahlung ca. 0,4 mSv und durch kosmische Strahlung in Meereshöhe ca. 0,3 mSv pro Jahr.

Grundnahrungsmittel wie Milch, Gemüse, Getreide, Obst und Fleisch sind durch Radiocäsium aus dem Reaktorunfall nur noch geringfügig kontaminiert. Die Messwerte der spezifischen Aktivität bzw. Aktivitätskonzentration

von Cäsium-137 liegen wie im Vorjahr in den meisten Fällen unter 1 Bq pro Kilogramm Frischmasse bzw. pro Liter. Im Durchschnitt wird mit der Gesamtnahrung eine Aktivität von ca. 0,3 Bq Cäsium-137 pro Tag zugeführt, woraus eine Ingestionsdosis von 0,001 mSv pro Jahr resultiert, die gegenüber der mittleren Strahlenexposition von ca. 0,3 mSv durch Ingestion natürlich radioaktiver Stoffe (Kalium-40, radioaktive Isotope von Uran und Thorium und deren Folgeprodukte) vernachlässigbar klein ist.

In Lebensmitteln aus Waldgebieten und vereinzelt auch bei Fischen aus Binnenseen sind weiterhin spezifische Cäsium-137-Aktivitäten von einigen hundert, in einigen Arten von Wildpilzen und in Wildfleisch bis zu einigen tausend Bq/kg Frischmasse zu verzeichnen, weshalb besondere Ernährungsgewohnheiten Abweichungen von der durchschnittlichen Aktivitätszufuhr über Ingestion zur Folge haben können. Betroffen sind einige eng begrenzte Regionen, die hohe Bodenkontaminationen an Cs-137 aufweisen. In Waldökosystemen ist die Verweildauer von Radiocäsium und seine Verfügbarkeit für Pflanzen gegenüber landwirtschaftlich genutzten Böden stark erhöht. Ein Verzehr von z. B. 500 g eines Lebensmittels mit einer spezifischen Cs-137-Aktivität von 1 000 Bq/kg führt zu einer effektiven Dosis von 0,007 mSv. Durch ein umfangreiches Messprogramm nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz, in dem jährlich mehrere tausend Lebensmittelproben auf ihren Radioaktivitätsgehalt untersucht werden, wird eine bundesweite Überwachung sichergestellt.

Anhang A:**Messgrößen der Umweltradioaktivität und der Strahlenbelastung**

Die beiden wesentlichen Größen in diesem Bericht sind das Becquerel und das Millisievert. In Becquerel (Bq) wird die „Menge“ an Radioaktivität in einem bestimmten Umweltmedium (Umweltradioaktivität) angegeben, in Millisievert (mSv) die sich daraus ergebende Strahlenbelastung des Menschen. Den Zusammenhang zwischen beiden Größen untersuchen die Radioökologie und die Dosimetrie; die größtmögliche Einschränkung der Strahlenbelastung ist Ziel des Strahlenschutzes.

Ein Becquerel pro Maßeinheit eines Umweltmediums – also z. B. pro Kubikmeter Luft, pro Liter Wasser oder pro Kilogramm – bedeutet, dass sich pro Sekunde ein Atom unter Abgabe von Strahlung in ein anderes umwandelt. Für die Strahlenbelastung (Dosis) ist wichtig, wo sich das Atom zum Zeitpunkt seines Zerfalls befindet (im Körper oder außerhalb) und welche Art von Strahlung (Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung) es abgibt. Alphastrahlung hat eine hohe Schadenswirkung auf betroffene Körperzellen, aber nur eine geringe Reichweite von unter einem Millimeter. Alphastrahler müssen sich also im Körper befinden, um zu einer Strahlenbelastung zu führen. Das wichtigste Beispiel hierfür sind die Zerfallsprodukte des radioaktiven Edelgases Radon, die durch Ablagerungen in der menschlichen Lunge einen großen Teil der Strahlenbelastung des Menschen bewirken. Gammastrahlen haben demgegenüber eine Reichweite von mehreren Metern. Auf diese Weise können radioaktive Atome in der

Umgebung zur Strahlenbelastung beitragen. Betastrahler liegen in ihrer Reichweite zwischen den beiden anderen Strahlenarten. Neben diesen Strahlenarten, die bei Atomumwandlungen entstehen, führen auch Röntgenstrahlen, die künstlich erzeugt werden, zu einer Strahlenbelastung.

Für viele Standardsituationen kann eine gegebene Radioaktivitätsmenge einfach in die sich ergebende Strahlenbelastung umgerechnet werden, indem man den Becquerel-Wert mit einem sog. Dosisfaktor multipliziert.

Im Dosisfaktor werden dabei verschiedene Wichtungen für die betroffenen Organe und die Strahlungsart berücksichtigt (siehe Anhang C „Strahlendosis und Strahlenwirkung“). Endergebnis dieser Berechnungen ist die Strahlenbelastung als effektive Dosis in Millisievert. Dadurch, dass dieser Wert entsprechend der Strahlenwirkung gewichtet ist und damit direkt einem bestimmten Risiko zugeordnet werden kann, lassen sich die effektiven Dosen aus verschiedenen Quellen zu einem Wert für die Gesamtstrahlenbelastung eines Menschen addieren. Auf der Ebene der Dosisbetrachtung können dann die Beiträge aus natürlichen, zivilisatorisch veränderten und zivilisatorischen Strahlenquellen verglichen werden.

Im vorliegenden Bericht ist zusätzlich eine Mittelung über die Gesamtbevölkerung durchgeführt worden. Da die einzelnen Komponenten – besonders die Exposition durch medizinische Maßnahmen und durch Radon – individuell sehr stark variieren, kann die individuelle Strahlenexposition auch deutlich höher oder deutlich geringer sein als der ausgewiesene Mittelwert über die Gesamtbevölkerung.

