

Unterrichtung

durch die Bundesregierung

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1996

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 Gebäuden	6
3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus	6
3.1 Umgebungsüberwachung an den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH	6
3.2 Altlastenkataster	7
IV. Zivilisatorische Strahlenexposition	13
1. Kerntechnische Anlagen	13
1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen	13
1.2 Jahresableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen	13
1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen	13
2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin	15
3. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt	16
3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen	16
3.2 Störstrahler	16

	Seite
4. Berufliche Tätigkeit	16
4.1 Personendosisüberwachung	16
4.2 Inkorporationsüberwachung	16
4.3 Berufliche Strahlenexposition durch Radonfolgeprodukte in den neuen Bundesländern	16
4.4 Strahlenexposition des Flugpersonals	17
5. Besondere Vorkommnisse	17
6. Fall-out von Kernwaffenversuchen	17
V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl ..	44
Anhang	
A. Strahlendosis und Strahlenwirkung	45
1. Strahlendosis und ihre Einheiten	45
2. Externe und interne Bestrahlung	46
3. Stochastische und deterministische Strahlenwirkung	47
4. Genetisch vererbare Defekte	47
5. Induktion von Leukämie und Krebs	48
6. Risikoabschätzung	49
7. Effektive Dosis	50
B. Erläuterung der benutzten Fachausdrücke	51

I. Auftrag und Zusammenfassung

1. Auftrag

Das Strahlenschutzvorsorgegesetz vom 19. Dezember 1986 (BGBl. I S. 2610), zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes vom 24. Juni 1994 (BGBl. I S. 1416), sieht die jährliche Berichterstattung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit an den Deutschen Bundestag und den Bundesrat über die Entwicklung der Radioaktivität in der Umwelt vor. Der Bericht für das Jahr 1996 wird hiermit 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 Kernkraftwerk 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 250 Bq/m³ liegt; diesen Wert sieht die Strahlenschutzkommission als Obergrenze des Normalbereichs an. Darüberliegende Werte treten überwiegend auf in Gebäuden in Gebieten, die aufgrund der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes erhöhte Radon-Vorkommen 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 Berichtsjahr 1996

3,6 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 Kernkraftwerk 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.

Einzelergebnisse für das gesamte Bundesgebiet im Jahr 1996 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die effektive Dosis aus natürlichen Strahlenquellen beträgt im Mittel ca. 2,4 mSv pro Jahr. Das radioaktive Edelgas Radon und seine kurzlebigen Folgeprodukte liefern über Inhalation den Hauptbeitrag zur Strahlenexposition natürlichen Ursprungs mit einer durchschnittlichen effektiven Dosis von ca. 1,4 mSv.
- Die effektive Dosis der zivilisatorischen Strahlenexposition liegt bei ca. 1,6 mSv pro Einwohner und Jahr. Der größte Beitrag wird 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 zur Strahlenexposition durch Kernkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung blieb auch im Jahr 1996 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. Diese Exposition betrifft nur eine sehr kleine Bevölkerungsgruppe. Die Zahl der beruflich strahlenexponierten Personen betrug im Jahr 1996 ca. 340 000. Die mittlere Jahresdosis beläuft sich bei dieser Bevölkerungsgruppe auf 0,3 mSv.
- Die durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl resultierende mittlere Strahlenexposition der

Bevölkerung von 0,11 mSv im Jahr 1986 ging auf weniger als 0,02 mSv zurück.

- Der Beitrag der Strahlenexposition durch die in den vergangenen Jahrzehnten in der Atmosphäre

durchgeführten Kernwaffenversuche zur effektiven Dosis ist weiterhin rückläufig und beträgt 1996 weniger als 0,01 mSv. Seit 1981 wurden keine Kernwaffenversuche in der Atmosphäre durchgeführt.

II. Natürliche Strahlenexposition

Durch natürliche Strahlenquellen ist der Mensch einer mittleren effektiven Dosis von 2,4 mSv pro Jahr ausgesetzt. 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 inneren Strahlenexposition durch Inkorporation radioaktiver Stoffe über Inhalation und Ingestion unterschieden wird.

Die äußere Strahlenexposition beträgt im Mittel 0,7 mSv pro Jahr und setzt sich etwa zu gleichen Teilen aus der kosmischen und terrestrischen Strahlungskomponente zusammen.

Abbildung II.1 zeigt die ortsabhängige Verteilung der äußeren Strahlenexposition im Freien in der Bundesrepublik Deutschland.

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

Die terrestrische Komponente der äußeren Strahlenexposition wird im wesentlichen durch die Gammastrahlung des Kalium-40 sowie durch die Strahlung der Radionuklide aus den natürlichen Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232 verursacht. Der Gehalt an Kalium-40 liegt im Bereich von 40 bis 1 000 Bq pro Kilogramm Trockenmasse (TM). Innerhalb der Uran-238-Zerfallsreihe spielt das Radium-226 die wichtigste Rolle, der Gehalt im Boden schwankt in Deutschland zwischen 10 und 200 Bq pro Kilogramm TM. Der Gehalt an Thorium-232 aus der Thoriumreihe liegt zwischen 8 und 80 Bq pro Kilogramm TM. Die effektive Dosis, verursacht durch terrestrische Strahlung, errechnet sich im Mittel zu 0,41 mSv pro Jahr, wobei die effektive Dosis durch Aufenthalt im Freien 0,07 mSv und in Gebäuden 0,34 mSv beträgt. Dabei nimmt man eine Aufenthaltsdauer von 5 Stunden pro Tag im Freien und 19 Stunden in Gebäuden an. Diese Werte basieren auf einer effektiven Jahresdosis von 0,32 mSv im Freien (Wertebereich 0,06 bis 2,2 mSv) und 0,43 mSv in Gebäuden (Wertebereich von 0,09 bis 2,4 mSv). Die höheren Werte findet man zum Teil über Granitmassiven mit einer erhöhten spezifischen Aktivität der Radioisotope von Radium, Thorium und Kalium.

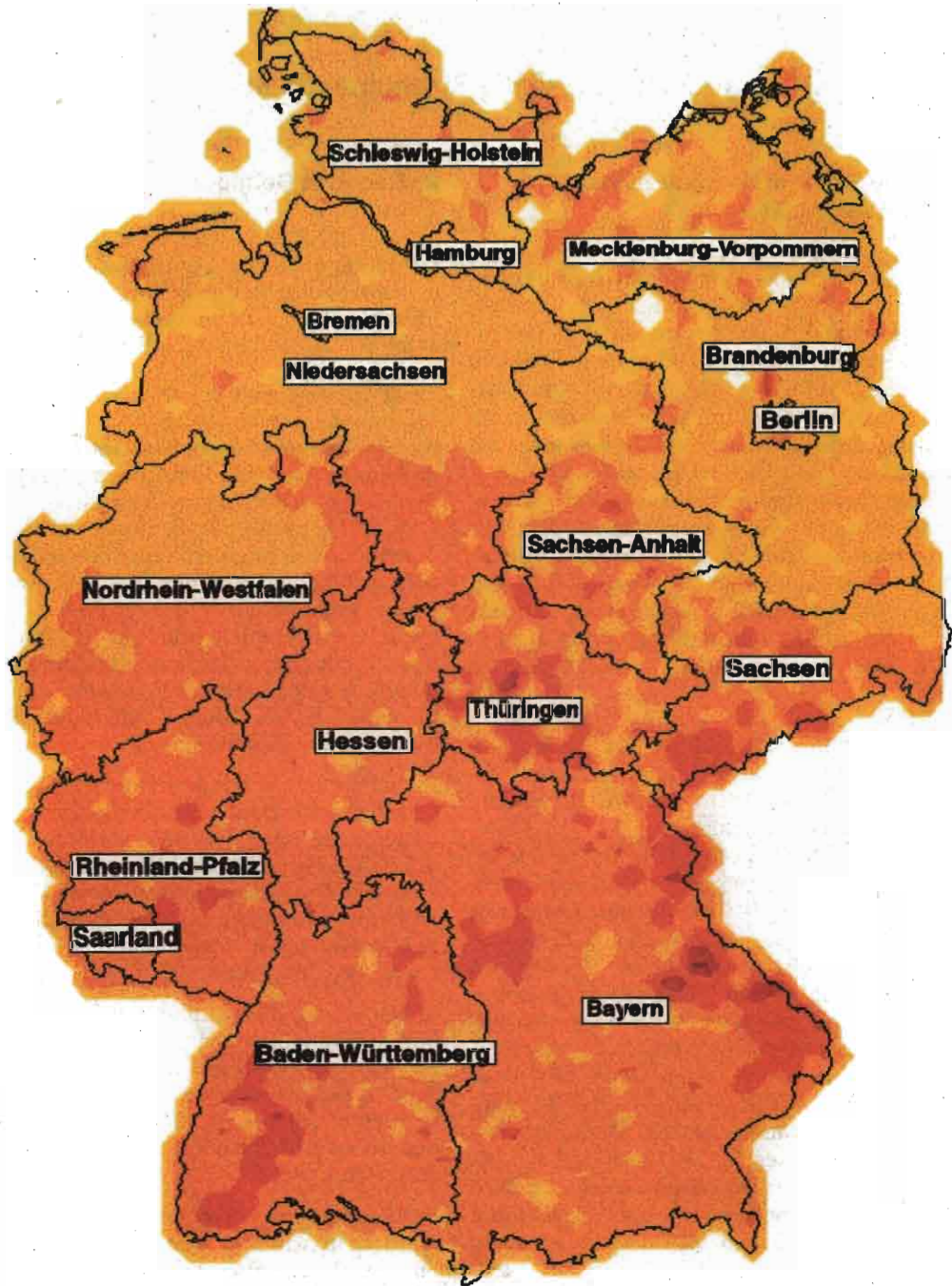
Die interne Strahlenexposition des Menschen aus natürlichen Quellen beträgt im Mittel 1,7 mSv pro Jahr. Allein auf das radioaktive Edelgas Radon und seine Zerfallsprodukte entfallen ca. 1,4 mSv pro Jahr (effektive Dosis durch Aufenthalt im Freien 0,2 mSv; effektive Dosis durch Aufenthalt in Gebäuden 1,2 mSv).

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 Radon wird zur Zeit eine Studie in der Bundesrepublik durchgeführt, deren erste Ergebnisse Ende 1997 vorliegen werden. Vieles deutet schon jetzt darauf hin, daß die biologische Wirkung des Radons noch geringer ist als von der ICRP angenommen wurde.

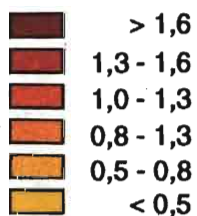
Den Hauptanteil der Strahlenexposition liefern die kurzlebigen Zerfallsprodukte des Radon-222 (Halbwertszeit 3,8 Tage). Das Radon-222 ist ein Zerfallsprodukt des Radiums-226 und gelangt durch Diffusion aus dem Erdboden in die bodennahe Luft. Das eingeatmete Radon und seine Zerfallsprodukte werden im Atemtrakt und in der Lunge unterschiedlich stark abgeschieden bzw. wieder ausgeatmet. Infolge der kurzen Halbwertszeit bewirken die inhomogen abgeschiedenen Radon-Zerfallsprodukte unter Abgabe der biologisch besonders wirksamen Alphastrahlung im wesentlichen eine Exposition des Atemtraktes. Die mittlere Äquivalentdosis der strahlenempfindlichen Zellen der oberen Bronchien ist etwa 5–10 mal höher als diejenige im Alveolarbereich. Die durch das Edelgas Radon selbst verursachte Strahlenexposition ist um mehr als eine Größenordnung niedriger und wird teils durch das im ganzen Körper gelöst verteilte Radon, teils durch das in der Atemluft befindliche Radon verursacht.

