

Unterrichtung durch die Bundesregierung

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1999

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Auftrag und Zusammenfassung	3
1. Auftrag	3
2. Zusammenfassung	3
II. Natürliche Strahlenexposition	4
III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition	7
1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten	7
2. Radon in Wohngebäuden	7
3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus	7
3.1 Umgebungsüberwachung an den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH ..	7
3.2 Altlastenkataster	8
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	13
1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen	13
2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin ..	15

3.	Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt	16
3.1	Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen	16
3.2	Störstrahler	16
4.	Berufliche Tätigkeit	16
4.1	Personendosisüberwachung	16
4.2	Inkorporationsüberwachung	16
4.3	Berufliche Strahlenexposition durch Radonfolgeprodukte in den neuen Bundesländern	17
4.4	Strahlenexposition des Flugpersonals	17
5.	Besondere Vorkommnisse	17
6.	Fall-out von Kernwaffenversuchen	18
V.	Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl ..	40
Anhang		
A.	Strahlendosis und Strahlenwirkung	41
1.	Strahlendosis und ihre Einheiten	41
2.	Äußere und innere Bestrahlung	42
3.	Stochastische und deterministische Strahlenwirkung	43
4.	Genetisch vererbare Defekte	43
5.	Induktion von Leukämie und Krebs	44
6.	Risikoabschätzung	45
7.	Effektive Dosis	46
B.	Erläuterung der benutzten Fachausdrücke	48

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. Hiermit wird der Bericht für das Jahr 1999 vorgelegt. Er umfasst die wichtigsten Informationen und Änderungen im Bereich der Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung gegenüber den Vorjahren. Umfassendes Datenmaterial wird jeweils in den ausführlichen Jahresberichten über „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ wiedergegeben.

2. Zusammenfassung

Der Bericht behandelt

- die natürliche Strahlenexposition (Kapitel II)
- die zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition (Kapitel III)
- die zivilisatorische Strahlenexposition (Kapitel IV)
- die Strahlenexposition durch den Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl (Kapitel V).

Die natürliche Strahlenexposition setzt sich aus der kosmischen und der terrestrischen Komponente sowie aus der Exposition durch die Aufnahme natürlich radioaktiver Stoffe in den Körper zusammen. 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 Strahlenexposition. Insbesondere Radon in Gebäuden und natürlich radioaktive Stoffe aus Bergbau- und Verarbeitungsprozessen können zur Erhöhung der mittleren Strahlenexposition beitragen. Die bisher durchgeführten Messungen haben ergeben, dass in weniger als 2 % der Wohnungen in Deutschland die Radonkonzentration in der Raumluft über einem Wert von 200 Bq/m³ liegt; die Europäische Kommission empfiehlt, diesen Wert bei Neubauten einzuhalten. Darüber liegende Werte treten überwiegend auf in Gebäuden in Gebieten, die aufgrund der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes erhöhte Radonvorkommen aufweisen, insbesondere in Bergbaugebieten.

In den neuen Bundesländern wird gemäß Einigungsvertrag vom 31. August 1990 nach fortgeltendem Recht der ehemaligen DDR die bei bergbaulichen und anderen Tätigkeiten durch Radonfolgeprodukte auftretende berufliche Strahlenexposition überwacht. Die mittlere effektive Jahresdosis aus der beruflichen Tätigkeit des betroffenen Personenkreises betrug im Jahr 1999 2,27 mSv und lag damit weit unter dem gesetzlich festgelegten Dosisgrenzwert von 50 mSv pro Jahr.

Die Beiträge zur zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung resultieren aus dem Betrieb 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 und dem Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl im Jahr 1986.

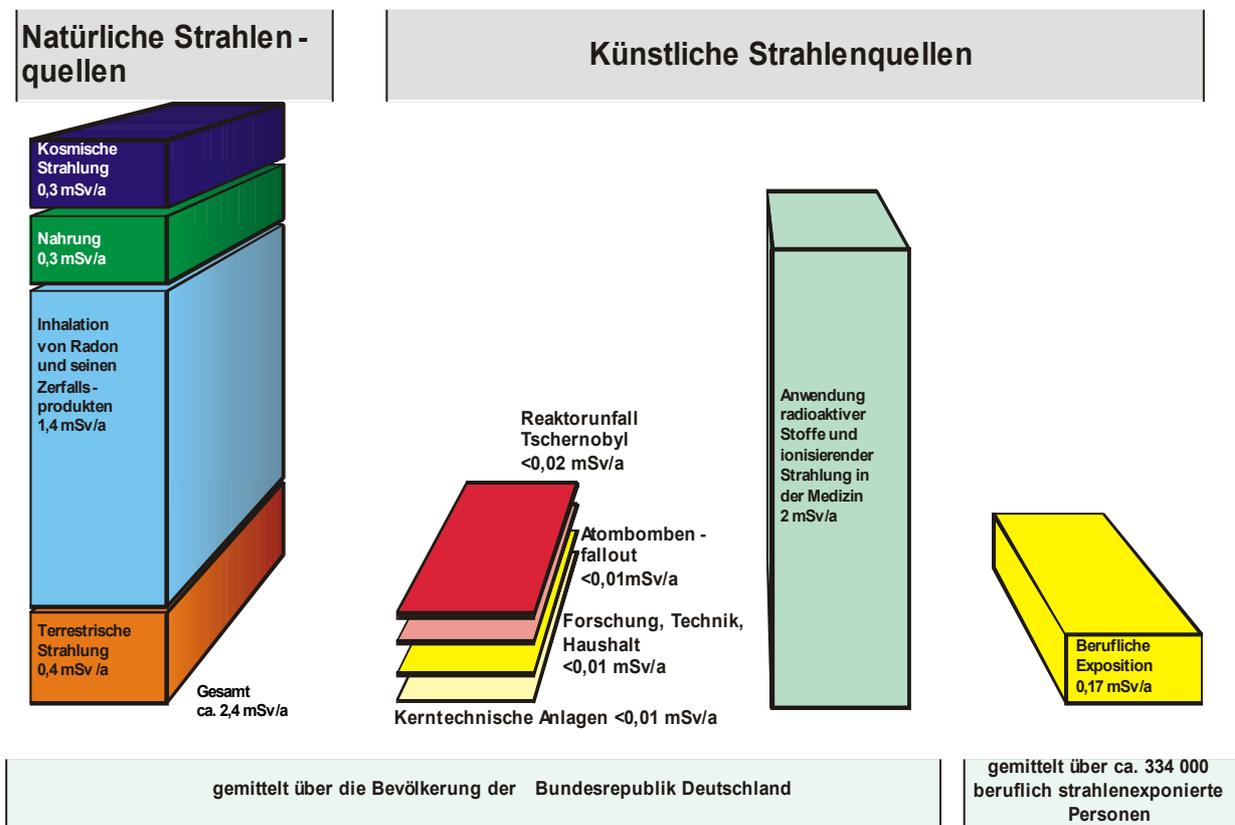
Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung durch die natürliche Strahlenexposition beträgt 2,4 mSv pro Jahr. Bei der zivilisatorischen Strahlenbelastung kann der Dosisbeitrag durch die Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin auf etwa 2 mSv pro Jahr abgeschätzt werden. Die Beiträge der anderen Strahlenquellen sind sehr gering.

Einzelergebnisse für das gesamte Bundesgebiet im Jahr 1999 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die effektive Dosis betrug aus natürlichen Strahlenquellen im Mittel ca. 2,4 mSv pro Jahr. Das radioaktive Edelgas Radon und seine kurzlebigen Folgeprodukte lieferten über Inhalation den Hauptbeitrag zur Strahlenexposition natürlichen Ursprungs mit einer durchschnittlichen effektiven Dosis von ca. 1,4 mSv pro Jahr.
- Die effektive Dosis der zivilisatorischen Strahlenexposition lag bei ca. 2,1 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. Dieser Schätzwert kann nicht ohne weiteres für Risikoabschätzungen bei der Gesamtbevölkerung herangezogen werden, da sich die medizinisch bedingte Strahlenexposition sehr ungleichmäßig auf die Bevölkerung verteilt.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch Atomkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung blieb auch im Jahr 1999 deutlich unter 1 % der zivilisatorischen Strahlenexposition. Die Jahresemissionen radioaktiver Stoffe lagen bei allen kerntechnischen Anlagen unterhalb, bei den meisten weit unterhalb der genehmigten Werte.
- Der Beitrag der beruflichen Strahlenexposition hat sich gegenüber dem Vorjahr nicht verändert. Die Zahl der beruflich strahlenexponierten Personen betrug im Jahr 1999 ca. 334 000. Die mittlere Jahresdosis beläuft sich bei dieser Bevölkerungsgruppe auf 0,17 mSv.
- Die durch den Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl resultierende mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung ging zwar von 0,11 mSv im Jahr 1986 auf weniger als 0,02 mSv zurück, dennoch finden sich in Nahrungsmitteln aus Waldgebieten vereinzelt noch stark erhöhte Cäsium-137-Werte.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch die in den vergangenen Jahrzehnten in der Atmosphäre durchgeführten Kernwaffenversuche zur effektiven Dosis ist weiterhin rückläufig und betrug 1999 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 1999: ca. 4,5 mSv



II. Natürliche Strahlenexposition

Die durch natürliche Strahlenquellen verursachte effektive Dosis beträgt im Mittel 2,4 mSv pro Jahr. 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 zeigt die ortsabhängige Verteilung der externen Strahlenexposition im Freien in der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1999.

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 1000 Bq pro Kilogramm 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

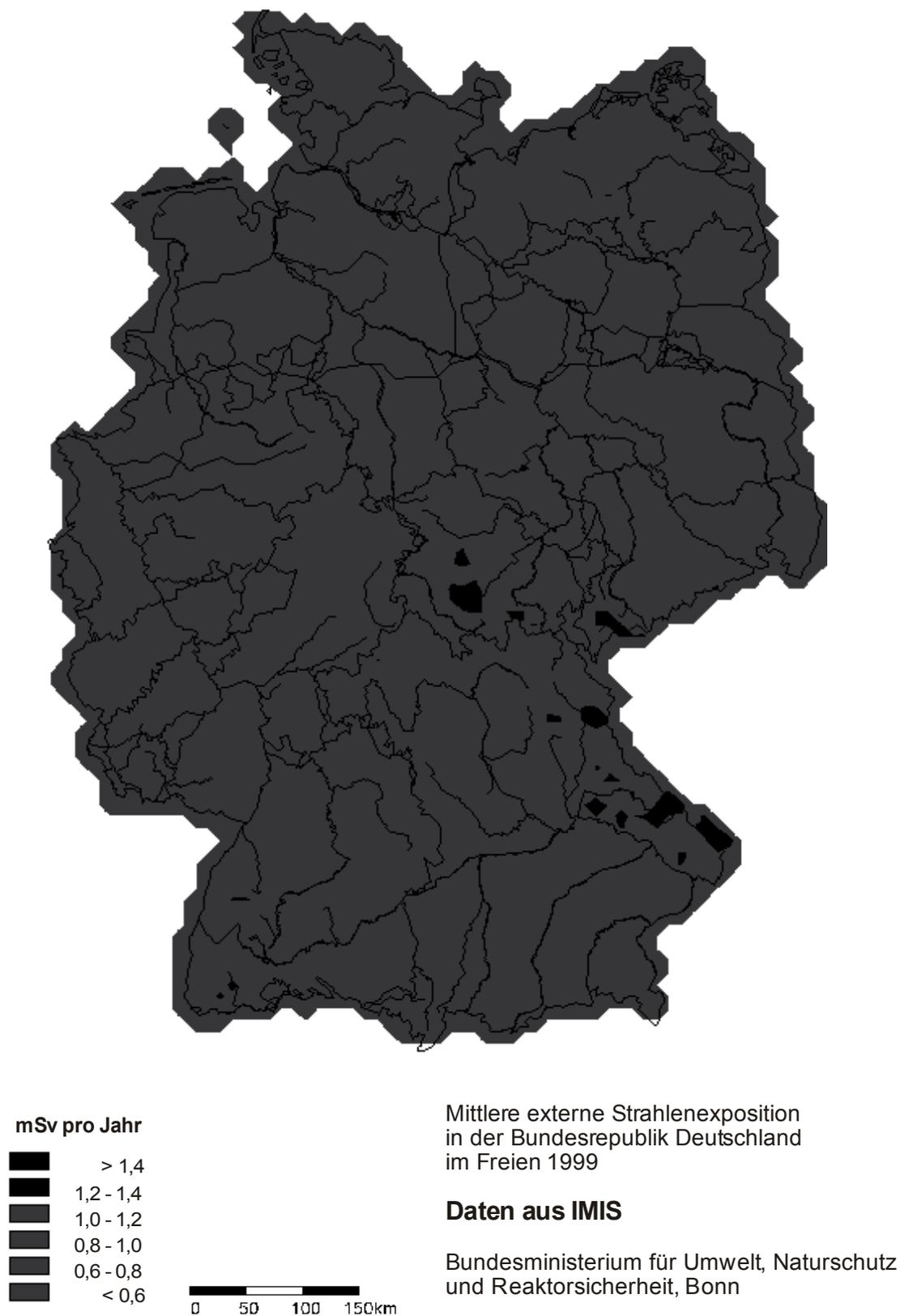
leiten sich von einem Wertebereich für die effektive Jahresdosis bei ständigem Aufenthalt im Freien von 0,06 mSv bis 2,2 mSv bzw. bei ständigem Aufenthalt in Gebäuden von 0,09 mSv bis 2,4 mSv ab. Die höheren Werte findet man vor allem über Granitmassiven mit einer erhöhten spezifischen Aktivität der oben genannten Radionuklide.

Die interne Strahlenexposition des Menschen aus natürlichen Quellen beträgt im Mittel 1,7 mSv pro Jahr, sie entsteht vor allem über die Inhalation radioaktiver Stoffe. Al-

lein auf das radioaktive Edelgas Radon und seine Zerfallsprodukte entfallen ca. 1,4 mSv pro Jahr (effektive Dosis durch Aufenthalt im Freien 0,2 mSv; effektive Dosis durch Aufenthalt in Gebäuden 1,2 mSv).

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.

Abbildung II.1



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 Rückständen und Abfallstoffen durchgeführt. Es wurde die spezifische Aktivität des Radium-226, Thorium-232 und Kalium-40 in mehr als 1500 Proben von Natursteinen, Baustoffen und industriellen Rückständen bestimmt (S. Tabelle III.1).

Die spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide weist von Material zu Material große Unterschiede auf und zeigt auch innerhalb der Stoffarten eine große Variationsbreite. Unter den Natursteinen besitzen kieselsäurereiche Magmageschiefer, insbesondere Granite, vergleichsweise hohe Konzentrationen an natürlichen Radionukliden.

Der Mittelwert der von den Baustoffen ausgehenden Gamma-Ortsdosisleistung (ODL) in Gebäuden Deutschlands beträgt rund 0,4 mSv/a. Vereinzelt treten Werte bis zum 3-fachen dieser Dosisleistung auf.

Das durch radioaktiven Zerfall aus Radium-226 entstehende Radon-222 ist aus der Sicht des Strahlenschutzes von besonderem Interesse. In den wichtigen deutschen Baustoffen Beton, Ziegel, Porenbeton und Kalksandstein wurden nur Radium-226-Konzentrationen kleiner 200 Bq/kg gemessen. Der Beitrag dieser Baustoffe zur Radonkonzentration in Gebäuden beträgt meist deutlich weniger als 100 Bq/m³ Luft, im Durchschnitt weniger als 30 Bq/m³ Luft.

In einigen Rückständen aus industriellen Verarbeitungsprozessen reichern sich radioaktive Stoffe an, die bei unkritischer Verwendung, z. B. beim Einsatz als Sekundärrohstoffe im Bauwesen, eine erhöhte Strahlenexposition der Bevölkerung hervorrufen könnten. So z. B. wurden in früher aus Kupferschlackesteinen des Mansfelder Gebietes errichteten Häusern stark erhöhte Werte gemessen. Um dies zu vermeiden wird heute bestimmten Materialgruppen besondere Aufmerksamkeit gewidmet, vor allem unter dem Aspekt der Nutzung von Rohstoffen aus aller Welt. Bei der überwiegenden Menge mineralischer Baustoffe wurden jedoch Radionuklidkonzentrationen gemessen, wie sie auch in konventionellen Baustoffen vorkommen.

In Deutschland wird der Grundsatz vertreten, dass in erster Linie die anfallende Menge industrieller Rückstände minimiert werden soll und in zweiter Linie ihre Verwertbarkeit zu prüfen ist. Es ergibt sich deshalb die steigende Tendenz, diese Stoffe hinsichtlich ihrer Verwendungsfähigkeit in der Baustoffindustrie zu untersuchen. Unter Beobachtung der Entwicklungstendenzen in der Baustoffproduktion und spezieller Gebäudeparameter ist

eine Erhöhung der Strahlenexposition der Bevölkerung zu vermeiden und bei Materialien mit einer überdurchschnittlich hohen spezifischen Aktivität an radioaktiven Stoffen auf eventuell bestehende Probleme bezüglich des vorsorgenden Strahlenschutzes hinzuweisen.

Durch die Zusammenarbeit des Deutschen Instituts für Bautechnik mit dem Bundesamt für Strahlenschutz werden bei der Erteilung von Zulassungen für neue Baustoffe, Bauteile und Bauarten die Belange des Strahlenschutzes bei deren Prüfung der Umweltverträglichkeit berücksichtigt.

2. Radon in Wohngebäuden

Tabelle III.2 zeigt auf der Grundlage von Radonmessungen (Messzeit mehrere Monate bis zu einem Jahr) eine Übersicht über den geschätzten Anteil an Wohngebäuden, in denen die Werte von 200 Bq/m³ bzw. 400 Bq/m³ überschritten werden. Die Europäische Kommission empfiehlt, diese Werte bei Neubauten bzw. Altbauten langfristig einzuhalten.