Anhang B:**Erläuterung der benutzten Fachausdrücke**

Aerosol	Gase mit festen oder flüssigen Schwebeteilchen
Aktivität	Anzahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne
Alphastrahler	Radionuklide, die Alphateilchen (Heliumatomkerne) aussenden
Anthropogen	durch den Menschen beeinflusst, verursacht
Äquivalentdosis	Produkt aus Energiedosis und einem u. a. von der Strahlenart abhängigen Bewertungsfaktor. Die Äquivalentdosis ist das Maß für die Wirkung einer ionisierenden Strahlung auf den Menschen
Becquerel	SI-Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel (Bq) liegt vor, wenn 1 Atomkern je Sekunde zerfällt. $1 \text{ Becquerel (Bq)} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Curie}$
Betastrahlung	Teilchenstrahlung, die aus beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Elektronen besteht
Betasubmersion	Strahlenexposition durch Betastrahlung von radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre
Brachytherapie	Behandlung von Erkrankungen durch in den Körper eingeführte bzw. auf den Körper aufgelegte Strahlenquellen
Computertomographie (CT)	Röntgenuntersuchung mit relativ hoher Strahlenexposition aber sehr hoher Aussagekraft durch Darstellung als überlagerungsfreies Querschnittsbild
Dekontamination	Beseitigung oder Verminderung von radioaktiven Verunreinigungen
Deterministisch	Nicht-stochastisch; deterministische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Schwere des Schadens mit der Dosis zunimmt und in der Regel ein Schwellenwert besteht, z. B. Hautrötung, Augenlinsentrübung (siehe auch stochastisch)
Digitale Subtraktionsangiographie	Röntgendarstellung von Blutgefäßen durch Einspritzen von Kontrastmittel. Durch die elektronische Subtraktion des Leerbilds von dem Kontrastbild wird eine bessere Darstellung der Blutgefäße bei gleichzeitiger Einsparung von Kontrastmittel erreicht.
Dosis	Siehe Energiedosis und Äquivalentdosis
Effektive Dosis	Summe der gewichteten mittleren Äquivalentdosen in den einzelnen Organen und Geweben des Körpers. Der Wichtungsfaktor bestimmt sich aus den relativen Beiträgen der einzelnen Organe und Gewebe zum gesamten Strahlenrisiko des Menschen bei Ganzkörperbestrahlung
Energiedosis	Quotient aus der Energie, die durch ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird, und der Masse in diesem Volumenelement
Fall-out	Aus der Atmosphäre auf die Erde in Form kleinster Teilchen abgelagertes radioaktives Material, das zum Beispiel bei Kernwaffenversuchen entstanden ist
Gammastrahlung	Energiereiche elektromagnetische Strahlung, die bei der radioaktiven Umwandlung von Atomkernen oder bei Kernreaktionen auftreten kann
Gammastrahlung	Strahlenexposition durch Gammastrahlung von radioaktiven Aerosolen und Gasen in der Atmosphäre
Ganzkörperdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel als Folge einer als homogen angesehenen Bestrahlung des ganzen Körpers
Gray	SI-Einheit der Energiedosis. $1 \text{ Gray (Gy)} = 1 \text{ Joule pro Kilogramm}$
Ingestion	Allgemein: Nahrungsaufnahme Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Nahrung
Inhalation	Allgemein: Einatmung von Gasen Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Atemluft

Inkorporation	Allgemein: Aufnahme in den Körper Speziell: Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper
Interventionelle Radiologie	Verfahren, bei dem unter Durchleuchtungskontrolle Heilmaßnahmen, hauptsächlich die Aufdehnung verengter oder verschlossener Blutgefäße, durchgeführt werden.
Ionisierende Strahlen	Elektromagnetische oder Teilchenstrahlen, welche die Bildung von Ionen bewirken können (z. B. Alphastrahlen, Betastrahlen, Gammastrahlen, Röntgenstrahlen)
Isotop	Atomart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl
Kontamination	Speziell: Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen
Kosmische Strahlung	Sehr energiereiche Strahlung aus dem Weltraum
Nuklearmedizin	Anwendung radioaktiver Stoffe am Menschen zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken
Nuklid	Durch Protonenzahl (Ordnungszahl) und Massenzahl charakterisierte Atomart
Organdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über ein Organ
Ortsdosis	Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort
Ortsdosisleistung	Ortsdosis pro Zeitintervall
Radioaktive Stoffe	Stoffe, die ionisierende Strahlen spontan aussenden
Radioaktivität	Eigenschaft bestimmter chemischer Elemente bzw. Nuklide, ohne äußere Einwirkung Teilchen- oder Gammastrahlung aus dem Atomkern auszusenden
Radiojod	Radioaktive Jodisotope
Radionuklide	Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen
Si-Einheiten	Einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI). Die Anwendung der Einheiten im Strahlenschutzmesswesen ist durch die Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Messwesen vom 13.12.1985 (BGBl. I S.2272) geregelt
Sievert	SI-Einheit der Äquivalentdosis und der effektiven Dosis 1 Sievert (Sv) = 100 Rem, 1 Sievert = 1 000 Millisievert (mSv) = 1 000 000 Mikrosievert (µSv)
Stochastisch	Zufallsbedingt; stochastische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von der Dosis abhängt, nicht jedoch deren Schwere (siehe auch deterministisch)
Strahlenbelastung	Siehe Strahlenexposition
Strahlenexposition	Einwirkung ionisierender Strahlen auf den menschlichen Körper oder Körperteile
Teletherapie	Behandlung von Erkrankungen durch Bestrahlung des Körpers von außen
Terrestrische Strahlung	Strahlung der natürlich radioaktiven Stoffe, die überall auf der Erde vorhanden sind
Tritium	Radioaktives Isotop des Wasserstoffs, das Betastrahlung sehr niedriger Energie aussendet

Anhang C:**Strahlendosis und Strahlenwirkung**

(Quelle: In Anlehnung an die Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 14)

1. Strahlendosis und ihre Einheiten

Beim radioaktiven Zerfall von instabilen Nukliden werden energiereiche Teilchen emittiert. Bei Radionukliden, die aus kerntechnischen Anlagen freigesetzt werden, sind dies vor allem Alpha- und Beta-Teilchen sowie die Photonen der Gammastrahlung. Durch Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung erzeugen Photonen im bestrahlten Material energiereiche Elektronen und Positronen. Beim Durchgang der elektrisch geladenen Teilchen (Alpha- und Beta-Teilchen, Elektronen und Positronen) durch Materie wird die kinetische Energie der Teilchen diskontinuierlich in vielen Teilbeträgen auf die Materie übertragen. Es kommt dabei zur Ionisation und Anregung von Molekülen und als deren Folge zur Radikalbildung. Die Dichte dieser Ionisations- und Anregungsereignisse längs der Teilchenbahn hängt von Strahlenart und Strahlenenergie ab. Man unterscheidet daher locker ionisierende Strahlungen (z. B. Beta- und Gammastrahlung) und dicht ionisierende Strahlung (z. B. Alphateilchen). Die in Wasser als Referenzmaterial längs eines kurzen Teilstücks der Teilchenbahn durch Ionisation und Anregung auf die Materie übertragene Energie, dividiert durch die Länge dieses Wegstückes, wird als linearer Energietransfer (LET) bezeichnet.

