

Unterrichtung

durch die Bundesregierung

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1998

Inhalt

| | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I. Auftrag und Zusammenfassung | 3 |
| 1. Auftrag | 3 |
| 2. Zusammenfassung | 3 |
| II. Natürliche Strahlenexposition | 4 |
| III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition | 6 |
| 1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten | 6 |
| 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 | 7 |
| IV. Zivilisatorische Strahlenexposition | 14 |
| 1. Kerntechnische Anlagen | 14 |
| 1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen | 14 |
| 1.2 Jahresableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen | 14 |
| 1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen | 14 |
| 2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin | 16 |
| 3. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt | 17 |
| 3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen | 17 |
| 3.2 Störstrahler | 17 |

| | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4. Berufliche Tätigkeit..... | 17 |
| 4.1 Personendosisüberwachung..... | 17 |
| 4.2 Inkorporationsüberwachung..... | 17 |
| 4.3 Berufliche Strahlenexposition durch Radonfolgeprodukte in den neuen Bundesländern..... | 17 |
| 4.4 Strahlenexposition des Flugpersonals..... | 18 |
| 5. Besondere Vorkommnisse..... | 18 |
| 6. Fall-out von Kernwaffenversuchen..... | 18 |
| V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl..... | 45 |
| Anhang | |
| A. Strahlendosis und Strahlenwirkung..... | 46 |
| 1. Strahlendosis und ihre Einheiten..... | 46 |
| 2. Äußere und innere Bestrahlung..... | 47 |
| 3. Stochastische und deterministische Strahlenwirkung..... | 48 |
| 4. Genetisch vererbare Defekte..... | 48 |
| 5. Induktion von Leukämie und Krebs..... | 49 |
| 6. Risikoabschätzung..... | 50 |
| 7. Effektive Dosis..... | 51 |
| B. Erläuterung der benutzten Fachausdrücke..... | 52 |

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 1998 vorgelegt. Er umfasst die wichtigsten Informationen und Änderungen im Bereich der Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung gegenüber den Vorjahren. Umfassenderes 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. Darüberliegende 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 des betroffenen Personenkreises betrug im Jahr 1998 2,04 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 1,5 mSv pro Jahr abgeschätzt werden. Die Beiträge der anderen Strahlenquellen sind sehr gering.

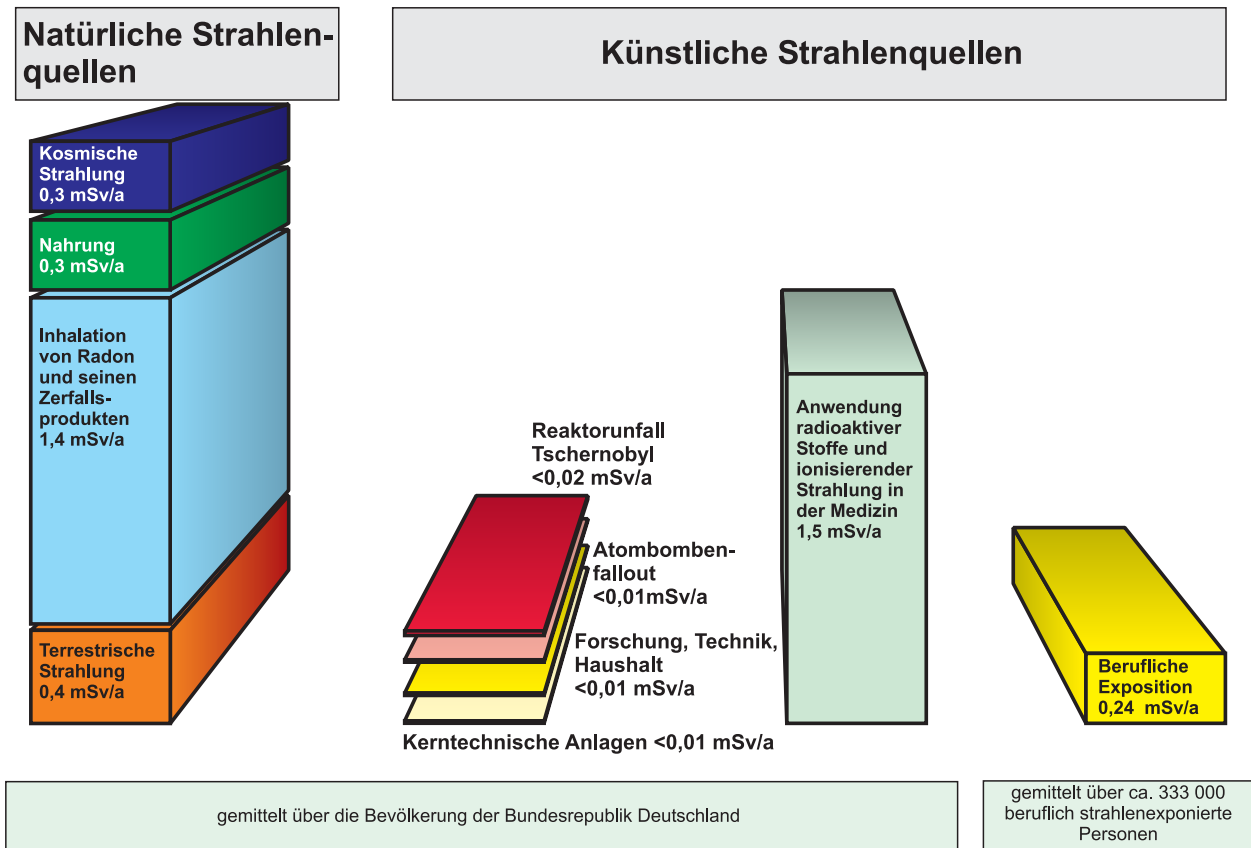
Einzelresultate für das gesamte Bundesgebiet im Jahr 1998 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 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. 1,6 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 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 1998 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 1998 ca. 330 000. Die mittlere Jahresdosis beläuft sich bei dieser Bevölkerungsgruppe auf 0,24 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 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 1998 weniger als 0,01 mSv. Seit 1981 wurden keine Kernwaffenversuche in der Atmosphäre durchgeführt.

Abbildung I.1

Mittlere effektive Jahresdosis durch ionisierende Strahlung im Jahr 1998: ca. 4 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.

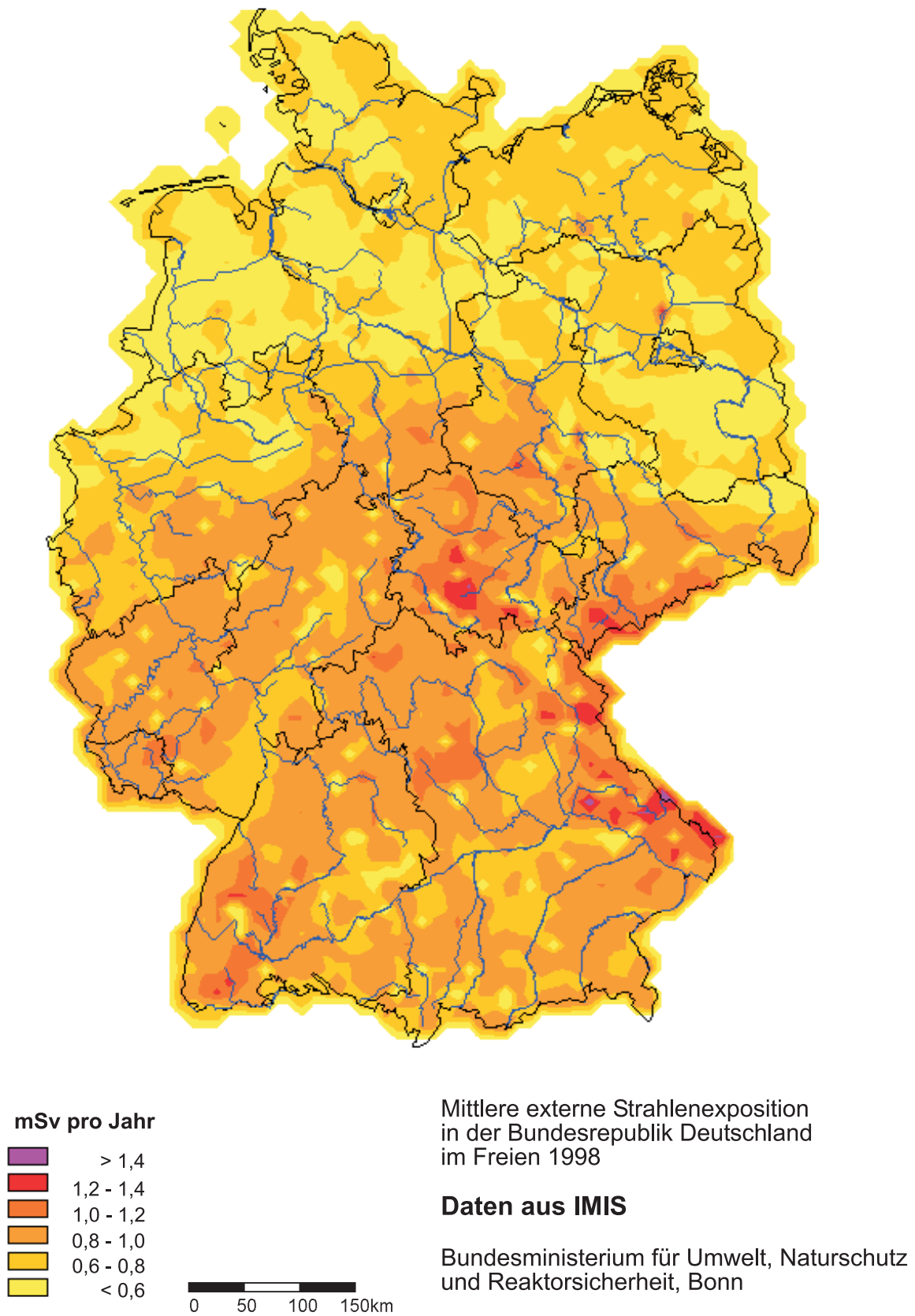
Die natürliche Strahlenexposition setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, wobei zwischen der äußeren Exposition durch Höhen- und Bodenstrahlung (kosmische und terrestrische Komponente, siehe Anhang Abschnitt B) und der internen Strahlenexposition durch Inkorporation radioaktiver Stoffe über Inhalation 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 1998.

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 kos-

Abbildung II.1



mischen 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 Gebäu-

den 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. Allein 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.

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 kiesel-säurereiche Magmageseine, 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 als 200 Bq/kg gemessen. Der Beitrag dieser Baustoffe zur Radonkonzentration in Gebäuden beträgt meist deutlich weniger als 100 Bq/m³, im Durchschnitt weniger als 30 Bq/m³.

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 Radonpotential 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 Radonpotential schrittweise im Einzelnen festzulegen. Abbildung III.1, Seite 11 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 Radonpotential 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 1998 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 Sanierungstätigkeiten; 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. Unter der Annahme der Nutzung der großen Vorfluter als Trinkwasser ergibt sich theoretisch eine effektive Jahresdosis von 0,001 bis 0,02 mSv pro Jahr.

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 Abwetterschächten, 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 1998 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 die Notwendigkeit von Einzelfallprüfungen zur Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen 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 Unter-

suchungen erfolgten in der 3. Phase des o. g. Projektes. Ziel war die 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. Untersuchungen dieser Art wurden in den vergangenen Jahren in den Gebieten um Dittrichshütte, Aue, Freital, Gottesberg, Johanngeorgenstadt, Annaberg-Buchholz, Mechelgrün-Zobes, Bärenstein und Marienberg (Alt- und Uranerzbergbaugebiete) sowie Hettstedt und Eisleben-Wimmelburg (Abbaugebiet von uranvererztem Kupferschiefer) durchgeführt. Mit den Untersuchungen im Gebiet Oberrothenbach (Uranerzaufbereitung), Zwickau (Abbaugebiet von Steinkohle), Filzteich, Altenberg, Freiberg, Lengenfeld und Gottesberg (Alt- und Uranerzbergbaugebiete) sowie Mansfeld-Leimbach (Abbaugebiet von uranvererztem Kupferschiefer) wurde das Ermittlungsprogramm des Bundes abgeschlossen. 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.

Der Aufbau des Fachinformationssystems zur bergbaubedingten Umweltradioaktivität (FbU) wurde fortgesetzt. 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 im Gange.

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 Magmasteine | 30– 500 | 17– 310 | 380–4 000 |
| 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 | 3–1 200 |
| Lehm, Ton | < 16– 90 | 18– 200 | 300–2 000 |
| Bims, Tuff, Lava | < 20– 200 | 25– 300 | 490–2 000 |
| Finalbaustoffe, Bindemittel | | | |
| Ziegel, Klinker | 10– 200 | 12– 200 | 100–2 000 |
| Beton | 7– 92 | 4– 80 | 50–1 600 |
| 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 | < 20–1 000 | < 20– 30 | < 40–8 000 |
| Rohphosphate | 10–2 000 | < 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 | < 30–5 900 | 27– 100 | 40–1 200 |
| Braunkohlefilteraschen | 4– 200 | 6– 150 | 12– 610 |
| Schlacke | 8–2 100 | 6– 340 | 10–1 000 |
| Hüttenbims | 110– 230 | 24– 62 | 180– 190 |
| Bauxit, Rotschlamm | < 20– 800 | < 50–1 000 | 1–1 000 |