Die Gebäude mit erhöhten Radonkonzentrationen konzentrieren sich auf Regionen mit erhöhtem Radonpotenzial im Untergrund. Dieses ist vor allem geologisch bedingt, kann jedoch auch durch Bergbau und bergbauliche Hinterlassenschaften, vor allem in Form von oberflächennahen bergmännischen Auffahrungen, verursacht werden.

Unter dem Aspekt des zielgerichteten Auffindens von existierenden Häusern mit hohen Radonkonzentrationen und zum Schutz von Neubauten vor erhöhten Konzentrationen des Radons hat die Strahlenschutzkommission empfohlen, Gebiete mit erhöhtem Radonpotenzial schrittweise im einzelnen festzulegen. Abbildung III.1 zeigt die regionale Verteilung der Radonkonzentration im geogenen Untergrund, die im Rahmen eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Forschungsvorhabens ermittelt wurde.

Neben dem Radonpotenzial im Baugrund hat die Bauweise, die auf Grund der technischen und technologischen Entwicklung in Verbindung mit dem Streben nach komfortablem, energiesparendem und gesundem Wohnen ständigen Veränderungen unterworfen ist, einen wesentlichen Einfluss auf die Radonkonzentration in Häusern. Es zeigte sich, dass Häuser mit Plattenfundamenten aus Beton in Kombination mit standardmäßigen Maßnahmen zum Schutz der Bauwerke gegen Bodenfeuchtigkeit einen guten Schutz gegen Radoneintritt aus dem Gebäudeuntergrund aufweisen.

3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus

3.1 Umgebungsüberwachung an den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH

Die Sanierungsbetriebe der Wismut GmbH ermittelten 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 Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abwettern und Abwässern wurden durch die zuständigen Landesbehörden Genehmigungswerte festgelegt.

Die für das Jahr 1999 ermittelten Werte der Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abluft bzw. Abwettern und Abwässern zeigen, dass die festgelegten Genehmigungswerte für radioaktive Stoffe eingehalten wurden (Abbildungen III.2 und III.3).

Die aus den übrigen bergbaulichen Anlagen (vor allem industrielle Absetzanlagen, Halden) freigesetzte Radonaktivität wird aus den Radium-226-Konzentrationen der deponierten Materialien unter Zugrundelegung einer abgeleiteten normierten Freisetzungsrates (1 Bq Rn-222 pro m² und sec bezogen auf 1 Bq Ra-226 pro g Material) mit einer theoretisch möglichen Radonfreisetzung von 2 · 10¹⁵ Bq pro Jahr abgeschätzt. Diese Abschätzung bezieht sich auf die Situation vor Beginn der Sanierungsarbeiten; infolge der bereits abgeschlossenen Sanierungsarbeiten hat sich die Radonfreisetzung aber bereits verringert. Überwachungsmessungen in der Umgebung der Betriebe haben gezeigt, dass durch Ableitung von Uran und Radium-226 mit den Abwässern in den großen Vorflutern der Bergbaugebiete (Elbe, Mulde, Weiße Elster und Pleiße) keine oder nur geringfügige Veränderungen der natürlichen Aktivitätskonzentration dieser Radionuklide verursacht werden. In den unmittelbar durch Ableitungen betroffenen kleineren Zuflüssen zu den o. g. Gewässern tritt aufgrund der geringeren Abflussmenge eine im Vergleich zum natürlichen Pegel deutlich erhöhte Aktivitätskonzentration dieser Radionuklide auf. Das Wasser dieser Gewässer wird jedoch nicht genutzt.

Die im Rahmen der Immissionsüberwachung in den Bergbaugebieten ermittelte Aktivitätskonzentration von Radon-222 in der Atemluft im Freien übersteigt häufig die für große Gebiete Mittel- und Norddeutschlands charakteristische Spannweite von 8 bis 23 Bq/m³. Auf Betriebsflächen und in der unmittelbaren Nähe von Abwetter-schächten, industriellen Absetzanlagen und einigen großflächigen Halden wurden insbesondere bei ungünstigen atmosphärischen Bedingungen (z. B. Inversionen in Tallagen) Spitzenwerte bis zu 500 Bq/m³ Radon-222 festgestellt. Wie durch Messungen und Modellrechnungen nachgewiesen wurde, liegen in geringer Entfernung von diesen Objekten die Werte für die 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.

Die Messungen des Bundesamtes für Strahlenschutz im Rahmen der großräumigen Langzeitüberwachung der Radonkonzentration in der bodennahen Luft im Freien wurden auch im Jahr 1999 fortgesetzt.

3.2 Altlastenkataster

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 diese Aufgabe zuständige Bundesamt für Strahlenschutz führt hierzu seit 1991 das Projekt „Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten (Altlastenkataster)“ durch. Mit dem Projekt sollen die bergbaubedingten Hinterlassenschaften (Bergbauobjekte und vom Bergbau beeinflusste Flächen) in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt großräumig erfasst, radiologisch untersucht und im Hinblick auf mögliche Nutzung bewertet werden. Als Bewertungsgrundlage stehen Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) zur Verfügung.

Das Projekt ist in drei Phasen mit jeweils wachsender Untersuchungstiefe gegliedert. Dieses abgestufte Vorgehen ermöglicht es, radiologisch unbedenkliche Objekte und Flächen mit Hilfe einfacher Bewertungsverfahren frühzeitig zu erkennen und aufwendige Messprogramme auf radiologisch bedeutende Hinterlassenschaften zu konzentrieren.

Die in den ersten beiden Projektphasen „Altlastenerfassung und Altlastenverifikation“ erhobenen und bewerteten Daten wurden 1994 in die für die Ergebnisdokumentation entwickelte Datenbank A.LAS.KA. (Altlastenkataster) aufgenommen. Der Bericht über die Ergebnisse der 2. Projektphase, die in der Datenbank gespeicherten Informationen sowie thematische Übersichtskarten wurden den für den Vollzug des Strahlenschutzes zuständigen Länderbehörden übergeben. Damit verfügten die Vollzugsbehörden bereits über eine wichtige Grundlage zur Bewertung der bergbaubedingten Umweltradioaktivität, die bei Entscheidungen über Notwendigkeit und Inhalt möglicher expositionsverringender Maßnahmen herangezogen werden kann. Insgesamt ließen diese Untersuchungen bereits erkennen, dass großräumige radioaktive Kontaminationen nicht vorliegen. Bereits in dieser Phase konnten zahlreiche Hinterlassenschaften identifiziert werden, für die keine Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind.

Für eine Reihe bergbaubedingter Hinterlassenschaften wurden aber noch weitere Daten benötigt, um eine abschließende Bewertung nach den SSK-Empfehlungen vornehmen zu können. Die hierfür erforderlichen Untersuchungen erfolgten in der 3. Phase des o. g. Projektes. Ziel der dazu durchgeführten Messprogramme war die genaue Eingrenzung der Flächen, die bergbaubedingt eine erhöhte Umweltradioaktivität aufweisen, so dass Sanierungsmaßnahmen in Erwägung zu ziehen sind. Die Ausdehnung und Tiefenverteilung radioaktiv kontaminierter Schichten bei diesen Hinterlassenschaften wurden untersucht. Des Weiteren wurden Untersuchungsprogramme zur Ermittlung der Radionuklidkonzentrationen von zur Trinkwasserversorgung genutzten Schacht- und Stollenwässern sowie zur Ermittlung des Einflusses des

Bergbaus auf die Sedimente und Auenböden von Vorflutern abgeschlossen. Im Ergebnis dieser Arbeiten liegt ein umfassender Überblick über die bergbaubedingte Umweltradioaktivität in den 34 Verdachtsflächen des Bergbaus vor.

Der Aufbau des Fachinformationssystems zur bergbaubedingten Umweltradioaktivität (FbU) wurde abgeschlossen.

Außer den bereits in der Datenbank A.LAS.KA. enthaltenen Informationen enthält das FbU die Daten aller Messprogramme. Es verfügt über eine Bedienoberfläche, die einen einfachen Umgang mit den Daten ermöglicht. Die Anbindung an ein geographisches Informationssystem ermöglicht eine effektive Aus- und Bewertung der Daten und Informationen. Die Abschlussbewertung der Untersuchungsgebiete ist noch nicht abgeschlossen.

Tabelle III.1

Bandbreite der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide in Baustoffen und Industrieprodukten in Bq/kg Trockenmasse (TM)

Material	Ra-226 (Bq/kg TM)	Th-232 (Bq/kg TM)	K-40 (Bq/kg TM)
Baustoffe natürlichen Ursprungs			
saure Magmages Steine	30–500	17–310	380–4000
basische Gesteine	< 10–36	< 10–37	100–380
Naturgips, Anhydrit	2–70	2–100	7–200
Kalkstein, Marmor	4–41	2–20	< 40–240
Kies, Sand	1–39	1–64	3–1200
Lehm, Ton	< 16–90	18–200	300–2000
Bims, Tuff, Lava	< 20–200	25–300	490–2000
Finalbaustoffe, Bindemittel			
Ziegel, Klinker	10–200	12–200	100–2000
Beton	7–92	4–80	50–1600
Kalksandstein, Porenbeton	6–80	1–60	40–800
Zement	10–330	10–200	< 40–700
Kalk, Kalkhydrat	13–60	2–93	< 20–600
Sonstige Industrieprodukte, Rohstoffe			
Düngemittel	< 20–1000	< 20–30	< 40–8000
Rohphosphate	10–2000	< 20–100	< 40–900
Steinkohle	< 20–30	< 20– < 50	7–700
Braunkohle	1–51	1–58	< 4–220
Koks	20–30	< 20	40–80
Industrielle Abfallstoffe			
REA-Gips	< 5–25	< 5–20	24–80
Bergbauabraum	< 30–5900	27–100	40–1200
Braunkohlefilteraschen	4–200	6–150	12–610
Schlacke	8–2100	6–340	10–1000
Hüttenbims	110–230	24–62	180–190
Bauxit, Rotschlamm	< 20–800	< 50–1000	1–1000

Tabelle III.2

Geschätzte Anzahl Wohnhäuser mit erhöhten Radonkonzentrationen in den Bundesländern

Bundesland	GM in Bq/m ³	GS in Bq/m ³	Anzahl Wohngebäude in Tausend	% >200 Bq/m ³	% >400 Bq/m ³
Baden-Württemberg	39	2,1	1 831,8 a)	5,1	1,1
Bayern	41	1,9	2 218,8 a)	2,8	0,8
Berlin	28	1,8	265,8 a, b)	0,2	0
Brandenburg	25	1,6	472,6 b)	0	0
Bremen	29	1,6	121,1 a)	0	0
Hamburg	27	1,9	207,2 a)	0,5	0
Hessen	39	1,9	1 102,8 a)	1,3	0,3
Mecklenburg-Vorpommern	39	2,0	294,6 b)	>0*	>0*
Niedersachsen	34	1,9	1 577,1 a)	0,7	0,1
Nordrhein-Westfalen	34	1,9	2 976,9 a)	0,5	0,1
Rheinland-Pfalz	52	1,9	884,1 a)	1,8	0,3
Saarland	39	1,9	261,5 a)	0,6	>0*
Sachsen	45	2,0	692,9 b)	>4,2*	>1,3*
Sachsen-Anhalt	33	1,7	502,6 b)	1,1	>0*
Schleswig-Holstein	33	2,0	576,5 a)	0,5	>0*
Thüringen	44	1,7	462,1 b)	>0,4*	>0*

a) Gebäude- und Wohnungszählung vom 25. Mai 1987

b) Gebäude- und Wohnungszählung 1995

GM – Geometrischer Mittelwert

GS – Geometrische Standardabweichung

* Basierend auf Kenntnissen aus speziellen Untersuchungsprogrammen oder abgeleitet aus Erfahrungen über die regionale Verteilung des Radonpotentials im Untergrund und der Radonkonzentration in Gebäuden ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen relativen Anteile über den aus Stichproben ermittelten Ergebnissen liegen.

Abbildung III.1

Regionale Verteilung der Radonkonzentration in der Bodenluft

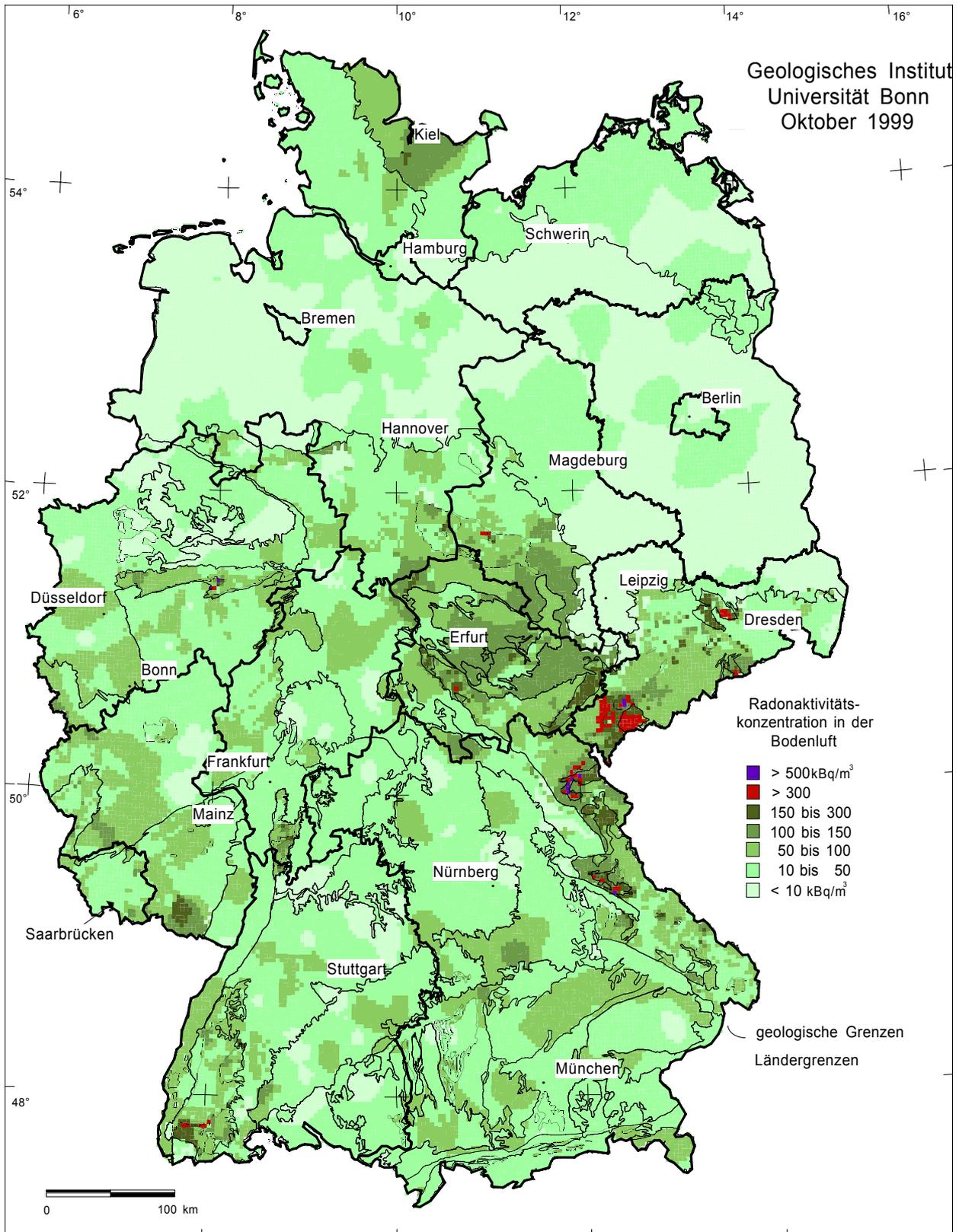


Abbildung III.2

Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Abwettern bzw. der Abluft in die Atmosphäre 1999