Da Ionisations- und Anregungsprozesse zu molekularen Veränderungen führen, die den Ausgangspunkt für die Entwicklung biologischer Strahlenwirkungen bilden, bezieht sich der für ionisierende Strahlungen geltende Dosisbegriff auf die Energiedeposition in Materie durch Ionisation und Anregung. Die Energiedosis ist definiert als die in einem kleinen Volumenelement auf die Materie übertragene Energie, dividiert durch die Masse dieses Volumenelementes. Die verwendete Dosiseinheit ist das Gray (Gy), es entspricht einer Energieabsorption von einem Joule pro Kilogramm, z. B. einem Kilogramm Gewebe. Früher wurde für die Energiedosis das Rad (rd) als Dosiseinheit benutzt; 1 Gy ist gleich 100 rd. Zur quantitativen Dosisangabe bei strahlenbiologischen Dosiswirkungsbeziehungen dient die Energiedosis.

Schon relativ frühzeitig wurde allerdings erkannt, dass das Ausmaß einer biologischen Strahlenwirkung nicht alleine von der Energiedosis abhängt. Beim Vergleich verschiedener Strahlenarten miteinander zeigte sich, dass ionisierende Strahlen mit hohem LET (dicht ionisierende Strahlen, z. B. Alphateilchen) wesentlich wirksamer sein können als ionisierende Strahlen mit niedrigem LET (locker ionisierende Strahlen, z. B. Beta- und Gammastrahlung) bei gleicher Energiedosis. Dies gilt für die einzelnen biologischen Effekte in unterschiedlichem Maße. Für die Abschätzung von Strahlenrisiken, für Grenzwertfestlegungen und für Strahlenschutzmessungen erschien es daher notwendig, neben der Energiedosis auch die Strahlenqualität, d. h. die Strahlenart und -energie, zu

berücksichtigen. Der lineare Energietransfer gilt vereinbarungsgemäß als physikalische Kenngröße der Strahlenqualität. Er kennzeichnet die vom Dosisbegriff nicht erfasste Konzentration der auf die Materie übertragenen Energie längs der Teilchenbahnen. Aus diesen Gründen ist neben der Energiedosis D die Äquivalentdosis H für Strahlenschutz Zwecke eingeführt worden. Die Äquivalentdosis ergibt sich aus der gemessenen oder berechneten Energiedosis durch Multiplikation mit einem von der Strahlenqualität abhängigen Bewertungsfaktor Q .

$$H = Q \cdot D$$

Der Bewertungsfaktor Q berücksichtigt die Unterschiede des biologischen Risikos bei den verschiedenen Strahlenqualitäten.

Zur Festlegung der Bewertungsfaktoren für die einzelnen Strahlenqualitäten sind experimentelle biologische Daten und klinische Erfahrungen zusammengefasst worden. Um einen exakten Vergleich der biologischen Wirkungen bei verschiedenen Strahlenqualitäten vorzunehmen, wird zunächst die relative biologische Wirksamkeit (RBW) bestimmt. Die RBW ist definiert als der Quotient aus der Energiedosis einer Referenzstrahlung (D_{Ref}) und der Energiedosis der zu untersuchenden Strahlenqualität (D_{Test}), wobei in den Quotienten diejenigen Strahlendosen eingesetzt werden, die das gleiche Ausmaß der untersuchten biologischen Wirkung herbeiführen.

$$RBW = \frac{D_{Ref}}{D_{Test}} \quad (\text{bei gleicher biologischer Wirkung})$$

Die Untersuchung der relativen biologischen Wirksamkeit hat ergeben, dass die resultierenden RBW-Werte nicht nur von der Strahlenqualität abhängig sind, sondern auch von dem gemessenen biologischen Endpunkt (z. B. Zelltod, Tumorbildung, Chromosomenschaden usw.), sowie von der Strahlendosis und anderen Faktoren. Ein biologisch exakt gemessener RBW-Wert gilt daher nur für sehr gut definierte experimentelle Bedingungen. Unter verschiedenen Bedingungen können bei gegebener Strahlenqualität auch unterschiedliche RBW-Werte resultieren.

Für den praktischen Strahlenschutz sind aus diesen Gründen die gemessenen RBW-Werte nicht unmittelbar verwendbar, sondern man hat auf der Grundlage der experimentellen RBW-Werte für die einzelnen Strahlenqualitäten Bewertungsfaktoren Q zur Ermittlung der Äquivalentdosis festgelegt. Sie beziehen sich ebenso wie die RBW-Werte auf harte Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung. Die Zahlenwerte der Bewertungsfaktoren orientieren sich aus Sicherheitsgründen am oberen Wertebereich der experimentell erhaltenen RBW-Werte für die jeweilige Strahlenqualität. Nach der Strahlenschutzverordnung gilt für die Berechnung der Äquivalentdosis der in Anlage VII der Verordnung angegebene LET-abhängige Bewertungsfaktor $Q(L)$, der je nach Strahlenqualität Werte zwischen 1 und 20 besitzt. Ist das LET-Spektrum nicht genau bekannt, so darf näherungsweise der Bewertungsfaktor 1 für Beta- und Gammastrahlung, der Bewertungsfaktor 10 für Neutronen und der Bewertungsfaktor 20 für Alphateilchen verwendet werden.

Die Einheit für die Äquivalentdosis ist heute das Sievert (Sv), früher wurde die Äquivalentdosis in Rem (rem) angegeben. Es gilt $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. Beispiel: $D = 0,1 \text{ mGy}$; $Q = 20$; $H = 2 \text{ mSv}$.