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

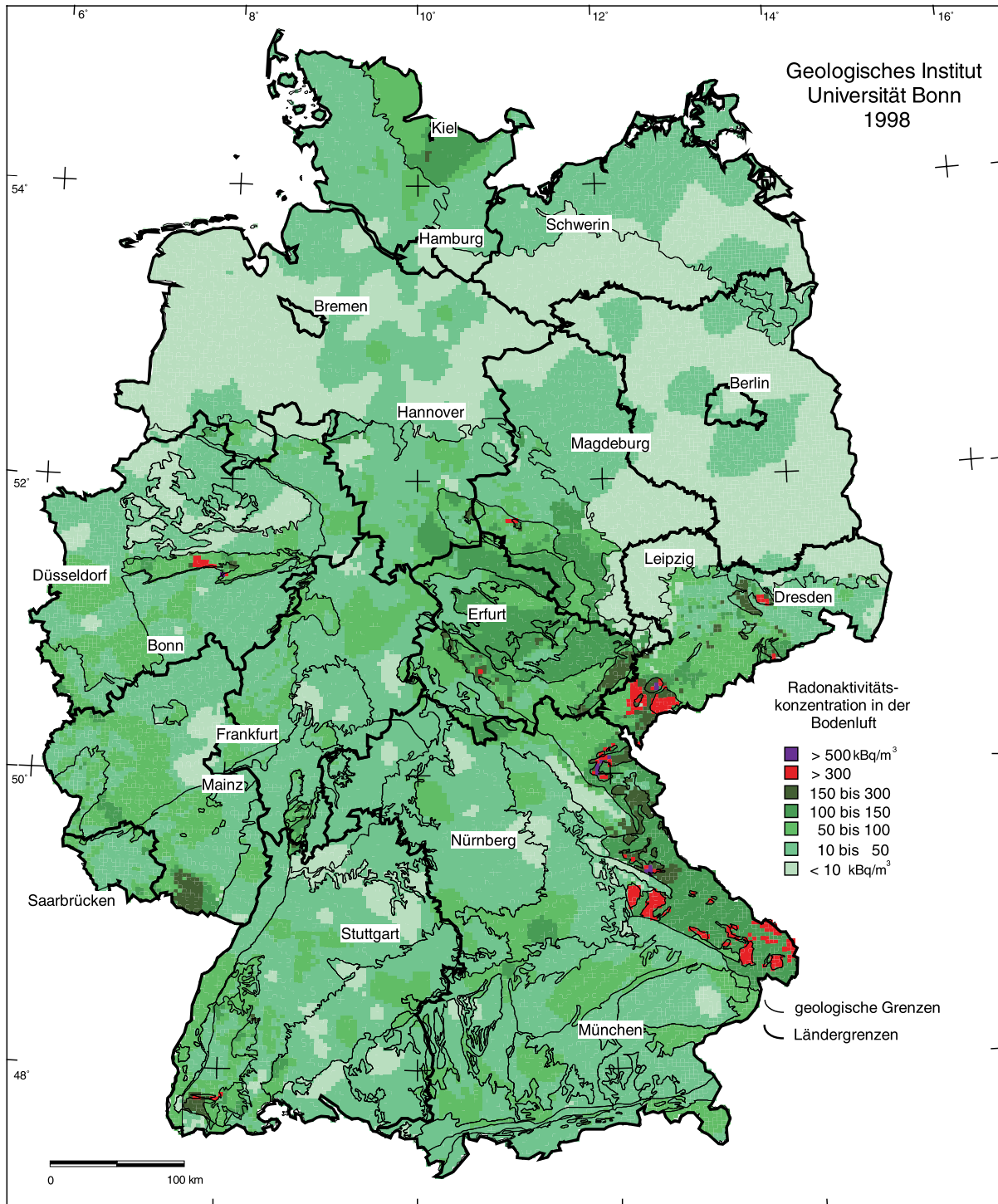


Abbildung III.2

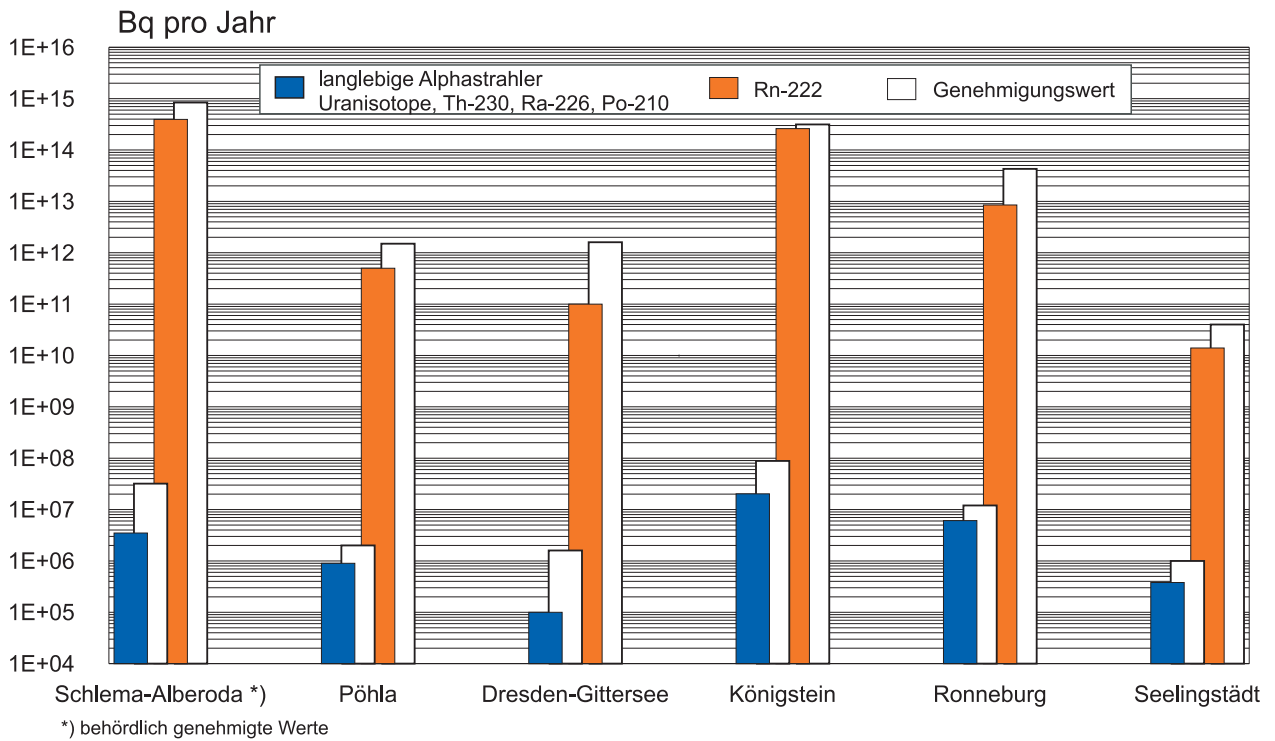
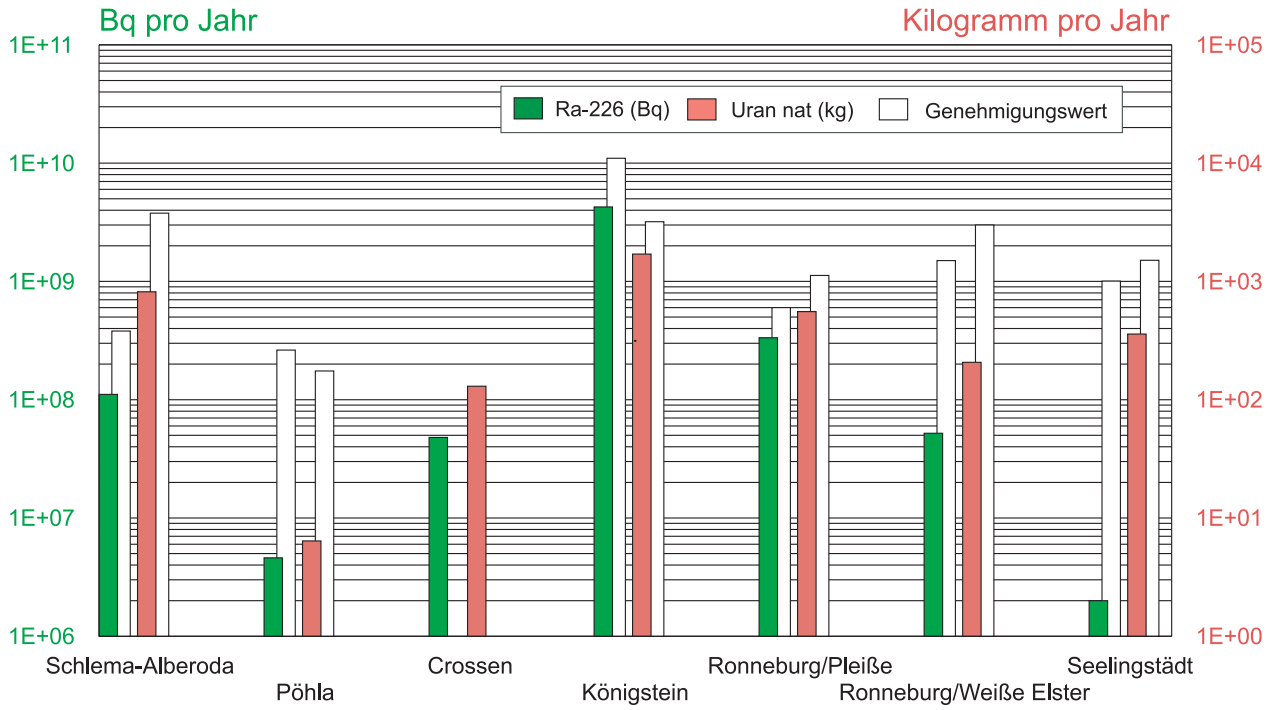
**Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Abwettern bzw. der Abluft
in die Atmosphäre 1998**

Abbildung III.3

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Schacht- bzw. Abwässern
in die Oberflächengewässer 1998**



IV. Zivilisatorische Strahlenexposition

1. Kerntechnische Anlagen

1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

Aus den für das Jahr 1998 ermittelten Werten für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen geht hervor, dass die von den zuständigen Behörden festgelegten Höchstwerte für die jährlichen Emissionen in allen Fällen eingehalten wurden. Die tatsächlichen jährlichen Ableitungen liegen im Allgemeinen deutlich unter den Genehmigungswerten, wie beispielsweise für Kernkraftwerke der Vergleich zwischen den Werten der Abbildungen IV.1 bzw. IV.2 und üblichen Genehmigungswerten von ca. 10^{15} Bq für Edelgase, ca. $3 \cdot 10^{10}$ Bq für Aerosole und ca. 10^{10} Bq für Jod-131 zeigt.

Die für 1998 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 1998 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 1998 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 For-

schungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf, Geesthacht und dem Hahn-Meitner-Institut in Berlin für das Jahr 1998 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 1998 zusammengestellt. Abbildung IV.6 enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 1998 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 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 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 1998 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Abluft enthält Abbildung IV.7. Angegeben ist die effektive Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die Schilddrüsendosis für Kleinkinder über

sämtliche relevanten Expositionspfade: Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammassubmersion), Gammastrahlung am Boden abgelagerter radioaktiver Stoffe, Inhalation und Ingestion. Abbildung IV.7 zeigt als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene 0,004 mSv (rund 1 % des Dosisgrenzwertes nach Strahlenschutzverordnung) 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 1 000 Stunden am Flussufer oder auf Wiesen in Flussnähe. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt 0,0004 mSv (entsprechend rund 0,13 % des Genehmigungswertes) beim Standort der Kernkraftwerke Emsland, Neckar 1 und 2.

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 0,0001 mSv, an der Donau bei 0,0004 mSv. Zu diesen 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 in Berlin. Die Abbildung weist für die effektive Dosis im Jahr 1998 als höchsten Wert 0,0033 mSv (1 % des Grenzwertes) für Erwachsene und 0,0055 mSv (rund 2 % des Grenzwertes) für Kleinkinder beim Forschungszentrum Jülich auf. Der höchste Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 0,0081 mSv (rund 1 % des Grenzwertes) ebenfalls 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 0,020 mSv pro Jahr. Nach Angaben aus den Jahresberichten der Forschungszentren Karlsruhe, Rossendorf und Jülich liegen die oberen Werte für die effektive Dosis für diese For-

schungszentren im Jahr 1998 bei 0,017 mSv, 0,012 mSv bzw. 0,002 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 für Erwachsene und Kleinkinder 0,0003 mSv (0,1 % des Grenzwertes), der höchste Wert der Lungendosis 0,0007 mSv für Kleinkinder (rund 0,1 % des Grenzwertes).

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

Die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser aus dem Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist in Tabelle IV.2 aufgeführt. Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe im Jahr 1998 mit der Abluft ermittelte Wert der effektiven Dosis für den Erwachsenen betrug 0,0003 mSv, für Kleinkinder 0,0005 mSv; dies sind 0,1 % bzw. 0,2 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Die Lungendosis errechnete sich zu 0,0015 mSv für Erwachsene und 0,0030 mSv für Kleinkinder (ca. 0,2 % bzw. 0,3 % des Grenzwertes). Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe im Jahr 1998 mit dem Abwasser ermittelte Wert der effektiven Dosis liegt unterhalb von 0,0001 mSv für Erwachsene und Kleinkinder.

Bei den Kernbrennstoff-Zwischenlagern Ahaus und Gorleben 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 1998 unter Anwendung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung auf Bundesgebiet zu oberen Werten der effektiven Dosis bis zu 0,005 mSv. Für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes über sämtliche relevanten Expositionspfade errechnen sich 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 durchgeführ-

ten Messungen des Radiojodgehaltes von Milchproben aus grenznahen Weidegebieten wurde im 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 ohne weiteres 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 Risiko-

faktoren. Aus einer durch das Bundesamt für Strahlenschutz erhobenen repräsentativen Stichprobe aus Akutkrankenhäusern 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 1,5 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.

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 Hartrakts 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 dosisparender 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 Strahlen-

exposition 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 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen

Bestimmte Industrieerzeugnisse 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-, Dicke- 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 Industrieerzeugnissen und die Röntgenverordnung den Einsatz von Röntengeräten, um – neben den Arbeitnehmern – die Bevölkerung vor unnötiger Strahlenexposition zu schützen. Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung, die aus der Anwendung der entsprechenden radioaktiven Stoffe resultiert, liegt unter 0,01 mSv pro Jahr.

3.2 Störstrahler

Störstrahler sind Geräte oder Einrichtungen, die Röntgenstrahlen erzeugen, ohne dass sie zu diesem Zweck betrieben werden (z. B. Elektronenmikroskope und 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 Personendosismessstellen ausgegeben und ausgewertet werden. Die Zahl der überwachten Personen betrug im Berichtsjahr insgesamt 330 823, davon im Bereich Medizin 241 145. 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 Betastrahlen sind nur in wenigen Fällen von Bedeutung. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,23 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, dass bei dem größten Teil aller Überwachten (86 %) während des ganzen Jahres die untere Messbereichsgrenze des Personendosimeters von 0,2 mSv nicht überschritten wird, was im Bereich Medizin auf 89 %, in den nicht medizinischen Bereichen auf 77 % der Überwachten zutrifft. Bei den verbleibenden Personen ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 1,64 mSv.

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) im Jahr 1998 betrug 77 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 Radon-folgeprodukte in den neuen Bundesländern

In den neuen Bundesländern wird gemäß Einigungsvertrag vom 31. August 1990 nach fortgeltendem Recht der 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. 1998 wurde diese Überwachung bei etwa 2 400 Personen vorgenommen, von denen 80 % Sanierungsarbeiten in den Betrieben der Wismut GmbH ausführten.

Mehr als ein Drittel der Beschäftigten der Wismut GmbH wurde 1998 mit personengebundenen Geräten (am Körper getragene spezielle Messgeräte mit akku-

mulatorgetriebener 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 1998 einschließlich der Exposition durch langlebige Alphastrahler und äußere Bestrahlung ca. 4,8 Personen-Sv. Bei Berechnung der Dosis gemäß ICRP-65 (s. Anhang) würden sich für die Kollektivdosis lediglich 3,2 Personen-Sv ergeben. Im nachfolgenden Text werden die auf dieser Grundlage berechneten Dosisangaben in Klammern gesetzt. 3,5 Personen-Sv (2,5 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 2,04 mSv (1,34 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 3,9 mSv (1,9 mSv), gefolgt von den Beschäftigten in Schauhöhlen und Schaubergwerken mit 3,8 mSv (1,9 mSv), in wissenschaftlichen Einrichtungen und in Radiumbädern mit 3,0 mSv (1,5 mSv), in der Wismut GmbH mit 1,85 mSv (1,32 mSv), in Wasserbetrieben mit 1,76 mSv (0,88 mSv), in Bergsicherungsbetrieben mit 1,28 mSv (0,64 mSv) und in Schachtbaubetrieben mit 0,7 mSv (0,35 mSv). Die insgesamt 44 Beschäftigten (1,9 %) 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 11,7 % zur Kollektivdosis.