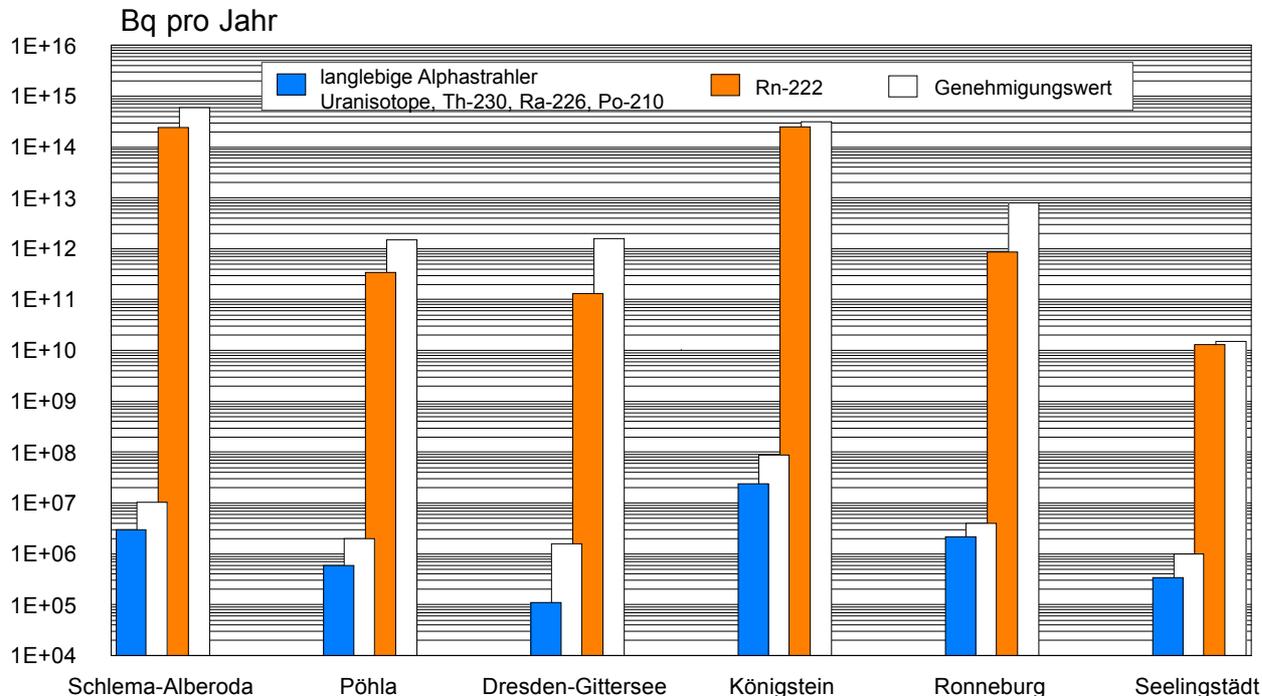
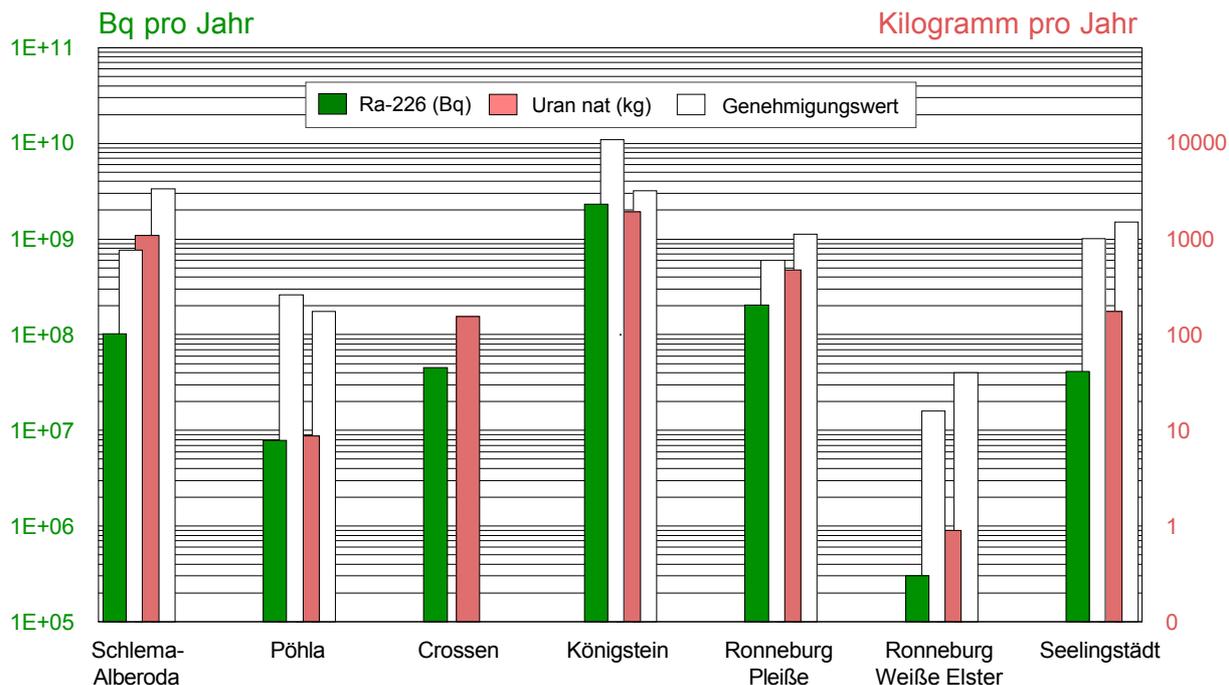


Abbildung III.3

Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Schacht- bzw. Abwässern in die Oberflächengewässer 1999



IV. Zivilisatorische Strahlenexposition

1. Kerntechnische Anlagen

1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

Aus den für das Jahr 1999 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. 1015 Bq für Edelgase, ca. $3 \cdot 10^{10}$ Bq für Aerosole und ca. 1010 Bq für Jod-131 zeigt.

Die für 1999 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 1999 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 1999 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 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 1999 zusammengefasst. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus den übrigen Forschungsreaktoren betragen im Mittel nur einige Prozent der Ableitungen von Kernkraftwerken. In Abbildung IV.5 sind die entsprechenden Abwasserdaten im Jahr 1999 zusammengestellt. Abbildung IV.6 enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 1999 in Grenznähe, d. h. bis zu einer Entfernung von 30 km zur deutschen Grenze, die in Tabelle IV.1 aufgeführten kerntechnischen Anlagen in Betrieb. Das Kernkraftwerk Mühleberg in der Schweiz wurde trotz der größeren Entfernung zur deutschen Grenze mitberücksichtigt, weil es im Einzugsgebiet des Rheins liegt. Über die Jahresemissionen kerntechnischer Anlagen in EU-Ländern berichtet die Kommission der Europäischen Union. 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 angegebenen Expositionswerte stellen obere Werte dar, die gemäß § 45 Abs. 2 StrlSchV für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen ermittelt wurden. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen in der Umgebung einer Anlage, bei denen aufgrund 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. Bei der Berechnung dieser Werte wurden die in Anlage XI StrlSchV genannten Expositionspfade und die Lebensgewohnheiten der Referenzperson berücksichtigt, die ungünstige Ernährungsgewohnheiten und Aufenthaltszeiten beinhalten.

Die Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Jahr 1999 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 (Gammastrahlung), 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) 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 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 1000 Stunden am Flussufer oder auf Wiesen in Flussnähe. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt 0,0005 mSv (entsprechend rund 0,17 % des Genehmigungswertes) beim Standort des Kernkraftwerkes Emsland.

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 Neckars ermittelt; am Unterlauf der Weser wurden für Erwachsene 0,0003 mSv und für Kleinkinder 0,0004 mSv berechnet. An Rhein und Main liegen die effektiven Dosen bei 0,00015 mSv, an der Donau bei 0,0004 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 angegebenen Werte für die entsprechenden Strahlenexpositionen durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren stammen aus den Jahresberichten und aus zusätzlichen Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf, Geesthacht und dem Hahn-Meitner-Institut Berlin. Die Abbildung weist für die effektive Dosis im Jahr 1999 als höchsten Wert 0,0010 mSv (rund 0,3 % des Grenzwertes) für Erwachsene und 0,0017 mSv (rund 0,6 % des Grenzwertes) für Kleinkinder beim Forschungszentrum Karlsruhe auf. Der höchste Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 0,0055 mSv (rund 0,6 % des Grenzwertes) beim Forschungszentrum Jülich.

Für die Strahlenexposition über das Abwasser aus Kernforschungszentren ergibt die Abschätzung aufgrund von Messwerten, die bei radioökologischen 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 1999 bei 0,037 mSv, 0,006 mSv bzw. 0,0006 mSv.

Für die kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe in Hanau, Karlstein, 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 0,0005 mSv für Erwachsene (rund 0,2 % des Grenzwertes) der höchste Wert der Lungendosis 0,001 mSv für Kleinkinder (rund 0,1 % des Grenzwertes).

Die durch die Ableitungen von Alphastrahlern mit der Abluft bedingten Werte der effektiven Dosis von Erwachsenen und Kleinkindern in der Umgebung kernbrennstoffverarbeitender Betriebe sind in Abbildung IV.10 aufgeführt. Wie im Vorjahr liegen auch 1999 die Werte der effektiven Dosis in der Umgebung aller kernbrennstoffverarbeitender Betriebe 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 1999 mit der Abluft ermittelte Wert der effektiven Dosis für den Erwachsenen betrug 0,0004 mSv, für Kleinkinder 0,0006 mSv; dies sind 0,1 % bzw. 0,2 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Die Lungendosis errechnete sich zu 0,0006 mSv für Erwachsene und 0,0011 mSv für Kleinkinder (ca. 0,07 % bzw. 0,12 % des Grenzwertes). Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe im Jahr 1999 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 kerntechnischer Anlagen in Nachbarländern (Tabelle IV.1) führte 1999 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 ebenfalls obere Werte bis zu 0,01 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 1999 Berichtszeitraum Jod-131 in Milch nicht nachgewiesen.

2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin

Die medizinische Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen einschließlich der Röntgendiagnostik hat in der Bundesrepublik Deutschland einen hohen Stand erreicht. In Anwendung der Strahlenschutzgrundsätze der Strahlenschutzverordnung und der Vorschriften der Röntgenverordnung 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 nicht Untersuchungen ohne Anwendung radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlen oder z. B. Verfahren mit radioaktiven Stoffen ohne Anwendung am Menschen (In-vitro-Verfahren) den gewünschten medizinischen Effekt erfüllen. Die Mehrzahl der Untersuchungsverfahren ist mit niedriger Strahlenexposition verbunden. Einige neue Verfahren wie z. B. die Computertomographie und die interventionelle Radiologie, die einen erheblichen diagnostischen Fortschritt erbracht haben, sind jedoch mit einer relativ hohen Strahlenexposition verbunden. Gleichwohl wird die Bundesregierung am Ziel festhalten, die Strahlenbelastung der Patienten weiter zu verringern. Die Strahlenschutzkommission beurteilt neue Methoden im Hinblick auf den Strahlenschutz.

Bei der Bewertung der Strahlenexposition durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin ist zu berücksichtigen, dass ein daraus resultierendes Risiko gegenüber dem Nutzen der Anwendung für den Patienten in den Hintergrund treten soll. Das Risiko einer nicht oder nicht rechtzeitig erkannten Krankheit kann wesentlich höher sein als das Strahlenrisiko durch eine notwendige Röntgenuntersuchung. Dies gilt in noch höherem Maße für strahlenintensive Maßnahmen wie z. B. bei der interventionellen Radiologie, denn dadurch können oft Operationen mit wesentlich höheren Risiken vermieden werden. Die medizinisch bedingte Strahlenexposition ist ungleichmäßig auf die Bevölkerung verteilt, da ältere Personen wesentlich stärker betroffen sind als jüngere. Es ist deshalb nicht zulässig, ein mittleres Strahlenrisiko für die Bevölkerung abzuleiten. Viele und z. T. auch dosisintensive Anwendungen werden gerade bei Schwer- und Schwerstkranken notwendig. Es wäre daher falsch, wenn der aus diesen Untersuchungen resultierende Anteil an der kollektiven Dosis in Risikoabschätzungen zur strahlenbedingten Krebsmortalität einbezogen würde, ohne dass alters- und geschlechtsspezifische Risikofaktoren und die Krankheit berücksichtigt werden. Grundlage für eine genauere Abschätzung des Strahlenrisikos muss die Ermittlung der Individual- und Altersverteilung der Patienten sein, die aus Gründen des Datenschutzes nur mit großen Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten möglich ist, da sie eine Einsichtnahme in

personenbezogene Krankenakten erfordert. Zusätzlich erforderlich ist die Verwendung alters- und geschlechtsspezifischer Risikofaktoren. Aus einer durch das Bundesamt für Strahlenschutz erhobenen repräsentativen Stichprobe aus Akut-krankenhäusern liegen Daten über die Altersverteilung stationärer Patienten von sieben Untersuchungsarten der Röntgendiagnostik vor, die zusammen etwa 86 % der kollektiven effektiven Dosis der stationären Röntgendiagnostik ausmachen. Die Patienten jeder Untersuchungsart werden in Anlehnung an UNSCEAR in vier Altersklassen eingeteilt. Für diese Altersklassen wurden aus den zusätzlichen Lebenszeitriskiken nach ICRP 60 mittlere Risikokoeffizienten ermittelt. Die relativen Risiken dieser vier Altersgruppen stellen sich wie folgt dar:

Altersgruppe	Relatives Risiko
< 16 Jahre	2,4
16 - 40 Jahre	1,25
41 - 65 Jahre	0,44
> 65 Jahre	0,19

Bei vorsichtiger Abschätzung der o. g. Einflussgrößen ergibt sich ein Reduktionsfaktor von mindestens 0,6 bis 0,7, um aus der mittleren Exposition das mit der Exposition verbundene reale Strahlenrisiko zu ermitteln. Ein im Rahmen der Genauigkeit repräsentativer Wert der mittleren Exposition liegt derzeit bei 2 mSv pro Jahr und Person.

Aus Erhebungen über die Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen durch das Bundesamt für Strahlenschutz ergeben sich die in Tabelle IV.3 dargestellten Untersuchungsfrequenzen für Deutschland im Jahr 1994. Mittlere Werte der effektiven Dosis häufiger Röntgenuntersuchungen sind in Abbildung IV.11 dargestellt. Es handelt sich dabei um Dosen, wie sie bei Patienten in Krankenhäusern und Arztpraxen ermittelt wurden. Neuere Erhebungen zur Häufigkeit und Dosis werden vom Bundesamt für Strahlenschutz, z. T. über vom Bundesumweltministerium geförderte Forschungsvorhaben durchgeführt. Die Ergebnisse können im Bericht für das Jahr 2000 veröffentlicht werden.

Es ist davon auszugehen, dass die Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen weiter geringfügig zunimmt, insbesondere bei Aufnahmen des Skeletts. Bei Röntgenuntersuchungen des Magen-Darm-Kanals ist ein erheblicher Rückgang zugunsten der Magen-Darm-Spiegelung festzustellen. Röntgenuntersuchungen des Harntrakts sowie von Leber und Galle werden in großem Umfang durch Ultraschalluntersuchungen ersetzt. Dagegen zeigen die modernen Verfahren der Bildgebung, die Computertomographie, die digitale Subtraktionsangiographie und die interventionelle Radiologie eine starke Zunahme. Letztere werden vorwiegend bei älteren Personen durchgeführt, bei denen das Langzeitstrahlenrisiko bezüglich der Tumorentstehung vermindert ist. Bei der Strahlenexposition

des einzelnen untersuchten Patienten kann ein Rückgang je Untersuchung angenommen werden, der auf die Einführung dosissparender Untersuchungstechniken, z. B. durch den Einsatz von empfindlicheren Röntgenbildverstärkern und verbesserten Film-Folien-Systemen, zurückzuführen ist. Eine erhebliche Dosisreduzierung bei der Durchleuchtung ist durch die Anwendung der gepulsten Durchleuchtung möglich.

Die Nuklearmedizin liefert im Vergleich zur Röntgendiagnostik wegen der niedrigeren Anwendungshäufigkeit und der zum Teil niedrigen effektiven Dosis je Untersuchung einen wesentlich geringeren Beitrag zur Strahlenexposition der Bevölkerung. Er liegt etwa bei einem Zehntel des Betrages der durch die Röntgendiagnostik verursachten Strahlenexposition (ausgedrückt als mittlere effektive Dosis).

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, Rauch- und Feuermelder, 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-, Dicken- und Dichtemessung) oder zur Qualitätskontrolle bei der zerstörungsfreien Materialprüfung eingesetzt. Der Umgang mit diesen technischen Strahlenquellen bedarf in der Regel der Genehmigung (Anzeigepflicht bei geringer Radioaktivität oder bei bauartzugelassenen Geräten).

Die Strahlenschutzverordnung regelt den Umgang mit diesen Industrierzeugnissen und die Röntgenverordnung den Einsatz von Röntgengeräten, 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 Hochspannungsgleichrichter); 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 Personendosisstellen ausgegeben und ausgewertet werden. Die Zahl der überwachten Personen betrug im Jahr 1999 insgesamt 334 091, davon im Bereich Medizin 248 737. Abbildung IV.13 zeigt den Verlauf seit 1981 für die alten und ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer.

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 0,17 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, dass bei dem größten Teil aller Überwachten (87 %) während des ganzen Jahres die untere Messbereichsgrenze des Personendosimeters von 0,2 mSv unterschritten wird. In diesen Fällen setzen die Messstellen für die Personendosis den Wert Null fest, was im Bereich Medizin auf 90 %, in den nicht medizinischen Bereichen auf 79 % der Überwachten zutrifft. Bei den verbleibenden Personen ergibt sich eine ausgeprägte Häufung bei kleinen Dosiswerten. Bildet man einen Mittelwert nur für die Überwachten mit von Null verschiedenen Jahrespersonendosiswerten, so ergibt sich eine mittlere Jahrespersonendosis von 1,29 mSv.

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) im Jahr 1999 betrug 55 Personen-Sv. Die Beiträge typischer Tätigkeitszweige zur Kollektivdosis zeigt die Abbildung IV.14. Einige Angaben über die berufliche Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken sind in den Abbildungen IV.15 und IV.16 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).

4.3 Berufliche Strahlenexposition durch Radonfolgeprodukte in den neuen Bundesländern

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. 1999 wurde diese Überwachung bei fast 2 200 Personen vorgenommen, von denen mehr als 75 % Sanierungsarbeiten in den Betrieben der Wismut GmbH ausführten.

Mehr als die Hälfte der Beschäftigten der Wismut GmbH wurde 1999 mit personengebundenen Geräten (am Körper getragene spezielle Messgeräte mit akkumulatorgetriebener Probenahmepumpe, Filter, Kernspur- und Thermolumineszenzdetektoren) zur Messung der Strahlenexposition überwacht. 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 und Ermittlung der entsprechenden unterschiedlichen Aufenthaltszeiten bestimmt.

Die Kollektivdosis der überwachten beruflich durch Radonzerfallsprodukte strahlenexponierten Personen betrug 1999 einschließlich der Exposition durch langlebige Alphastrahler und äußere Bestrahlung ca. 5,1 Personen-Sv. Bei Berechnung der Dosis gemäß ICRP-65 (s. Kapitel II) würden sich für die Kollektivdosis lediglich 3,2 Personen-Sv ergeben. Im nachfolgenden Text werden die auf dieser Grundlage berechneten Dosisangaben in Klammern gesetzt. 2,6 Personen-Sv (1,9 Personen-Sv) entfielen auf die Beschäftigten der Wismut GmbH. Bei diesen wurden auch die Expositionen durch langlebige Alphastrahler und durch externe Strahlung messtechnisch erfasst. Bei den Beschäftigten in den Nichturanbergbaubetrieben und in den sonstigen überwachten Einrichtungen mit Expositionen durch Radonzerfallsprodukte liefern diese Komponenten im Allgemeinen nur einen kleinen Beitrag, der pauschal mit insgesamt 10 % der ermittelten Dosis berücksichtigt wurde.