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

Abbildung II.1



mSv pro Jahr



Mittlere externe Strahlenexposition
in der Bundesrepublik Deutschland
im Freien 1996

Datenquelle: BZS

Daten aus IMIS

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit, Bonn



III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten

Zum Schutz der Bevölkerung gegen ionisierende Strahlen werden seit ca. 20 Jahren in der Bundesrepublik Deutschland Untersuchungen und Bewertungen der Strahlenexposition durch radioaktive Stoffe in Baumaterialien sowie industriellen Rest- und Abfallstoffen durchgeführt. Es wurde die spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide in mehr als 1 500 Proben bestimmt. Ziel ist es, unter Beobachtung der Entwicklungstendenzen in der Baustoffproduktion und spezieller Gebäudeparameter 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.

Der Gehalt an Radium-226, Thorium-232 und Kalium-40 in Natursteinen, Baustoffen und Industrieprodukten geht aus Tabelle III.1 hervor. Die spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide weist von Material zu Material große Unterschiede auf und zeigt auch innerhalb der Stoffarten eine große Variationsbreite. Unter den Baustoffen natürlichen Ursprungs weisen kieselsäurereiche Magmasteine, insbesondere Granite, vergleichsweise hohe Gehalte an natürlichen Radionukliden auf. Das durch radioaktiven Zerfall aus Radium-226 entstehende Radon-222 ist aus der Sicht des Strahlenschutzes von besonderem Interesse. In konventionellen deutschen Baustoffen wird nur in Ausnahmefällen eine Radium-226-Konzentration von mehr als 200 Bq/kg gemessen. Überschreitungen des bis 250 Bq/m³ reichenden Normalbereiches der Radonkonzentration in Wohnräumen wurden in Verbindung mit der Verwendung von derzeit handelsüblichen Baumaterialien nicht festgestellt.

In einigen Abfällen aus industriellen Verarbeitungsprozessen reichern sich radioaktive Stoffe an, die bei unsachgemäßer Weiterverwendung, z. B. bei ihrem Einsatz als Sekundärrohstoffe im Bauwesen, eine erhöhte Strahlenexposition der Bevölkerung hervorrufen könnten. Deshalb bedürfen diese Materialien einer besonderen Aufmerksamkeit, vor allem unter dem Aspekt der Nutzung von Rohstoffen aus aller Welt und dem gleichzeitigen Gebot, entstehende Abfallstoffe möglichst wieder zu verwenden. Bei der überwiegenden Menge mineralischer Abfallstoffe, z. B. Gips aus der Rauchgasentschwefelung und Rückständen der Kohleverbrennung, wurden jedoch Radionuklidkonzentrationen in dem Niveau gemessen, wie sie in konventionellen Baustoffen vorkommen.

2. Radon in Gebäuden

Tabelle III.2 zeigt eine bundeslandbezogene Übersicht über die Radonkonzentration in Wohnungen als zusammengefaßtes Ergebnis von Radonmessungen über die Dauer von mehreren Monaten bis zu einem Jahr.

Zieht man neben den Radon-Langzeitmessungen die Ergebnisse von Messungen in Häusern in Betracht, die im Rahmen spezieller Untersuchungsaufgaben gewonnen wurden, kann davon ausgegangen werden, daß in schätzungsweise zwischen 1 und 2 % der Häuser Deutschlands der von der Strahlenschutzkommission definierte Normalbereich der Konzentration des Radon in Wohnungen überschritten wird. Diese Gebäude konzentrieren sich auf Regionen mit erhöhtem Radonpotential im Untergrund. Neuere Bauten mit Plattenfundamenten und normgerechtem Schutz gegen Bodenfeuchte weisen auch in diesen Gebieten im Durchschnitt niedrigere Radonkonzentrationen auf als Altbauten.

Es wird derzeit damit gerechnet, daß ca. 2,8 % der Gesamtfläche Deutschlands Gebieten mit erhöhtem Radonpotential zugeordnet werden könnten. Abbildung III.1 verdeutlicht diese Situation. In welcher Häufigkeit in den prognostizierten Gebieten mit erhöhtem Radonpotential erhöhte Radonkonzentrationen in Gebäuden vorkommen, ist durch Radonmessungen zu überprüfen.

In Gebieten mit erhöhtem Radonpotential spielt nicht nur die Radonkonzentration in Wohnungen für die Strahlenexposition der Bevölkerung eine Rolle, sondern es müssen auch die Arbeitsplätze in Gebäuden betrachtet werden, an denen eine erhöhte Strahlenexposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte auftreten kann.

Im Rahmen von verschiedenen Forschungsvorhaben wurden inzwischen Materialien und Baumethoden entwickelt, um auch hochbelastete Häuser sanieren zu können, bzw. in stark radongefährdeten Gebieten radongeschützt zu bauen.

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 im Berichtsjahr 1996 die Ableitung 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 1996 ermittelten Werte der Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abluft bzw. Abwettern zeigen, daß die festgelegten Genehmigungswerte für radioaktive Stoffe eingehalten wurden (Abbildungen III.2 und III.3).

Die aus den übrigen bergbaulichen Anlagen (vor allem industriellen 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 $2 \cdot 10^{15}$ 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.

Kontrollmessungen in der Umgebung der Betriebe haben gezeigt, daß durch Ableitungen 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 Aktivitätskonzentrationen 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 1996 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 natürlich 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 bergbaulichen Hinterlassenschaften (Bergbaubjekte und vom Bergbau beeinflusste Flächen) in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt großräumig erfaßt, radiologisch untersucht und im Hinblick auf mögliche Nutzung bewertet werden. Als Bewertungsgrundlage stehen Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 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 verfügen diese Vollzugsbehörden nunmehr über eine wichtige Erkenntnisgrundlage zur radiologischen Altlastensituation, die auch bei Entscheidungen über Notwendigkeit und Inhalt möglicher expositionsverringender Maßnahmen herangezogen werden kann. Insgesamt lassen die Untersuchungen erkennen, daß großräumige radioaktive Kontaminationen nicht vorliegen.

Für eine Reihe bergbaubedingter Hinterlassenschaften werden vertiefte radiologische Daten benötigt, um eine abschließende Bewertung nach den SSK-Empfehlungen vornehmen zu können. Die hierfür erforderlichen Untersuchungen erfolgen in der 3. Projektphase („Altlastenuntersuchungen“). Ziel ist die genaue Eingrenzung der Flächen, die bergbaubedingt eine erhöhte Umweltradioaktivität aufweisen, sowie die Ermittlung der Ausdehnung und Tiefenverteilung radioaktiv kontaminierter Schichten. Untersuchungen dieser Art wurden bis 1994 an den Standorten Dittrichshütte, Aue/Hakenkrümme und Freital sowie in den Gebieten Gottesberg und Johanngeorgenstadt (Altbergbaugebiete und Uranerzbergbaugebiete) sowie Hettstedt (Abbaugelände von uranvererztem Kupferschiefer) und 1995 in den Verdachtsflächen Johanngeorgenstadt, Annaberg-Buchholz und Mechelgrün-Zobes (Alt- und Uranerzbergbaugebiete) durchgeführt. Im Jahr 1996 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.

Weitere Meßprogramme wurden bis 1996 u. a. in den Gebieten Bärenstein und Marienberg (Alt- und Uranbergbaugebiete), Eisleben-Wimmelburg (Abbaugebiet von uranvererztem Kupferschiefer) sowie im Gebiet Oberrothenbach (Gebiet der Uranerzaufbereitung) und Zwickau (Abbaugebiet und Steinkohle) durchgeführt.

Es wurde mit dem Aufbau eines Fachinformationssystems zur bergbaubedingten Umweltradioaktivität

(FbU) begonnen, in das außer den bereits in der Datenbank A.LAS.KA enthaltenen Informationen insbesondere die Daten aller Meßprogramme einfließen werden. Die Anbindung an ein geographisches Informationssystem ermöglicht eine effektive Aus- und Bewertung der Daten und Informationen.

Bis zum Jahr 1997 sollen die Untersuchungen für alle Verdachtsflächen abgeschlossen sein. Es wird dann ein vollständiger Überblick über die bergbaubedingte Umweltradioaktivität im Fachinformationssystem FbU vorliegen.

Tabelle III.1

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

Material	Ra-226 (Bq/kg TM)	Th-232 (Bq/kg TM)	K-40 (Bq/kg TM)
Baustoffe natürlichen Ursprungs			
saure Magmages Steine	30– 500	17– 310	380–4 000
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

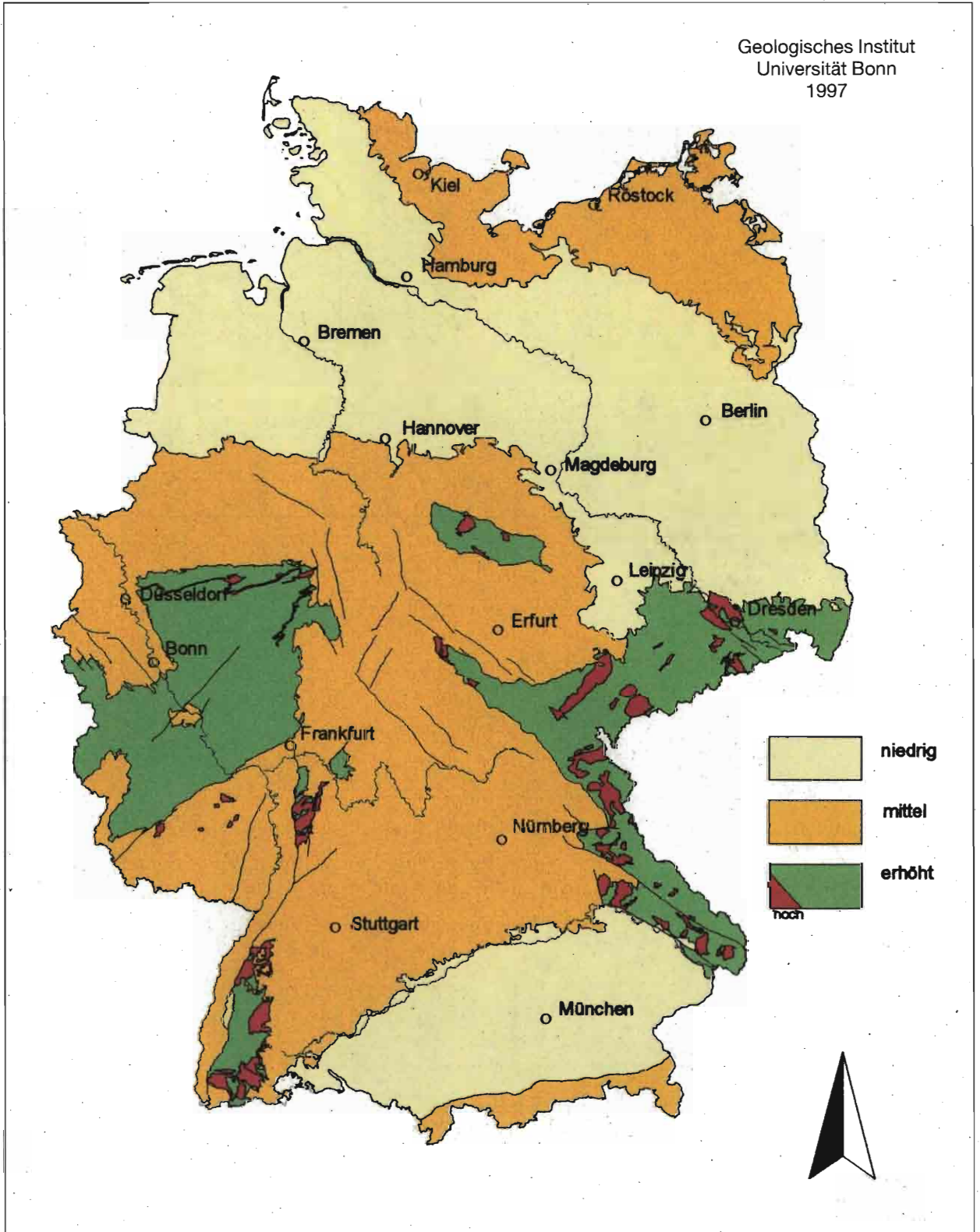
**Regionale Verteilung der Radonkonzentration in Wohnungen
der Bundesrepublik Deutschland**