Im Jahr 1998 gab es keine Grenzwertüberschreitungen bei den durch Radonzerfallsprodukte beruflich exponierten Überwachten. Die höchste individuelle effektive Dosis betrug 25,8 mSv (12,9 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 1998, 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. Die Übersicht enthält nicht die 1998 bekanntgewordenen Kontaminationen an Transportbehältern für Reaktorbrennelemente; hierzu wurde dem Deutschen Bundestag mit umfangreicherem Datenmaterial im Jahre 1998 gesondert berichtet.

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 1998 führte Indien 5 Atomtests durch (bisher ein Atomtest 1974), im Anschluss daran zündete Pakistan 6 Atomspaltungen (erstmalig). Radionuklide in der Atmosphäre aufgrund dieser Explosionen konnten nicht nachgewiesen werden.

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
(Stand: Dezember 1998)

| 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 1998**

| | Abluft/Bq | Abwasser/Bq |
|-----------------------------------|-----------|-------------|
| Tritium | 2,2 E+10 | 2,3 E+0,5 |
| Kohlenstoff-14 | 1,3 E+09 | – |
| langlebige Aerosole | 1,8 E+06 | – |
| Radonfolgeprodukte | 1,0 E+10 | – |
| Nuklidgemisch außer Tritium | – | 6,7 E+03 |

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**

| Organ/Untersuchung | Anzahl in Tausend | | | | je 1 000 Einwohner |
|---------------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------|-----------------------|
| | 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 1998**

| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 12. 1. 1998 | Aufenthalt eines Mitarbeiters im Bestrahlungsraum einer Klinik beim Einschalten eines medizinischen Beschleunigers für eine Testbestrahlung | Unachtsamkeit | Strahlenexposition des Mitarbeiters ca. 0,1 mSv | Zusätzliche Belehrung |
| 12. 1. 1998 | Störung im Sicherheitskreis eines medizinischen Beschleunigers (Symmetrie Interlock) | Lose Arretierungsbolzen zur Fixierung des Kollimators | Keine; Gerät schaltete bestimmungsgemäß ab | Fehlerbehebung durch Servicefirma |
| 13. 1. 1998 | Fund radioaktiver Stoffe (Ra-Standard 25 MBq, in 6 cm 15µGy/h) in einer Universität bei Aufräumarbeiten | Unzulässige Lagerung | Gefährdungspotential gering; keine Kontamination | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 13. 1. 1998 | Störung bei der Strahlerrückführung (Ir-192; 500 GBq) an einem Afterloadinggerät | Unebenheit im Bereich der Verbindung von Speicherschlauch und Anschlussrohr | Keine | Konstruktive Verbesserung durch den Hersteller |
| 14. 1. 1998 | Fußbodenkontamination (Ac-228 max. 6,6 kBq/m ² , Pb-212 u. Tl-208 max. 1,4 kBq/m ²) bei Löschung eines Filterbrandes in der Gasglühstrumpffertigung in einem Fertigungsraum (Verarbeitung von Thorium) | Brand durch fehlerhafte Installation der Filterkühlung | Keine Gefährdung der Umwelt; keine Inkorporationen | Dekontamination des Fertigungsraumes, technische Änderungen der Filterkühlung |
| 15. 1. 1998 | Fund von 8 Prüfstrahlern (7 Cs-137-Strahler je 74–85 kBq, 1 Sr-90/Y-90-Strahler; 820 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 16. 1. 1998 | Störung der Strahlerrückführung beim Testen eines Afterloadinggerätes | Beschädigter Stecker | Keine; inaktiver Strahler verwendet | Stecker repariert und mit Rammschutz versehen |
| 21. 1. 1998 | Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241; 29,6 kBq) in einer Schule | Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Installation von mechanischen Diebstahlsicherungen |
| 30. 1. 1998 | Aufenthalt eines Handwerkers bei Kalibrierarbeiten im Bestrahlungsraum eines medizinischen Beschleunigers | Unzureichende Kontrolle; unterlassene Belehrung des Handwerkers | Strahlenexposition des Handwerkers ca. 0,13 mSv | Strengere Zutrittsbeschränkungen; Nachrüstung mit einem Quittierschalter |
| 19. 2. 1998 | Verlust von 6 Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 37 kBq) in einem Hotel | Diebstahl | Keine | Ionisationsrauchmelder wieder aufgefunden und ordnungsgemäß entworgt |
| 20. 2. 1998 | Fund eines Prüfstrahlers (Co-60; 180 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 25. 2. 1998 | Fund von 3 Prüfstrahlern (2 Ra-226-Strahler 460 kBq, 1 Sr-90/Y-90-Strahler; 800 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 2. 3. 1998 | Verlust von 19 Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 156 kBq) in einem Firmengebäude | Brand | Keine, spezifische Aktivität des Bauschutts lag unter dem Freigabewert | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 2. 3. 1998 | Fund einer Sonde mit Strahler (Cs-137 ca. 70 MBq, an Sondenoberfläche max. 6,8 mSv/h, an Strahleroberfläche 150 mSv/h) eines Füllstandsmessgerätes in einer Schrottlieferung in einem Stahlwerk | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |

noch Tabelle IV.4

| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5. 3. 1998 | Fund einer Präzisionswaage mit 2 radioaktiven Strahlern (Ra-226 je 74 kBq) im Keller eines Labors | Unzulässige Lagerung | Keine | Sicherstellung, Rücknahme durch Herstellerfirma |
| 10. 3. 1998 | Verlust des Strahlers einer Schulvorrichtung (Ra-226; 48 kBq) | Unbemerktetes Herauslösen des Strahlers aus dem Strahlerhalter | Gefährdungspotential gering | Suche ergebnislos; Überprüfung der Bauart |
| 11. 3. 1998 | Fund von 2 Schulquellen (Cs-137; 101 kBq, Kr-85; 41,5 kBq) in einem Park | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Sicherstellung |
| 12. 3. 1998 | Einschalten eines medizinischen Beschleunigers während des Aufenthalts einer Mitarbeiterin im Bestrahlungsraum | Unzureichende Kontrolle, Unachtsamkeit | Mitarbeiterin betätigte sofort den Notausschalter, ihr Dosimeter zeigte keine Dosis an | Kameraüberwachung verbessert |
| 18. 3. 1998 | Fund eines Strahlers (Cs-137; 222 MBq) aus einer in Deutschland genutzten radiometrischen Messeinrichtung bei einem Schrotthändler im Ausland | Mangelnde Kontrolle und unterlassene Information der die Demontage durchführenden Fremdfirma | Keine, Strahler verblieb in der Abschirmung | Festlegung: Strahler künftig auch unter Isolierungen als radioaktiv kennzeichnen; radiometrische Messeinrichtung in Verfahrensbildern deutlich kennzeichnen; Strahler zwischenzeitlich in Deutschland entsorgt |
| 19. 3. 1998 | Fund von 4 Ionisationsrauchmeldern (2 Stück Pu-239 je 4,2 MBq, 2 Stück Kr-85 je 18,5 MBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 20. 3. 1998 | Feststellung einer Kontamination innerhalb eines Messkopfes (2 Strahler Sr-90/Y-90; 460 und 451 MBq) einer Dichtemesseinrichtung | Undichtheit der Strahlensquellen durch Mikrorisse infolge hoher mechanischer Beanspruchung | Keine; außerhalb des Messkopfes keine Kontamination festgestellt | Organisatorische Maßnahmen (u. a. Kontaminationskontrollen) bis zur Umsetzung konstruktiver Änderungen |
| 23. 3. 1998 | Fund von kontaminiertem Klinikmüll (Re-186 und Sr-89) in einer Müllverbrennungsanlage | Unzulässige Entsorgung | Lokale Kontamination durch Beschädigung der Verpackung; geringfügige Strahlenexpositionen für einige Beschäftigte | Organisatorische Maßnahmen |
| 1. 4. 1998 | Fund eines Metallbehälters mit einem Radium-Trinkbecher (Ra-226; 150 kBq) in einer Müllumladestelle | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 1. 4. 1998 | Verlust von 8 Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 29,6 kBq) in einer Fabrik | Brand | Keine | Ordnungsgemäße Entsorgung des Brandschutts |
| 2. 4. 1998 | Fund von 2 Prüfstrahlern (Sr-90/Y-90 je 1 MBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 2. 4. 1998 | Fund eines mit Strahlenzeichen gekennzeichneten Bleibehälters mit 4 Schulquellen (Po-210, 3 Ra-Quellen max. je 370 kBq) bei einem Abfallentsorger | Unzulässige Entsorgung durch eine Schule | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung; Ermittlungsverfahren |
| 3. 4. 1998 | Fund eines Behältnisses mit radioaktiven Stoffen (Cs-137; 1,9 MBq) bei Aufräumarbeiten in einer Fabrik | Unterlassene Entsorgung durch ehemalige Betriebsinhaber | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 15. 4. 1998 | Verlust eines Kleintransporters, in dem radioaktive Stoffe transportiert wurden | Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Radioaktive Stoffe wurden unversehrt wiedergefunden |
| 16. 4. 1998 | Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90/Y-90; 800 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 27. 4. 1998 | Fund eines Prüfstrahlers (Co-60; 860 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |

noch Tabelle IV.4

| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.–6. 5. 1998 | Feststellung einer Inkorporation (Pu-238/239/240/241, Am-241) bei einem Mitarbeiter durch routinemäßige Ausscheidungsanalyse in einem Forschungslabor | Vermutlich Perforation eines Schutzhandschuhs | Effektive Dosis von 1,6 mSv und Knochenoberflächendosis von 31 mSv | Arbeits- und Sicherheitsanalyse |
| 6. 5. 1998 | Fund von 44 Ionisationsrauchmeldern (42 Stück Kr-85 je 18,5 MBq, 2 Stück Am-241, 560 kBq und 30 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 14. 5. 1998 | Fund von 2 Prüfstrahlern (Sr-90/Y-90 je 800 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 20. 5. 1998 | Fund eines Radium-Emanators (Ra-226, an Behälterwand 10 µSv/h) in einer Schrottladung | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 25. 5. 1998 | Feststellung erhöhter Dosisleistung (6 µSv/h) an einem Fahrzeug beim Transport einer Füllstandsmesseinrichtung (Co-60, 18 MBq) bei einem Zollamt | Unzureichende Transportverpackung | Dosisleistung am Fahrersitz 1,3 µSv/h | Sicherstellung; staatsanwaltliches Ermittlungsverfahren |
| 25. 5. 1998 | Verkehrsunfall bei der Beförderung radioaktiver Präparate (4 x Mo-99/ Tc-99m; 66 GBq, 15 GBq, 2 x 11 GBq; 1 x Tl-201; 1 GBq) für medizinische Zwecke | Fahrfehler | Keine; Verpackungen nicht beschädigt | Kontaminationskontrolle |
| 27. 5. 1998 | Einschalten eines medizinisch genutzten Beschleunigers während des Aufenthalts von 2 Mitarbeitern im Bestrahlungsraum | Unachtsamkeit | Keine Strahlenexposition anhand Dosimeterauswertung | Installation von Bewegungsmeldern im Bestrahlungsraum vorgesehen |
| 27. 5. 1998 | Fund von 500 g Thoriumnitrat mit Beimengungen von Uran in einer Flasche (Th-232; 1,2 kBq/g, U-238; 0,24 kBq) in der Lagerhalle einer Firma | Unzulässige Lagerung | Gefährdungspotential gering | Sicherstellung |
| 3. 6. 1998 | Verlust eines Prüfstrahlers (Cs-137; 3,7 MBq) in einer Arztpraxis | Vermutlich mit Müll abgegeben | Gefährdungspotential gering | Befestigung des Prüfstrahlers mit langem Draht am Lagerbehälter |
| 6. 6. und 8. 6. 1998 | Feststellung der Inkorporation (Pu-238/239/240/241, Am-241) bei einem Mitarbeiter durch routinemäßige Ausscheidungsanalyse in einem Forschungslabor | Defekt an Schutzkleidung, Nichtbeachtung der Strahlenschutzanweisung | Effektive Dosis von 11,4 mSv und Knochenoberflächendosis von 213 mSv | Einstellung der Arbeiten; Arbeits- und Sicherheitsanalyse; Tragen zusätzlicher Handschuhe aus Leder angeordnet; Maßnahmenkatalog für Rückbauarbeiten |
| 6. 6. 1998 | Fund radioaktiver Stoffe (2 360 g metallisches Uran, 200 g Thoriumnitrat, 75 g Uranylacetat, Ra-226; 5,7 MBq in offener und 300 kBq in umschlossener Form, Uran 1 MBq in offener Form, Uranmineralien) in einem Privathaus | Unzulässige Lagerung | Gefährdungspotential gering, keine Kontamination | Ordnungsgemäße Entsorgung bzw. Übergabe an Nachnutzer |
| 8. 6. 1998 | Freisetzung von Radioaktivität in die Raumluft und in angrenzende Kellerräume in einem Forschungslabor | Unterlassene Errichtung einer Schutzvorrichtung, Nichtbeachtung der Strahlenschutzanweisung | Inkorporation (Pu-238-241, Am-241) bei 5 Mitarbeitern; effektive Dosen von 6,6; 2,6; 0,8; 0 mSv und Knochenoberflächendosen von 125; 48; 15; 0 mSv; Exposition der 5. Person siehe Vorkommnis 6. 6. und 8. 6. 98 | Einstellung der Arbeiten; Arbeits- und Sicherheitsanalyse; Maßnahmenkatalog für Rückbauarbeiten |