Die mittlere effektive Jahresdosis aller durch Radonzerfallsprodukte beruflich exponierten Überwachten betrug 2,27 mSv (1,42 mSv). Sie lag damit weit unter dem Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen

der Kategorie A von 50 mSv pro Jahr. Die höchste mittlere effektive Jahresdosis ergab sich für die Beschäftigten bei Förderung und Sanierung im Nichturanbergbau mit 6,0 mSv (3,0 mSv), gefolgt von den Beschäftigten in Schauhöhlen und Schaubergwerken mit 5,9 mSv (3,0 mSv), in technisch-wissenschaftlichen Einrichtungen und in Radiumbädern mit 3,9 mSv (2,0 mSv), in Bergsicherungsbetrieben mit 3,8 mSv (1,9 mSv), in Wasserbetrieben mit 3,0 mSv (1,5 mSv) und in der Wismut GmbH mit 1,5 mSv (1,1 mSv). Die insgesamt 83 Beschäftigten (3,7 %) mit einer nach ICRP-65 ermittelten jährlichen effektiven Dosis von mehr als 6 mSv (wahrscheinlicher zukünftiger Einbeziehungswert für beruflich durch Radon und Radonzerfallsprodukte strahlenexponierte Personen) lieferten einen Beitrag von 13,5 % zur Kollektivdosis.

Im Jahr 1999 gab es keine Grenzwertüberschreitungen bei den durch Radonzerfallsprodukte beruflich exponierten Überwachten. Die höchste individuelle effektive Dosis betrug 38,6 mSv (19,3 mSv).

4.4 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 gewichtete Umgebungs-Äquivalentdosis, die die effektive Dosis im Flugzeug konservativ abschätzt, 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 Reiseflughöhe 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 ausschließlich zur Südhalbkugel die Jahresdosen um den Faktor 2 bis 3 geringer.

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 1999, enthält Tabelle IV.4. Die Übersicht dient dazu, mögliche Fehlerquellen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aufzuzeigen, um vergleichbare Vorkommnisse zu vermeiden. Die Anmerkungen zum radiologischen Gefährdungspotential 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 1999 wurden keine Atomtests durchgeführt.

Der allgemeine Pegel der Umweltradioaktivität durch die früheren Kernwaffenversuche in der Atmosphäre ist in den letzten 35 Jahren ständig zurückgegangen. Ihr Anteil an der gesamten Strahlenexposition des Menschen beträgt zur Zeit weniger als 0,01 mSv/a.

Tabelle IV.1

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	ca. 20 km
	Urananreicherungsanlage Almelo	ca. 15 km

Tabelle IV.2

Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser aus dem Endlager Morsleben im Jahr 1999

	Abluft/Bq	Abwasser/Bq
Tritium	2,8 E+10	2,7 E+05
Kohlenstoff-14	2,0 E+09	–
langlebige Aerosole	2,0 E+06	–
Radonfolgeprodukte	6,4 E+09	–
Nuklidgemisch außer Tritium	–	1,3 E+04

Tabelle IV.3

**Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen in Deutschland (81,44 Mio. Einwohner),
in Absolutzahlen und in relativer Häufigkeit je 1 000 Einwohner
im Jahr 1994**

	Anzahl in Tausend				
	Ambulant	Stationär	Sonstige	Gesamt	
Brustkorb	11 050	10 600		21 650	266
Gliedmaßen	21 630	3 350		24 980	307
Wirbelsäule	11 110	1 200		12 310	151
Becken	3 210	570		3 780	46
Hüfte	3 830	480		4 310	53
Schädel	10 200	1 050		11 250	138
Bauchraum (leer)	1 870	720		2 590	32
Speiseröhre/Magen	750	110		860	11
Dünndarm	140	10		150	2
Dickdarm	210	80		290	4
Galle	120	100		220	3
Harntrakt	1 600	680		2 280	28
Arteriendarstellung	410	1 030		1 440	18
Venendarstellung	420	260		680	8
Mammographie	5 240	300		5 540	68 ¹⁾
CT-Schädel	850	810		1 660	20
CT-Sonstige	2 150	1 420		3 570	44
Knochendichtemessung	1 090			1 090	13 ²⁾
Sonstige	1 380	250	1 990 ³⁾	3 620	44
Zwischensumme	77 260	23 020	1 990	102 270	1 256
Zahnuntersuchungen	22 510	10		22 520	277
Gesamt	99 770	23 030	1 990	124 790	1 533

1) Entspricht 157 je 1 000 Frauen älter als 15 Jahre

2) Nur Ambulanz

3) Nicht klassifizierte Röntgenuntersuchungen

CT: Computertomographie

Tabelle IV.4

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1999**

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
29.05.98 (Nachtrag)	Verkehrsunfall eines LKW mit radioaktiven Versandstücken (I-125 200 kBq)	Missglücktes Ausweichmanöver	Keine, Versandstücke nicht beschädigt	
01.08.98 (Nachtrag)	Fund radioaktiv markierter Messinstrumente (Ra-226 2,3 MBq) in einer alten Fluginstrumententafel eines Sammlers	Unzulässige Entsorgung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
25.08.98 (Nachtrag)	Verlust eines Kampfstoffdetektors mit Strahler (Am-241 925 kBq) während der Übung einer ausländischen Armee	Unachtsamkeit	Gefährdungspotential gering	Suche auf dem Übungsgebiet erfolglos
02.12.98 (Nachtrag)	Fund von thorium- und uranhaltigen Substanzen (Aktivität z.T. ca. 10fache Freigrenze) auf mehreren Grundstücken	Unzulässige Lagerung, ungenehmigter Umgang mit radioaktiven Stoffen	Kein Hinweis auf Freisetzung radioaktiver Stoffe	Ordnungsgemäße Entsorgung, staatsanwaltschaftliches Ermittlungsverfahren
04.01.99	Fund einer Bohrlochsonde mit Strahler (Cs-137 2,22 GBq) in einer Kupferschrottlieferung aus dem Ausland bei einer Logistikgesellschaft	Unzulässige Entsorgung	Keine erhöhten Strahlenexpositionen bekannt, Strahler im Abschirmbehälter vorgefunden	Ordnungsgemäße Entsorgung
11.01.99	Abgabe eines Radium-Emanators (Ra-226 ca. 40 kBq) bei einem Gesundheitsamt	Unzulässige Lagerung in einem Privathaus	Dosisleistung am Daueraufenthaltsplatz 35 µSv/a	Ordnungsgemäße Entsorgung
15.01.99	Verlust eines Strahlungsmessgerätes mit Prüfstrahler (Sr-90/Y-90 ca. 5,7 MBq) aus einem Dienst-Pkw	Diebstahl des auf dem Rücksitz befindlichen Messgerätes	Keine	Staatsanwaltschaftliche Ermittlungen erfolglos; disziplinarische Maßnahmen
19.01.99	Verkehrsunfall eines LKW mit radioaktiven Versandstücken für die Medizin (2 Mo-99/Tc-99m-Generatoren 6,45 und 21,5 GBq)	Missglücktes Ausweichmanöver	Keine, Versandstücke nicht beschädigt	

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
20.01.99	Fund eines Schulquellensatzes (Na-22 37 kBq; Co-60 0,37 MBq; Kr-85 185 kBq; Cs-137 185 kBq) in einer Kleingartenanlage	Unzulässige Lagerung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
21.01.99	Feststellung geringfügiger Kontaminationen (Co-57 max. 4 Bq/cm ²) im Labor- und Außenbereich einer technischen Beschleunigeranlage und im Wohnbereich einer Mitarbeiterin (>0,5 Bq/cm ² Gegenstände und Kleidung)	Ungenügende Sorgfalt	Ausscheidungsanalyse und Dosimeterauswertung ergaben eine Strahlenexposition einer Mitarbeiterin von weniger als 2 mSv/a	Sperrung der Laborräume, Dekontamination der Kleidung und der Laborräume, Abtrag von Erdreich im Außenbereich
28.01.99	Fund schwach radioaktiver Abfälle (kurzlebige Radionuklide) aus einer nuklearmedizinischen Praxis in einem Hausmüllfahrzeug	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung, behördliche Maßnahmen gegen Verursacher
02.02.99	Fund eines Metallbehälters mit drei Prüfstrahlern aus der Strahlentherapie (1 Cs-137 925 kBq, 2 Ra-226 2,2 MBq) im Schreddergut bei einer Metallrecyclingfirma	Unzulässige Entsorgung	Keine erhöhten Strahlenexpositionen bekannt, Strahler unversehrt im Behälter	Ordnungsgemäße Entsorgung
03.02.99	Fund eines Radiumkissens (Ra-226 ca. 7,4 MBq)	Unbekannte Herkunft	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
07.02.99	Fund von fünf Prüfstrahlern (Sr-90/Y-90 mit je 0,6 MBq) und mehreren Ampullen Übungsstaub (P-32, Eu-152, Ba-133)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
11.02.99	Fund radioaktiver Stoffe (Tc-99m 37 MBq) in einem Müllfahrzeug in einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage
15.02.99	Verlust von zwei Strahlern (Cs-137 130 und 290 MBq) einer Füllstandsmessanlage in einem Chemiebetrieb bei Umbauarbeiten	Ungenügende Kontrolle, unbemerkte Abgabe in den Schrott	Einschmelzen der Strahler, Kontamination des Filterstaubs (250 µSv/h)	Ordnungsgemäße Entsorgung des Filterstaubs, staatsanwaltschaftliche Ermittlungen

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
16.02.99	Fund von zwei Prüfstrahlern (Sr-90/Y-90 je 0,6 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
22.02.99	Fund eines Messgerätes mit Prüfstrahler (Ra-226 1,26 MBq) in einer Arztpraxis	Unzulässige Lagerung	Keine Kontaminationen, Dosisleistung 0,2 µSv/a,	Ordnungsgemäße Entsorgung
23.02.99	Fund von 3 Strahlenschutzbehältern mit zwei Strahlern (Cs-137 max. 20 mSv/h, Co-60 max. 940 µSv/h) einer Dichtemesseinrichtung bei Aufräumarbeiten	Mangelhafte Bestandskontrolle, Gerät in Vergessenheit geraten	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
24.02.99	Fund eines innen kontaminierten Stahltresors (Pb-210 900 Bq) in einem ehemals von der Polizei genutzten Gebäude	Unzureichende Räumung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
26.02.99	Verbleib einer Neutronenquelle (Cf-252 73 MBq) in einem Bohrloch in ca. 25 m Tiefe bei Drucksondierung in einem Tagebaurestloch	Abbruch des Sondiergestänges	Keine, belegt durch TÜV-Gutachten	Veranlassung konstruktiver Veränderungen durch die Herstellerfirma, erforderliche Prüfung der Sondiergestänge auf Risse vor weiteren Einsätzen
05.03.99	Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90/Y-90 0,6 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
09.03.99	Verkehrsunfall eines LKW mit radioaktiven Versandstücken für die Medizin (Tl-204)	Unfallursache nicht geklärt	Keine, Versandstücke nicht beschädigt	
09.03.99	Übergabe eines leeren Metallbehälters mit der Aufschrift „Radium“ (19 µSv/h) an die Polizei nach Kauf auf einem Trödelmarkt	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Behälter diente in der Medizin der Aufnahme von radiumhaltigen Substanzen und Flüssigkeiten vor ca. 80–100 Jahren
09.03.99	Beseitigung fester radioaktiver Abfälle (H-3 40 kBq) über den Hausmüll aus einer Klinik durch Reinigungskräfte	Unzulässige Entsorgung, unterlassene Einweisung	Keine, zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung bei Verbrennung deutlich weniger als 0,1 µSv	Organisatorische Maßnahmen
10.03.99	Freisetzung von Kr-85 (ca. 80 GBq) durch Abluftsystem über dem Dach bei einem Leuchtmittelhersteller	Undichtes Absperrventil einer Stahlflasche	Keine, da Freisetzung über Abluftsystem, für Betasubmersion von Personen in der Nachbarschaft ca. 0,1 µSv abgeschätzt	Umfüllen der Restmenge in eine dichte Flasche

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
11.03.99	Fund von fünfzehn Ionisationsrauchmeldern (Pu-239 je 3 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
15.03.99	Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241) in einem Hotel	Diebstahl	Keine	Straftat aufgeklärt, Ionisationsrauchmelder unversehrt sichergestellt
15.03.99	Fund von fünf Strahlern (2 Sr-90 je 0,6 MBq, 3 Ra-226 je 0,3 MBq) bei Sanierungsarbeiten	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
16.03.99	Fund einer tritiumhaltigen Cholesterolverbindung (H-3 ca. 10 MBq) in einem verschlossenen Lagerraum eines Krankenhauses	Unterlassene Entsorgung bei Schließung eines Krankenhausbereiches	Keine, Originalverpackung unversehrt	Ordnungsgemäße Entsorgung, Auswertung des Vorfalls mit den zuständigen Strahlenschutzbeauftragten
19.03.99	Verlust von vier umschlossenen Strahlern (Am-241 3,7 MBq; Fe-55 0,37 MBq; 0,395 MBq; 6,6 MBq) und zwei offenen Freigrenzenpräparaten (Mischpräparate Am, Pu, Cm) in einem Labor einer Universität	Mangelhafte Bestandskontrolle	Gefährdungspotential gering	Maßnahmen zur Sicherstellung einer lückenlosen Bestandskontrolle
19.03.99	Fund von einem Messinstrument und einem Schaltelement (Ra-226 je 0,3 MBq)	Unzureichende Entsorgung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
22.03.99	Fund von 4 Strahlern (Sr-90 max. 2 mSv/h) in einer fabrikneuen Flächendichtemesseinrichtung im Abrissgebäude eines Betriebes	Mangelhafte Bestandskontrolle, Gerät in Vergessenheit geraten	Keine, Strahler waren ordnungsgemäß in Transportbehältern verpackt	Ordnungsgemäße Entsorgung
26.03.99	Störung bei der Strahlerrückführung (Co-60) an einer medizinischen Gammabestrahlungsanlage	Unsatzgemäße Befestigung eines Steuerungskabels	Strahlenexposition (je 20 µSv) von drei Mitarbeiterinnen bei Bergung der Patientin, geringfügige Überexposition der Patientin	Reparatur durch Servicefirma
28.03.99	Feststellung erhöhter Ortsdosisleistung (1,8 µSv/h) an der Außenfläche eines Eisenbahnwagens mit einer Schrottsendung	Unzulässige Entsorgung	Keine	Rückführung des Wagens zum Absender

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
29.03.99	Feststellung von kontaminiertem Wasser (Sr-90 80 Bq/l) im Betonkammersystem eines stillgelegten Forschungsreaktors	Ursachenermittlung nicht abgeschlossen	Gefährdungspotential gering	Austausch des kontaminierten Wassers, Beprobung relevanter Bereiche in der unmittelbaren Umgebung und des Grundwassers
12.04.99	Fund von acht Ampullen Übungsstaub (P-32, Eu-152, Ba-133), eines Prüfstrahlers (Sr-90/Y-90 0,6 MBq) und einem Messinstrument mit Strahler (Ra-226 0,3 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
12.04.99	Kontamination einer Dickenmessanlage beim Einsatz eines Strahlerstiftes (Pm-147 1 MBq) in einer Firma	Lösen der Klebestelle des Strahlerhalters in der Messvorrichtung, Kontamination durch Abrieb	Keine Kontamination außerhalb der Messvorrichtung, keine Inkorporation	Dekontamination der Messvorrichtung, Inkorporationskontrolle der Beschäftigten
13.04.99	Versagen des Endschalters nach der Strahlerückführung an einem Afterloadinggerät (Ir-192 370 GBq)	Wärmeausdehnung eines Kunststoffzahnrades des Antriebs	Keine, Strahler befand sich bereits im Gerät	Reparatur durch Servicefirma
13.04.99	Fund eines Prüfstrahlers (Co-60 0,18 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
15.04.99	Fund von acht Ringen von Armaturen mit Leuchtfarbe (Ra-226 ca. 2 MBq) in rückgeführter Schrottsendung	Unzulässige Entsorgung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung, siehe auch Vorkommnis vom 28.03.1999
15.04. bis 04.05.1999	Feststellung von Kontaminationen (67–5 000 Bq) auf Privatkleidung von Fremdpersonal bei Eingangsbzw. Ausgangsmessungen in einem Kernkraftwerk		Gemessene Aktivitäten unterhalb der Freigrenzen der StrlSchV	Klärung der Ursache noch nicht abgeschlossen, Tragen privater Unterwäsche im Kontrollbereich untersagt, anlagenspezifische organisatorische und technische Maßnahmen zur Verhinderung der Weiterverbreitung von Kontaminationen eingeleitet
19.04.99	Fund von zwei Prüfstrahlern (Sr-90/Y-90 je 0,6 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
27.04.99	Fund eines undichten Strahlers (Am-241) bei Aufräumarbeiten im Rahmen der Auflösung eines nuklearmedizinischen Labors	Mangelhafte Bestandskontrolle	Kontamination des Labors, Kontamination von Abfallfässern (50 Bq/cm ²), Inkorporation bei 12 Personen mit Dosen von weniger als 1 mSv bis ca. 30 mSv	Sperrung und Dekontamination des Labors, ordnungsgemäße Entsorgung des Strahlers, Inkorporationsmessungen bei 17 Personen, staatsanwaltschaftliche Ermittlungen
04.05.99	Bestrahlung von Beschäftigten bei zerstörungsfreier Werkstoffprüfung (Ir-192 315 GBq) in 4 bis 6 m Entfernung	Nichtabgrenzung des vorgeschriebenen Kontrollbereiches	Strahlenexposition der Beschäftigten durch Streustrahlung 40–60 µSv/h	Präventive Untersuchung durch Strahlenschutzarzt; Bußgeldverfahren gegen Prüffirma
10.05.99	Funktionsstörung an einem medizinischen Beschleuniger	Defekter Taster und fehlerhafter Schaltkreis im Sicherheitskreis	Fehlbestrahlung von 4 Patienten, keine akuten oder chronisch radiogenen Nebenwirkungen	Reparatur durch Servicefirma, Sachverständigenprüfung; Forderung an Hersteller, den systeminhärenten Fehler zu beseitigen; Information der Länderbehörden
10.05.99	Fund von Prüfstrahlern (Cs-137 1,1 MBq und H-3 4 kBq) in einem zur Verschrottung freigegebenen Flüssigkeitszintillationszähler bei einer Rohstoffverwertungsfirma	Unzulässige Entsorgung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung, organisatorische Maßnahmen bei Verursacher
Mai 1999	Verlust eines Prüfstrahlers (Pu-239 37 kBq)	Unzulässige Entsorgung mit Elektronikschrott	Gefährdungspotential gering	Ordnungswidrigkeitsverfahren
07.06.99	Fund offener radioaktiver Stoffe (C-14-Lösung 4,44 MBq) in einem Labor einer Behörde	Mangelhafte Bestandskontrolle	Gefährdungspotential gering, intakte Verpackung	Ordnungsgemäße Entsorgung, Verbesserung des organisatorischen Strahlenschutzes gefordert
09.06.99	Feststellung von Oberflächenkontaminationen (Cs-137 max. 74 Bq/cm ²) an einem aus dem Ausland zurückgesandten leeren Transportbehälter für bestrahlte Brennelemente bei der Eingangskontrolle der Transportfirma	Unbekannt	Gefährdungspotential gering	Stopp des Rücktransports eines zweiten Behälters bis zur Ursachenklärung
09.06.99	Fund von Ra-226 (80 kBq)- bzw. H-3 (60 kBq)-haltigen Bauteilen von Vorschaltgeräten der Straßenlaternen und Zählerschränken für Nachtstromspeicherheizungen im Elektronikschrott bei einer Schrottrecyclingfirma	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Information der Länderbehörden nach Abschluss der Untersuchungen