	Durchschnitt in Bq/m ³	% größer 50 Bq/m ³	% größer 100 Bq/m ³	% größer 250 Bq/m ³
Baden-Württemberg	39	33,2	8,8	1,4
Bayern	41	34,7	7,4	0,9
Berlin	22	2,8	*)	0
Brandenburg	25	5,9	0	0
Bremen	29	10,5	0	0
Hamburg	27	13,9	2,3	0,2
Hessen	39	35,0	6,6	0,6
Mecklenburg-Vorpommern ..	39	30,7	7,8	*)
Niedersachsen	34	24,2	4,6	0,4
Nordrhein-Westfalen	34	23,4	3,1	0,3
Rheinland-Pfalz	52	56,1	11,2	0,9
Saarland	39	37,5	4,0	0,3
Sachsen	44	34,3	12,9	2,2
Sachsen-Anhalt	33	18,5	3,6	*)
Schleswig-Holstein	33	28,5	5,5	0,1
Thüringen	44	33,0	6,2	0,4

*) keine Angaben, da nur wenige Meßergebnisse

Abbildung III.1

Geogenes Radon-Potential in der Bundesrepublik Deutschland



**Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Abwettern bzw. der Abluft
in die Atmosphäre 1996**

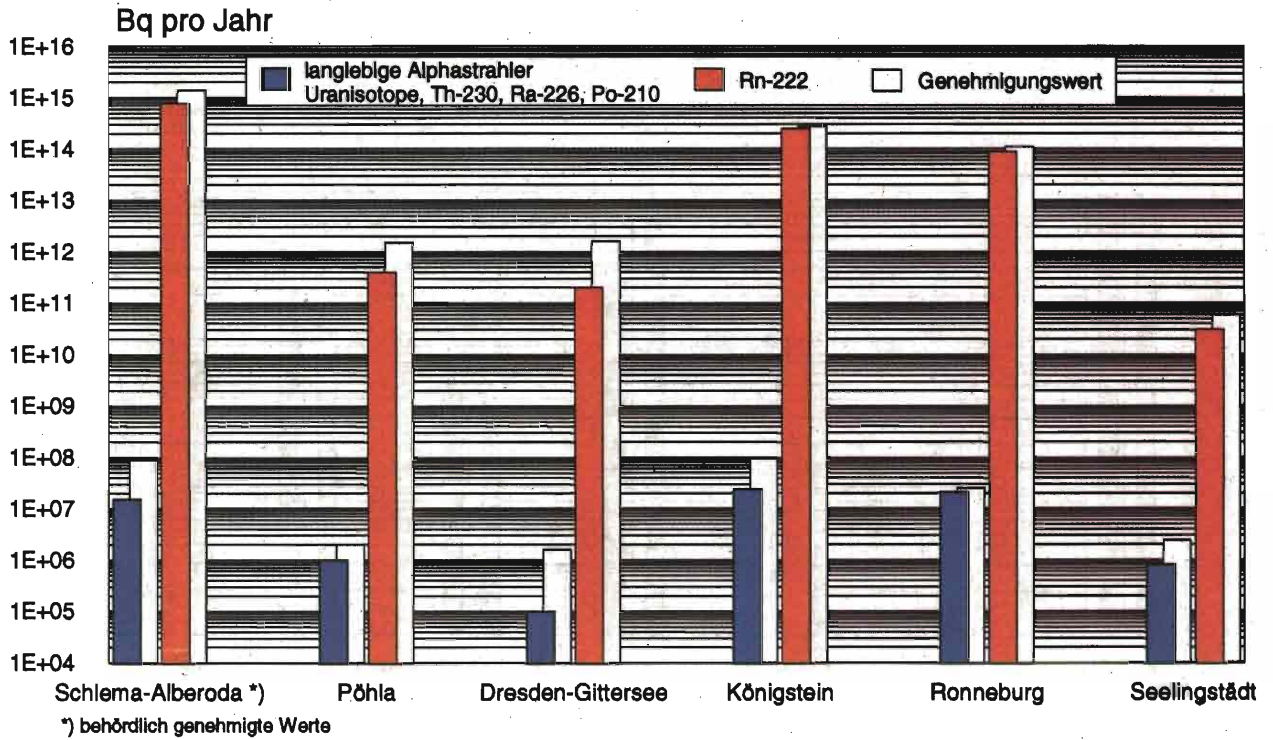
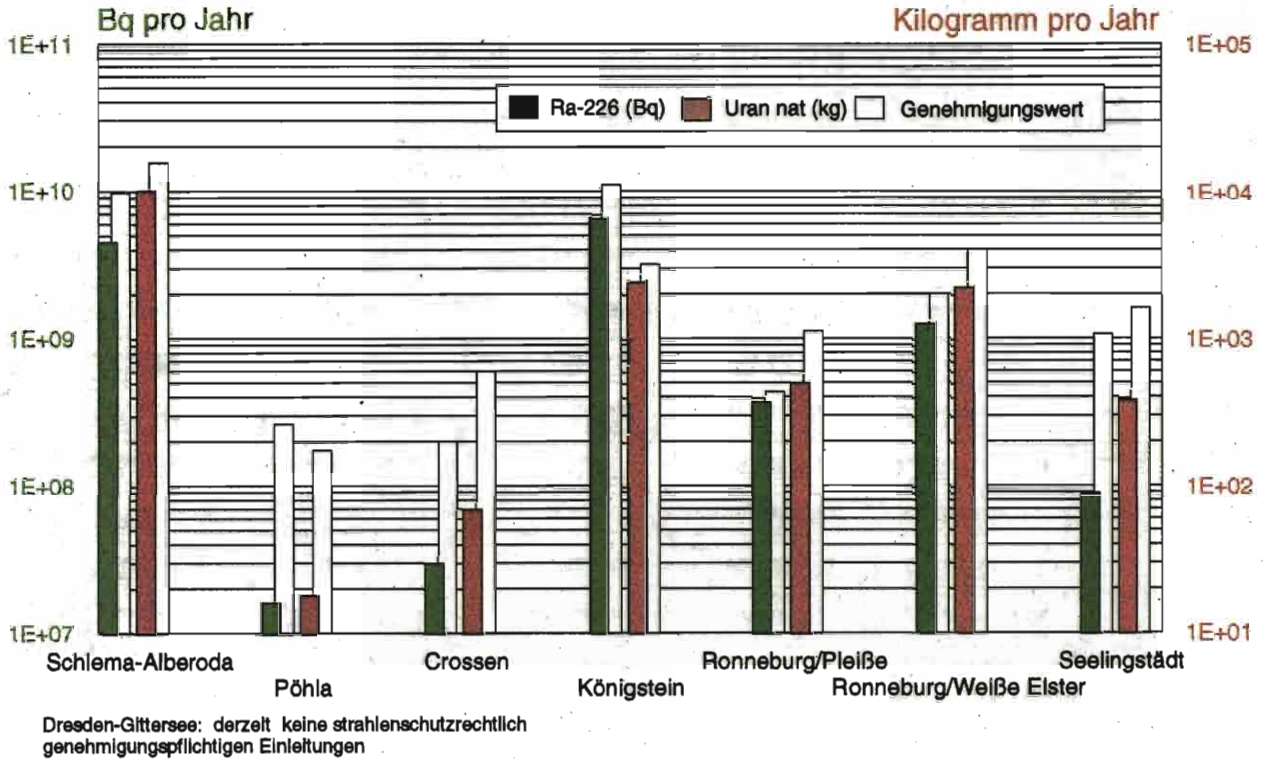


Abbildung III.3

Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Schacht- bzw. Abwässern in die Oberflächengewässer 1996



IV. Zivilisatorische Strahlenexposition

1. Kerntechnische Anlagen

1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

Aus den für das Jahr 1996 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 jährliche 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 1996 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. Damit sind die oberen Werte der Strahlenexposition durch Ableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen deutlich kleiner als die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland.

Der Beitrag der kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland sowie im angrenzenden Ausland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland lag auch 1996 deutlich unter 0,01 mSv pro Jahr und ist damit für das Strahlenrisiko ohne Bedeutung.

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 1996 ermittelten Jahresableitungen radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser von Kernkraft-

werken sind in den Abbildungen IV.1 bis IV.3 angegeben und nach Nuklidgruppen aufgeschlüsselt. Sie liegen in der Größenordnung der Ableitungen der Vorjahre und unterschreiten deutlich die entsprechenden Genehmigungswerte. In Abbildung IV.4 sind die Daten über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf und Geesthacht für das Jahr 1996 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 1996 zusammengestellt. Abbildung IV. 6 enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 1996 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 der Eidgenössischen Kommission zur Überwachung der Radioaktivität 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 1996 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 (Gammabestrahlung), Gammastrahlung am Boden abgelagerter radioaktiver Stoffe, Inhalation und Ingestion. Abbildung IV.7 zeigt als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene 0,003 mSv (1 % des Dosisgrenzwertes nach Strahlenschutzverordnung) und für Kleinkinder 0,006 mSv (2 % des Dosisgrenzwertes) beim Kernkraftwerk Philippsburg. Der größte Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 0,006 mSv (rund 0,7 % des Dosisgrenzwertes) ebenfalls beim Kernkraftwerk Philippsburg.

In Abbildung IV.8 sind die aus den Ableitungen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken resultierenden oberen Werte der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder zusammengestellt. Hierbei wurden ebenfalls ungünstige Verzehr- und Lebensgewohnheiten angenommen, insbesondere für Erwachsene ein hoher Konsum an Flußfisch, der in der Kühlwasserfahne gefangen wurde und für beide Personengruppen der Aufenthalt von 1000 Stunden am Flußufer oder auf Wiesen in Flußnähe. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt 0,0006 mSv (entsprechend rund 0,2 % des Grenzwertes) 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 0,002 mSv für Erwachsene und Kleinkinder im Mündungsgebiet des Neckar ermittelt; am Unterlauf der Weser wurden für Erwachsene 0,0004 mSv und für Kleinkinder 0,0005 mSv berechnet. An Rhein und Main liegen die effektiven Dosen bei 0,0002 mSv, an der Donau bei 0,0004 mSv. Zu den höheren Werten trägt vor allem die äußere Bestrahlung auf Überschwemmungsgebieten bei, die im wesentlichen durch Ablagerungen in früheren Jahren bedingt ist.