noch Tabelle IV.4

| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 11. 6. 1998 | Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90/Y-90; 160 kBq) und einer Visiereinrichtung (Pm-147; 300 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 11. 6. 1998 | Verlust von 3 Ionisationsrauchmeldern (Ra-226 je 2,2 kBq) in einem Krankenhaus | Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Ermittlungsverfahren |
| 17. 6. 1998 | Fund eines mit radioaktiver Leuchtfarbe kontaminierten Rohrs (max. 20 µSv/h) bei einer Metallrecyclingfirma | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 17. 6. 1998 | Personen- und Fußbodenkontamination (H-3 ca. 90 kBq) beim innerbetrieblichen Transport tritiummarkierter Zellkulturen (Gesamtaktivität 450 kBq) | Unachtsamkeit | Abschätzung der Hautdosis der betroffenen Person max. 50 µSv | Personen- und Raumdekontamination |
| 18. 6. 1998 | Brand in einer Glashütte mit radiometrischen Messanlagen (3 Sr-90-Strahler; 5 GBq, 9 GBq, 13 GBq und 3 Am-241-Strahler je 3,7 GBq) | Brandursache unbekannt | Strahlenexposition der Mitarbeiter durch die Bergung der Strahler 0,15 mSv, Strahler waren unversehrt | Sicherstellung der Strahler |
| 24. 6. 1998 | Verlust von 9 Ionisationsrauchmeldern (Am-241) in einem Wohnhaus | Vermutlich Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Ermittlungsverfahren |
| 3. 7. 1998 | Fund radioaktiver Stoffe (Aktivitäten im Bereich einiger Freigrenzen) bei Aufräumarbeiten in einer Universität | Unzulässige Lagerung | Keine; äußere Exposition und Kontamination ausgeschlossen | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 6. 7. 1998 | Verkehrsunfall bei der Beförderung eines Tc-99m-Generators (Restaktivität) | Auffahrunfall | Keine; Ladung nicht beschädigt | |
| 8. 7. 1998 | Beschädigung eines Bahncontainers (Öffnung der Nähte der Blechbeplankung über 60 cm) mit radioaktiven Abfallgebinden beim Umladen vom Eisenbahnfahrzeug auf ein Straßenfahrzeug | Zusammenstoß des Ladegeschirrs des Entladefahrzeugs mit Container infolge ungenügender Abstützung des Fahrzeugs | Keine; Abfallgebinde blieb innerhalb des Containers unbeschädigt | |
| 9. 7. 1998 | Fund eines Strahlers (Ra-226; 400 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 10. 7. 1998 | Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Ra-226; 2,22 kBq) in einer Berufsschule | Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Ermittlungsverfahren |
| 16. 7. 1998 | Einschalten eines medizinischen Beschleunigers während des Aufenthalts einer Mitarbeiterin im Bestrahlungsraum | Unzureichende Kontrolle, Unachtsamkeit | Dosimeterauswertung der Mitarbeiterin ergab eine Dosis von 22,8 mSv (Grenzwertüberschreitung) | Ärztliche Untersuchung; Installation von Bewegungsmeldern vorgesehen |
| 23. 7. 1998 | Aufenthalt einer Reinigungskraft im Bestrahlungsraum eines medizinischen Beschleunigers während des Vorbereitungsbetriebes | Unzureichende Kontrolle, unterlassene Belehrung des Reinigungspersonals | Abschätzung der Strahlenexposition der Reinigungskraft < 50 µSv | Strengere Zutrittsbeschränkungen; Nachrüstung mit Quittierschalter |
| 29. 7. 1998 | Bestrahlung von 13 Mitarbeitern von Fremdfirmen bei der Errichtung von 3 radiometrischen Füllstandsmessanlagen (Cs-137; 11 GBq und 2 x 0,55 GBq) in einer Firma | Selbständiges Lösen einer Rasterverbindung, unterlassene Messungen nach Ausbau des Quellenhalters | Dosisabschätzungen ergaben für die 2 am stärksten exponierten Personen jeweils eine Dosis von ca. 4 mSv | Ärztliche Untersuchung; Rasterverbindung durch Hersteller verbessert |

noch Tabelle IV.4

| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| August 1998 | Feststellung des Verlusts eines Strahlers (Co-57; 1,1 MBq) in einem Krankenhaus bei behördlicher Kontrolle | Unterlassene Anzeige des Verlusts des Strahlers vor 10 Jahren | Gefährdungspotential gering | Belehrung der Mitarbeiter |
| 4. 8. 1998 | Fund von 24 Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 29,6 kBq) bei einer Schrottwertungsfirma | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung durch den Verursacher |
| 12. 8. 1998 | Fund von radioaktiven Stoffen (I-125 mit Datum 11/92; 100 g Uranylнитrat) bei einer Stadtreinigungsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 20. 8. 1998 | Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90; 50 kBq) in einer Aluminiumschrottlieferung bei einer Metallrecyclingfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 24. 8. 1998 | Fund radioaktiv kontaminierter Schlauchstücke (Ra-226 max. 5 MBq) in einem Schrottcontainer bei einem Schredderwerk | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential für Personal des Schredderwerkes gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 25. 8. 1998 | Fund einer Präzisionswaage mit 2 Strahlern (Ra-226 je 74 kBq) in einer Universität | Unzulässige Aussonderung von Geräten | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 27. 8. 1998 | Fund von kontaminiertem Abfall aus der Nuklearmedizin (I-131, an Containeroberfläche max. 1 µSv/h) bei einer Müllwertungsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Rücktransport zum Verursacher |
| 27. 8. 1998 | Lagerung eines Statik-Eliminators mit 2 Strahlern (Po-210 je 200 MBq) außerhalb des diebstahl- und brandgeschützten Lagerbehälters in einer Lackierhalle, in der ein Brand ausbrach | Verstoß gegen Bestimmungen der Bauartzulassung | Keine Freisetzung von Radioaktivität | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 31. 8. 1998 | Fund von 2 Prüfstrahlern (Sr-90/Y-90 je 600 kBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 1. 9. 1998 | Fund von kontaminiertem Abfall aus der Nuklearmedizin (I-131, an Containeroberfläche max. 7 µSv/h) bei einer Müllwertungsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Rücktransport zum Verursacher |
| 1. 9. 1998 | Verlust von 2 Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 29,6 kBq) bei Baumaßnahmen in einem Theater | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ermittlungsverfahren |
| 4. 9. 1998 | Fund von Bruchstücken ehemaliger Fliegerabwehrraketen mit radioaktiv markierten Anzeigeelementen (Ra-226; 40 Bq/cm ² , max. 5,5 µSv/h) im Metallschrott bei einer Schrotthandlungsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 10. 9. 1998 | Störung der automatischen Strahlerrückführung an einem Afterloadinggerät nach einer Patientenbestrahlung | Gebrochene Feder im Endschalter | Keine; Strahler manuell in Endposition zurückgezogen | Reparatur durch Servicefirma |

noch Tabelle IV.4

| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 22. 9. 1998 | Fund einer Radiumkompresse im Schrott (am Bleimantel 10 µSv/h) bei einer Schrotthandelsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering; Kompresse befand sich im Bleimantel | Ordnungsgemäße Entsorgung; Ermittlungsverfahren |
| 22. 9. 1998 | Fund einer Gasuhr, mit einem Strahler (Ra-226, 37 kBq) bei einer Schrotthandelsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 25. 9. 1998 | Fund eines Strahlers (Ra-226; 2,2 MBq) bei Aufräumarbeiten in einem Halbleiterwerk | Herkunft unbekannt | Strahlenexposition für Mitarbeiter max. 1,5 mSv | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 30. 9. 1998 | Strahlenexposition eines Mitarbeiters durch eine Füllstandsmesseinrichtung (Cs-137, 1,11 GBq) | Nicht geschlossener Strahlengang | Abgeschätzte Strahlenexposition des Mitarbeiters ca 100 µSv | Ärztliche Untersuchung |
| 6. 10. 1998 | Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90/Y-90, 18,5 Mbq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 8. 10. 1998 | Unbeabsichtigte Änderung der Isodosenverteilung bei der Therapie von Patienten mit einem Afterloadinggerät (Ir-192; 555 GBq) | Verwendung eines zu kurzen neuen Ausfahrtschlauchs für Cervicalstifte | Veränderte Isodosenverteilung bei der Therapie von 4 Patienten | Verstärkte regelmäßige Kontrollen angeordnet |
| 15. 10. 1998 | Fund von 3 Transportbehältern mit 28 Strahlern (19 Pm-147-Strahler, 2 x 20 MBq, 5 x 110 MBq, 4 x ca. 230 MBq, 8 abgeklungene Strahler; 9 Kr-85-Strahler, 3 x 100 MBq, 1 x 440 MBq, 5 x 570 MBq) in einer Wertstoffsortieranlage | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering; Transportbehälter und Strahler unversehrt | Sicherstellung |
| 16. 10. 1998 | Einschalten eines medizinischen Beschleunigers während des Aufenthalts einer Mitarbeiterin im Bestrahlungsraum (Bestrahlungsdauer 30 Sekunden) | Unzureichende Kontrolle | Abschätzung der Strahlenexposition: Kopfhöhe 0,7 mSv; Brusthöhe 0,75 mSv; Ovarienhöhe 1,35 mSv durch Streustrahlung | Verbesserung durch zusätzliche akustische Anzeige der Betriebsbereitschaft |
| 17. 10. 1998 | Verkehrsunfall eines Fahrzeuges mit radioaktiven Versandstücken (2 Mo-99-Generatoren mit je 68 MBq) | Unbekannt | Keine; Versandstücke blieben unversehrt | Transport wurde fortgesetzt |
| 19. 10. 1998 | Fund eines perlenförmigen radioaktiven Teiles (Ra-226 Gesamtaktivität 30 kBq) bei einer Müllverwertungsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 19. 10. 1998 | Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241; 37 kBq) in einem Hotel | Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Ermittlungsverfahren |
| 21. 10. 1998 | Fund eines Ra-226-Emanators (1,3 MBq) und kontaminierter Schrotteile (Co-60; 24 kBq, Cs-137; 40 kBq, Ra-226; 66 kBq) bei einem Schrotthändler in einer Lieferung aus dem Ausland | Unzulässige Einfuhr | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 28. 10. 1998 | Feststellung des Bruchs von 6 Glasflaschen mit C-14 Lösung (888 kBq) | Unzureichende Transportsicherung | Keine Kontamination, C-14-Lösung war bereits verdampft | |
| 29. 10. 1998 | Fund von 2 Strahlern (Cs-137 je 370 MBq) | Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |

noch Tabelle IV.4

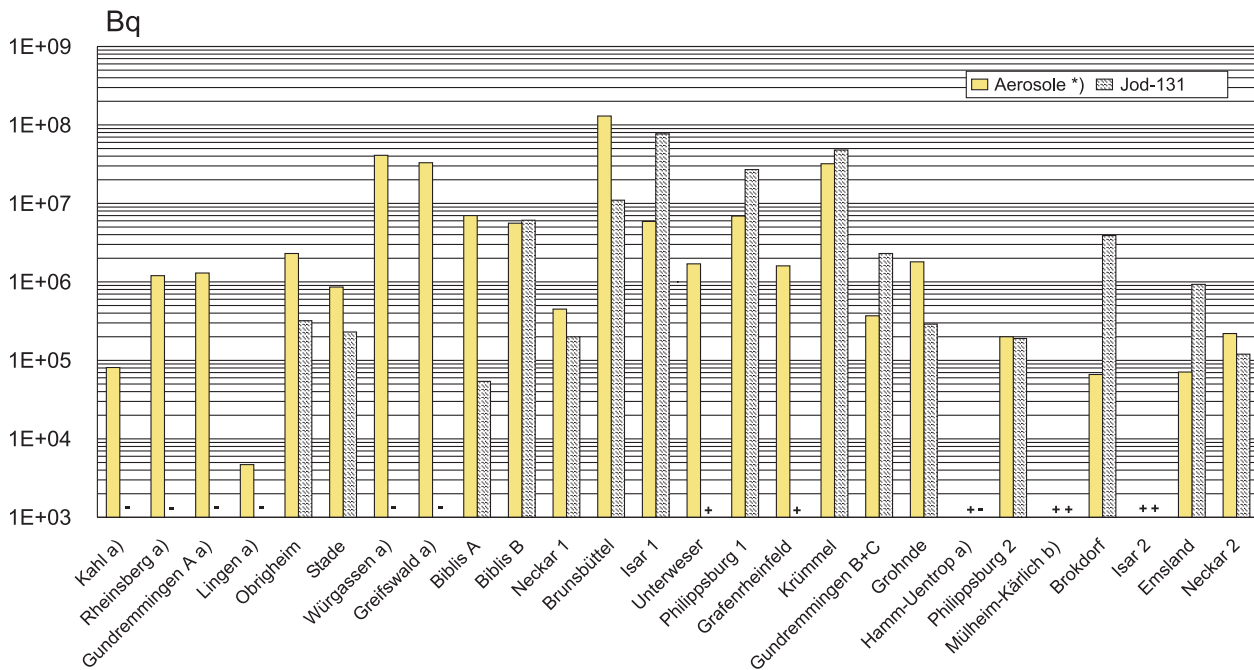
| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 30. 10. 1998 | Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241; 29,6 kBq) in einer Brauerei | Unbekannt | Gefährdungspotential gering | Diebstahl wird ausgeschlossen |
| 3. 11. 1998 | Verlust von 28 gasgefüllten H-3-Lichtquellen (3 Stück je 120 GBq, 25 Stück je 13 GBq) | Absturz eines unbemannten Such- und Bordhubschraubers ins Meer | Keine | 7 der insgesamt 35 im Hubschrauber befindlichen H-3-Lichtquellen geborgen; innere Schutzhülle war dicht |
| 9. 11. 1998 | Hängenbleiben des Strahlers (Ir-192; 393 GBq) im Ausfahrtschlauch eines Afterloadinggerätes | Unzulässige Zeitabweichung zwischen den das Gerät kontrollierenden elektronischen Uhren durch äußere elektronmagnetische Störung | Keine, Bergung der Patientin erfolgte unverzüglich | Organisatorische Maßnahmen; Austausch defekter Teile; Sachverständigenprüfung |
| 12. 11. 1998 | Verlust von 2 Ionisationsrauchmeldern (Ra-226 je 2,22 kBq) bei Umbauarbeiten in einem Gebäude eines Hauptschulzweckverbandes | Ionisationsrauchmelder vermutlich mit dem Bauschutt abtransportiert | Gefährdungspotential gering | |
| 14. 11. 1998 | Abgabe von Behältern mit kontaminierten Klinikabfällen (I-131, an Behälteraußenseiten max. 200 µSv/h) | Unachtsamkeit | Gefährdungspotential gering | Disziplinarische Maßnahmen, behördliche Auflagen |
| 16. 11. 1998 | Verkehrsunfall eines Fahrzeuges mit radioaktiven Versandstücken (13 x Mo/Tc; max. 21,5 GBq, 4 x In-111; max. 122 MBq, 1 x Ga-67; 82 MBq, 7 x Tl-201; max. 1,11 GBq, 4 x I-131; max. 1,04 GBq, 1 Fass Y-90; max. 3,7 GBq) | Fahrfehler | Kontaminationen auf Fahrbahn und Seitenstreifen, da Versandstücke überrollt | Fahrbahn dekontaminiert; ordnungsgemäße Entsorgung des kontaminierten Erdreichs und der Versandstücke |
| 20. 11. 1998 | Fund eines Strahlers (Co-60; 50 MBq) im Abwassersystem eines Kellerraumes während der Freimessung einer Therapieanlage | Verlust des Strahlers vor 10 Jahren | Keine; der Raum wurde nur kurzzeitig zu Kontrollzwecken betreten | Ordnungsgemäße Bergung und Entsorgung |
| 20. 11. 1998 | Fund eines Statikeliminators mit Strahler (Ra-226, an Geräteoberfläche max. 30 mSv/h, an Containeroberfläche max. 180 µSv/h) im Metallschrott bei einer Metallrecyclingfirma | Unzulässige Entsorgung | Keine erhöhten Strahlenexpositionen bekannt | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 20. 11. 1998 | Ausfall der Zeitschaltuhr und Störung der automatischen Rückführung des Strahlers an einem Afterloadinggerät | Technischer Fehler am Bedienpult | Strahlenexposition der Patientin betrug weniger als 5 % der geplanten Dosis | Strahler konnte durch den Notausschalter am Gerät zurückgeführt werden; Austausch des Bedienpultes; Sachverständigenprüfung |
| 23. 11. 1998 | Verlust eines Schulquellensatzes (Co-60; 167 kBq; Kr-85; 167 kBq; Na-22; 185 kBq; Pu-238; 37 kBq) in einer Schule | Vermutlich Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Suche ergebnislos |
| 23. 11. 1998 | Einschalten eines medizinischen Beschleunigers während des Aufenthalts einer Reinigungskraft im Labyrinth des Bestrahlungsraums einer Klinik | Unzureichende Belehrung der Reinigungskraft; unterlassene Kontrolle | Abschätzung der Strahlenexposition der Reinigungskraft von max. 0,14 µSv | Festlegung von Maßnahmen zur Vermeidung derartiger Vorkommnisse |
| 24. 11. 1998 | Fund eines Behälters mit 3 Strahlern (Cs-137; 100 GBq, 10 GBq, 100 MBq) im Schrott bei einem Stahlwerk | Unzureichende Räumung einer ehemals militärisch genutzten Liegenschaft | Gefährdungspotential gering; Strahler innerhalb Aufbewahrungsbehälter | Sicherstellung |