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
14.06.99	Verlust eines im Schutzgehäuse befindlichen Strahlers (Cs-137 5,5 GBq) einer Dichtemesseinrichtung bei Aufräumarbeiten auf einem stillgelegten Werftgelände	Vermutlich mit Schrott entsorgt	Gefährdungspotential gering, solange der Strahler im Schutzgehäuse verbleibt	Polizeiliches Ermittlungsverfahren
01.07.99	Zerquetschen einer I-131-Ampulle (1GBq) durch die Tresortür bei der Vorbereitung einer Therapie in einer Klinik	Unachtsamkeit	Kontamination von Kleidung und Labor-tisch, Ausscheidungs-analyse und Schilddrü-senmessung ergaben keinen Nachweis einer Inkorporation	Dekontamination, Sonderbe-lehrung für das beruflich strahlenexponierte Personal der Klinik
07.07.99	Überrollen eines bei einem Transport verloren gegangenen Versand-stücks mit 15 Tracerflas-chen (I-125 Gesamtakt. <5,8 MBq) durch nach-folgende Fahrzeuge	Unachtsamkeit, offene Hecktür des Transport-fahrzeuges	Keine, Aktivität blieb in der Verpackung	Ordnungsgemäße Entsor-gung
13.07.99	Fund eines radioaktiv kontaminierten Urinbeu-tels (Tc-99m), eines U-rinbechers und eines I-125-Seeds (ca. 7,7 MBq) im konventionellen Ab-fall in einer Klinik	Ausscheidung eines Pa-tienten nach einer nuk-learmedizinischen Untersuchung und Aus-scheidung eines implan-tierten Seeds außerhalb nuklearmedizinischer Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsor-gung
14.07.99	Einschalten eines medi-zinischen Beschleuni-gers während des Aufenthalts eines Medi-zinphysikers im Be-strahlungsraums einer Arztpraxis	Unachtsamkeit	Sofortiger Abbruch der Bestrahlung durch Bewegungsmelder; Ab-schätzung der Strahlen-exposition des Medizin-physikers max. 14 µSv	Auswertung in Strahlen-schutzbelehrung, Aufnahme weiterer organisatorischer Maßnahmen in Strahlen-schutzanweisung für das technische Personal
15.07.99	Fund von zwei Visier-einrichtungen mit Ra-226 (0,4 µSv/h) bei Ab-rissarbeiten in einem ehemaligen Panzerwerk und nachfolgender Fund weiterer 31 Visierein-richtungen und deren Teile (max. 35,4 µSv/h)	Unterlassene Entsor-gung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsor-gung
20.07.99	Fund von kontaminiertem Klinikmüll (I-131, Containeroberfläche max. 7,3 µSv/h) in einem Müllfahrzeug in einer Müllverbren-nungsanlage	Unzulässige Entsor-gung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsor-gung, behördliche Maßnah-men gegen Verursacher

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
22.07.99	Fund von Gegenständen mit Strahlenzeichen (Co-60 0,5–100 Bq) auf ehemaligem Flughafengelände	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
23.07.99	Fund von aktivierten Teilen eines medizinischen Linearbeschleunigers (Co-60 2,2 MBq) im Schrott	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung der radioaktiven Teile; künftig Kontrolle vor Abbau
28.07.99	Unkontrollierte Freisetzung von radioaktivem Kohlendioxid bei der Autoklavierung von C-14-markierten Rückständen (einige 10 Bq) in einem Isotopenlabor	Fehlbedienung des Autoklaven	Geringfügige Inkorporation eines Mitarbeiters, abgeschätzte Strahlenexposition kleiner als 1 µSv	Auswertung des Vorfalls mit allen Mitarbeitern des Isotopenlabors
28.07.99	Fund von zwanzig Elektronikbauteilen (Ra-226 je 2,22 kBq) im Recyclinghof der Stadtreinigung	Unzulässige Entsorgung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
01.08.– 15.09.1999	Verlust von 9,08 g Uranylacetat in einer stillgelegten Firma	Diebstahl	Gefährdungspotential gering	Sicherstellung durch die Polizei im Abfall einer Apotheke am 23.11.1999
05.08.99	Fund von sieben Ionisationsrauchmeldern (Pu-239 je 3 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
17.08.99	Fund von zwei Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 2,66 MBq) in einem Container bei der Eingangskontrolle eines Altwarenhändlers	Existenz der in einer Zwischendecke eingebauten Rauchmelder war dem derzeitigen Mieter nicht bekannt	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung, behördliches Ermittlungsverfahren
18.08.99	Fund einer radiometrischen Dichtemessanlage (Cs-137 1,1 GBq) und von zwei Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 18,5 kBq) im Brandschutt eines Polymerisationsbetriebes	Brand durch außer Kontrolle geratene Polymerisationsreaktion	Keine, Strahler waren unversehrt	Ordnungsgemäße Entsorgung
18.08.99	Kontamination von Instrumenten und Katheter nach Explantation von in Kunststoffschläuche eingeschweißten Seeds (I-125 ca. 70–220 MBq) in der Strahlentherapie	Undichtheit von Seeds	Keine Kontamination des Patienten und des stereotaktischen Operationsplatzes	Seeds an Hersteller zur Überprüfung gesandt

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
23.08.99	Fund von kontaminiertem Müll in einem Hausmüllcontainer (I-131 Containeroberfläche max. 3,5 µSv/h) bei einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
24.08.99	Fehlbestrahlung durch Verwechslung eines Patienten	Unzureichende Sorgfalt	Nach ärztlicher Auffassung keine Beeinträchtigung der Gesamttherapie durch die Fehlbestrahlung	Technische und organisatorische Verbesserungsmaßnahmen
25.08.99	Fund eines Strahlers in einem Kupferrohr (Ra-226 36 MBq) einer Kupferschrottladung aus dem Ausland bei einer Logistikgesellschaft	Unzulässige Entsorgung	Keine erhöhten Strahlenexpositionen bekannt	Ordnungsgemäße Entsorgung
26.08.99	Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241 2,66 MBq) in einer Sporthalle	Unbeabsichtigte Zerstörung, unzulässige Entsorgung mit dem Hausmüll	Gefährdungspotential gering	Neuinstallation eines Ionisationsrauchmelders mit Schutzgitter
31.08.99	Strahlenexposition von drei Mitarbeitern bei der Entladung eines Telekobaltgerätes	Bewegung des Quellenrades aus der Ruheposition nach erfolgter Trennung des Gerätes vom Netz	Strahlenexposition von drei Mitarbeitern zwischen 7 und 59 µSv	Zusätzliche mechanische Arretierung des Quellenrades vorgeschrieben
02.09.99	Verlust eines Ionisationsrauchmelders aus einem Verwaltungsgebäude (Ra-226 2,22 kBq)	Unzulässige Entsorgung während der Rekonstruktion des Gebäudes	Gefährdungspotential gering	
03.09.99	Störung bei der Strahlerrückführung (Ir-192 260 GBq) an einem Afterloadinggerät in einer Klinik	Lösen des Bronchialkatheters aus Klemmadapter, Blockierung des Rückzugkanals am Geräteausgang durch Federmechanismus der Klemmkupplung	Strahlenexposition des Patienten von 0,5 mSv, ein an der Bergung beteiligter Mitarbeiter erhielt eine Personendosis von 0,4 mSv und eine Teilkörperdosis von 1mSv (Hand)	Aufforderung der Herstellerfirma an Betreiber baugleicher Geräte die alten Klemmadapter durch neue zu ersetzen
06.09.99	Fund einer Füllstandsmesseinrichtung mit Strahler (Co-60 913 MBq) in einer Schrottlieferung aus dem Ausland bei einer Metallrecyclingfirma	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering, da Strahler im Abschirmbehälter	Ordnungsgemäße Entsorgung
08.09.99	Funktionsstörung an den Messgeräten für Alpha- und Betastrahlung (HFK-Monitore, Luftüberwachung, etc.)	Versehentliches Einspeisen von Wasserstoff in die zentrale Gasversorgung anstelle des erforderlichen Messgases	Keine	Zukünftig Verwendung von Messgasflaschen, die sich in der Form deutlich von Wasserstoffflaschen unterscheiden

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
23.09.99	Fund einer Kupferplatte mit radioaktiven Plättchen (Ra-226 52 MBq) in einer Metallschrottlieferung aus dem Ausland bei einer Logistikgesellschaft	Unzulässige Entsorgung	Keine erhöhten Strahlenexpositionen bekannt	Ordnungsgemäße Entsorgung
28.09.99	Verlust von zwei Schulquellen (Ra-226 11 kBq, Po-210 37 kBq)	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	
08.10.99	Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241 37 kBq) bei einem Stadtwerk	Unzulässige Entsorgung des bei Umbauarbeiten beschädigten Rauchmelders mit anderen Reststoffen	Gefährdungspotential gering	
11.10.99	Fund von 7,5 kg thoriumhaltigen Chemikalien (ca. 60 MBq) in einem wegen Verstößen gegen das Ordnungsrecht versiegelten Chemikalienlager	Unzulässige Lagerung	Gefährdungspotential gering	Sicherstellung
11.10.99	Fund einer Bohrlochsonde mit Strahler (Cs-137 2,77 GBq) in einer zurückgesandten Metallschrottlieferung bei einer Logistikgesellschaft	Unzulässige Entsorgung	Keine erhöhten Strahlenexpositionen bekannt; Strahler im Abschirmbehälter vorgefunden	Ordnungsgemäße Entsorgung
20.10.99	Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241 34 GBq) bei Umbaumaßnahmen in einem Stadtwerk	Ungenügende Kontrolle bei Umbauarbeiten	Gefährdungspotential gering	Nachforschung ergebnislos
20.10.99	Fund von 16 000 gefüllten 20 ml-Fläschchen (H-3 ca. 1,6 MBq bzw. C-14 160 kBq) in der Garage eines verstorbenen Laborleiters	Unzulässige Lagerung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
23.10.99	Feststellung eines entleerten Strahlers (Kr-85 74 MBq) in einem Aerosol-Neutralisator in einer Universität	Undichtheit des Strahlers	Keine, da undichter Strahler in einem ständig betriebenen Abzug eingebaut war	Überprüfung der Strahler in kurzen Zeitabständen
25.10.99	Fund einer Flächenmassesseinrichtung mit Strahler (Kr-85 ca. 0,9 MBq) bei Sanierungsarbeiten auf einem ehemaligen Fabrikgelände	Unterlassene Entsorgung durch früheren Eigentümer	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
28.10.99	Fund von 2 Flaschen mit radioaktiven Stoffen (U-234 6,2 und 5,3 kBq/g; U-235 0,34 und 0,21kBq/g; U-238 6,2 und 5,3 kBq/g) auf einem Trödelmarkt	Ungenehmigter Umgang	Gefährdungspotential gering	Sicherstellung der radioaktiven Stoffe
28.10.99	Fund radioaktiver Abfälle (Re-186 1,7 MBq) aus einer nuklearmedizinischen Praxis auf einem Hausmüllfahrzeug	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung, behördliche Maßnahmen gegen Verursacher
10.11.99	Fund radioaktiv kontaminierten Klinikabfalls (Re-186 1µSv/h) in einem Müllcontainer in einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage
15.11.99	Fund einer Radium-Kompresse (Ra-226, Th-232 2,2 MBq) in einem Müllcontainer in einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
19.11.99	Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241 29,6 kBq) bei Baumaßnahmen in einem Betrieb	Unzulässige Entsorgung mit Bauschutt	Gefährdungspotential gering	
26.11.99	Personen- und Raumluftkontamination (Pu-241, Am-241 max. 27 kBq) bei Dekontaminationsarbeiten in einem Labor einer Forschungseinrichtung	Beschädigung eines Handschuhs bei mechanischen Zerlegearbeiten in einem Handschuhkasten, Eindringen von kontaminierter Reinigungsflüssigkeit im Bereich des Armes	Inkorporation bei 3 Personen, Personendosen 0,2; 0,6 bzw. 4,2 mSv und Teilkörperdosen (Knochenoberfläche) 2,5; 11,3 bzw. 78 mSv	Sperrung des Labors, zukünftig Verwendung eines zweiten Handschuhs, Tragen von Schutzmaske und Errichtung eines absaugbaren Zeltes während Dekontaminationsmaßnahmen im Handschuhkasten
01.12.99	Aufenthalt einer Auszubildenden im Labyrinth des Bestrahlungsraumes beim Einschalten eines medizinischen Beschleunigers	Unachtsamkeit des Bedienpersonals	Strahlenexposition kleiner als 10 µSv	Zusätzliche Belehrung des Personals und Konsequenzen für Erstbelehrung von Auszubildenden
01.12.99	Fund eines Gaschromatographen mit eingebautem Ni-63-Elektroneneinfangdetektor (74 MBq) im zur Entsorgung vorgesehenen Elektronikschrott einer Fachhochschule	Unzulässige Entsorgung	Keine Kontaminationen feststellbar	Rückgabe des Elektroneneinfangdetektors an Lieferfirma

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Maßnahmen/Bemerkungen
08.12.99	Fund von drei Säcken Klinikmüll mit je 200 Glasampullen zu 25 ml (C-14-Lösung insgesamt 98 MBq) in einer Müllverbrennungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung, aufsichtliche Maßnahmen
09.12.99	Fund von 5 Strahlern (2 x Pm-147 je 14,8 MBq, 3 x Tl-204 je 1,85 MBq) und einer mit Blei umwickelten 100 ml Flasche mit Th-232 (max. 3 µSv/h an der Öffnung) auf einer Hausmülldeponie	Unzulässige Entsorgung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung
13.12.99	Fund kontaminierter Krankenhausabfälle (I-131, Containeroberfläche 1,8 µSv/h) in einem Presscontainer bei einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Abklingen auf dem Gelände des Krankenhauses
14.12.99	Fund kontaminierter Krankenhausabfälle (I-131, am Fahrzeug 1,5 µSv/h) in einem Müllfahrzeug bei einer Müllverwertungsanlage	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Abklingen auf dem Gelände der Müllverwertungsanlage
14.12.99	Verlust eines Messgerätes mit Strahler (Ba-133 1,75 MBq) bei einem Grenzzollamt	Messgerät im untersuchten Fahrzeug liegengelassen	Gefährdungspotential gering	Gerät wurde bei ausländischer Zollkontrolle des Fahrzeuges sichergestellt
22.12.99	Fund eines Prüfstrahlers (Cs-137 0,6 MBq) durch den Nachfolger einer Institution	Unterlassene Entsorgung	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

Abbildung IV.1

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1999
Aerosole und Jod-131**

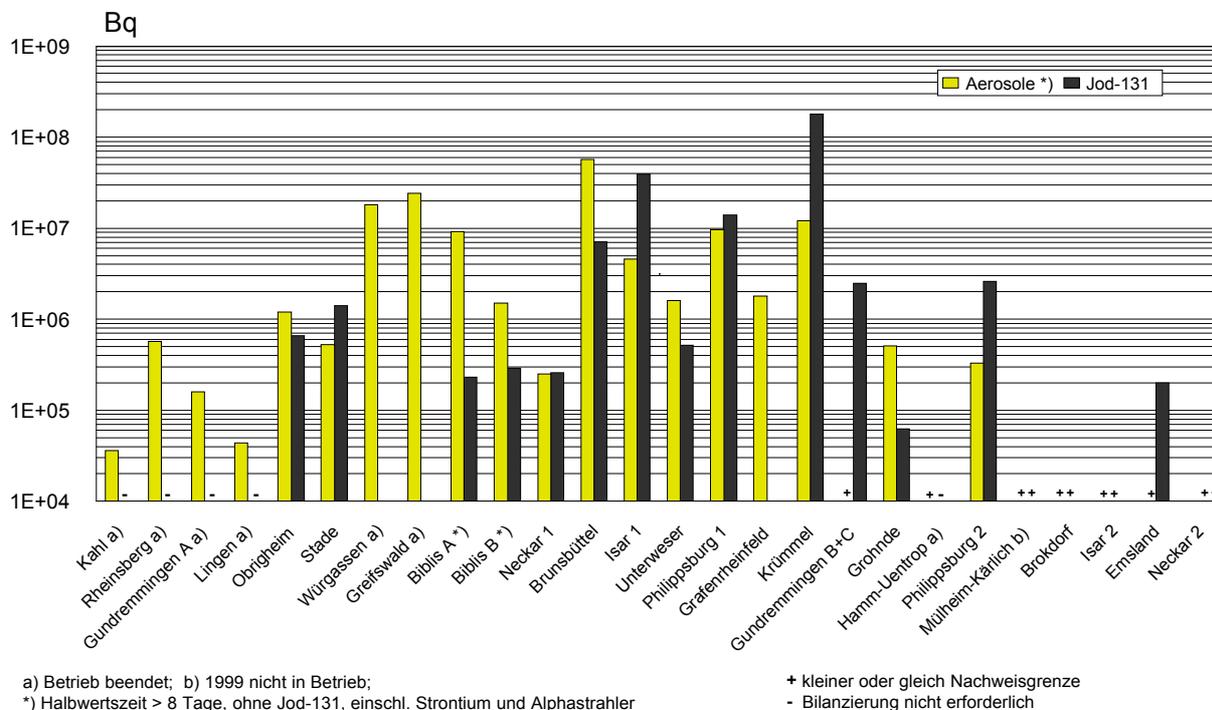


Abbildung IV.2

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1999
¹⁴CO₂, Tritium und Edelgase**