2. Äußere und innere Bestrahlung

Bei einer Bestrahlung von außen (die Strahlenquelle befindet sich außerhalb des Organismus, externe Bestrahlung) ist die Eindringtiefe der verschiedenen Strahlenqualitäten in das menschliche Gewebe sehr unterschiedlich. Gammastrahlung hat wie Röntgenstrahlung die Fähigkeit, den gesamten Körper zu durchdringen und ihn mit geschwächter Intensität wieder zu verlassen, während Alpha- und Betaeilchen relativ zu den Körperdimensionen nur eine geringe Eindringtiefe besitzen. Bei Alphastrahlung ist die Eindringtiefe so gering, dass nur die äußere Zellschicht der Haut betroffen ist. Die Keimschicht der Haut (stratum germinativum), in der die Zellerneuerung stattfindet, liegt bei äußerer Alphabestrahlung bereits außerhalb der Reichweite der Alphateilchen. Bei Betastrahlung liegt die Eindringtiefe im Gewebe im Bereich von einigen Millimetern, sodass es bei einer Bestrahlung von außen bei relativ hohen Strahlendosen beispielsweise zu Hautschäden und Schäden der Augenlinse, aber nicht zu Schäden in tiefer gelegenen Geweben kommen kann. Bei niedrigen Strahlendosen ist die Bestrahlung durch Alpha- und Betastrahlung von außen für das Strahlenrisiko ohne Bedeutung. Radionuklide, bei deren Zerfall Alpha- bzw. Betastrahlung entsteht, sind jedoch dann für das Strahlenrisiko relevant, wenn sie mit der Nahrung, dem Trinkwasser oder durch Atmung dem Körper zugeführt werden und die Bestrahlung von innen erfolgt. Zur Bestimmung der Strahlendosis ist es bei einer Inkorporation der radioaktiven Stoffe notwendig, die Verteilung der Radionuklide und ihre Verweildauer im Organismus und in einzelnen Organen sowie Geweben genau zu kennen. Die Biokinetik, die sich vor allem aus dem Stoffwechselverhalten und anderen biologischen Vorgängen ergibt, muss bei der Dosisabschätzung für die Strahlenexposition von innen berücksichtigt werden. Neben zahlreichen, u. a. altersabhängigen biokinetischen Parametern gehen in die Dosismittlung die physikalischen Eigenschaften der Strahlung und die physikalischen Halbwertszeiten der Radionuklide ein.

Radionuklide mit einer langen physikalischen Halbwertszeit und einer zusätzlich langen Verweildauer (lange biologische Halbwertszeit) im Organismus tragen nach einer Inkorporation über eine entsprechend lange Zeit zur Strahlendosis bei. Daher wird bei der Berechnung der Strahlendosis nach Inkorporation derartiger Radionuklide die 50-Jahre-Folgedosis (70-Jahre-Folgedosis bei Kindern) ermittelt. Das bedeutet, dass bei der Festlegung des Dosisfaktors die Dosisleistung (Strahlendosis in einem Zeitintervall, dividiert durch dieses Zeitintervall) über die auf die Inkorporation folgenden 50 Jahre (bzw. 70 Jahre) integriert (aufsummiert) wird. Unter diesen Prämissen sind Dosisfaktoren für die verschiedenen Inkorporationswege (z. B. Ingestion und Inhalation) sowie für verschie-

dene chemische Formen der inkorporierten Radionuklide (z. B. löslich und unlöslich) abgeschätzt worden.

Die Aktivität einer radioaktiven Substanz ist die Anzahl der spontanen Kernumwandlungen in einem kurzen Zeitintervall, dividiert durch dieses Zeitintervall. Sie wird in Becquerel (Bq) angegeben. Die Anzahl der Becquerel bezeichnet die Anzahl der spontanen Kernumwandlungen je Sekunde. Die frühere Einheit ist das Curie (Ci). 1 Ci ist gleich $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$. Kenngröße für die Exposition von innen ist der Dosisfaktor, d. h. der Quotient aus der in einem bestimmten Gewebe oder Organ erzeugten Äquivalentdosis und der dem Körper zugeführten Aktivität eines bestimmten Radionuklids, gemessen in Sievert pro Becquerel (Sv/Bq). Durch Multiplikation des Dosisfaktors mit der Aktivität des aufgenommenen Radionuklids wird die Äquivalentdosis errechnet.

Die Konzentration der Ionisations- und Anregungsprozesse ionisierender Teilchen auf den Nahbereich der Teilchenbahnen (s. Kennzeichnung der Strahlenqualität durch den linearen Energietransfer) hat bei mikroskopischer Betrachtungsweise auch die Bedeutung einer von Zelle zu Zelle statistisch variierenden Anzahl der Teilchendurchgänge; die Energiedosis gibt nur den räumlichen Mittelwert der massebezogenen Energiedeposition an. Bei einer Energiedosis von 10 mGy erfährt z. B. nur einer unter ca. 40 Zellkernen des Querschnitts $60 \mu\text{m}^2$ den Durchgang eines Alphateilchens der Anfangsenergie 5 MeV . Erst bei wesentlich höheren Dosen – für Alphateilchen bei etwa 50 mGy – kommt es ebenso oft vor, dass ein Zellkern von einem bzw. von zwei oder mehr Alphateilchen getroffen wird, aber auch bei dieser Dosis ereignet sich in etwa 30 % aller Zellkerne kein Teilchendurchgang. Bei locker ionisierender Strahlung erfahren in diesem Dosisbereich bereits alle Zellkerne eine annähernd gleiche Anzahl von Teilchendurchgängen.

Mit abnehmender Dosis kommt man also in einen Bereich, in dem nicht mehr alle, sondern nur noch einzelne Zellen und Zellkerne (Durchmesser des Kernes einer menschlichen Zelle: etwa $8 \mu\text{m}$) von einem Teilchendurchgang betroffen werden. Die Zahl der dann noch getroffenen Zellkerne nimmt bei weiterer Erniedrigung der Strahlendosis proportional zu dieser ab. Der Dosisbereich, in dem diese inhomogene Verteilung der Teilchendurchgänge aufzutreten beginnt, ist von der Strahlenqualität abhängig. Bei Strahlung mit niedrigem LET liegt er tiefer als bei Strahlung mit hohem LET. So tritt dieses Phänomen bei Röntgen- und Gammastrahlung im Dosisbereich unterhalb etwa 3 mGy und bei 14 MeV Neutronen unterhalb etwa 50 mGy auf. Bei Alphastrahlung (z. B. nach Zerfall von Plutonium-239) erstreckt sich der Bereich der vereinzelt Teilchendurchgänge zu noch höheren Dosen. Bei inkorporierten Radionukliden, die an Partikel (Aerosole) gebunden sind oder in Zellen durch Phagozytose akkumuliert sind, kann in der unmittelbaren Nachbarschaft eine zusätzliche Inhomogenität der mikroskopischen Dosisverteilung auftreten. Diese Bedingungen sind bei Radionukliden, die bei ihrem Zerfall Alphateilchen emittieren, von besonderer Relevanz (hot particles).