Die in Abbildung IV.9 angegebenen Werte für die entsprechenden Strahlenexpositionen durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren stammen aus den Jahresberichten und aus zusätzlichen Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf und Geesthacht. Die Abbildung weist für die effektive Dosis im Jahr 1996 als höchsten Wert 0,037 mSv (rund 12 % des Grenzwertes) für Erwachsene und 0,064 mSv (rund 21 % des Grenzwertes) für Kleinkinder beim Forschungszentrum Jülich auf. Der höchste Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 0,065 mSv (rund 7 % des Grenzwertes) ebenfalls beim Forschungszentrum Jülich. Bedingt durch extreme Wetterlagen und höhere Ableitungen von C-14 liegen diese Dosiswerte über den Vorjahreswerten von 0,002 mSv effektive Dosis für Erwachsene,

sowie 0,0033 mSv effektive Dosis und 0,0071 mSv Schilddrüsendosis für Kleinkinder. Läßt man Bereiche am Betriebszaun, die landwirtschaftlich nicht genutzt wurden, außer Betracht, reduzieren sich die für 1996 berechneten Dosen um mehr als den Faktor 3.

Für die Strahlenexposition über das Abwasser aus Kernforschungszentren ergibt die Abschätzung aufgrund von Meßwerten, die bei radiologischen Untersuchungen ermittelt wurden, einen oberen Wert von 0,02 mSv pro Jahr. Nach Angaben aus den Jahresberichten der Forschungszentren Karlsruhe, Rossendorf und Jülich liegen die oberen Werte für die effektive Dosis für diese Forschungszentren im Jahr 1996 bei 0,014 mSv, 0,005 mSv bzw. bei 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 0,0005 mSv (rund 0,2 % des Grenzwertes), der höchste Wert der Lungendosis 0,001 mSv für Kleinkinder (rund 0,1 % des Grenzwertes).

Die durch die Ableitung 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.4 aufgeführt. Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe im Jahr 1996 mit der Abluft ermittelte Wert der effektiven Dosis für den Erwachsenen betrug 0,0005 mSv, für Kleinkinder 0,009 mSv; dies sind ca. 0,2 % bzw. 0,3 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Die Lungendosis errechnete sich zu 0,0025 mSv für Erwachsene und 0,0048 mSv für Kleinkinder (ca. 0,3 % bzw. 0,5 % des Grenzwertes). Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe im Jahr 1996 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 Ableitun-

gen des jeweiligen Standortes erfaßt und bei der Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung berücksichtigt.

Der Betrieb kerntechnischer Anlagen in Nachbarländern (Tabelle IV.1) führte 1996 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 oberer Werte bis zu 0,01 mSv pro Jahr; den größten Beitrag zur Schilddrüsendosis liefert der Weide-Kuh-Milch-Pfad. Bei den im Rahmen der Umgebungsüberwachung durchgeführten Messungen des Radiojodgehaltes von Milchproben aus grenznahen Weidegebieten wurde im Berichtszeitraum Jod-131 in Milch nicht nachgewiesen.

2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin

Die medizinische Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe 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 so weit 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 neuere Verfahren wie z. B. die Computertomographie, die einen erheblichen diagnostischen Fortschritt gebracht haben, sind jedoch mit einer höheren 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 tritt. 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. die interventionelle Radiologie, denn dadurch können Operationen mit wesentlich höheren Risiken vermieden werden. Die medizinisch bedingte Strahlenexposition ist ungleichmäßig auf die Bevölkerung verteilt, da ältere Personen wesentlich stärker betroffen sind als jüngere. Es ist deshalb nicht zulässig, ein mittleres Strahlenrisiko für die Bevölkerung abzuleiten. Be-

sonders viele und z. T. auch dosisintensive Anwendungen werden gerade bei Schwer- und Schwerstkranken notwendig. Es ist daher falsch, wenn der aus diesen Untersuchungen resultierende Anteil an der kollektiven Dosis in Risikoabschätzungen zur strahlenbedingten Krebsmortalität einbezogen wird, ohne daß alters- und geschlechtsspezifische Risikofaktoren berücksichtigt werden. Aus einer durch das Bundesamt für Strahlenschutz erhobenen repräsentativen Stichprobe aus Akutkrankenhäusern liegen Daten über die Altersverteilung stationärer Patienten von 7 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 4 Altersklassen eingeteilt. Für diese Altersklassen wurden aus den zusätzlichen Lebenszeitriskiken nach ICRP 60 mittlere Risikoeffizienten ermittelt. Die relativen Risiken dieser 4 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 oben genannten 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.15 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 und der Ultraschalluntersuchungen festzustellen. 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, wodurch sich das Langzeitstrahlenrisiko bezüglich der Tumorentstehung vermindert. 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 zurückzu-

führen ist. Eine erhebliche Dosisreduzierung bei der Durchleuchtung ist durch die Anwendung der gepulsten Durchleuchtung möglich.

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

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

3.1 Industrierzeugnisse und technische Strahlenquellen

Bestimmte Industrierzeugnisse wie z. B. wissenschaftliche Instrumente, elektronische Bauteile, Leuchtstoffröhren, Rauch- und Feuermelder, Gasglühstrümpfe, Schweißelektroden und keramische Gegenstände enthalten radioaktive Stoffe verschiedener Art und Aktivität. Der Umgang mit diesen Erzeugnissen wird durch ein differenziertes Anzeig- 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. Bei den Qualitätskontrollen werden auch Röntgengeräte benutzt. 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 und die Röntgenverordnung den Einsatz von Röntgengeräten mit diesen Industrierzeugnissen, 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 werden 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 340 037, davon im Bereich Medizin 241 052. Abbildung IV.11 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 0,30 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, daß bei dem größten Teil aller Überwachten (85 %) während des ganzen Jahres die untere Meßbereichsgrenze des Personendosimeters von 0,2 mSv nicht überschritten wird, was im Bereich Medizin auf 89 %, in den nichtmedizinischen Bereichen auf 73 % der Überwachten zutrifft. Bei den verbleibenden Personen ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 1,8 mSv.

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) im Berichtsjahr betrug 95 Personen-Sv.

Die Beiträge typischer Tätigkeitszweige zur Kollektivdosis zeigt die Abbildung IV.12. Einige Angaben über die berufliche Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken sind in den Abbildungen IV.13 und IV.14 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. Bei diesen Inkorporationsmessungen wurden nur geringfügige, beruflich bedingte Körpergehalte radioaktiver Stoffe ermittelt. Alle Aktivitätszufuhren, die gemäß Richtlinie für die Ermittlung der Körperdosen bei innerer Strahlenexposition aus den ermittelten Körperaktivitätswerten berechnet wurden, liegen unterhalb 1 % der radionuklidspezifischen Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr.

4.3 Berufliche Strahlenexposition durch Radonfolgeprodukte in den neuen Bundesländern

In den neuen Bundesländern wird gemäß Einigungsvertrag vom 31. August 1990 nach fortgeltendem Recht der ehemaligen DDR die Strahlenexposition

durch Inhalation kurzlebiger Radonzerfallsprodukte im Bergbau und bei anderen Tätigkeiten, die nicht Umgang mit radioaktiven Stoffen oder Anwendung ionisierender Strahlung gemäß Strahlenschutzverordnung sind, überwacht. 1996 wurde diese Überwachung bei etwa 3 000 Personen vorgenommen, von denen fast 80 % Sanierungsarbeiten in den Betrieben der Wismut GmbH ausführten.

Mehr als ein Drittel der Beschäftigten der Wismut GmbH wurde 1996 mit personengebundenen Geräten (am Körper getragene spezielle Meßgeräte mit akkumulatorgetriebener Probenahmepumpe, Filter, Kernspur- und Thermolumineszenzdetektoren) zur Messung der Strahlenexposition überwacht. Für alle anderen überwachten Personen wird die Strahlenexposition durch repräsentative Messungen an Arbeitsplätzen und Ermittlung der unterschiedlichen Aufenthaltszeiten bestimmt.

Die Kollektivdosis der überwachten beruflich durch Radonzerfallsprodukte strahlenexponierten Personen betrug 1996 einschließlich der Exposition durch langlebige Alphastrahler und äußere Bestrahlung ca. 10,7 Personen-Sv. Bei Berechnung der Dosis gemäß ICRP 65 (s. Kapitel II) würden sich für die Kollektivdosis lediglich 6,8 Personen-Sv ergeben. Im nachfolgenden Text werden die auf dieser Grundlage berechneten Dosisangaben in Klammern gesetzt. Fast 8,5 Personen-Sv (5,7 Personen-Sv) entfielen auf die Beschäftigten der Wismut GmbH. Bei diesen wurden auch die Expositionen durch langlebige Alphastrahler und durch äußere 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 vernachlässigbaren Beitrag, der pauschal mit insgesamt 10 % der ermittelten Dosis berücksichtigt wurde.

Die mittlere effektive Jahresdosis aller durch Radonzerfallsprodukte beruflich exponierten Überwachten betrug 3,6 mSv (2,3 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 erhielten die Beschäftigten in einer wissenschaftlichen Einrichtung und in einem Radiumbad mit 8,2 mSv (4,1 mSv), gefolgt von den Beschäftigten in Schauhöhlen und Schaubergwerken mit 4,4 mSv (2,2 mSv), in Wasserbetrieben mit 4,3 mSv (2,1 mSv), in der Wismut GmbH mit 3,6 mSv (2,4 mSv), bei Förderung und Sanierung im Nichturanbergbau mit 3,3 mSv (1,7 mSv), in Bergsicherungsbetrieben mit 2,6 mSv (1,3 mSv) und in Schachtbaubetrieben mit 2,0 mSv (1,0 mSv). Die insgesamt 57 Beschäftigten (1,9 %) mit einer jährlichen effektiven Dosis von mehr als 15 mSv (Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B) lieferten einen Beitrag von 10,1 % zur Kollektivdosis. Nach ICRP-65 würden lediglich 3 Personen (0,1 %) eine Dosis größer als 15 mSv erhalten und damit einen Beitrag von 0,9 % zur Kollektivdosis liefern.

Im Jahr 1996 gab es keine Grenzwertüberschreitungen bei den durch Radonzerfallsprodukte beruflich exponierten überwachten Personen.

4.4 Strahlenexposition des Flugpersonals

Die Höhe der Strahlenexposition wird maßgeblich durch Flughöhe, Flugdauer und die geomagnetische Breite bestimmt. Der Strahlenpegel ist im Bereich des Äquators am niedrigsten und steigt mit zunehmender geomagnetischer Breite an. So liegt die Äquivalentdosisleistung bei Flügen in einer Höhe von etwa 10 bis 12 km bei geomagnetischen Breiten vom Äquator bis zu 70° Nord im Bereich von 0,002 mSv/h bis 0,009 mSv/h. Bei Annahme einer über Reiseflughöhen und -routen nördlich 50° Nord gewichteten Äquivalentdosisleistung von 0,006 mSv/h und einer Flugzeit in Reiseflughöhe von 875 Stunden im Jahr ergibt sich für das Flugpersonal auf diesen Routen eine mittlere jährliche Strahlenexposition von etwa 6 mSv.