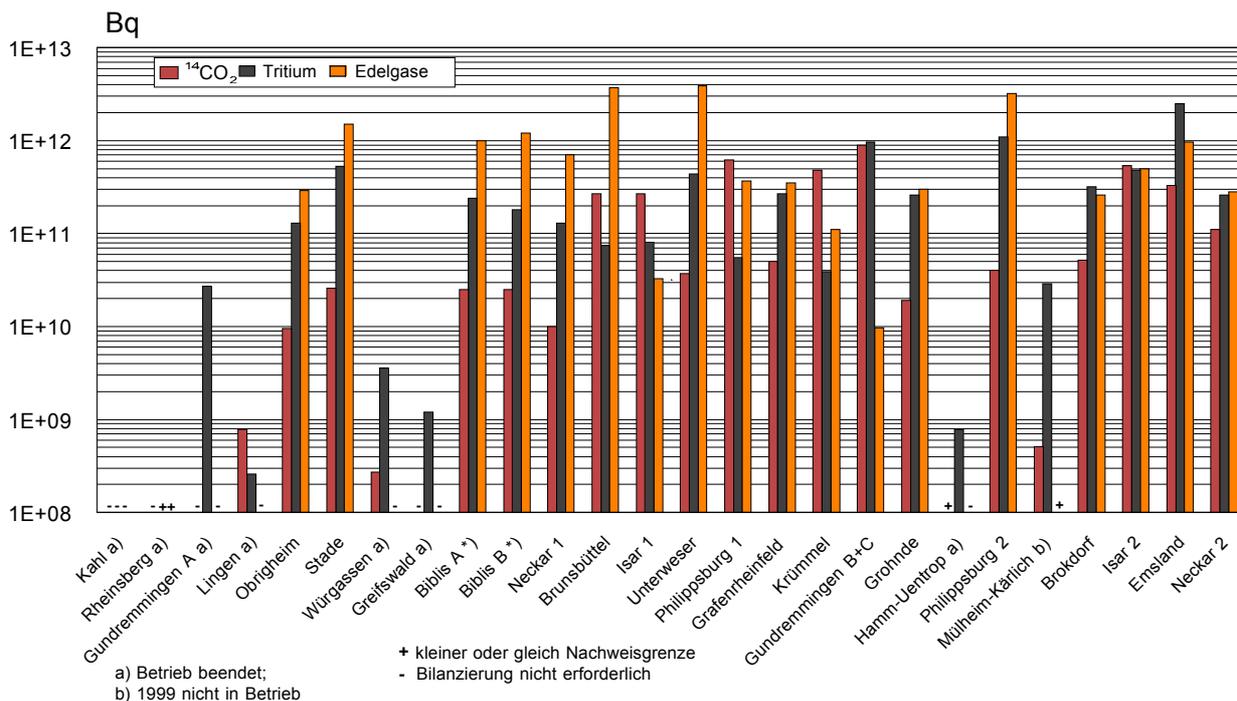


Abbildung IV.3

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken im Jahr 1999
Aerosole und Jod-131**

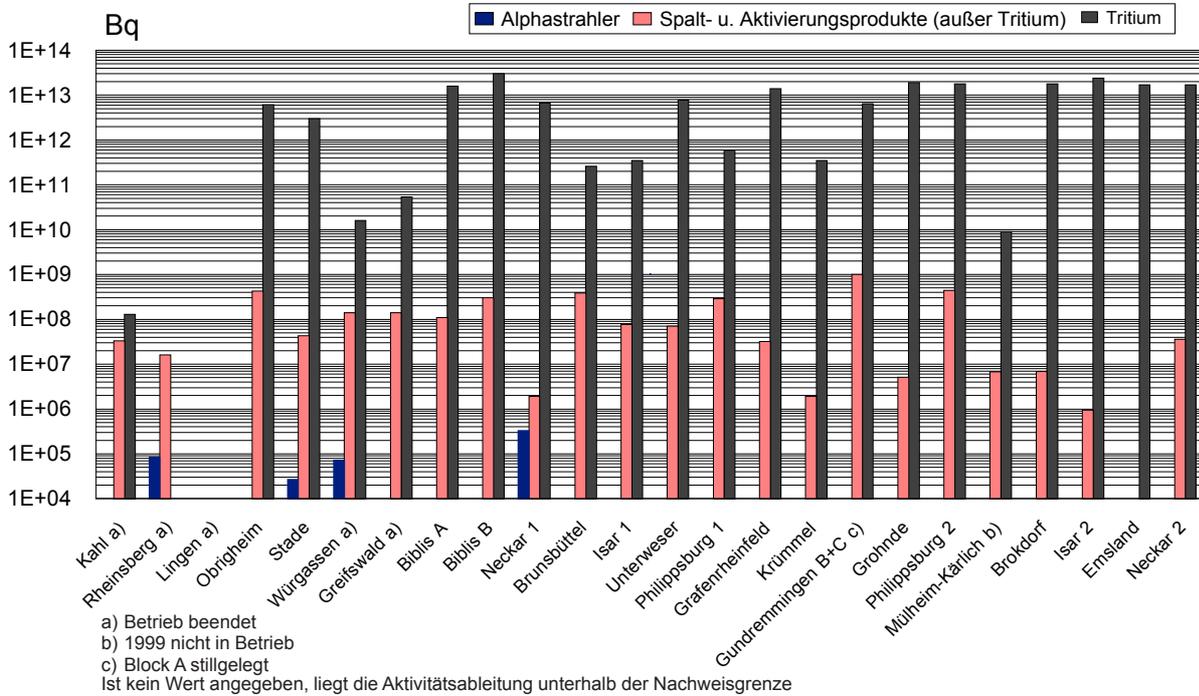


Abbildung IV.4

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken im Jahr 1999
¹⁴CO₂, Tritium und Edelgase**

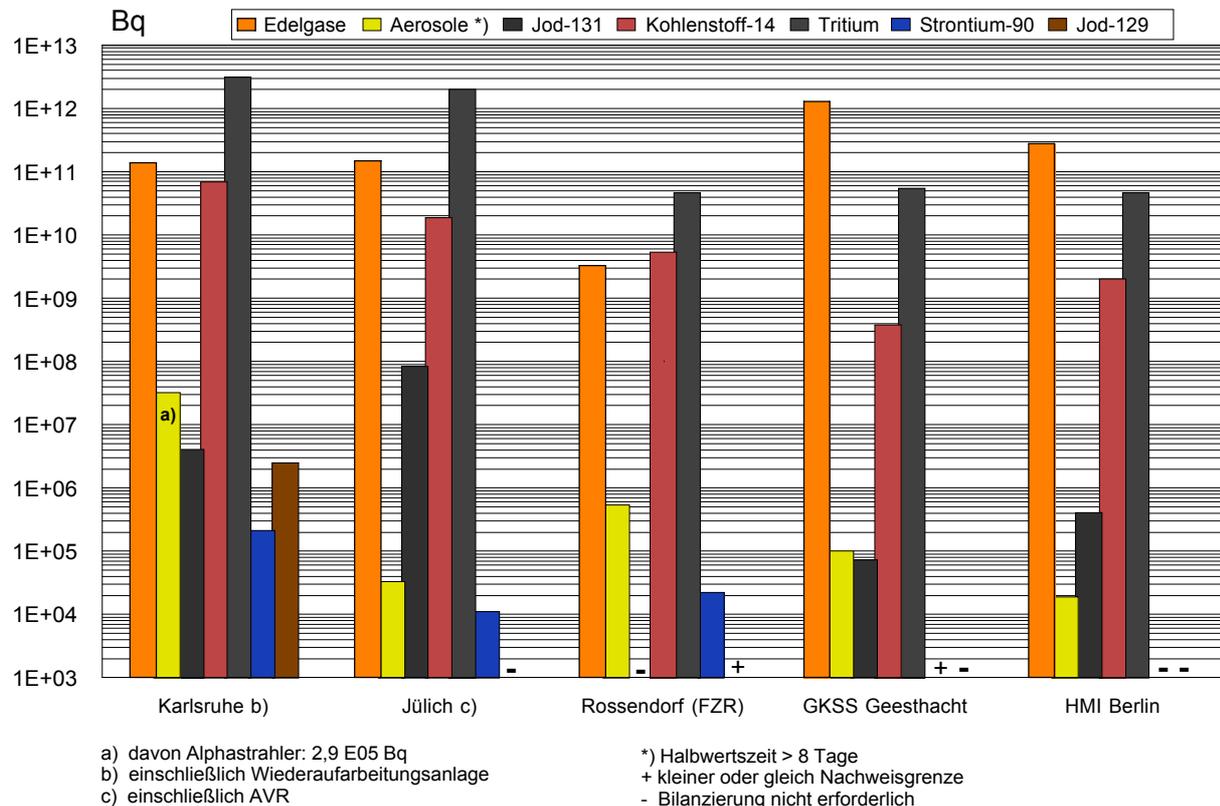
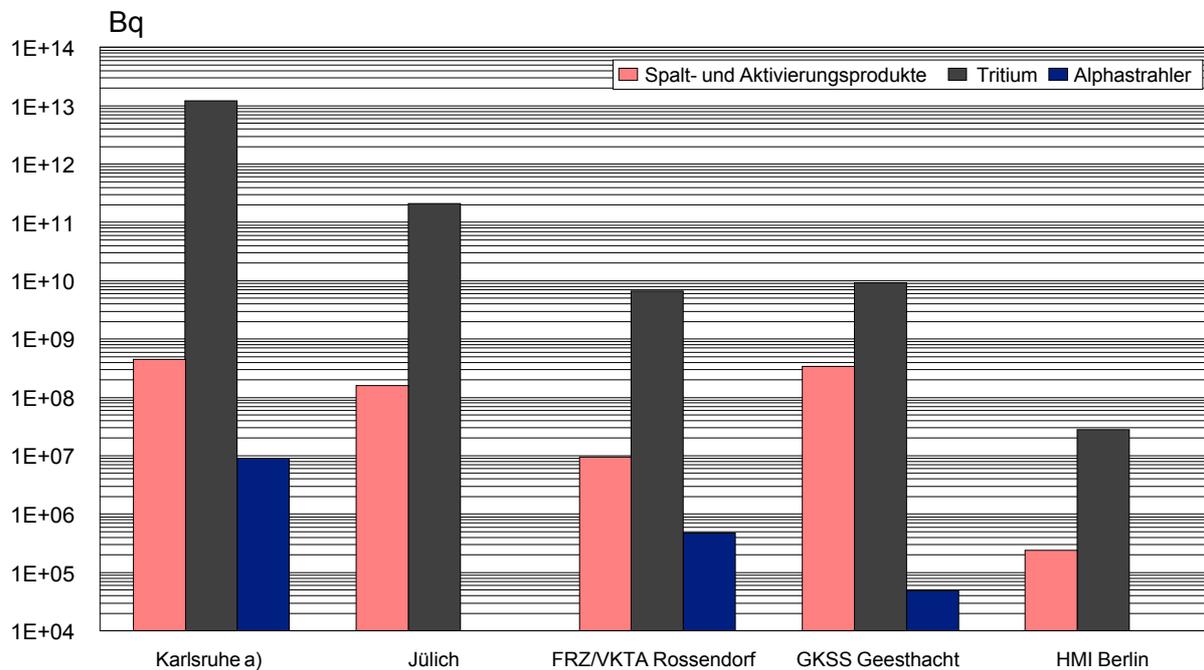


Abbildung IV.5

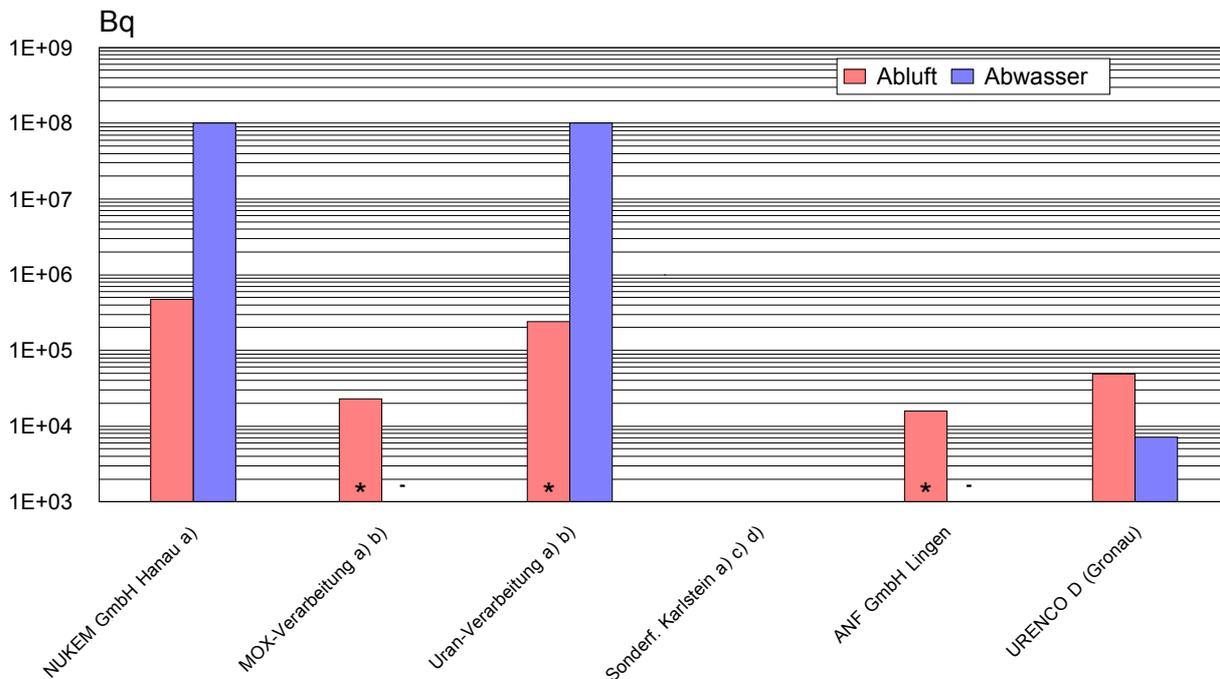
Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Forschungszentren im Jahr 1999



a) einschließlich Wiederaufbereitungsanlage
Ist kein Zahlenwert angegeben, liegt die Aktivitätsabgabe unterhalb der Nachweisgrenze

Abbildung IV.6

Ableitung radioaktiver Stoffe (Alphaaktivität) aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben im Jahr 1999

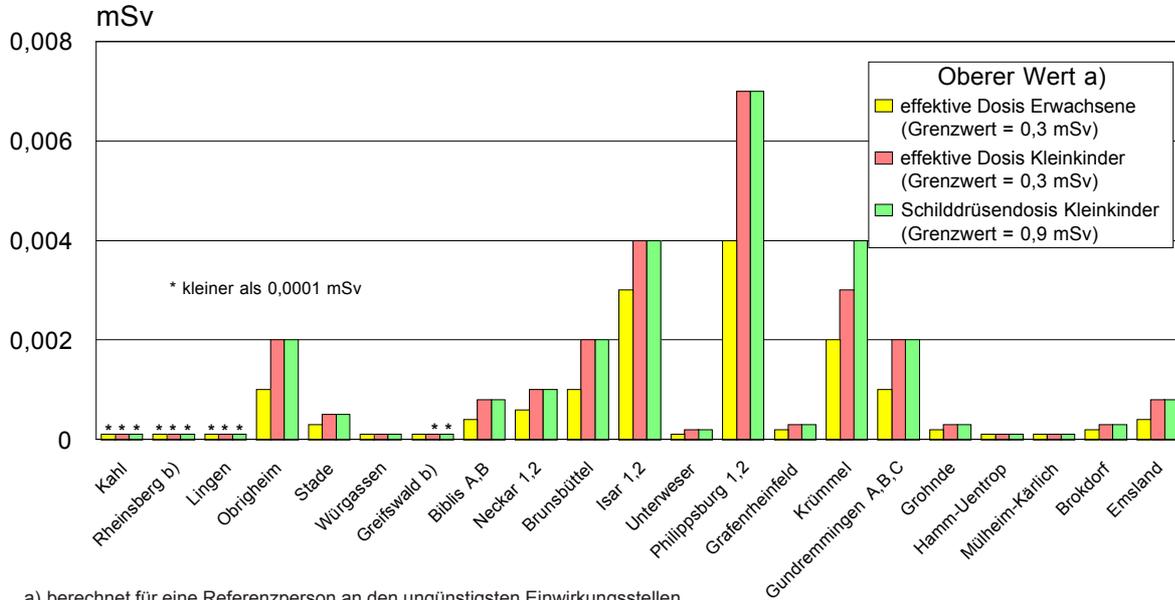


a) Brennelementproduktion eingestellt
b) SIEMENS AG, Brennelementwerk Hanau
c) SIEMENS AG
d) Nach Freimessung Betrieb der Lüftung eingestellt;
im März 1999 aus dem Atomgesetz entlassen

* kleiner als angegebener Wert
- unterhalb der Nachweisgrenze

Abbildung IV.7

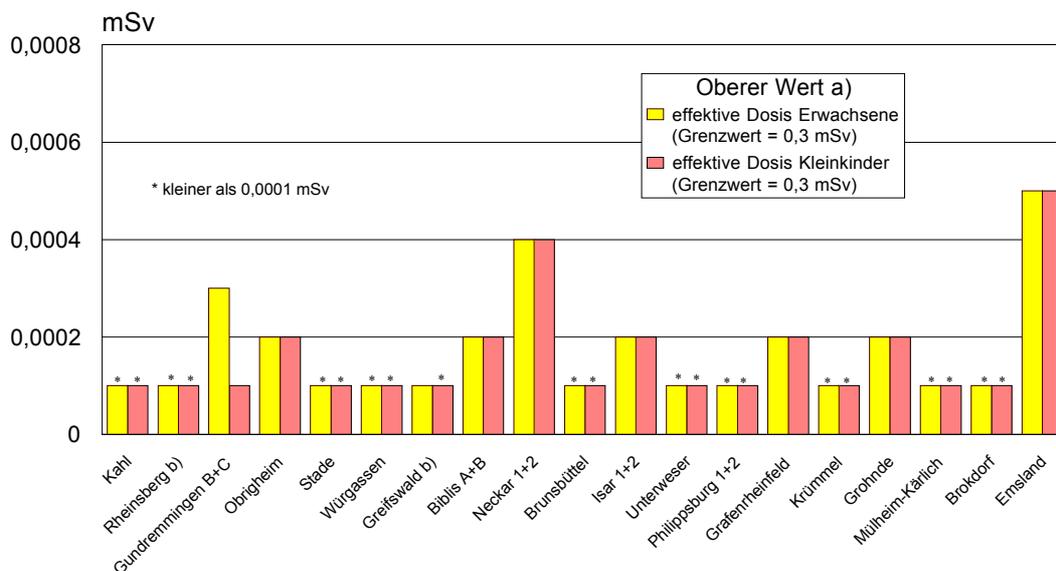
Strahlenexposition im Jahr 1999 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft



- 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 nicht vorliegen.