noch Tabelle IV.4

| Datum | Vorkommnis | Ursache | Radiologische Folgen | Maßnahmen/ Bemerkungen |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25. 11. 1998 | Fund von kontaminiertem Abfall (I-131, an Containeroberfläche max. 7 µSv/h) bei einer Müllverwertungsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 25. 11. 1998 | Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241; 29,6 kBq) in einer Schule | Diebstahl | Gefährdungspotential gering | Installation von mechanischen Diebstahlsicherungen |
| 26. 11. 1998 | Radiojodtherapie (I-131; 3,7 GBq) einer Patientin in der 6. Schwangerschaftswoche | Schwangerschaft verschwiegen oder nicht bekannt | Dosis am Uterus 200 mSv, Risiko für Schädigung des Fötus auf 10 % geschätzt | Medizinisches Gutachten |
| 26. 11. 1998 | Fund radioaktiver Stoffe (La-138, Th-227, Ra-223, Pb-211, Bi-211; 600–700 Bq/kg) im Keller eines Wohnhauses | Unzulässige Lagerung | Keine | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 27. 11. 1998 | Kontamination (Tc-99m) der Hände und der Kleidung einer Assistentin während ihrer Ausbildung in der Nuklearmedizin | Unachtsamkeit | Sehr geringfügige Hautdosis der betroffenen Person (weniger als 1 µSv) | Dekontamination der Hände und der Kleidung |
| 7. 12. 1998 | Personenkontamination und Kontamination (Co-57) des Laborbereichs einer Zyklotronanlage sowie Verschleppung der Kontamination in eine Privatwohnung | Nichtbeachtung der Strahlenschutzanweisung | Inkorporation von ca. 30 kBq Co-57 (0,2 mSv) | Anordnung von Schutzmaßnahmen; weitere Untersuchungen |
| 8. 12. 1998 | Fund von kontaminiertem Abfall (TI-201, an Containeroberfläche max. 2 µSv/h) bei einer Müllverwertungsfirma | Unzulässige Entsorgung | Gefährdungspotential gering | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 9. 12. 1998 | Fund von 17 Strahlern (Cs-137; Gesamtaktivität 3 GBq) in Originalbehältern im verschlossenen Strahlenschrank bei einer Firma | Übernahme der Strahler 1988; Strahler in Vergessenheit geraten | Gefährdungspotential gering, da zugriffssicher gelagert | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 9. 12. 1998 | Feststellung des Verlusts von 2 Pm-147-Strahlern (Aktivität abgeklungen) und 4 Kr-85-Strahlern (je 500 MBq) bei der nachträglichen Bestandskontrolle in einem stillgelegten Betrieb | Unterlassene Entsorgung bei Betriebsstilllegung; unzureichende Kontrolle | Gefährdungspotential gering | Übrige Strahler aus dem Bestand des früheren Betriebes in Transportbehältern vorgefunden |
| 14. 12. 1998 | Verlust einer Schulquelle (Ra-226; 3,7 kBq) | Unachtsamkeit | Gefährdungspotential gering | Suche nach dem Strahler ergebnislos |
| 15. 12. 1998 | Überflutung von Kellerräumen eines Universitätsgebäudes, in denen schwach radioaktive Abfälle (I-125 und P-32) lagerten | Rohrbruch der Warmwasserleitung | Keine; Radioaktivität nicht ausgetreten | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 17. 12. 1998 | Brand im Physiksaal eines Gymnasiums, in dem radioaktive Stoffe (Sr-90, Ra-226, Th-232, Am-241; Gesamtaktivität 200-fache der Freigrenze) gelagert wurden | Vermutlich technischer Defekt an einem Elektrogerät | Keine; Schulquellen befanden sich im Tresor | Ordnungsgemäße Entsorgung |
| 21. 12. 1998 | Verlust eines Ionisationsrauchmelders (Am-241; 29,6 kBq) in einer Stiftung | Melder vermutlich versehentlich zerstört und in den Müll gegeben | Gefährdungspotential gering | Ermittlungsverfahren |
| 31. 12. 1998 | Verlust des H-3-Detektors (7,4 GBq) eines Gaschromatographen nach Räumung des Labors | Unzulässige Lagerung, unterlassene Kontrolle | Gefährdungspotential gering | Ermittlungsverfahren |
| 31. 12. 1998 | Verlust einer Schulquelle (Ra-226; 48 kBq) | Unsachgemäße Kontrolle | Gefährdungspotential gering | Suche ergebnislos |

Abbildung IV.1

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1998
Aerosole und Jod-131**



a) Betrieb beendet; b) 1998 nicht in Betrieb;

*) Halbwertszeit > 8 Tage, ohne Jod-131, einschl. Strontium und Alphastrahler

+ kleiner oder gleich Nachweisgrenze

- Bilanzierung nicht erforderlich

Abbildung IV.2

Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1998
¹⁴CO₂, Tritium und Edelgase

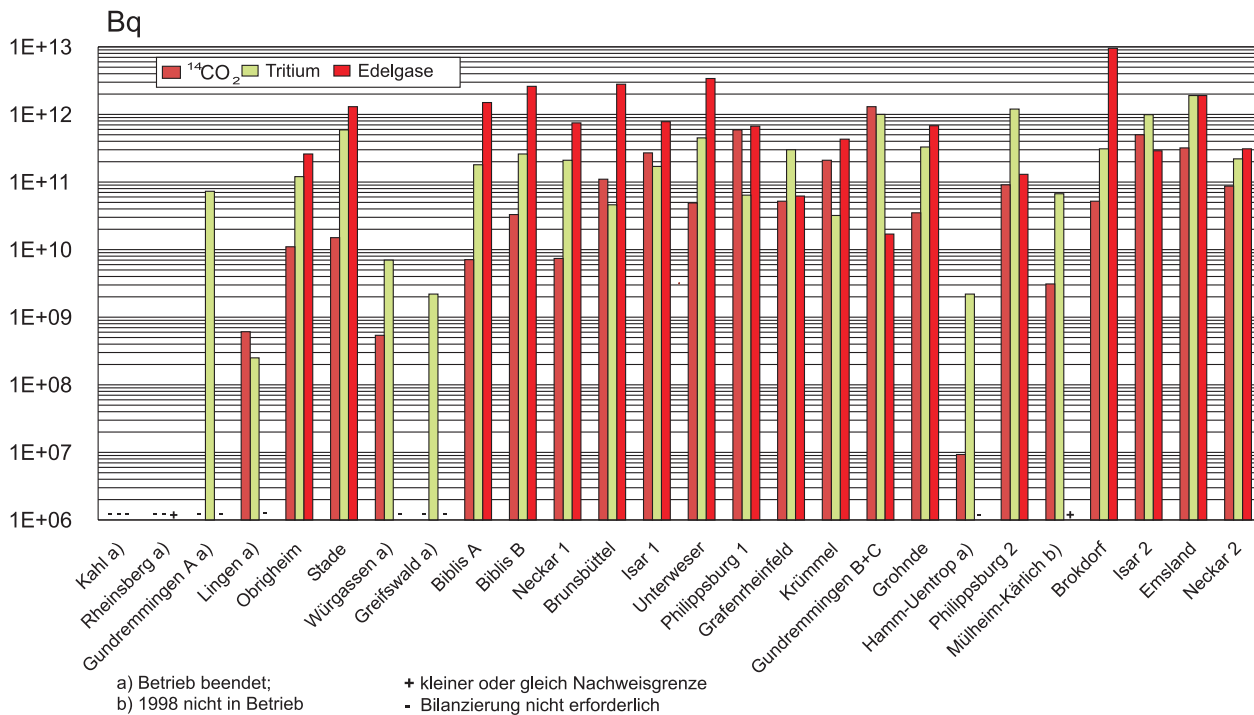


Abbildung IV.3

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken im Jahr 1998
(Alphastrahler, Summenwerte und Tritium)**

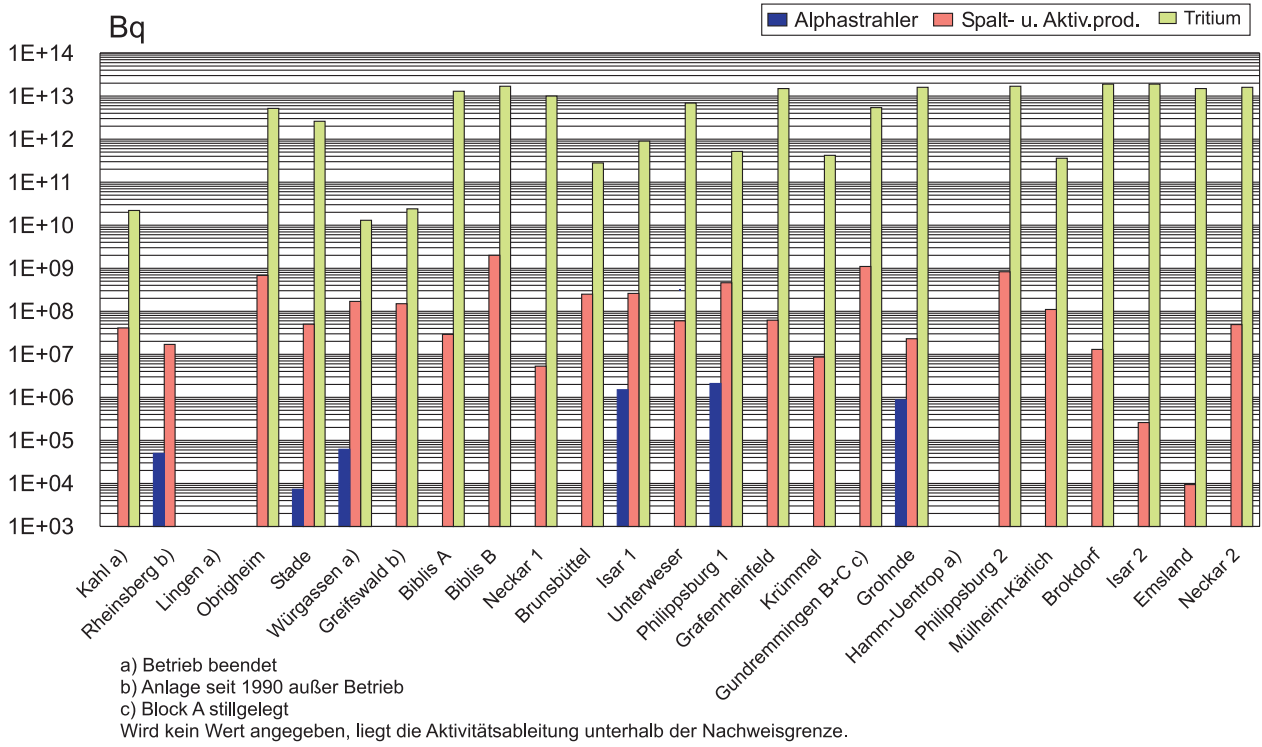
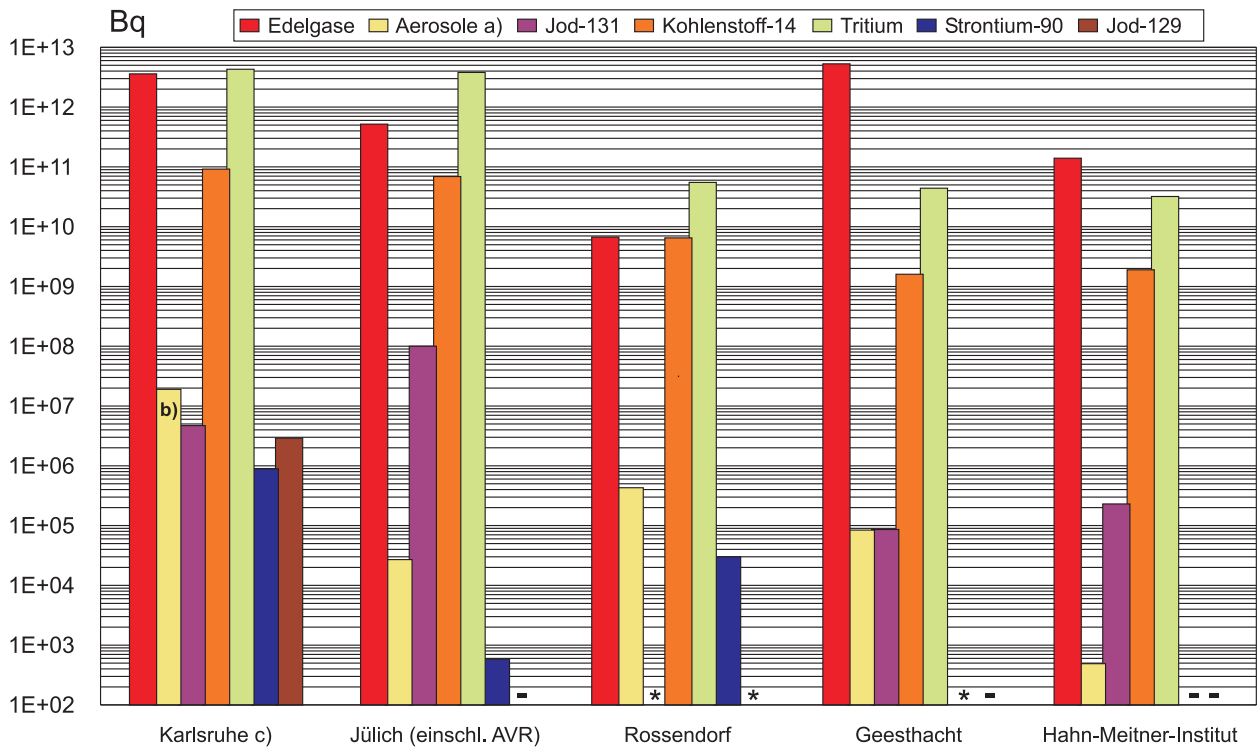