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 1996, enthält Tabelle IV.2. 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 angeführt, soweit abhanden gekommene radioaktive Quellen gefunden wurden.

6. Fall-out von Kernwaffenversuchen

In den Jahren 1945 bis 1980 wurde eine große Anzahl von oberirdischen Kernwaffenversuchen durchgeführt; seit 1981 gab es nurmehr unterirdische Atomtests. 1996 zündete China zwei unterirdische Kernexplosionen, Frankreich führte einen Kernwaffenversuch durch. Aus diesen unterirdischen Versuchen resultiert keine zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland.

Der allgemeine Pegel der Umweltradioaktivität durch die früheren Kernwaffenversuche in der Atmosphäre ist in den letzten 30 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 1996)

Land	Anlage/Standort	Entfernung zur deutschen Grenze
Schweiz	Kernkraftwerk Beznau (2 Blöcke)	ca. 6 km
	Paul Scherrer Institut Villingen/Würrenlingen	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

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1996**

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
Oktober 1995 Nachmeldung	Feststellung des Verlusts eines Meßgerätes mit eingebautem Prüfstrahler (Ra-226 18,5 MBq, Ortsdosisleistung 2 µSv/h in 1 m) in einem Krankenhaus	Vermutlich Diebstahl	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und Abschirmung gering	Der Verbleib des Gerätes konnte nicht ermittelt werden. Alle nicht mehr verwendeten Strahlenquellen werden abgegeben
10. 1. 1996	Fund eines Therapie-dosimeters alter Bauart mit einem Strahler (Ra-226 18,5 MBq) in einer Klinik	Unterlassene Entsorgung bei Aufhebung der Genehmigung	Zusätzliche Exposition einer beruflich strahlenexponierten Person ca. 0,3 mSv pro Jahr	Strahler sichergestellt; Hinweis an ehemalige Genehmigungsinhaber
11. 1. 1996	Verpuffung einer flüssigen Materialprobe in einem Labor für Kernchemie (Co-60 20 Bq; Cs-137 20 Bq; Th-228 1,5 kBq; Th-232 1,5 kBq; U-235 185 Bq)	Gasbildung durch organische Substanzen	Kontamination von zwei Labormitarbeitern	Ganzkörpermessungen und Ausscheidungsanalysen ergaben keine Hinweise auf Inkorporation
18. 1. 1996	Sr-90/Y-90-Kontamination in einem Gebäude (22 Bq/cm ²), Fund von 2 Prüfstrahlern (Co-60 je 1 MBq) und 2 Strahlern (Co-60 je 100 kBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential bei unsachgemäßer Handhabung vorhanden	Ordnungsgemäße Entsorgung
18. 1. 1996	Betreten des Kontrollbereichs während einer Durchstrahlungsprüfung	Unzureichende Aufsicht	Strahlenexposition einer Person (< 5 mSv)	Belehrung
23. 1. 1996	Fund von 21 Ionisationsrauchmeldern (Kr-85 Ges.-Akt. 388,5 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential aufgrund des Radionuklids und der Aktivität gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
24. 1. 1996	Fund eines Prüfstrahlers (Uran [nat] 15,7 MBq) auf einem Schrottplatz	Unzulässige Entsorgung	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und Umhüllung gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
24. 1. 1996	Kontamination eines Versandstücks (C-14 150 kBq)	Fehlerhafter Flaschenschluß	Gefährdungspotential aufgrund des Radionuklids und der Aktivität gering	Ordnungsgemäße Entsorgung der Verpackung
25. 1. 1996	Verschlußstörung (unvollständiges Schließen) an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung (Co-60)	Lagerschaden	Patient konnte sofort geborgen werden; geringfügige Strahlenexposition des beteiligten Personals (ca. 0,02 mSv)	Gerät bis zum Abschluß der Reparatur außer Betrieb
25. 1. 1996	Fund einer Meßeinrichtung mit einem Strahler (Kr-85 1 GBq) bei der Anlieferung einer Maschine	Fehlende Information	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und des Radionuklids sehr gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

noch Tabelle IV.2

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
31. 1. 1996	Brand im Vorraum einer Abklinganlage für radioaktive Stoffe in einem Institut	Fahrlässigkeit	Keine Gefährdung von Personen und der Umwelt; Ausscheidungsanalysen ergaben bei 4 Pers. H-3-Aktivitäten unterhalb der Interpretationsschwelle; Wischtests vom Brandort und Untersuchung des Löschwassers ergaben geringfügige Kontaminationen mit H-3 u. Cr-51	Auf Pflicht zur unverzüglichen Meldung nach Strahlenschutzverordnung bei Brand hingewiesen
6. 2. 1996	Führungsschlauch eines Afterloadinggerätes wurde mit 5 Ir-192 Seeds (Ges.-Akt. 180 MBq) in Klinikwerkstatt gegeben	Unterlassene Kontrollmessung und mangelhafte Bestandskontrolle	Ein Beschäftigter erhielt eine Dosis von 0,4 mSv.	Ordnungswidrigkeitsverfahren
9. 2. 1996	Fund von Behältnissen mit Thoriumoxid (Masse > 100 g) bei einem Entsorgungunternehmen	Unerlaubte Abgabe durch Unbekannte im Rahmen einer Schadstoffsammlung	Nach dem Ereignisablauf sind Expositionen durch Kontamination oder Inkorporation unwahrscheinlich. Die äußere Strahlenexposition ist unerheblich	Ordnungsgemäße Entsorgung
12. 2. 1996	Verlust eines Ni-63-Strahlers (370 MBq) während des Versands	Sendungen verwechselt	Gefährdungspotential gering; Verpackung unbeschädigt	Strahler wiedergefunden, Logistik beim Versand verbessert
20. 2. 1996	Vertrieb nicht bauartzugelassener Ionisationsrauchmelder (Am-241 37 kBq)	Import aus dem Ausland	Kein Gefährdungspotential bei intakten Rauchmeldern zu vermuten	Vertrieb untersagt
21. 2. 1996	Störung des Quellenrückholmechanismus an einem Afterloadinggerät (Ir-192) in einem Krankenhaus	Defekte Antriebseinheit	Keine, da keine Patientenbestrahlung stattfand	Keine Patientenbestrahlung bis zur Reparatur; zusätzliche Wartungsprüfpunkte festgelegt
27. 2. 1996	Vertrieb nicht bauartzugelassener Ionisationsrauchmelder (Am-241 je 37 kBq)	Import aus dem Ausland	Kein Gefährdungspotential bei intakten Rauchmeldern zu vermuten	Vertrieb untersagt
29. 2. 1996	Fund von 10 Ionisationsrauchmeldern (Kr-85 Ges.-Akt. 185 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential aufgrund des Radionuklids und der Aktivität gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
7. 3. 1996	Verlust eines I-131-Aktivitätsnormals (2,6 MBq) in einer Klinik	Diebstahl aus Tresor	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und der Halbwertszeit gering	Ermittlungen blieben ohne Ergebnis. Zugriffssicherheit wurde verbessert

noch Tabelle IV.2

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
8. 3. 1996	Explosion bei der Reinigung natriumbehalteter Komponenten einer Versuchsanlage, in der u.a. mit abgereichertem Uran umgegangen wurde, in einem Forschungszentrum	Entzündung von Lösungsmitteln	Keine; radioaktive Stoffe wurden nicht freigesetzt	
14. 3. 1996	Feststellung der Undichtheit eines zur Entsorgung vorgesehenen Strahlers (Ra-226)		Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
15. 3. 1996	Nach einer Materialprüfung wurde der Strahler (Ir-192 1,3 TBq) nicht vollständig in das Gerät zurückgeführt, wodurch der Prüfer kurzzeitig exponiert wurde	Unachtsamkeit	Strahlenexposition durch Nutzstrahlung, Personendosis des Prüfers betrug 0,8 mSv	Durchführung einer außerordentlichen Strahlenschutzbelehrung
18. 3. 1996	Sicherstellung von oberflächenkontaminierten Versandstücken (bis zu 17 Bq/cm ²) einer Luftfrachtsendung auf einem Flughafen	Unzulängliche Verpackung	Geringe Kontamination der Kleidung eines Frachtmitarbeiters	Ganzkörpermessung ohne Hinweise auf Inkorporation, Versandstücke neu verpackt, Ordnungswidrigkeitsverfahren
19. 3. 1996	Störung bei der Strahlerrückführung an einem Afterloadinggerät (Ir-192 200 GBq) in einer Klinik	Schwergängigkeit des Antriebssystems durch Verschmutzung	Keine Exposition des beteiligten Personals, zusätzliche Tumordosis beim Patienten ca. 2,8 Gy	Zusätzliche Prüfung bei der Wartung; Erneuerung des Antriebs alle 3 Jahre
19. 3. 1996	Fund eines Prüfstrahlers (Cs-137 360 kBq)	Bei Hausdurchsuchung gefunden	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität gering	Strahler sichergestellt
21. 3. 1996	Unvorschriftsmäßige Beförderungen von Abschirmteilen aus abgereichertem Uran		Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und der Umhüllung sehr gering	Ordnungsgemäßer Weitertransport wurde veranlaßt
22. 3. 1996	Fund von 6 Ionisationsrauchmeldern (Kr-85 Ges.-Akt. 111 MBq) und einem Prüfstrahler (Sr-90/Y-90 600 kBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
28. 3. 1996	Zusendung einer kontaminierten Meßzelle (Co-60 ca. 25 kBq) eines Wasseranalysegerätes aus dem Ausland an eine Servicefirma	Unzureichende Strahlenschutzkontrolle beim ausländischen Absender	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität gering	Dekontamination durchgeführt und radioaktiven Abfälle ordnungsgemäß entsorgt
28. 3. 1996	Abgabe von 107 MBq I-131 aus einem Krankenhaus in das öffentliche Abwassernetz	Technischer Defekt in der Abklinganlage (Relaisfehler)	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und Vermischung gering	Sicherheitstechnische Verbesserungen