3. Stochastische und deterministische Strahlenwirkung

Im Strahlenschutz werden stochastische und deterministische Strahlenwirkungen unterschieden. Beide Kategorien von Schadenstypen haben grundsätzlich verschiedene Dosiswirkungsbeziehungen. Bei den deterministischen Strahlenwirkungen muss zunächst eine Schwellendosis überschritten werden, bevor die beschriebenen Effekte induziert werden können (Abb. A-1). Oberhalb der Schwellendosis steigt die Zahl der Defekte und der Schweregrad des Effektes mit steigender Dosis an. Der Entwicklung dieser Strahlenschäden liegt ein multizellulärer Mechanismus zugrunde. Es müssen viele Zellen geschädigt werden, damit es zu einer Manifestation derartiger Effekte kommt. Zu diesen Strahlenwirkungen zählen alle akuten Strahleneffekte, die Linsentrübung (Katarakt) und die Entwicklung von fibrotischen Prozessen in verschiedenen Geweben.

Bei einem zweiten Typ von Strahlenwirkungen, den stochastischen Effekten, wird davon ausgegangen, dass keine Schwellendosis besteht und dass die Wahrscheinlichkeit des Eintretens mit steigender Strahlendosis zunimmt. Auch bei kleinen Strahlendosen können also noch Wirkungen auftreten, wenn auch mit geringerer Wahrscheinlichkeit als bei höheren Dosen (Abb. A-1). Für den Strahlenschutz sind die stochastischen Strahlenwirkungen daher von entscheidender Bedeutung. Ihr Auftreten unterliegt einer Zufallsverteilung, d. h. in einem Kollektiv gleich exponierter Personen werden sie mit einer durch den statistischen Erwartungswert nur angenähert vorausagbaren Häufigkeit beobachtet. Als „Risiko“ wird im Strahlenschutz die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer stochastischen Strahlenwirkung bei der Einzelperson bezeichnet; den Quotienten Risiko/Äquivalentdosis nennt man „Risikoeffizient“.

Zu dieser Kategorie von Strahlenwirkungen zählen die Induktion von vererbaren Defekten und von malignen Erkrankungen (Leukämie und Krebs). Man geht davon aus, dass es sich hier um unizelluläre Prozesse handelt. Bei den vererbaren Defekten muss nur eine Keimzelle geschädigt werden, damit es nach deren Beteiligung an einer erfolgreichen Befruchtung zu einer Mutation in der Folgegeneration kommt. Bei der Induktion von Leukämie und Krebs wird angenommen, dass die maligne Transformation einer Zelle ausreichend ist, um eine derartige Erkrankung zu verursachen. Man geht also davon aus, dass Leukämie oder Krebs mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch eine einzige maligne transformierte Zelle hervorgerufen werden kann (monoklonaler Ursprung).

Bei der Induktion von Leukämie und Krebs wird angenommen, dass die maligne Transformation einer Zelle ausreichend ist, um eine derartige Erkrankung zu verursachen. Man geht also davon aus, dass Leukämie oder Krebs mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch eine einzige maligne transformierte Zelle hervorgerufen werden kann (monoklonaler Ursprung).

4. Genetisch vererbare Defekte

Beim Menschen sind bisher keine genetischen Mutationen durch ionisierende Strahlen beobachtet worden, die zu einer quantitativen Abschätzung des genetischen Strahlenrisikos führen können. Auch bei Untersuchungen von Nachkommen der Überlebenden nach den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki sind bisher derartige Effekte nicht statistisch signifikant nachgewiesen worden. Man hat in diesem Zusammenhang bei der Untersuchung von mehr als 70 000 Kindern, deren Väter oder Mütter bzw. beide Elternteile bei den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki exponiert worden sind, lediglich einen angedeuteten, statistisch nicht ausreichend gesicherten Trend zu erhöhten Raten an genetischen Mutationen festgestellt.

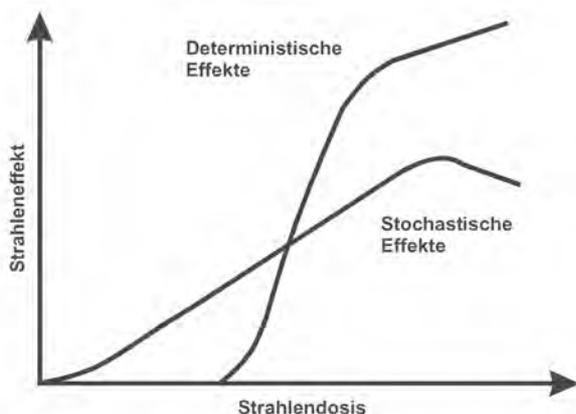
Die quantitative Abschätzung des Strahlenrisikos beruht daher auf tierexperimentellen Untersuchungen, die vor allem an Mäusen durchgeführt worden sind. Bei diesen Untersuchungen werden lokale Bestrahlungen der Gonaden vorgenommen und nach Möglichkeit leicht diagnostizierbare Merkmale wie die Fellfarbe, Form der Ohren, Form des Schwanzes, die Bildung von Katarakten usw. analysiert. Diesen Veränderungen liegen dominante, aber auch rezessive Mutationen zugrunde. Es werden sehr häufig lineare Dosiswirkungsbeziehungen für diese Effekte ermittelt, so dass aus der Steigung derartiger Dosiswirkungsbeziehungen die Mutationsrate pro Gray bzw. Sievert errechnet werden kann.

Die Versuchsergebnisse an Mäusen sind in überwiegendermaßen nach Strahlendosen im Bereich von 1 Gy und höher gewonnen worden, im Allgemeinen hat eine Bestrahlung mit hoher Dosisleistung (z. B. 0,1 Gy pro Tag) stattgefunden. Um diese Versuchsergebnisse für die Abschätzung des Strahlenrisikos beim Menschen verwenden zu können, sind zwei Annahmen notwendig:

1. Bei locker ionisierenden Strahlen und relativ kleinen Dosen und Dosisleistungen besteht zwischen Dosis und Zahl der induzierten Mutationen eine lineare Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellenwert. Diese Form der Dosiswirkungsbeziehung ist bereits bei den stochastischen Strahlenwirkungen besprochen worden.
2. Die Mutationshäufigkeit pro Locus in Keimzellen des Menschen und der Maus ist nach identischen Bestrahlungsbedingungen und Strahlendosen etwa gleich groß.