Abbildung IV.4

Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren im Jahr 1998



a) Halbwertszeit > 8 Tage

b) davon Alphastrahler: 2,9 E05 Bq

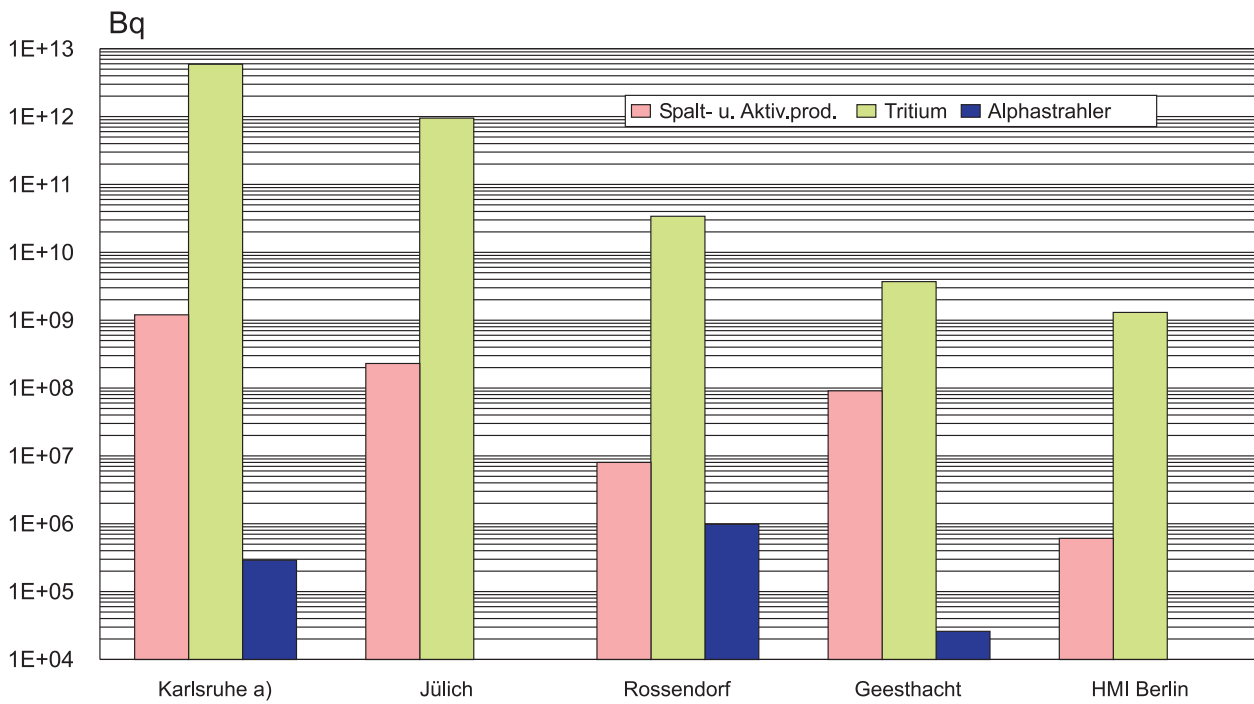
c) einschl. Wiederaufarbeitungsanlage

* kleiner oder gleich Nachweisgrenze

- Bilanzierung nicht erforderlich

Abbildung IV.5

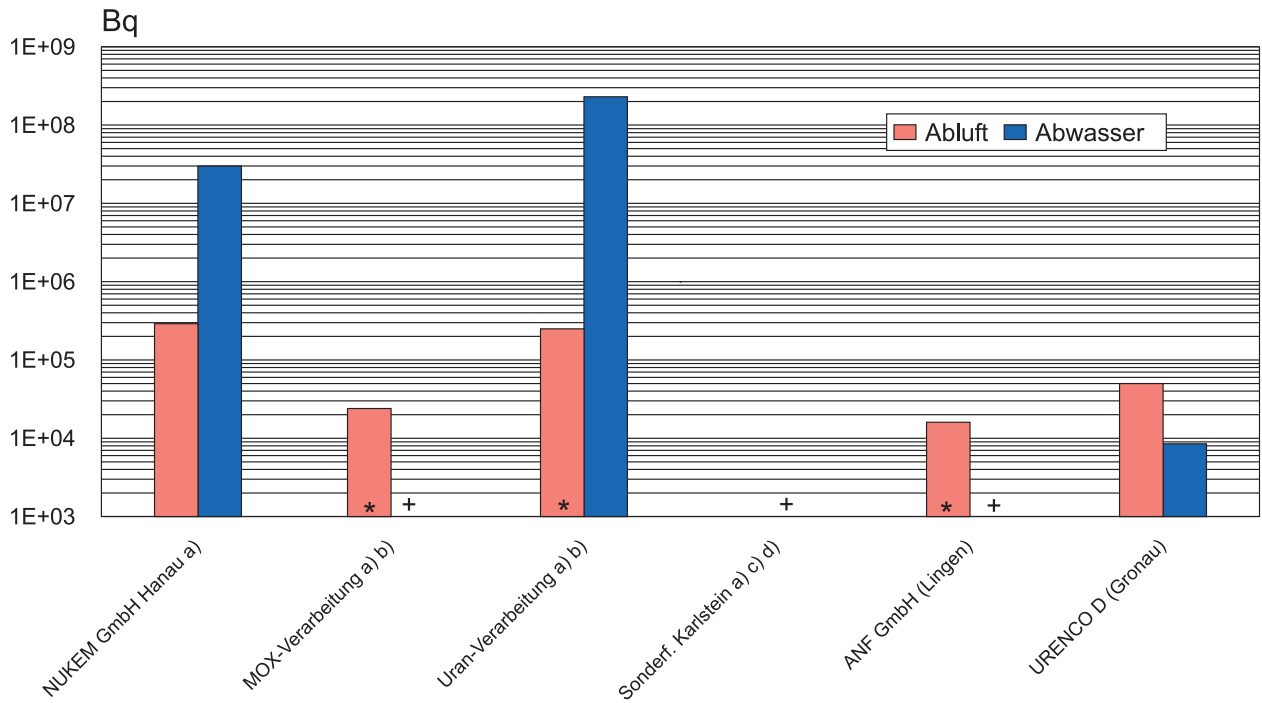
Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Forschungszentren im Jahr 1998



a) einschl. Wiederaufarbeitungsanlage

Abbildung IV.6

**Ableitung radioaktiver Stoffe (Alphaaktivität)
aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben im Jahr 1998**

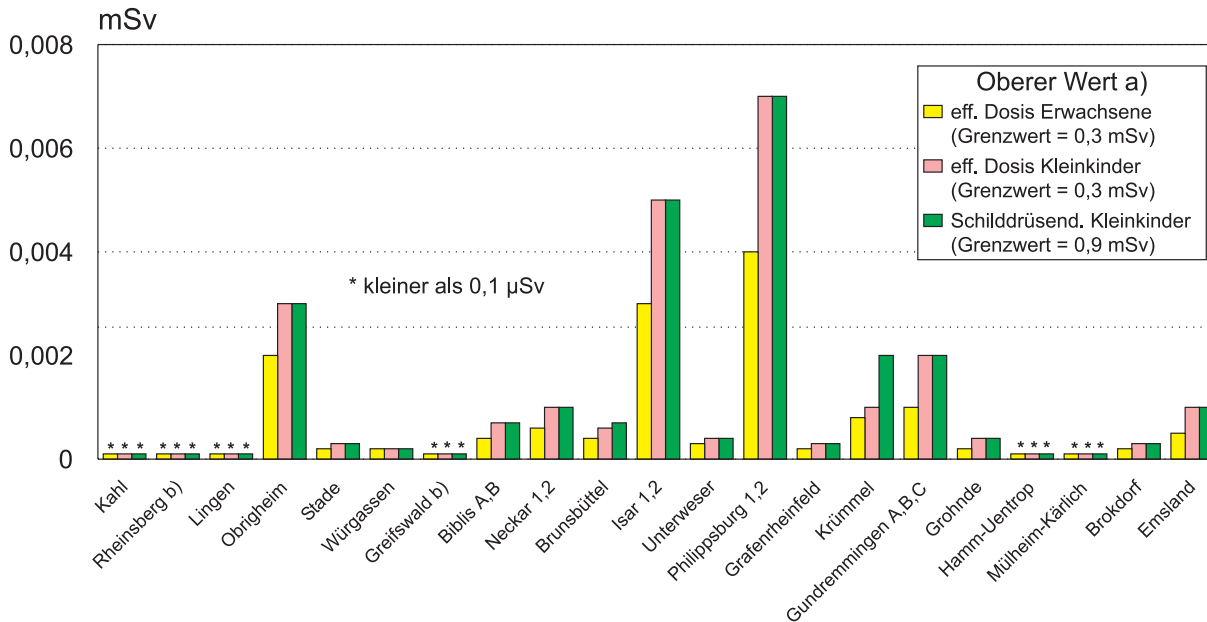


- a) Brennelementproduktion eingestellt
- b) SIEMENS AG, Brennelementewerk Hanau
- c) SIEMENS AG
- d) Nach Freimessung Betrieb der Lüftung eingestellt

- * kleiner als angegebener Wert
- + kleiner Nachweisgrenze

Abbildung IV.7

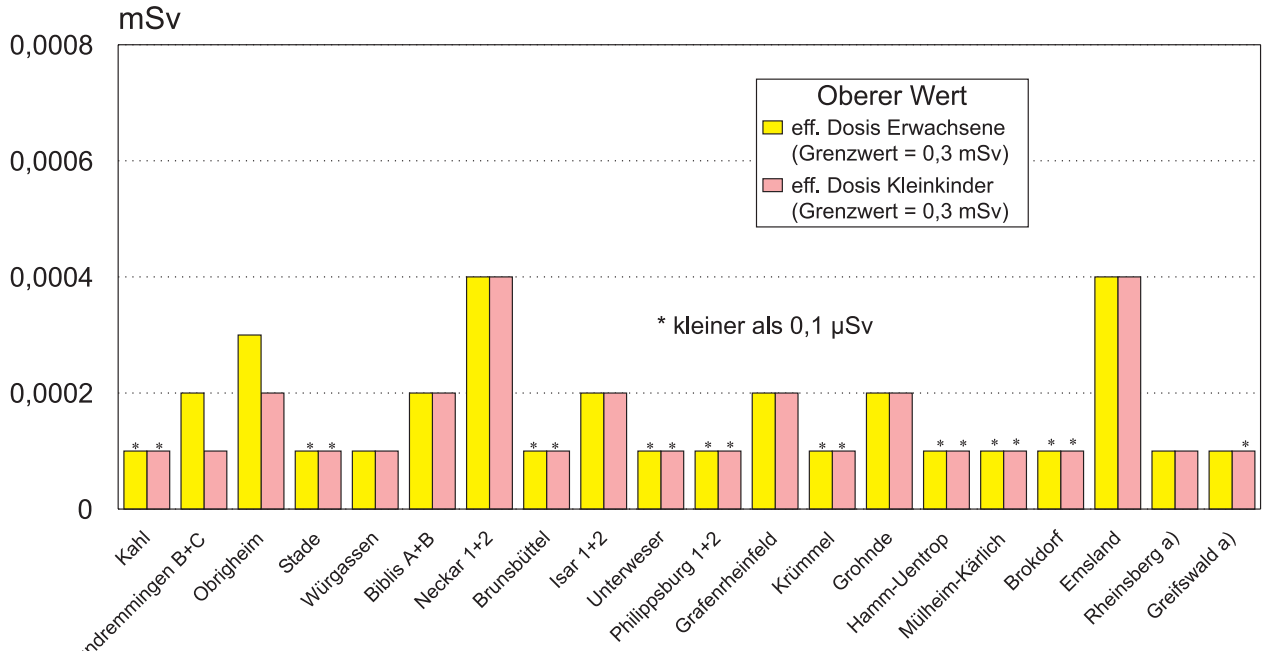
Strahlenexposition im Jahr 1998 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft



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

Abbildung IV.8

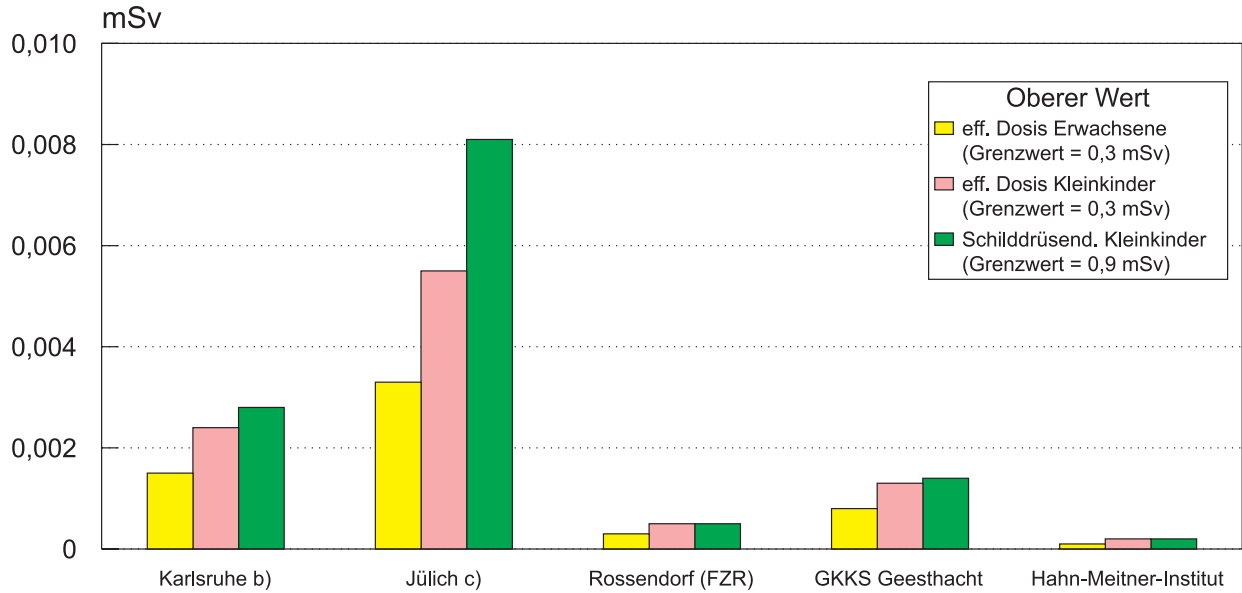
Strahlenexposition im Jahr 1998 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser



a) Die Strahlenexposition konnte für Expositionspfade, bei denen Radionuklide in den Vorjahren akkumuliert wurden, nur unvollständig berechnet werden, da bei diesen Kernkraftwerken Werte für die Abgabe radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus den Jahren vor 1990 nicht vorliegen.