noch Tabelle IV.2

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
2. 4. 1996	Verkehrsunfall eines Fahrzeugs mit radioaktiven Versandstücken (I-123 Ges.-Akt. 717 MBq; I-131 Ges.-Akt. 8,1 MBq; Tl-201 Ges.-Akt. 552 MBq)	Fahrfehler	Keine; Versandstücke blieben unversehrt	
28. 4. 1996	Fund eines alten Radium-Emanators auf einem verlassenen Hinterhof	Unterlassene Entsorgung	Keine Kontaminationen feststellbar; äußere Strahlenexposition bei unsachgemäßer Handhabung nicht auszuschließen	Ordnungsgemäße Entsorgung
2. 5. 1996	Fund von sechs medizinischen Ra-226 -Strahlern (je 185 MBq) in einem Abschirmbehälter im Keller eines Hauses	Unzulässige Mitnahme aus einem Krankenhaus Ende der 50er Jahre	Eine erhöhte Strahlenexposition ist aufgrund der Verpackung und Aufbewahrung auszuschließen	Strahler wurden sichergestellt
6. 5. 1996	Fund von 4 in Meßgeräten eingebauten Quellen (Pu-239 je 37 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität bzw. Abschirmung gering	Quellen wurden sichergestellt
14. 5. 1996	Lokale Hautkontamination (S-35 30 Bq) während eines Experiments	Präparateträger rutschte aus der Pinzette in die radioaktive Lösung	Geringe Exposition der Haut (ca. 0,5 mSv)	Belehrung
21. 5. 1996	Nicht angezeigter Export von acht Ionisationsrauchmeldern (Am-241 je 2,8 kBq) mit einer industriellen Anlage	Unterlassene Anzeige	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität sehr gering	Information an zuständige ausländische Behörde veranlaßt; Bußgeldverfahren
22. 5. 1996	Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90/Y-90 600 kBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
22. 5. 1996	Fund eines Containers mit 10 Strahlern (Co-60 Ges.-Akt. 20 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Keine, da Container unter der Erde gelagert war	Ordnungsgemäße Entsorgung
29. 5. 1996	Fund einer in einem Meßgerät eingebauten Quelle (Pu-239 37 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität bzw. Abschirmung gering	Quelle sichergestellt
Mitte Juni 1996	Sicherstellung von 25 radioaktiven Tabletten (Fe-59 3,7–3,9 kBq/Tablette, Co-60 270 bis 300 Bq/Tablette) zur Krebstherapie	Nichtbeachtung der gesetzlichen Bestimmungen	Eine Schädigung des Patienten ist nicht zu erwarten	Behördliche Ermittlungen

noch Tabelle IV.2

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
19. 6. 1996	Verkehrsunfall bei der Beförderung eines Feuchte-/Dichtemeßgerätes (Am-241 1480 MBq, Cs-137 296 MBq)	Fahrfehler	Keine, Strahler blieben unversehrt	
25. 6. 1996	Mo-99/Tc-99m-Generator mit zu hoher Aktivität per Luftfracht befördert	Vorzeitiger Versand durch ausländischen Absender	Keine, da nur geringfügig erhöhte ODL am Transportbehälter	Rückführung an den Absender
26. 6. 1996	Verlust von vier Ionisationsrauchmeldern (2 Melder Am-241 je 2,8 kBq; 2 Melder Am-241 je 5 kBq)	Bei Einbruch in Firma entwendet	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität gering	Polizeiliche Ermittlungen
26. 6. 1996	Feststellung des Verlusts eines Strahlers (Cs-137 170 MBq) aus einer Füllstandsmeßanlage	Vermutlich Diebstahl	Gefährdungspotential bei unsachgemäßer Handhabung vorhanden	Bevölkerung wurde über den vermißten Strahler informiert. Kriminalpolizeiliche Ermittlungen blieben ohne Ergebnis
6. 7. 1996	Fund von 3 Ionisationsrauchmeldern (Pu-239 Ges.-Akt. 55 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Kein Gefährdungspotential bei intakten Rauchmeldern	Ordnungsgemäße Entsorgung
12. 7. 1996	Verlust eines Prüfstrahlers (Sr-90 23 MBq) in einem Krankenhaus	Unzureichende Kontrolle	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität gering	Behördliche Ermittlungen
23. 7. 1996	Verschlußstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung (Co-60)	Abriß aller fünf Schweißpunkte an einer Mitnehmerscheibe des Quellenantriebs (Ermüdungsbruch)	Das die Bergung des Patienten durchführende Personal erhielt keine meßbaren Dosen	Schaden behoben und gesonderte Sachverständigenprüfung angeordnet
5. 8. 1996	Funktionsstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung (Co-60 111 TBq) in einem Krankenhaus	Verkleben des Endschalters an dem Verschlußschieber	Keine, da Strahler ordnungsgemäß zurückgeführt wurde	Fehler behoben
2. 9. 1996	Fund einer mind. 36 Jahre alten Laborwaage, in der 3 Ra-226-Strahler (Ges.-Akt. ca. 4 MBq) montiert waren, in einer Schrottlieferung bei der Eingangskontrolle	Unzulässige Entsorgung	Keine Kontaminationen feststellbar; äußere Strahlenexposition gering	Die radioaktiven Bauteile wurden ordnungsgemäß entsorgt. Die Belegung mit Ra-226 diente vermutlich der Vermeidung statischer Aufladung und ist heute nicht mehr gebräuchlich
2. 9. 1996	Fund von C-14-markierten organischen Verbindungen (30 GBq) und einer S-35-Verbindung (189 MBq) im Nachlaß einer Firma	Ungenehmigte Lagerung	Nicht zu erwarten, da ordnungsgemäße Verpackung und ODL an der Oberfläche gering	Ordnungsgemäße Entsorgung; staatsanwaltschaftliche Ermittlungen

noch Tabelle IV.2

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
2. 9. 1996	Der Strahler eines Gammadiographiergerätes ließ sich nicht vollständig in das Gerät zurückbewegen	Verformung des Ausfahrtschlauches infolge Herunterreißen des Gerätes von einem hochgelegenen Prüfplatz	Die zwei an der Bergung des Strahlers beteiligten Personen erhielten je eine Dosis von 1,4 mSv	Verbesserte Absicherung
3. 9. 1996	Fund von 2 Schulquellen auf dem Schrottplatz einer Firma (Kr-85 185 kBq; Cs-137 37 kBq)		Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität sehr gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
4. 9. 1996	Fund einer Ra-Be Neutronenquelle (111 MBq) im Keller eines ehemaligen Schulgebäudes	Unterlassene Entsorgung bei Auflösung der Schule	Nicht zu vermuten, da Abschirmung intakt und kein längerer Aufenthalt neben der Quelle stattfand	Quelle sichergestellt; staatsanwaltschaftliche Ermittlungen
4. 9. 1996	Fund von 48 Ionisationsrauchmeldern (Pu-239 je 4 MBq) in einer Garage einer Universität	Unzulässige Lagerung	Kein Gefährdungspotential bei intakten Rauchmeldern	Ordnungsgemäße Entsorgung
11. 9. 1996	Auf einer Baustelle wurden zwei Feuchte-/Dichtemeßsonden (Am-241 1480 MBq, Cs-137 296 MBq) von einem Lkw überrollt	Unachtsamkeit	Keine; Strahler blieben unversehrt	
19. 9. 1996	In einem Krankenhaus gelangte radioaktiver Abfall (ca. 10 l Lösung mit ca. 30 MBq C-14) in den nichtradioaktiven Müll und wurde verbrannt	Nichtbeachtung der Strahlenschutzanweisung	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und des Radionuklids sowie des Beseitigungsweges sehr gering	Strahlenschutzanweisung wurde erweitert (Behandlung des radioaktiven Abfalls nur durch besonders belehrte Personen)
24. 9. 1996	Fund von drei Füllstandsmeßeinrichtungen mit je einem Co-60 Strahler (130 MBq, 130 MBq, 370 MBq) in einem stillgelegten Betrieb	Unterlassene Entsorgung bei Betriebsstilllegung	Erhöhte Strahlenexposition nicht zu vermuten, da zwei Füllstandsmeßeinrichtungen ordnungsgemäß eingebaut waren und die dritte Einrichtung sich in einem verschlossenen Lageraum befand	Strahler sichergestellt, staatsanwaltschaftliche Ermittlungen
25. 9. 1996	Import einer Maschine, die eine Meßanlage mit Kr-85 (13,4 GBq) enthielt	Erforderliche Einfuhranzeige wurde unterlassen	Keine, da Meßanlage ordnungsgemäß eingebaut	
30. 9. 1996	Feststellung eines Erzes mit einer spezif. Aktivität von 2,1 kBq/g (214 kg) bei der Grenzkontrolle	Erforderliche Einfuhranzeige lag nicht vor	Keine	Ordnungsgemäße Zwischenlagerung bis zur Rückführung ins Ausland

noch Tabelle IV.2

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
2. 10. 1996	Hängenbleiben der Quelle beim Rücktransport in die Ruhestellung an einer medizinischen Gammastrahlungseinrichtung	Kollision zwischen Strahlerkopf und -tisch	Zusätzliche Exposition des Patienten (ca. 5 % der Therapiedosis)	Reparatur
4. 10. 1996	Verkehrsunfall eines Kleintransporters mit einem radioaktiven Versandstück (Rb/Kr-Generator 220 MBq Rb)	Fahrfehler	Keine; Versandstück blieb unversehrt	
13. 11. 1996	Fund von 2 Ionisationsrauchmeldern (Kr-85 Ges.-Akt. 37 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential aufgrund des Radionuklids und der Aktivität sehr gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
14. 11. 1996	Versehentliche Rückführung eines unbestrahlten Brennelements aus dem Ausland	Versäumnisse beim ausländischen Empfänger	Keine, da ordnungsgemäßes Transportgebilde	
18. 11. 1996	Fund eines Transportbehälters mit 2 Ra-226-Nadeln von je 370 MBq	Behälter war im Schrank eines Arbeitszimmers abgestellt	Eine Strahlenexposition von Personen ist nicht auszuschließen	Behördliche Ermittlungen
26. 11. 1996	Fund von 2 Flaschen mit 125 g Thoriumoxid und 25 g Uranylacetat bei der Auflösung eines Chemielabors		Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
26. 11. 1996	Fund eines Ionisationsrauchmelders (Pu-239 18 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Kein Gefährdungspotential bei intakten Rauchmeldern	Ordnungsgemäße Entsorgung
28. 11. 1996	Verlust eines Transportbehälters mit radioaktivem Inhalt (1 H-3 -Lösung, 1 kBq/g)	Diebstahl	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität sehr gering	Polizeiliche Ermittlungen
6. 12. 1996	Fund von 252 Ionisationsrauchmeldern mit Kr-85 (Ges.-Akt. 10,6 GBq) im Keller eines verlassenen Firmengebäudes	Unterlassene Entsorgung	Gefährdungspotential aufgrund des Radionuklids gering, Rauchmelder ordnungsgemäß verpackt	Sicherstellung der Rauchmelder, behördliche Ermittlungen
9. 12. 1996	Sicherstellung von ca. 1 kg Uran (nat) auf einem Flughafen	Illegale Einfuhr	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität sehr gering	Staatsanwaltschaftliche Ermittlungen
16. 12. 1996	Fund von 6 Flaschen mit Uranylacetat mit insgesamt ca. 2 MBq in einem Labor		Gefahrenpotential aufgrund der Aktivität sehr gering	Ordnungsgemäße Entsorgung

noch Tabelle IV.2

Datum	Vorkommnis	Ursache	Radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
16. 12. 1996	Abgabe von max. 36 MBq I-131 aus einem Krankenhaus in das öffentliche Abwassernetz	Durch fehlerhafte Kontaktfunktion Blockierung des Zulaufs in den Abklingbehälter	Gefährdungspotential aufgrund der Aktivität und Vermischung gering	Sicherheitstechnische Verbesserungen
18. 12. 1996	Fund von 2 Visiereinrichtungen für Handfeuerwaffen (Ra-226 Ges.-Akt. 18,5 MBq) und einem Prüfstrahler (Sr-90/Y-90 600 kBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Gefährdungspotential bei sachgemäßer Handhabung gering	Ordnungsgemäße Entsorgung
18. 12. 1996	Fund von 18 Ionisationsrauchmeldern (Pu-239 Ges.-Akt. 300 MBq)	Unzureichende Räumung ehemals militärisch genutzter Bereiche	Kein Gefährdungspotential bei intakten Rauchmeldern	Ordnungsgemäße Entsorgung

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 1000 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 1000 Frauen älter als 15 Jahre.