Aufgrund der vorhandenen Erkenntnisse über den Wirkungsmechanismus ionisierender Strahlung und der Entstehung der Mutationen in Keimzellen, die zu vererbaren Defekten führen, steht es in der wissenschaftlichen

Abbildung A-1



Diskussion heute weitgehend außer Zweifel, dass eine Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellendosis existiert und damit auch bei niedrigen Dosen und niedriger Dosisleistung mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit Mutationen auftreten können. Es ist gezeigt worden, dass bei einer chronischen Bestrahlung über 300 Tage mit Gammastrahlen und einer Dosisleistung von 0,01 Gy pro Tag, ebenso wie nach einer fraktionierten Bestrahlung von 0,1 Gy pro Tag über 60 Tage, Mutationen bei Mäusen induziert werden können.

5. Induktion von Leukämie und Krebs

Während für die Abschätzung des genetischen Strahlenrisikos keine ausreichenden Erfahrungen beim Menschen vorliegen, kann man für die Abschätzung des Leukämie- und Krebsrisikos auf eine Vielzahl von Daten aus epidemiologischen Untersuchungen beim Menschen zurückgreifen. In Betracht kommen hierfür vor allem Untersuchungen an

- Überlebenden nach den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki,
- Personen nach beruflichen Strahlenexpositionen,
- Patienten mit medizinischen Strahlenexpositionen,
- Personen mit Strahlenbelastung durch die Tschernobyl-Katastrophe.

Da eine strahlenbedingte maligne Erkrankung sich nicht von einer „spontanen“ malignen Erkrankung unterscheidet, können Leukämie oder Krebs im Einzelfall nicht allein aufgrund ihrer Erscheinungsform oder ihres klinischen Verlaufes als strahlenbedingte Erkrankung erkannt werden. Nur epidemiologisch-statistische Untersuchungen können dazu beitragen, quantitative Daten für die Risikoabschätzung beim Menschen zu erhalten. Strahlenexponierte Personengruppen müssen dabei nichtexponierten Personengruppen gegenübergestellt werden. Dann kann erkannt werden, ob und in welchem Ausmaß die Raten an Leukämie und Krebs nach Bestrahlung in der exponierten Gruppe erhöht sind. Auch hier ist auf individueller Basis eine qualitative Unterscheidung hinsichtlich der Frage, ob der Krebs strahlenbedingt ist oder nicht, nicht möglich. Es kann lediglich die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der eine individuelle Krebserkrankung durch die vorausgegangene Bestrahlung verursacht ist.

Erschwert werden diese Untersuchungen dadurch, dass die Erkrankungen mit einer erheblichen Latenzzeit (5 bis 10 Jahre bei Leukämie und mehrere Jahrzehnte bei Krebs) auftreten können und damit analytisch, z. B. hinsichtlich der Anamnese, schwerer zugänglich werden. Da Leukämien mit einer relativ kurzen Latenzzeit nach einer Bestrahlung und mit einem besonders hohen relativen Risiko beobachtet werden, liegen für diese Erkrankungen verhältnismäßig umfangreiche Daten vor.

Es wird beobachtet, dass vor allem myeloische Leukämien (akute und chronische Erscheinungsformen), aber auch akute lymphatische Leukämien, nach Bestrahlung vermehrt auftreten. Dagegen sind chronisch-lymphatische Leukämien nicht erhöht beobachtet worden. Die Un-

tersuchungen an den Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki, aber auch bei Patientengruppen, wie z. B. nach Bestrahlung wegen Morbus Bechterew, ergeben für die Gesamtpopulation, dass nach Strahlendosen im Bereich von 0,2 bis 0,5 Sv und höher mit einer signifikanten Erhöhung der Leukämierate zu rechnen ist. Strahlendosen, die unter diesem Bereich liegen, haben bei epidemiologischen Untersuchungen von Gruppen der Gesamtbevölkerung nicht zu einer statistisch signifikant erhöhten Leukämierate geführt.

Nach unserem heutigen Verständnis bedeutet dieses nicht, dass geringere Strahlendosen als 0,2 Sv keine Leukämien hervorrufen können. Die Zahl der Fälle wird jedoch dann so klein, dass andere Faktoren wie Lebensgewohnheiten, genetische Prädispositionen usw., die das Krebs- und Leukämierisiko beeinflussen, mit ihrer Variabilität das strahlenbedingte Risiko überlagern, sodass letzteres sich aus den Schwankungen der „spontanen“ Leukämie- und Krebsrate nicht mehr heraushebt. Bei den Überlebenden in Hiroshima und Nagasaki ist das Leukämierisiko nach einer Strahlendosis von 4 Gy etwa um den Faktor 15 erhöht. Dagegen ist das Risiko für alle Krebsformen außer Leukämien bei der gleichen Strahlendosis nur etwa um den Faktor 2 angestiegen. Dieser Zuwachsfaktor wird als „relatives Risiko“ bezeichnet; die „spontanen“ Raten an Leukämie und Krebs (Raten ohne Bestrahlung) entsprechen einem relativen Risiko von 1,0.

Neben dem Knochenmark (Induktion von Leukämie) und dem Brustgewebe zählen auch Lunge und die Epithelien der Bronchien zu den strahlenempfindlichen Geweben hinsichtlich der Induktion von Tumoren. Eine erhöhte Rate an Lungentumoren ist bei Bergarbeitern beobachtet worden, die in Bergwerken mit hohem Radongehalt tätig gewesen sind. Durch den radioaktiven Zerfall dieses mit der Atemluft eingeatmeten Edelgases und vor allem seiner ebenfalls eingeatmeten, an Schwebstoffen angelagerten radioaktiven Zerfallsprodukte kommt es zu einer lokalen Strahlenexposition der Bronchial- und Lungenepithelien. Hierbei wird die Exposition in überwiegenderem Maße durch Alphastrahlung hervorgerufen.

Die bisher für die Einschätzung der Strahlenwirkung des Radons und seiner Zerfallsprodukte benutzten Dosiskoeffizienten beruhen sowohl auf epidemiologischen Studien bei Bergarbeitern als auch auf dosimetrischen Modellen. Die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) hat in der 1993 erschienenen Publikation Nr. 65 über den Schutz vor Radon-222 in Wohnungen und am Arbeitsplatz vorgeschlagen, für die Risikoabschätzung nur noch die Ergebnisse der epidemiologischen Bergarbeiterstudien zu verwenden. Anstelle der bisherigen Dosiskoeffizienten wird deshalb von der ICRP eine neue Dosis-konvention vorgeschlagen, bei deren Anwendung sich die Strahlenexposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte für die Bevölkerung auf etwa 60 Prozent der angegebenen Werte reduziert. Zur Ermittlung der gesundheitlichen Wirkung des Radons wurde in der Bundesrepublik eine Studie durchgeführt, deren gesamte Auswertung im Jahr 2001 vorliegen wird.