Abbildung IV.9

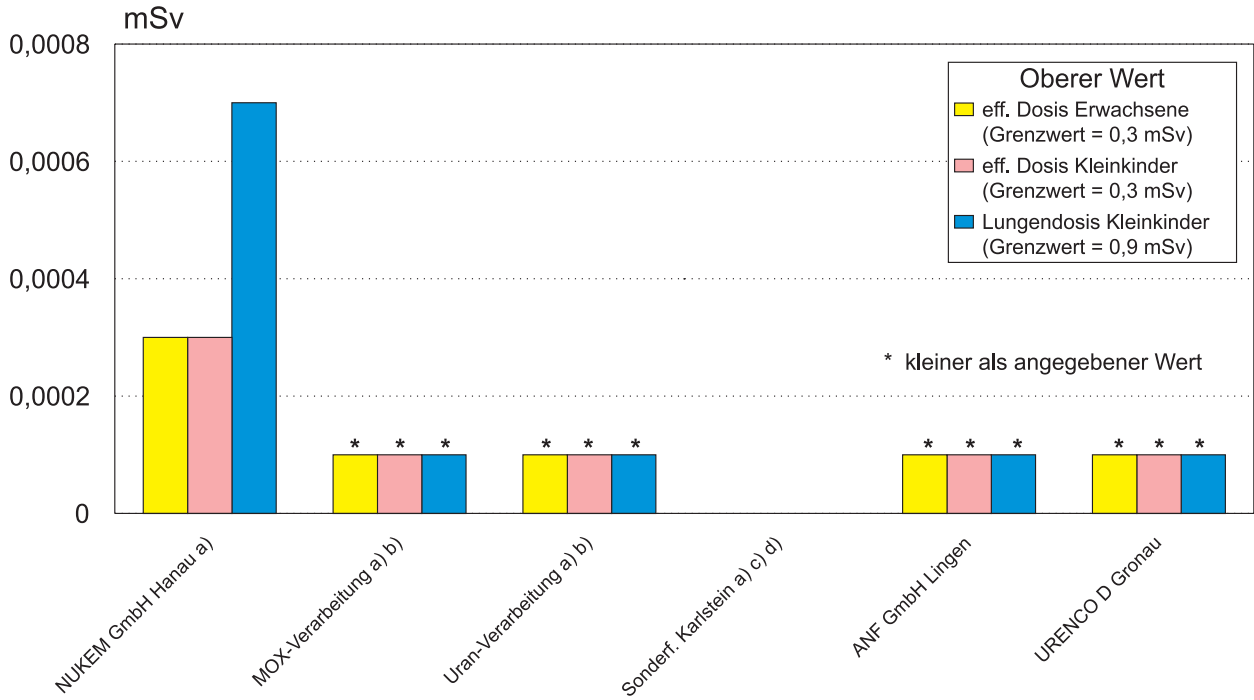
Strahlenexposition im Jahr 1998 in der Umgebung von Forschungszentren durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft a)



- a) Entnommen aus den Jahresberichten 1998 sowie nach Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf, Geesthacht und HMI-Berlin
- b) einschl. Wiederaufarbeitungsanlage
- c) einschl. Versuchsreaktor AVR

Abbildung IV.10

Strahlenexposition im Jahr 1998 in der Umgebung der kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft



- a) Brennelementproduktion eingestellt
- b) SIEMENS AG, Brennelementewerk Hanau
- c) SIEMENS AG
- d) Nach Freimessung Betrieb der Lüftung eingestellt

Abbildung IV.11

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

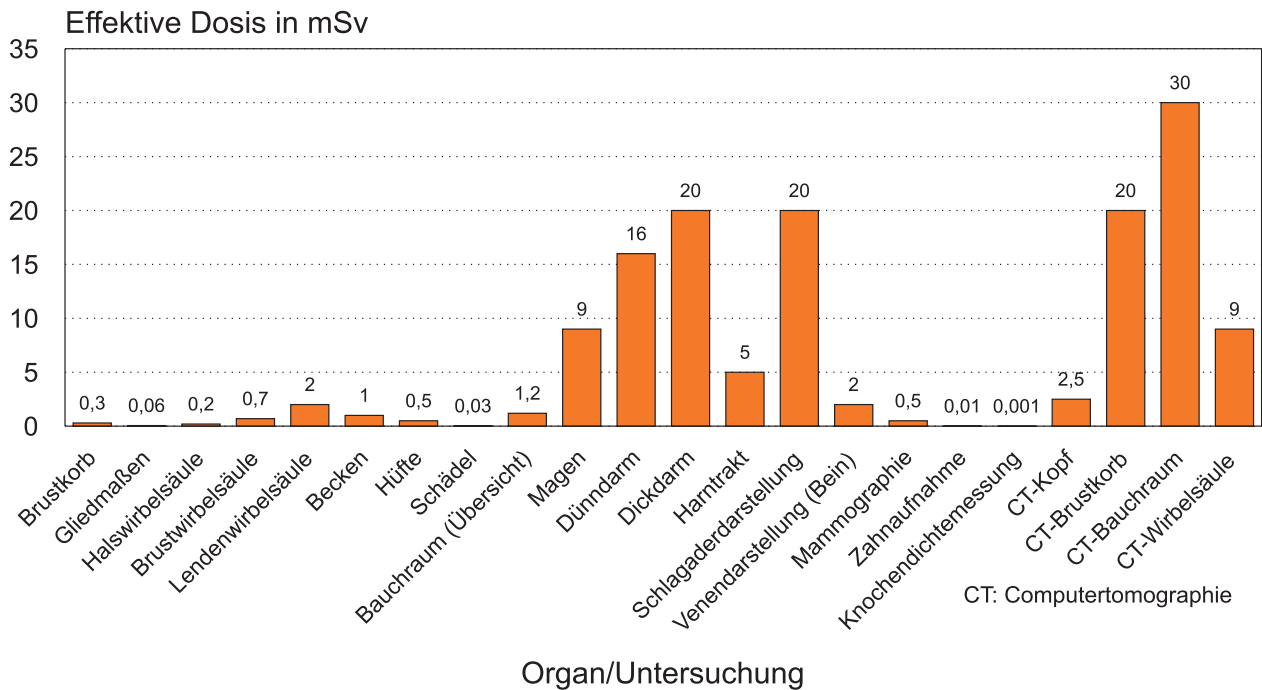


Abbildung IV.12

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

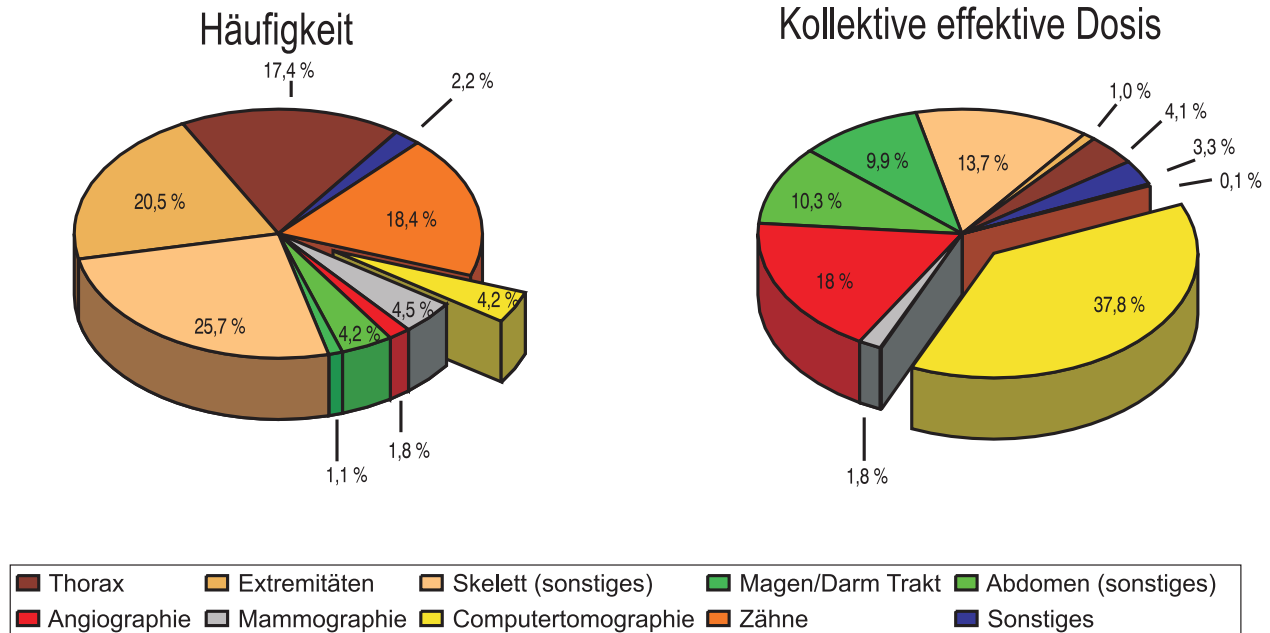
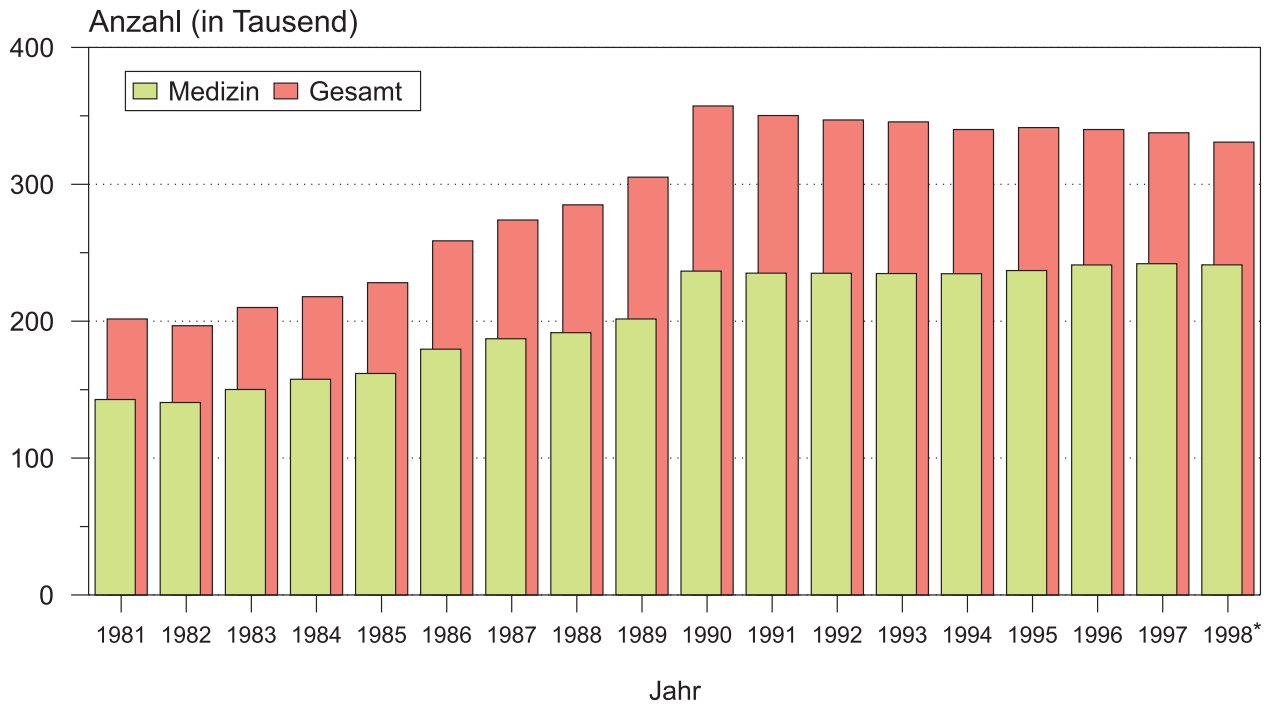