Abbildung IV.8

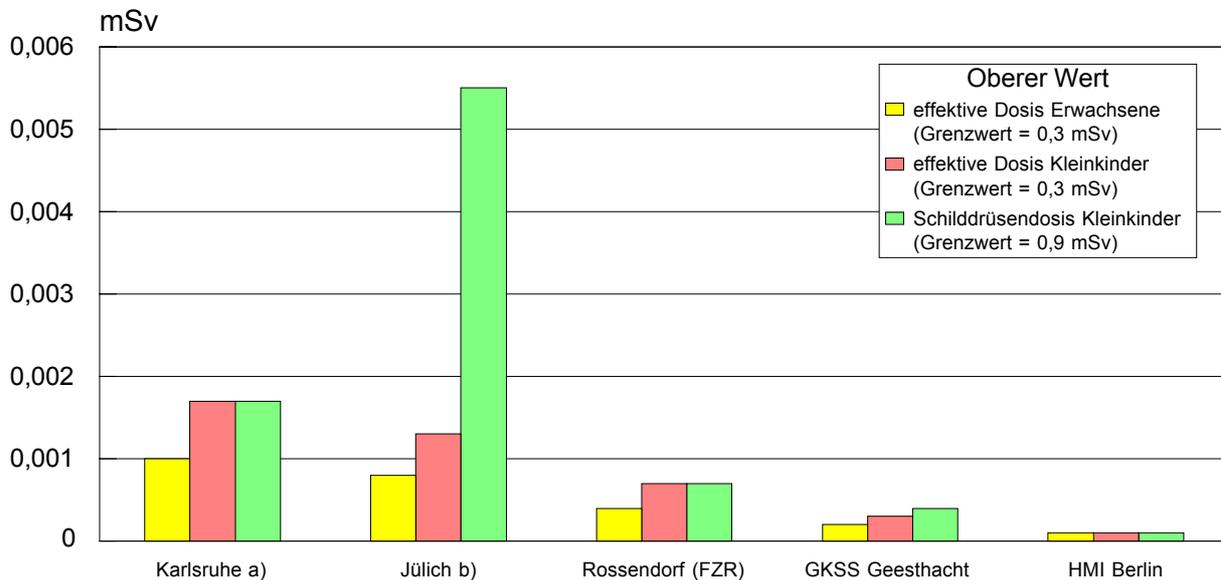
Strahlenexposition im Jahr 1999 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser



- a) berechnet für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen
- b) Die Strahlenexposition 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 dem Abwasser aus den Jahren vor 1990 nicht vorliegen.

Abbildung IV.9

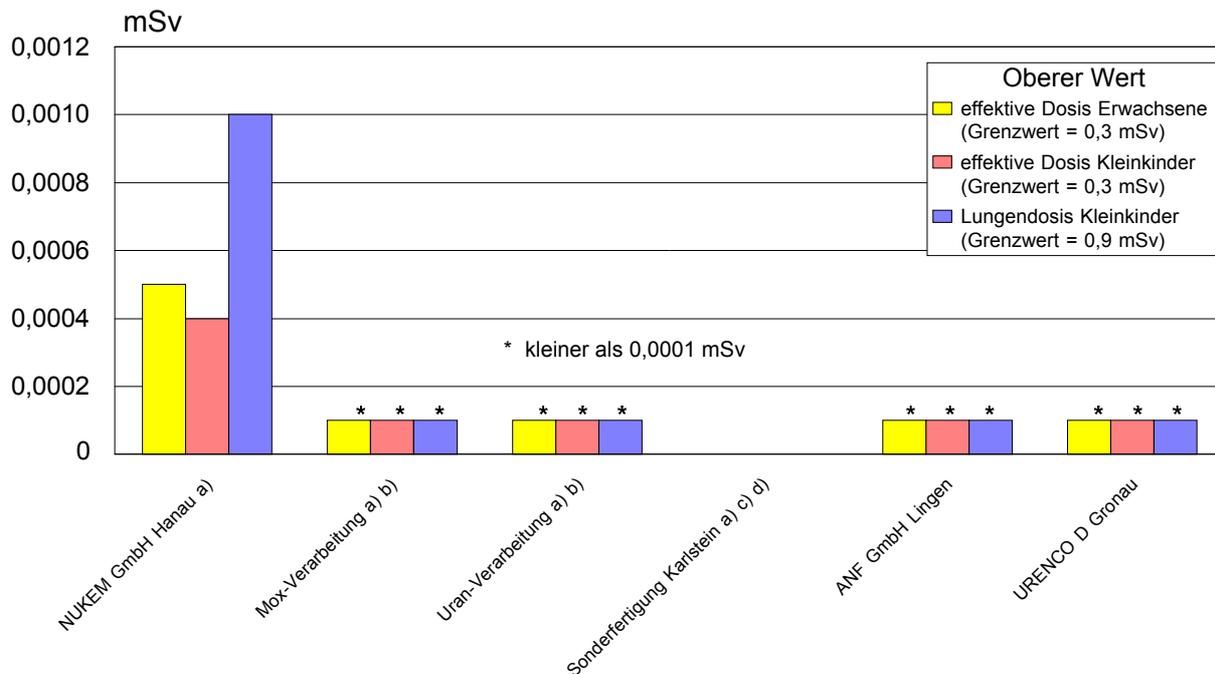
Strahlenexposition im Jahr 1999 in der Umgebung von Forschungszentren durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft*)



*) Entnommen aus den Jahresberichten 1999 sowie nach Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf, Geesthacht und HMI-Berlin
 a) einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage
 b) einschließlich Versuchsreaktor AVR

Abbildung IV.10

Strahlenexposition im Jahr 1999 in der Umgebung von kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft



a) Brennelementproduktion eingestellt
 b) SIEMENS AG, Brennelementwerk Hanau
 c) SIEMENS AG

d) Nach Freimessung Betrieb der Lüftung eingestellt;
 im März 1999 aus dem Atomgesetz entlassen

Abbildung IV.11

Gerundete Mittelwerte der effektiven Dosis bei häufigen Röntgenuntersuchungen aus Messungen an Patienten

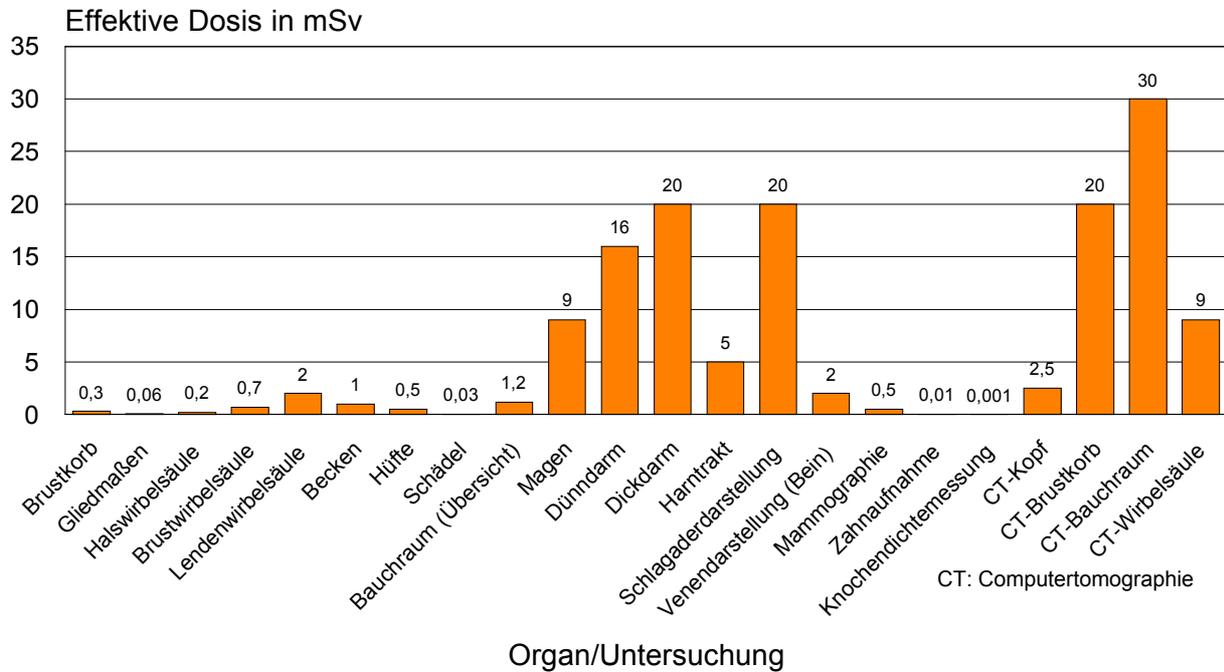


Abbildung IV.12

Prozentuale Verteilung der Röntgenuntersuchungen und ihr Anteil an der kollektiven effektiven Dosis in Deutschland 1994

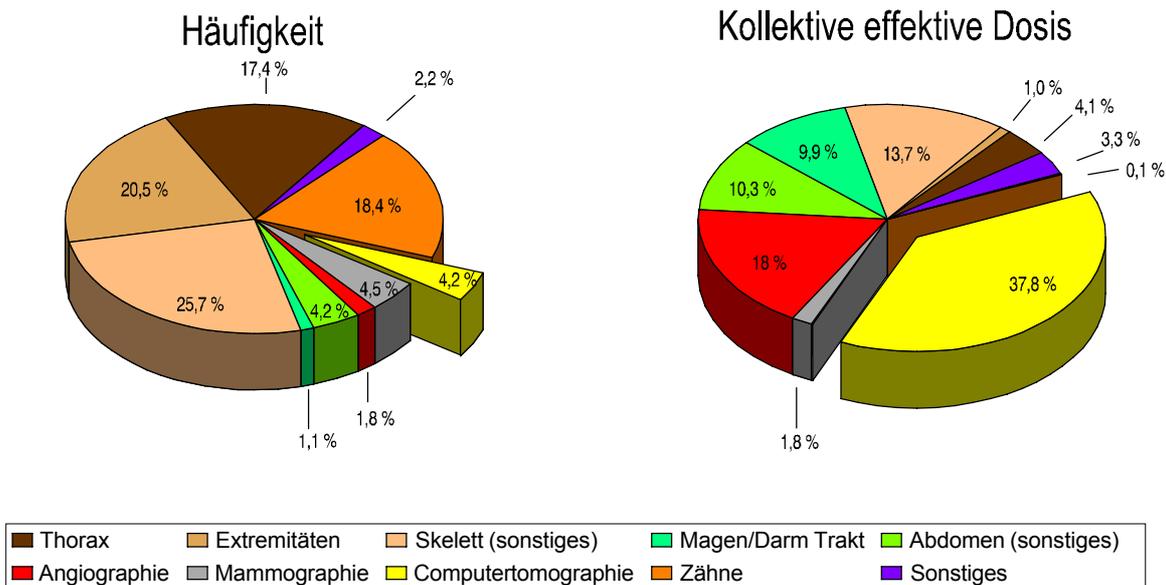
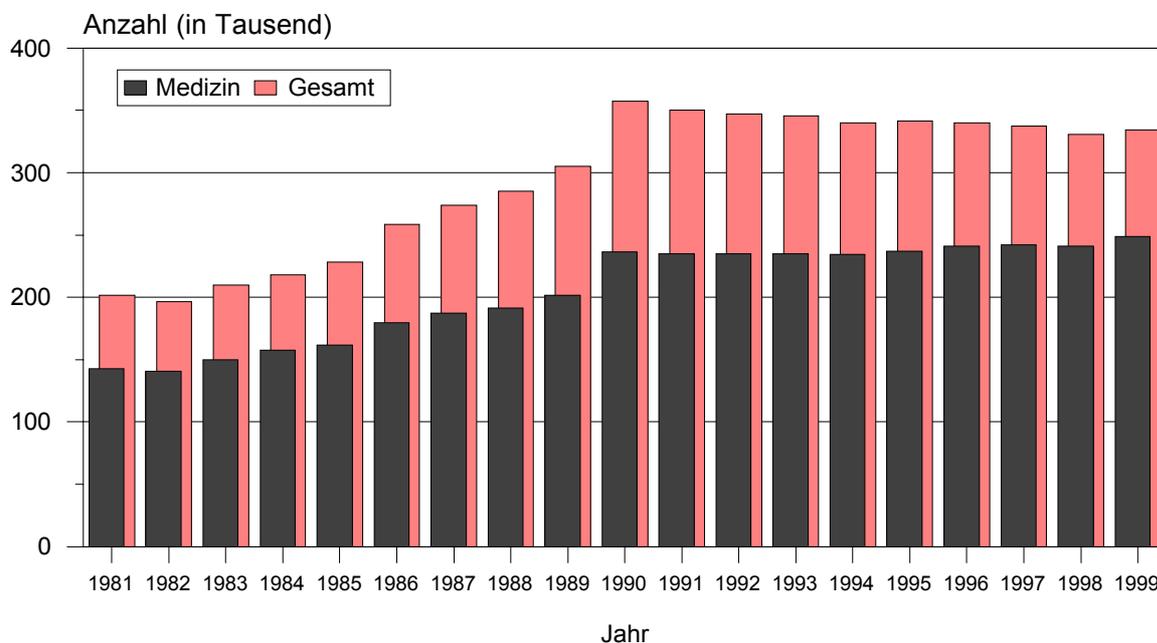


Abbildung IV.13

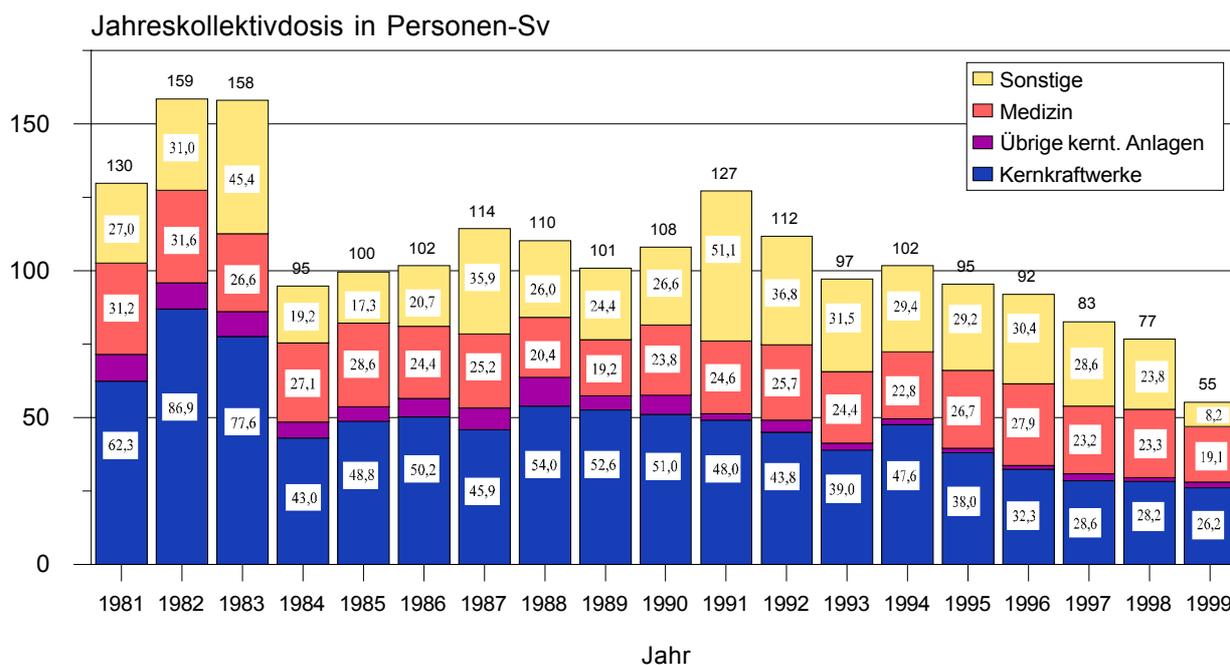
**Mit Personendosimetern überwachte Personen insgesamt und in der Medizin
(ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer)**