Den Hauptanteil der Strahlenexposition liefern die kurzlebigen Zerfallsprodukte des Radon-222 (Halbwertszeit 3,8 Tage). Das Radon-222 ist ein Zerfallprodukt des Radiums-226 und gelangt vor allem durch Diffusion aus dem Erdboden in die bodennahe Luft. Das eingeatmete Radon und seine Zerfallsprodukte werden im Atemtrakt und in der Lunge unterschiedlich stark abgeschieden bzw. wieder ausgeatmet. Infolge der kurzen Halbwertszeit bewirken die inhomogen abgeschiedenen Radonzerfallsprodukte unter Abgabe der biologisch besonders wirksamen Alphastrahlung im Wesentlichen eine Exposition des Atemtraktes. Die mittlere Äquivalentdosis der strahlenempfindlichen Zellen der oberen Bronchien ist etwa fünf bis zehnmal höher als diejenige im Alveolarbereich. Die durch das Edelgas Radon selbst verursachte Strahlenexposition ist um mehr als eine Größenordnung niedriger und wird teils durch das im ganzen Körper gelöst verteilte Radon, teils durch das in der Atemluft befindliche Radon verursacht.

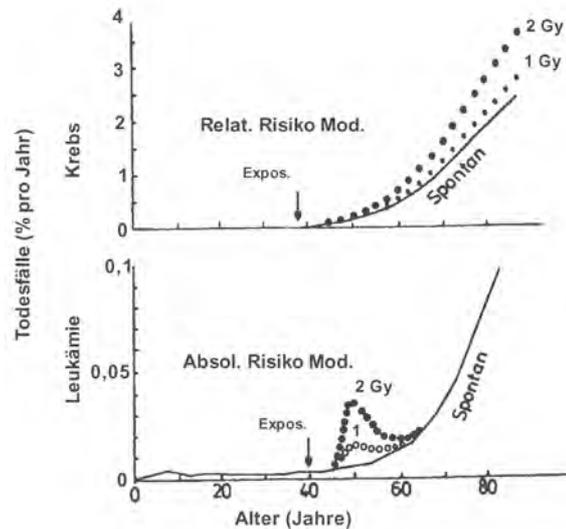
Auch bei der Induktion von Knochentumoren liegen Erfahrungen nach Exposition durch Alphastrahlen vor. In diesem Falle sind Untersuchungen nach Behandlung mit Radiumpräparaten durchgeführt worden. Das Radium wurde injiziert und hat sich vor allem im Knochengewebe abgelagert.

6. Risikoabschätzung

Für die Risikoabschätzung wird außer bei Leukämie und Knochentumoren von einem so genannten relativen Risikomodell ausgegangen. Für Leukämien und Knochentumoren dagegen wird das absolute Risikomodell zur Risikoabschätzung eingesetzt. Bei dem letzteren Risikomodell geht man davon aus, dass nach einer Latenzzeit die Rate an Erkrankungen über der „spontanen“ Rate liegt, nach einer weiteren Periode aber keine zusätzlichen strahlenbedingten Erkrankungen auftreten (Abb. A-2). Offensichtlich haben sich dann alle strahlenbedingten Erkrankungen manifestiert. Beim relativen Risikomodell liegt die Rate an malignen Erkrankungen in der bestrahlten Personengruppe ebenfalls nach einer Latenzzeit über der „spontanen“ Rate, aber diese Erhöhung bleibt bis zum Lebensende erhalten. Das „relative Risiko“, d. h. die relative Zunahme der strahlenbedingten Rate im Vergleich zur „spontanen“ Rate, wird dabei als über die Lebenszeit konstant angenommen (Abb. A-2). Das bedeutet, dass auch die strahlenbedingten Tumoren vorwiegend erst in einem Alter beobachtet werden, in dem die „spontanen“ Tumoren ohne Bestrahlung manifest werden. Die Abschätzung des strahlenbedingten Krebsrisikos auf der Basis des relativen Risikomodells stellt eine auf die Gesamtlebenszeit bezogene Risikoabschätzung dar.

Die vielfältigen epidemiologischen Untersuchungen haben ergeben, dass eine statistisch signifikante und damit zahlenmäßig bestimmbare Erhöhung maligner Erkrankungen im Allgemeinen erst im Dosisbereich von einigen Zehntel bis einem Sievert eintritt. In niedrigeren Dosisbereichen, die für die berufliche Strahlenexposition (einige mSv/a bis einige 10 mSv/a) und vor allem für Expositionen der Bevölkerung etwa in der Umgebung kerntechnischer Anlagen (einige 10 μ Sv/a) von Bedeutung sind,

Abbildung A-2



müssen daher die Strahlenrisiken durch rechnerische Extrapolation, ausgehend von diesen höheren Strahlendosen, ermittelt werden. Ferner sind die statistisch signifikanten epidemiologischen Daten der Leukämie- und Krebserhöhung nicht nur nach Exposition mit hohen Strahlendosen, sondern häufig auch nach Bestrahlung mit hoher Dosisleistung erhalten worden. Da die Exposition am Arbeitsplatz und in noch stärkerem Maße in der Umwelt bei niedriger Dosisleistung stattfindet, ergeben sich hier zusätzliche Schwierigkeiten bei der Extrapolation zur Ermittlung der Risikoeffizienten.

Die durchgezogenen Kurven geben die „spontane“ Mortalität durch diese Erkrankungen an. Die gepunkteten Kurven geben die Mortalität nach Strahlenexposition entsprechend dem „Relativen Risikomodell“ und dem „Absoluten Risikomodell“ an.

Für die Extrapolation wird angenommen, dass eine Schwellendosis nicht existiert und dass die Dosiswirkungsbeziehung für die Eintrittswahrscheinlichkeit stochastischer Effekte auch in diesem niedrigen Dosisbereich linear mit der Strahlendosis verläuft. Aufgrund unserer wissenschaftlichen Kenntnisse ist eine solche Annahme für den Strahlenschutz sinnvoll, der Beweis dafür steht aber noch aus. Um der niedrigen Dosisleistung im niedrigen Dosisbereich Rechnung zu tragen, werden für den Risikoeffizienten häufig Reduktionsfaktoren von 2 eingesetzt, was allerdings kontrovers beurteilt wird. Für die Induktion von Leukämie und Krebs hat sich in einer Reihe von Fällen ergeben, dass sowohl eine lineare als auch eine linear-quadratische Dosiswirkungsbeziehung angenommen werden kann. Für die Zwecke des Strahlenschutzes wird jedoch häufig der Einfachheit halber, und um Unterschätzungen auszuschließen, eine lineare Dosiswirkungskurve für den Bereich bis zu den Grenzwerten der beruflichen Exposition zugrunde gelegt.