Abbildung IV.13

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



* Stand: 1.9.99

Abbildung IV.14

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

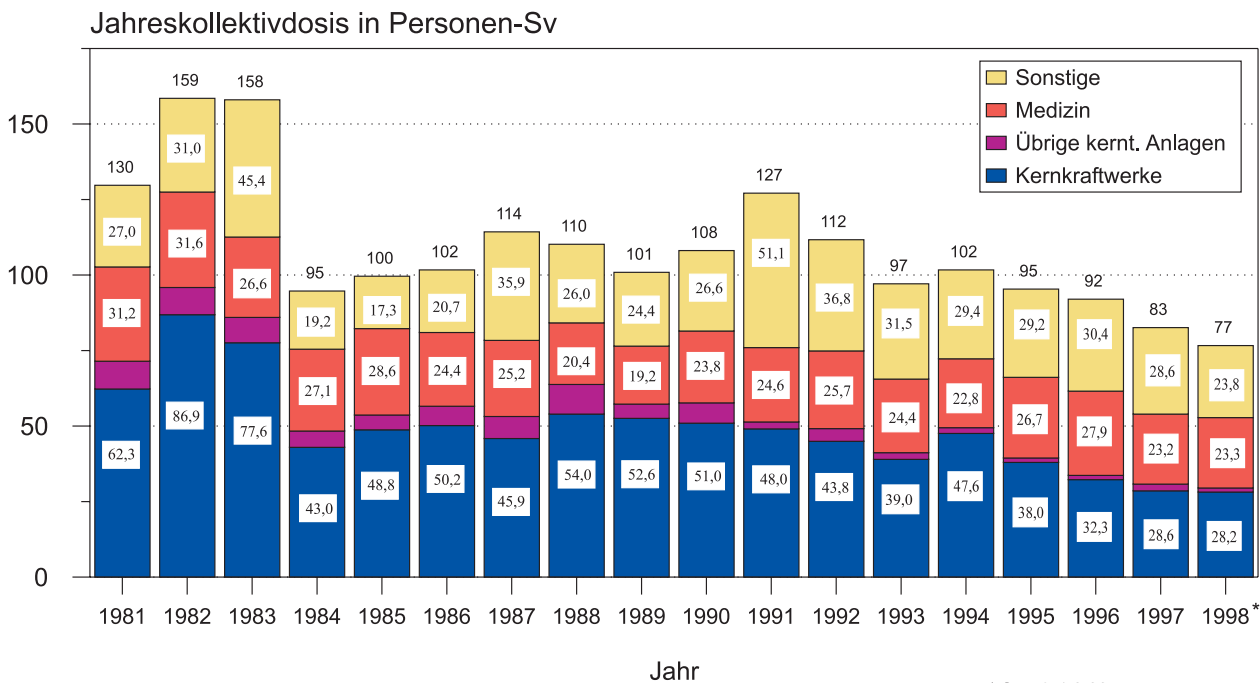


Abbildung IV.15

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

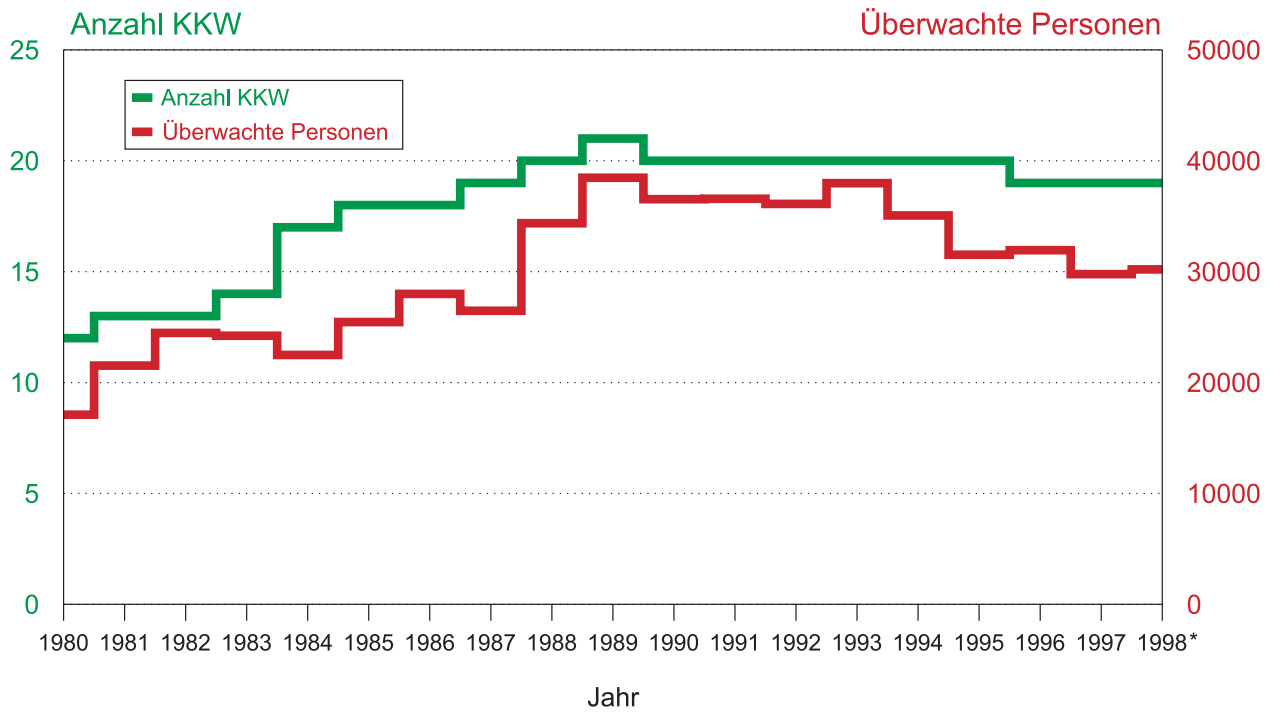
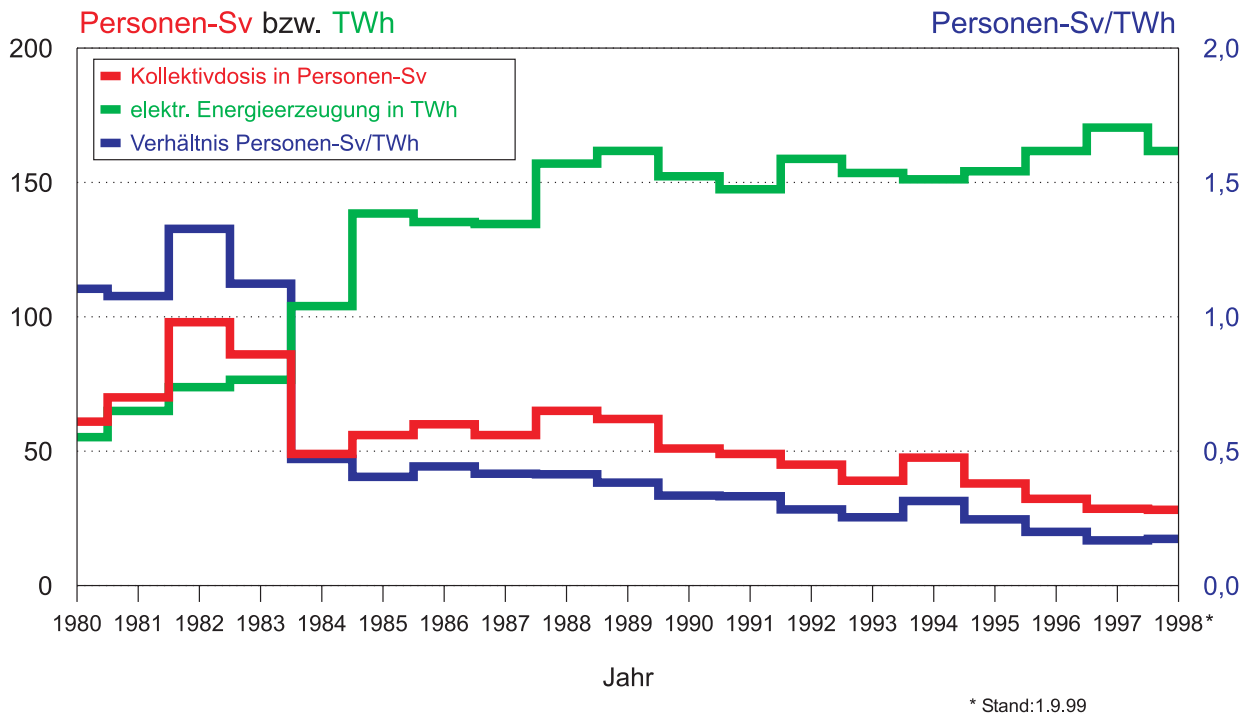


Abbildung IV.16

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 1998 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 76 % 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 – in Einzelfällen bis zu einigen zehntausend – Frischmasse zu verzeichnen, weshalb besondere Ernährungsgewohnheiten Abweichungen von der durchschnittlichen Aktivitätszufuhr über Ingestion bedingen können. Ein Verzehr von z. B. 200 g Maronenhöhrlingen 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, Comptoneffekt 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. Alphaeilchen). 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 Dosiseneinheit 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 Dosiseneinheit benutzt; 1 Gy ist gleich 100 rd. Zur quantitativen Dosisangabe bei strahlenbiologischen Dosiswirkungsbeziehungen dient die Energiedosis.

Schon relativ frühzeitig wurde allerdings erkannt, dass das Ausmaß einer biologischen Strahlenwirkung nicht alleine von der Energiedosis abhängt. Beim Vergleich verschiedener Strahlenarten miteinander zeigte sich, dass ionisierende Strahlen mit hohem LET (dicht ionisierende Strahlen, z. B. Alphaeilchen) 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 Strahldosen 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 Betateilchen relativ zu den Körperdimensionen nur eine geringe Eindringtiefe besitzen. Bei Alphastrahlung ist die Eindringtiefe so gering, dass nur die äußere Zellschicht der Haut betroffen ist. Die Keimschicht der Haut (stratum germinativum), in der die Zellerneuerung stattfindet, liegt bei äußerer Alphabestrahlung bereits außerhalb der Reichweite der Alphateilchen. Bei Betastrahlung liegt die Eindringtiefe im Gewebe im Bereich von einigen Millimetern, 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 ver-

schiedenen 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).

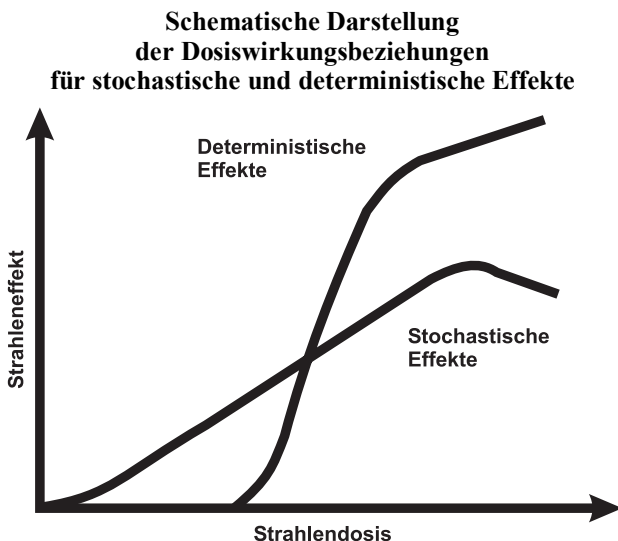
3. Stochastische und deterministische Strahlenwirkung

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 voraussagbaren Häufigkeit beobachtet. Als „Risiko“ wird im Strahlenschutz die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer stochastischen Strahlenwirkung bei der Einzelperson bezeichnet; den Quotienten Risiko/Äquivalentdosis nennt man „Risikoeffizient“.

Zu dieser Kategorie von Strahlenwirkungen zählen die Induktion von vererbaren Defekten und von malignen Erkrankungen (Leukämie und Krebs). Man geht davon aus, dass es sich hier um unizelluläre Prozesse handelt. Bei den vererbaren Defekten muss nur eine Keimzelle

Abbildung A-1



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 überwiegenderem 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 Ent-

stehung 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 überwiegendem 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 Zerfallsprodukt 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 gelöste 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.

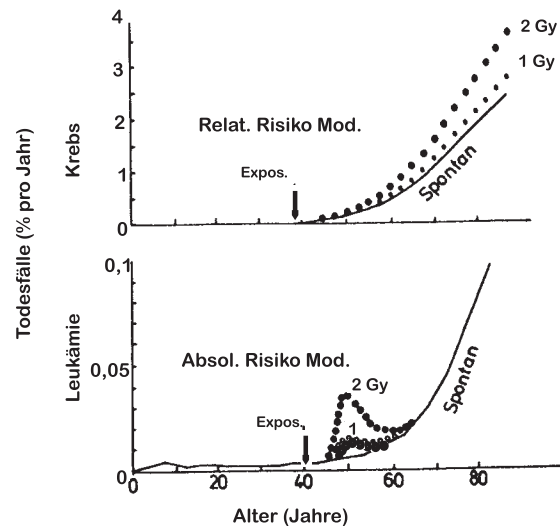
6. Risikoabschätzung

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 Bedeu-

Abbildung A-2

Schematische Darstellung der Mortalität durch Krebs und Leukämie



tung 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 Risikoeffizienten.

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

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

Unter dieser Annahme ist eine Risikoabschätzung durch Extrapolation, ausgehend von den Daten bei hohen Strah-

lendosen, 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

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

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

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

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

B. Erläuterung der benutzten Fachausdrücke

| | |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aerosol | Gase mit festen oder flüssigen Schwebeteilchen |
| Aktivität | Anzahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne |
| Alphastrahler | Radionuklide, die Alphateilchen (Heliumatomkerne) aussenden |
| anthropogen | durch den Menschen beeinflusst, verursacht |
| Äquivalentdosis | Produkt aus Energiedosis und einem u.a. von der Strahlenart abhängigen Bewertungsfaktor. Die Äquivalentdosis ist das Maß für die Wirkung einer ionisierenden Strahlung auf den Menschen |
| Becquerel | SI-Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel (Bq) liegt vor, wenn 1 Atomkern je Sekunde zerfällt 1 Becquerel (Bq) = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Curie |
| Betastrahlung | Teilchenstrahlung, die aus beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Elektronen besteht |
| Betasubmersion | Strahlenexposition durch Betastrahlung von radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre |
| Computertomographie | Röntgenuntersuchung mit relativ hoher Strahlenexposition aber sehr hoher Aussagekraft durch Darstellung als überlagerungsfreies Querschnittsbild |
| Dekontamination | Beseitigung oder Verminderung von radioaktiven Verunreinigungen |
| Deterministisch | Nicht-stochastisch; deterministische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Schwere des Schadens mit der Dosis zunimmt und in der Regel ein Schwellenwert besteht, z. B. Hautrötung, Augenlinsentrübung (siehe auch stochastisch) |
| Digitale Subtraktionsangiographie | Röntgendarstellung von Blutgefäßen durch Einspritzen von Kontrastmittel. Durch die elektronische Subtraktion des Leerbilds von dem Kontrastbild wird eine bessere Darstellung der Blutgefäße bei gleichzeitiger Einsparung von Kontrastmittel erreicht. |
| Dosis | Siehe Energiedosis und Äquivalentdosis |
| Effektive Dosis | Summe der gewichteten mittleren Äquivalentdosen in den einzelnen Organen und Geweben des Körpers. Der Wichtungsfaktor bestimmt sich aus den relativen Beiträgen der einzelnen Organe und Gewebe zum gesamten Strahlenrisiko des Menschen bei Ganzkörperbestrahlung |
| Energiedosis | Quotient aus der Energie, die durch ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird, und der Masse in diesem Volumenelement |
| Fall-out | Aus der Atmosphäre auf die Erde in Form kleinster Teilchen abgelagertes radioaktives Material, das zum Beispiel bei Kernwaffenversuchen entstanden ist |
| Gammastrahlung | Energiereiche elektromagnetische Strahlung, die bei der radioaktiven Umwandlung von Atomkernen oder bei Kernreaktionen auftreten kann |
| Gammasubmersion | Strahlenexposition durch Gammastrahlung von radioaktiven Aerosolen und Gasen in der Atmosphäre |
| Ganzkörperdosis | Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel als Folge einer als homogen angesehenen Bestrahlung des ganzen Körpers |
| Gray | SI-Einheit der Energiedosis. 1 Gray (Gy) = 100 Rad |
| Ingestion | Allgemein: Nahrungsaufnahme Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Nahrung |
| Inhalation | Allgemein: Einatmung von Gasen Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Atemluft |
| Inkorporation | Allgemein: Aufnahme in den Körper Speziell: Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper |

| | |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Interventionelle Radiologie | Therapeutischer Eingriff am Kranken, ohne eine Körperhöhle zu eröffnen, wobei das Behandlungsinstrument unter Durchleuchtungskontrolle über ein Blutgefäß oder einen anderen Zugang eingeführt wird. |
| Ionisierende Strahlen | Elektromagnetische- oder Teilchenstrahlen, welche die Bildung von Ionen bewirken können (z. B. Alphastrahlen, Betastrahlen, Gammastrahlen, Röntgenstrahlen) |
| Isotop | Atomart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl |
| Kontamination | Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen |
| Kosmische Strahlung | Sehr energiereiche Strahlung aus dem Weltraum |
| Nuklearmedizin | Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken |
| Nuklid | Durch Protonenzahl (Ordnungszahl) und Massenzahl charakterisierte Atomart |
| Organdosis | Mittelwert der Äquivalentdosis über ein Organ |
| Ortsdosis | Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort |
| Ortsdosisleistung | In einem kurzen Zeitintervall erzeugte Ortsdosis, geteilt durch die Länge des Zeitintervalls |
| 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 |
| Radionuklide | Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen |
| Si-Einheiten | Einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI). Die Anwendung der Einheiten im Strahlenschutzmesswesen ist durch die Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Messwesen vom 13.12.1985 (BGBl. I S.2272) geregelt |
| Sievert | SI-Einheit der Äquivalentdosis und der effektiven Dosis. 1 Sievert (Sv) = 100 Rem, 1 Sievert = 1 000 Millisievert = 1 000 000 Mikrosievert |
| Stochastisch | Zufallsbedingt; stochastische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens mit der Dosis variiert, nicht jedoch deren Schwere (siehe auch deterministisch) |
| Strahlenbelastung | Siehe Strahlenexposition |
| Strahlenexposition | Einwirkung ionisierender Strahlen auf den menschlichen Körper oder seine Teile |
| Terrestrische | |
| Strahlung | Strahlung der natürlich radioaktiven Stoffe, die überall auf der Erde vorhanden sind |
| Tritium | Radioaktives Isotop des Wasserstoffs, das Betastrahlung sehr niedriger Energie aussendet |