²⁾ Nur Ambulanz.

³⁾ Nicht klassifizierte Röntgenuntersuchungen.

CT: Computertomographie

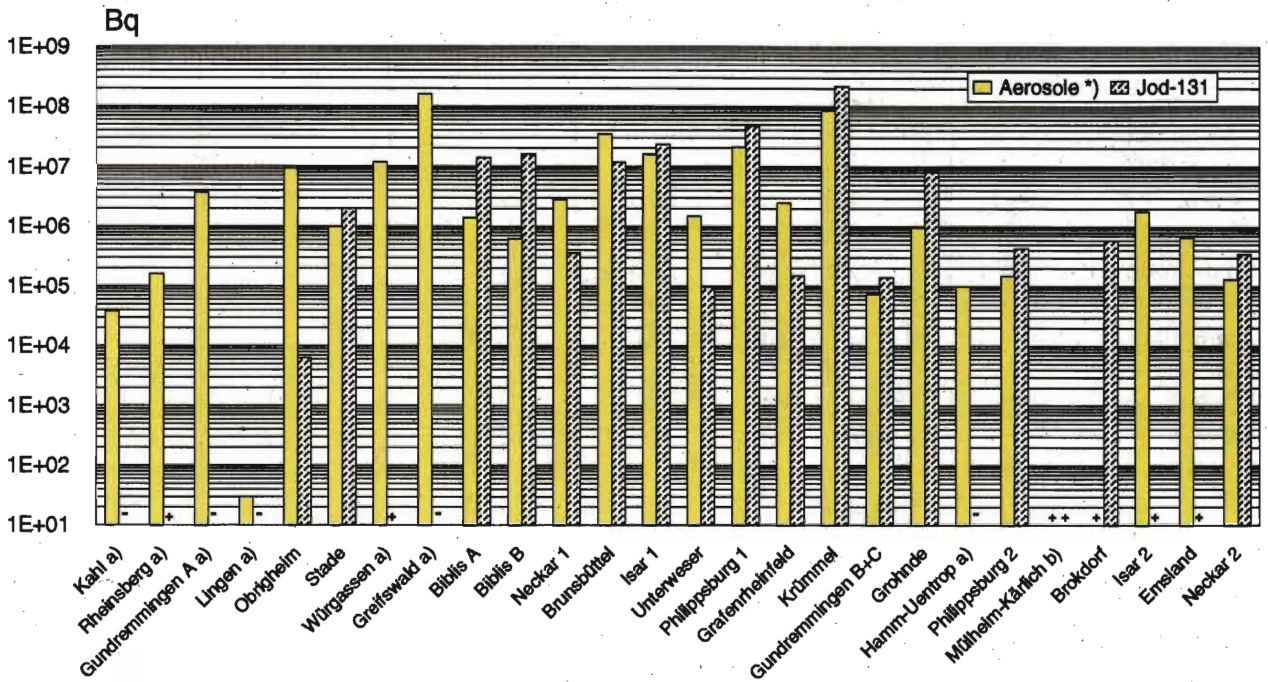
Tabelle IV.4

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser aus dem Endlager Morsleben
im Jahr 1996**

	Abluft/Bq	Abwasser/Bq
Tritium	3,3 E+11	9,8 E+05
Kohlenstoff-14	1,8 E+09	–
langlebige Aerosole	3,5 E+06	–
Radon-Folgeprodukte	1,6 E+10	–
Nuklidgemisch außer Tritium	–	8,6 E+03

Abbildung IV.1

Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1996 Aerosole und Jod-131



a) Betrieb beendet.

b) 1996 nicht in Betrieb.

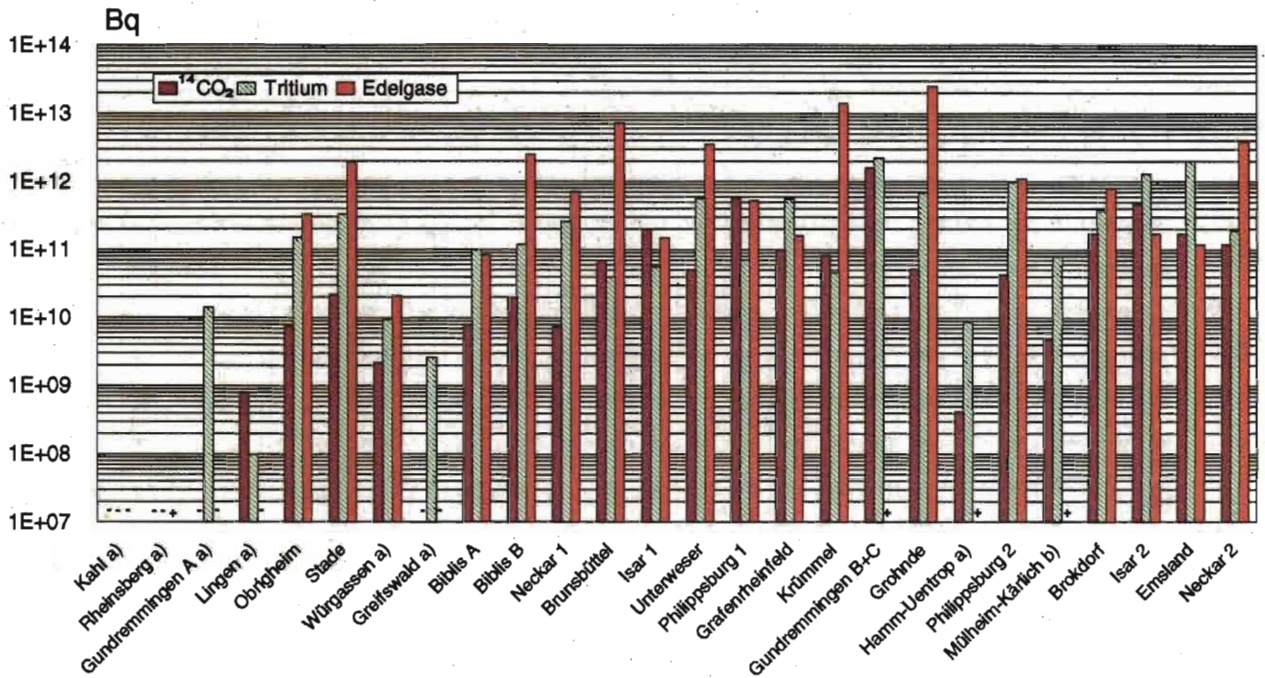
*) Halbwertszeit > 8 Tage, ohne Jod-131, einschl. Strontium und Alpha-Strahler.

+) Kleiner oder gleich Nachweisgrenze.

-) Bilanzierung nicht erforderlich.

Abbildung IV.2

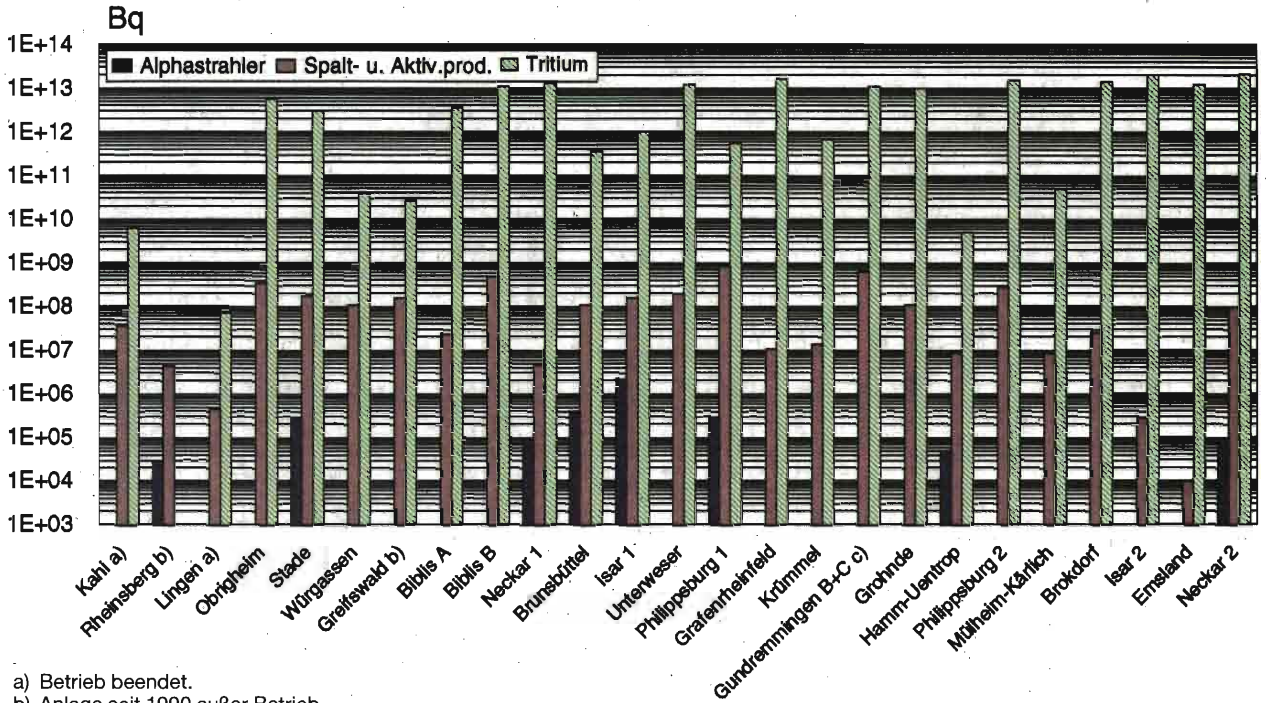
Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1996
¹⁴CO₂, Tritium und Edelgase



- a) Betrieb beendet.
- b) 1996 nicht in Betrieb.
- +) Kleiner oder gleich Nachweisgrenze.
-) Bilanzierung nicht erforderlich.