Stand: 1.7.00

Abbildung IV.14

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



Stand: 1.7.00

Abbildung IV.15

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

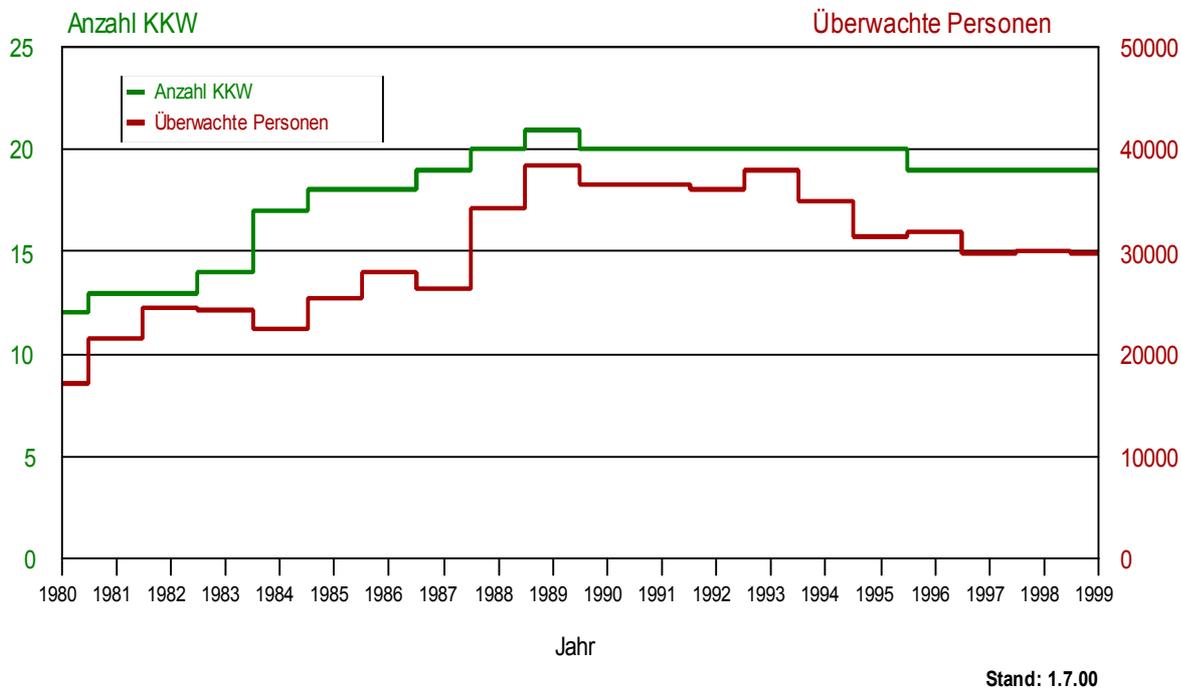
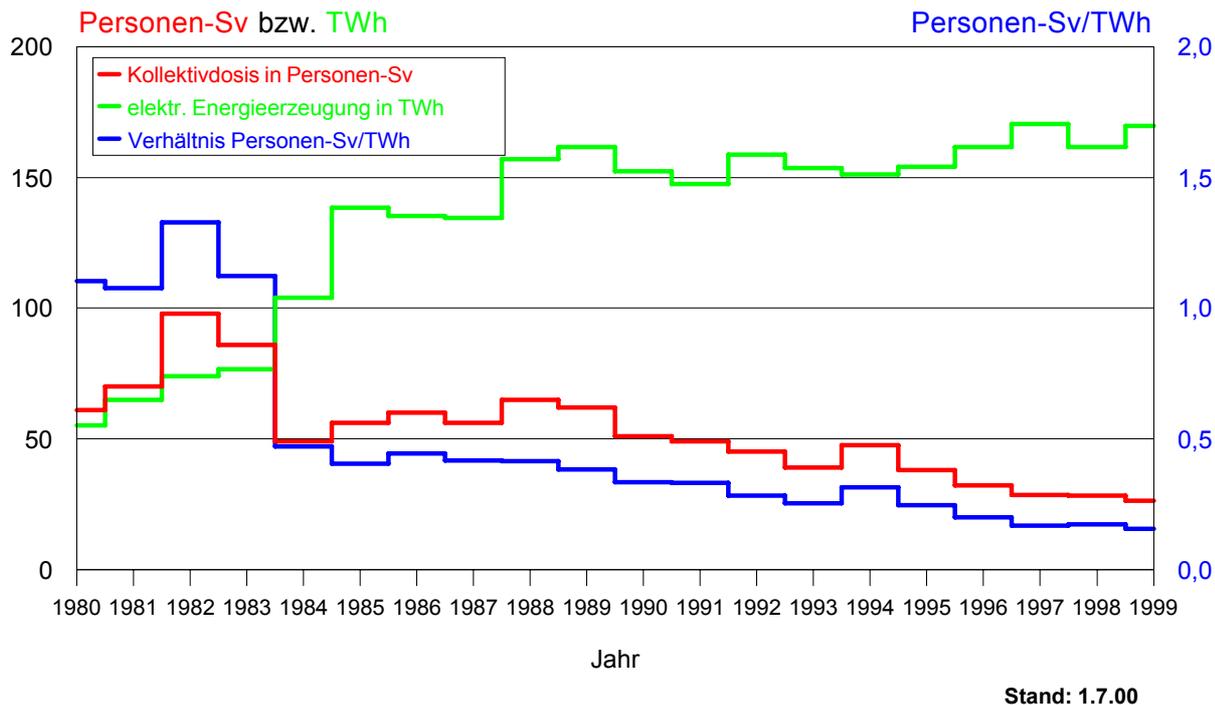


Abbildung IV.16

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken



V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

Die mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung durch den Reaktorunfall von Tschernobyl wurde 1999 fast ausschließlich durch die Bodenstrahlung des im Jahr 1986 deponierten Radiocäsium verursacht, andere Radionuklide spielen keine Rolle mehr. Dabei verursachte Cäsium-137 mehr als 95 % dieser Bodenstrahlung, da aufgrund seiner physikalischen Halbwertszeit von 30 Jahren noch 74 % der 1986 deponierten Aktivität vorliegt. Die Aktivität von Cäsium-134 hingegen ist auf weniger als 2 % des Ausgangswertes zurückgegangen. Bei ausschließlicher Berücksichtigung des physikalischen Zerfalls nahm die äußere Strahlenexposition gegenüber dem Vorjahr um ca. 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 0,015 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 zur Zeit des Durchzugs der radioaktiven Wolke, die zu einer erhöhten Ablagerung des Radiocäsium 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. 0,2 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 Nahrungsmitteln 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 bedingen können. Ein Verzehr von z. B. 200 g Maronenröhrlingen mit einer spezifischen Cäsium-137-Aktivität von 3 500 Bq/kg Frischmasse führt zu einer effektiven Dosis von 0,01 mSv.

Anhang

A. 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 Betaeilchen sowie die Photonen der Gammastrahlung. Durch Photoeffekt, Compton-effekt und Paarbildung erzeugen Photonen im bestrahlten Material energiereiche Elektronen und Positronen. Beim Durchgang der elektrisch geladenen Teilchen (Alpha- und Betaeilchen, 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 Dosis Einheit 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 Dosis Einheit benutzt; 1 Gy ist gleich 100 rd. Zur quantitativen Dosisangabe bei strahlenbiologischen Dosiswirkungbeziehungen 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.

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

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 Betastrahlung 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 Alphastrahlung bereits außerhalb der Reichweite der Alphateilchen. Bei Betastrahlung liegt die Eindringtiefe im Gewebe im Bereich von einigen Millimetern, so dass 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 Dosisermittlung 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 verschiedene 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 voraus-sagbaren Häufigkeit beobachtet. Als „Risiko“ wird im Strahlenschutz die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer stochastischen Strahlenwirkung bei der Einzelperson bezeichnet; den Quotienten Risiko/Äquivalentdosis nennt man „Risikokoeffizient“.

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).

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 überwiegendem Maße 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 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 nicht-exponierten 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 (5-10 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 Untersuchungen 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, so dass 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 überwiegender 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 Dosiskonvention 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 sogenannten 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 µSv/a) von Bedeutung sind, 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 Risikokoeffizienten.

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 Risikokoeffizienten 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 Krebstodesrate, die im Bereich von einem bis einigen Promille der „spontanen“ Leukämie- und Krebstodesrate unserer Bevölkerung liegt. Die Exposition der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen der Bundesrepublik Deutschland liegt beim bestimmungsgemäßen Betrieb einschließlich von Auslegungstörfällen 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 Krebstodesfälle werden mit Hilfe 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 sogenannte effektive Dosis eingeführt 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.

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

Abbildung A-1

Schematische Darstellung der Dosiswirkungsbeziehungen für stochastische und deterministische Effekte

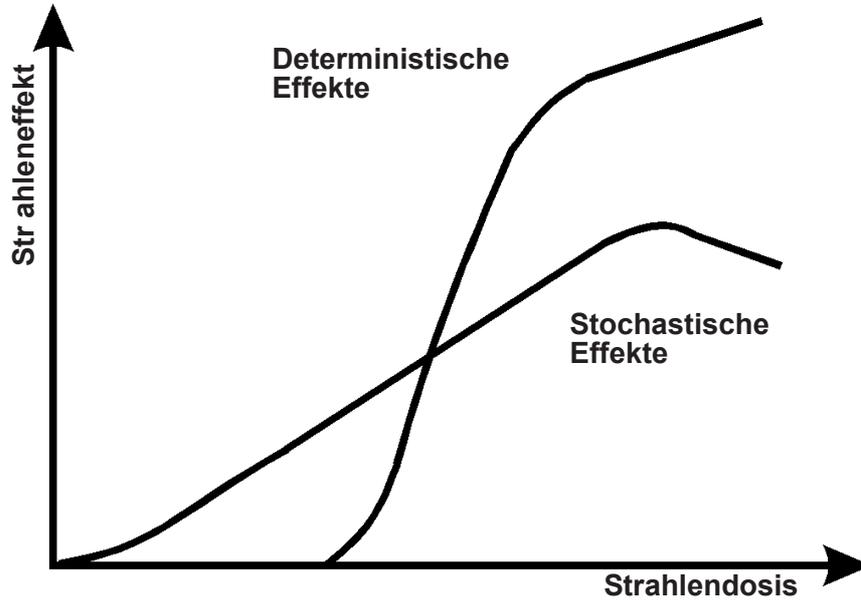
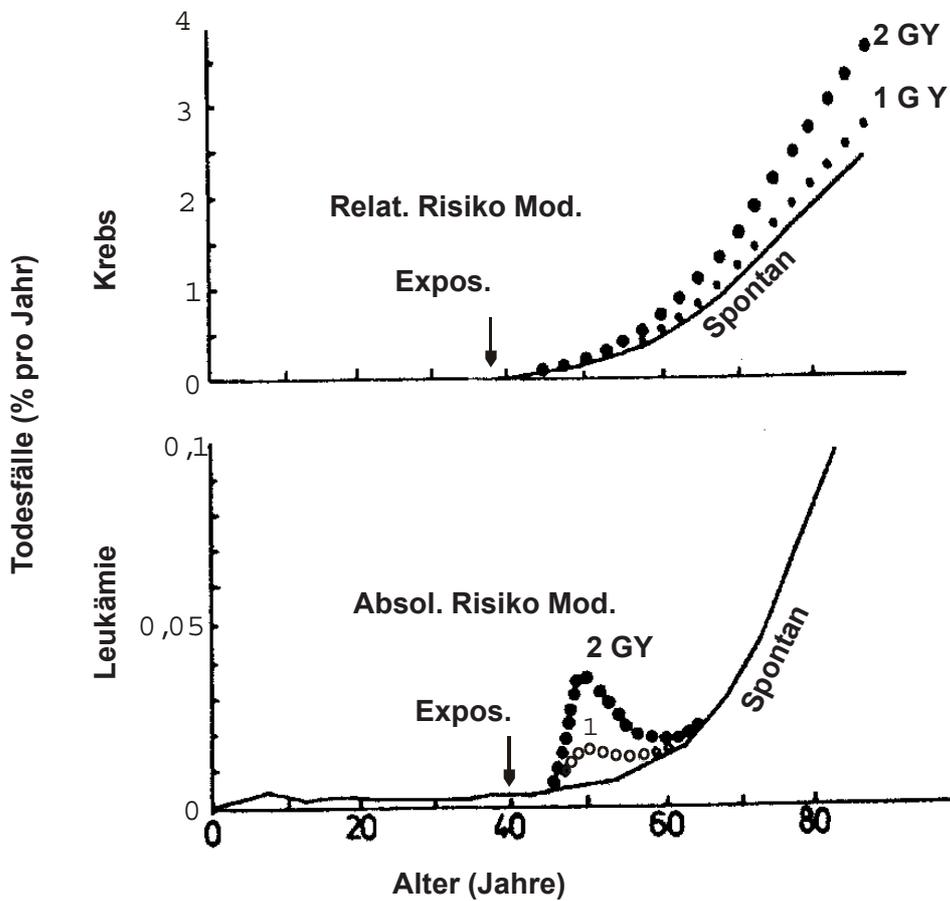


Abbildung A-2

Schematische Darstellung der Mortalität durch Krebs und Leukämie



B. Erläuterung der benutzten Fachausdrücke

Aerosol	Gase mit festen oder flüssigen Schwebeteilchen	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
Aktivität	Anzahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne	Energiedosis	Quotient aus der Energie, die durch ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird, und der Masse in diesem Volumenelement
Alphastrahler	Radionuklide, die Alphateilchen (Heliumatomkerne) aussenden	Fall-out	Aus der Atmosphäre auf die Erde in Form kleinster Teilchen abgelagertes radioaktives Material, das zum Beispiel bei Kernwaffenversuchen entstanden ist
anthropogen	durch den Menschen beeinflusst, verursacht	Gammastrahlung	Energiereiche elektromagnetische Strahlung, die bei der radioaktiven Umwandlung von Atomkernen oder bei Kernreaktionen auftreten kann
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	Gamma-submersion	Strahlenexposition durch Gammastrahlung von radioaktiven Aerosolen und Gasen in der Atmosphäre
Becquerel	SI-Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel (Bq) liegt vor, wenn 1 Atomkern je Sekunde zerfällt. 1 Becquerel (Bq) = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Curie	Ganzkörperdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel als Folge einer als homogen angesehenen Bestrahlung des ganzen Körpers
Betastrahlung	Teilchenstrahlung, die aus beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Elektronen besteht	Gray	SI-Einheit der Energiedosis. 1 Gray (Gy) = 100 Rad
Betasubmersion	Strahlenexposition durch Betastrahlung von radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre	Ingestion	Allgemein: Nahrungsaufnahme Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Nahrung
Computertomographie	Röntgenuntersuchung mit relativ hoher Strahlenexposition aber sehr hoher Aussagekraft durch Darstellung als überlagerungsfreies Querschnittsbild	Inhalation	Allgemein: Einatmung von Gasen Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Atemluft
Dekontamination	Beseitigung oder Verminderung von radioaktiven Verunreinigungen	Inkorporation	Allgemein: Aufnahme in den Körper Speziell: Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper
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)	Interventionelle Radiologie	Therapeutischer Eingriff am Kranken, ohne eine Körperhöhle zu eröffnen, wobei das Behandlungsinstrument unter Durchleuchtungskontrolle über ein Blutgefäß oder einen anderen Zugang eingeführt wird.
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.	Ionisierende Strahlen	Elektromagnetische- oder Teilchenstrahlen, welche die Bildung von Ionen bewirken können (z. B. Alphastrahlen, Betastrahlen, Gammastrahlen, Röntgenstrahlen)
Dosis	Siehe Energiedosis und Äquivalentdosis		

Isotop	Atomart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl	Radionuklide	Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen
Kontamination	Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen	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. Dezember 1985 (BGBl. I S. 2272) geregelt
Kosmische Strahlung	Sehr energiereiche Strahlung aus dem Weltraum	Sievert	SI-Einheit der Äquivalentdosis und der effektiven Dosis. 1 Sievert (Sv) = 100 Rem, 1 Sievert = 1 000 Millisievert = 1 000 000 Mikrosievert
Nuklearmedizin	Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken	Stochastisch	Zufallsbedingt; stochastische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens mit der Dosis variiert, nicht jedoch deren Schwere (siehe auch deterministisch)
Nuklid	Durch Protonenzahl (Ordnungszahl) und Massenzahl charakterisierte Atomart	Strahlenbelastung	Siehe Strahlenexposition
Organdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über ein Organ	Strahlenexposition	Einwirkung ionisierender Strahlen auf den menschlichen Körper oder seine Teile
Ortsdosis	Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort	Terrestrische Strahlung	Strahlung der natürlich radioaktiven Stoffe, die überall auf der Erde vorhanden sind
Ortsdosisleistung	In einem kurzen Zeitintervall erzeugte Ortsdosis, geteilt durch die Länge des Zeitintervalls	Tritium	Radioaktives Isotop des Wasserstoffs, das Betastrahlung sehr niedriger Energie aussendet
Radioaktive Stoffe	Stoffe, die Radionuklide enthalten		
Radioaktivität	Eigenschaft bestimmter chemischer Elemente bzw. Nuklide, ohne äußere Einwirkung Teilchen- oder Gammastrahlung aus dem Atomkern auszusenden		
Radiojod	Radioaktive Jodisotope		