Unter dieser Annahme ist eine Risikoabschätzung durch Extrapolation, ausgehend von den Daten bei hohen Strahlendosen, zu geringen Strahlendosen hin möglich. Es

ergeben sich dann Risikokoeffizienten, die im Bereich von 200 bis 1 000 Todesfällen durch Leukämie und Krebs nach Ganzkörperexposition einer Million Menschen mit 10 mSv (1 rem) liegen (Risikokoeffizient: $2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ bis $1 \cdot 10^{-1}$ pro Sv). Bei Berücksichtigung dieses Bereiches des Risikokoeffizienten ergibt eine Strahlendosis von 10 mSv eine Erhöhung der Leukämie- und Krebssterblichkeit, die im Bereich von einem bis einigen Promille der „spontanen“ Leukämie- und Krebssterblichkeit unserer Bevölkerung liegt. Die Exposition der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen der Bundesrepublik Deutschland liegt beim bestimmungsgemäßen Betrieb einschließlich von Auslegungsfällen im Bereich von einigen 10 μSv . Es müssen also Extrapolationen über mehrere Größenordnungen der Dosis (etwa um den Faktor 10^4) vorgenommen werden, um von dem Dosisbereich mit epidemiologisch ermittelten Daten in den Dosisbereich dieser Exposition zu kommen.

Die Breite des Schätzintervalls für den Risikokoeffizienten spiegelt die in den Abschätzungen liegende Ungenauigkeit nur bedingt wider. Sie ergibt sich u. a. daraus, dass die neueren Untersuchungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan zu höheren Risikofaktoren führen. Die höheren Risikofaktoren bei der japanischen Population ergeben sich aus drei Gründen:

1. Neue Rechnungen zur Dosimetrie nach den Atombombenexplosionen haben zu neuen Dosisabschätzungen geführt.
2. In den letzten Jahren sind neue Daten zu den Leukämie- und Krebsraten erhoben worden. Es sind vor allem neue Erkrankungen bzw. Todesfälle bei den im jungen Alter exponierten Personen beobachtet worden.
3. Diese Befunde haben zu dem Konzept des relativen Risikos geführt. Damit wird das Strahlenrisiko für die noch lebenden exponierten Personen in die Zukunft projiziert. Die noch zu erwartenden Krebssterblichkeit werden mithilfe der Altersabhängigkeit des Krebsrisikos nicht exponierter Personen unter Annahme eines zeitlich konstanten strahlenbedingten relativen Risikos ermittelt.

Während der erste Umstand den Risikokoeffizienten nicht erheblich beeinflusst hat, tragen die Gründe 2 und 3 in erheblichem Maße zur Erhöhung bei. Der Risikokoeffizient liegt dann etwa um den Faktor 3 bis 5 höher als früher angenommen.

7. Effektive Dosis¹

Für die Erfassung des Gesamtstrahlenrisikos bei kleinen Dosen ist die so genannte effektive Dosis eingeführt

¹ Gemäß ICRP-60 tritt anstelle des Begriffs „effektive Äquivalenzdosis“ der Begriff „effektive Dosis“

worden. Sie enthält Bewertungsfaktoren zur Berücksichtigung des gesamten stochastischen Strahlenrisikos und bezieht infolgedessen sowohl die vererbaren Defekte als auch die Induktion von Leukämie und Krebs ein. Aufgrund der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeiten in einzelnen Geweben und Organsystemen für die Induktion maligner Erkrankungen sind von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) Bewertungsfaktoren (Wichtungsfaktoren) für die verschiedenen Gewebe und Organe festgelegt worden. Die Summe aller Wichtungsfaktoren beträgt 1,0. Zur Ermittlung der effektiven Dosis werden die Äquivalentdosen in den einzelnen Organen und Geweben mit den Wichtungsfaktoren multipliziert und die so erhaltenen Produkte addiert. Ein erheblicher Vorteil der effektiven Dosis liegt darin, dass das Strahlenrisiko auch bei einer inhomogenen Bestrahlung, z. B. einer selektiven Strahlenexposition einzelner Organe nach Inkorporation radioaktiver Stoffe, bewertet werden kann.

Kritisch eingewendet wird, dass die Wichtungsfaktoren auf das Mortalitätsrisiko und nicht auf das Morbiditätsrisiko durch Leukämie und Krebs abstellen. Für einzelne Organe, z. B. die Schilddrüse, bei denen die Therapie der betreffenden Tumoren gute Erfolge erzielt, würden die Wichtungsfaktoren für die Morbidität größer als für die Mortalität sein. Für Organe und Gewebe mit ungünstiger Therapieprognose der Tumoren wäre diese Situation umgekehrt. Allerdings würde auch bei Berücksichtigung des Morbiditätsrisikos definitionsgemäß die Summe aller Wichtungsfaktoren 1,0 betragen. Der Risikokoeffizient insgesamt (Morbiditätsrate pro Dosis) würde jedoch höher als bei der Berücksichtigung der Mortalitätsraten liegen. Orientiert man die Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen und das damit verbundene Strahlenrisiko am Risiko anderer Berufe, so erhält man strengere Maßstäbe für die Dosisgrenzwerte, wenn man das Mortalitätsrisiko zugrunde legt.

Es wird ferner eingewendet, dass die Wichtungsfaktoren für einzelne Gewebe und Organe aufgrund neuerer epidemiologischer Daten verändert werden müssen. Da die Summe der Wichtungsfaktoren gleich 1,0 ist, ergibt sich bei einer homogenen Ganzkörperbestrahlung, dass die Ganzkörperdosis mit der effektiven Dosis identisch ist. Bei einer inhomogenen Bestrahlung, bei der einige Organe bzw. Gewebe besonders hoch belastet werden, schlagen dagegen diese hohen lokalen Bestrahlungen auf die effektive Dosis besonders durch. Dieses trifft u. a. auch für die natürliche Strahlenexposition zu, da in diesem Falle die Lunge und die Epithelien der Bronchien eine besonders hohe Strahlenexposition durch das Radon und seine radioaktiven Folgeprodukte erhalten. Die effektive Dosis wird heute anstelle der Ganzkörperdosis zur Angabe der Dosisgrenzwerte in Gesetzen, Verordnungen und Empfehlungen verwendet.