Abbildung IV.3

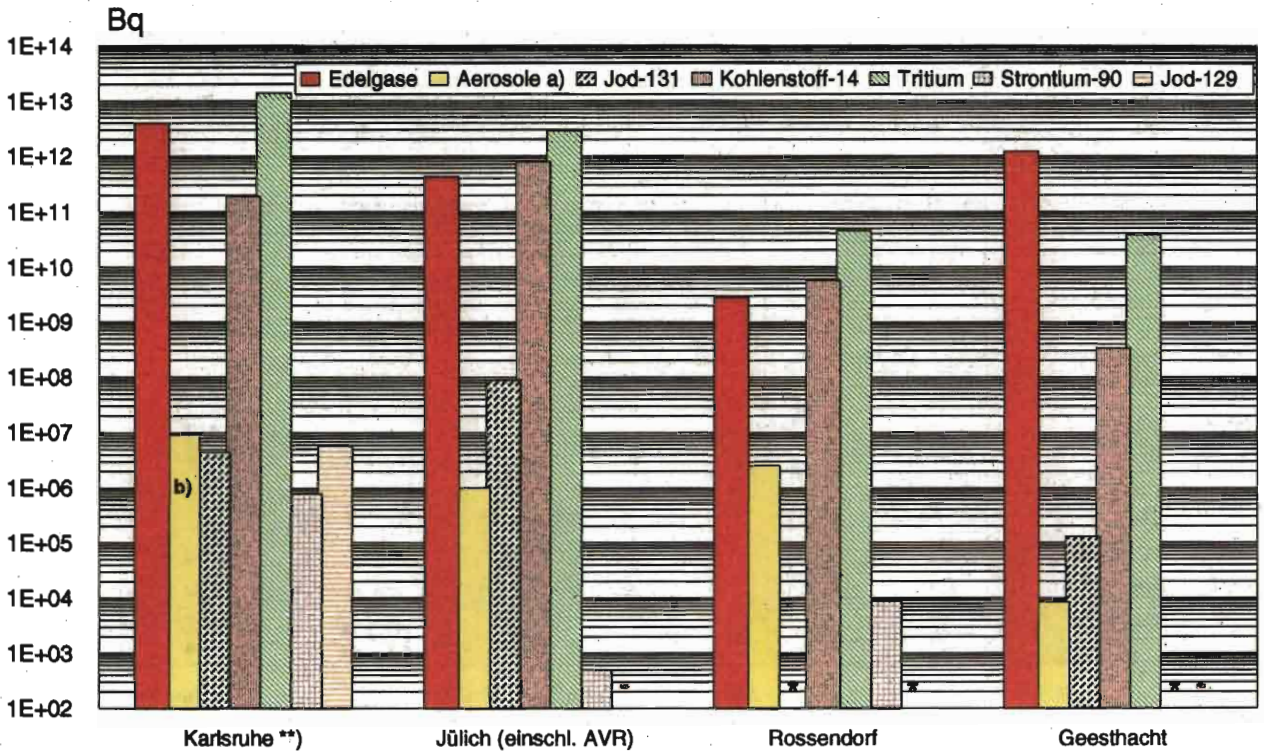
**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken im Jahr 1996
(Alphastrahler, Summenwerte und Tritium)**



- a) Betrieb beendet.
- b) Anlage seit 1990 außer Betrieb.
- c) Block A stillgelegt.

Wird kein Wert angegeben, liegt die Aktivitätsableitung unterhalb der Nachweisgrenze.

Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren im Jahr 1996



a) HWZ > 8 Tage.

b) Davon Alphastrahler: 2,1 E05 Bq.

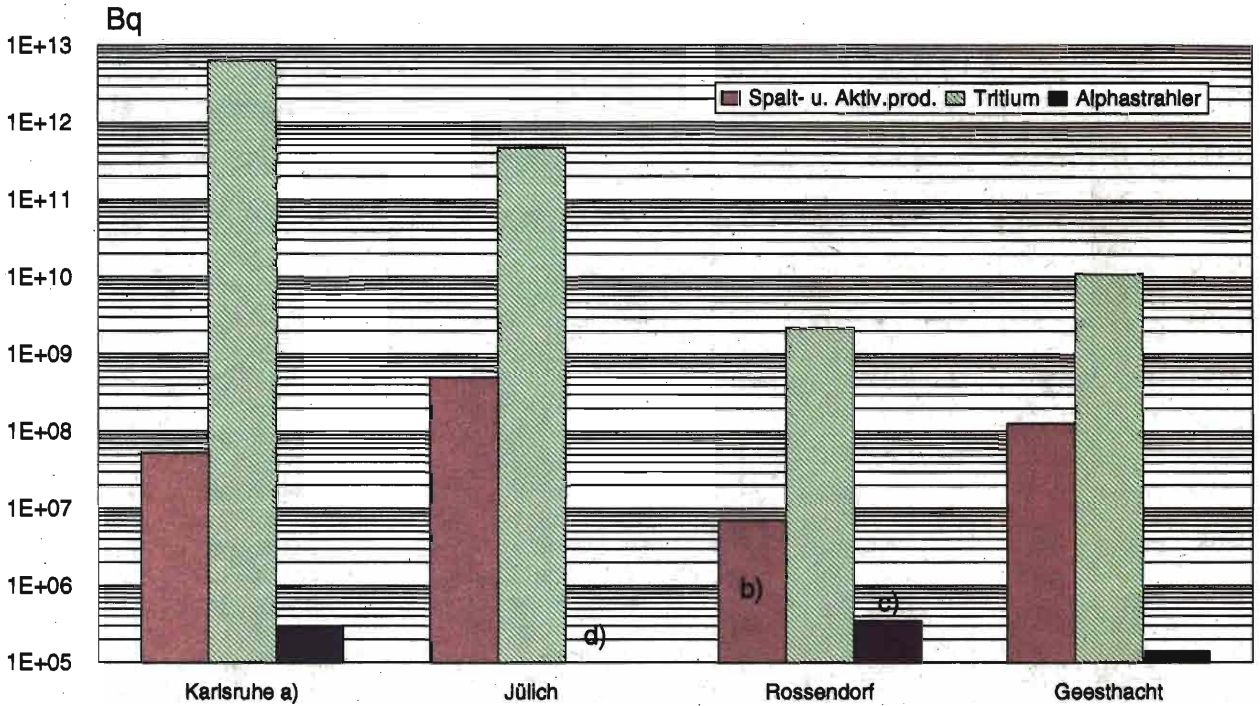
*) Nicht nachgewiesen (kleiner oder gleich Nachweisgrenze).

***) Einschl. Wiederaufarbeitungsanlage.

-) Bilanzierung nicht erforderlich.

Abbildung IV.5

Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Forschungszentren im Jahr 1996



a) Einschl. Wiederaufbereitungsanlage.

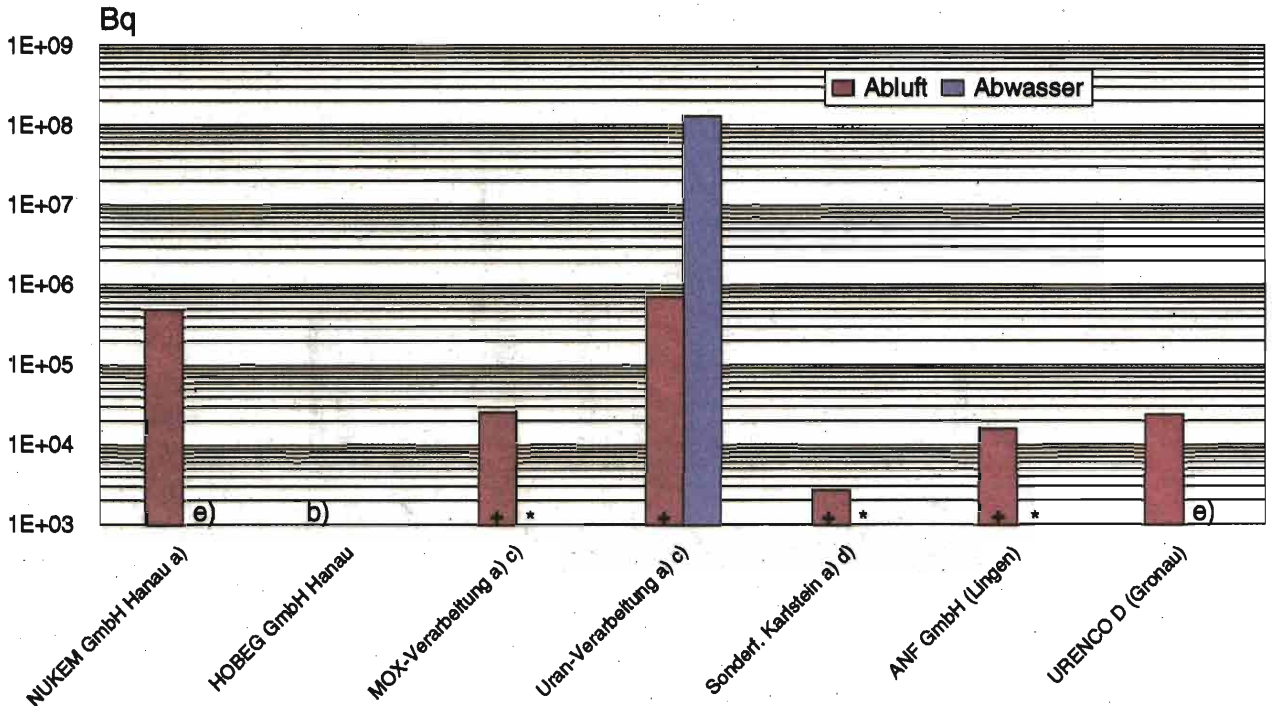
b) Einschl. der Radionuklide aus der Isotopenproduktion und Forschungseinrichtung.

c) Pu-239.

d) Kleiner Nachweisgrenze.

Abbildung IV.6

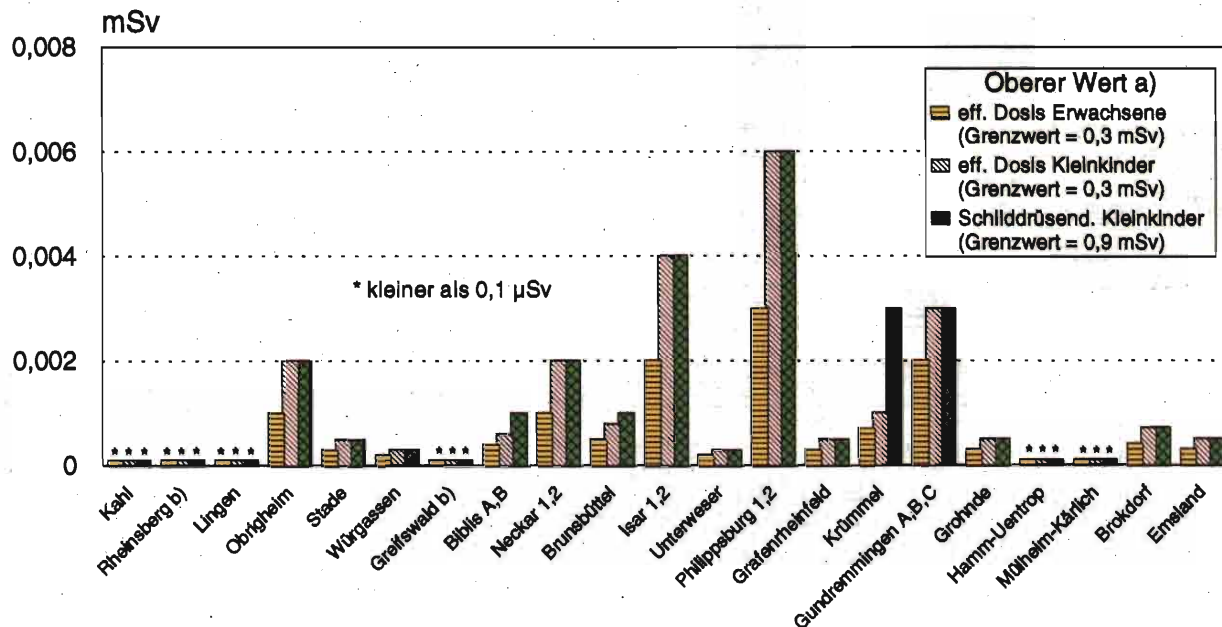
**Ableitung radioaktiver Stoffe (Alpha-Aktivität)
aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben im Jahr 1996**



- a) Brennelementproduktion eingestellt.
- b) Aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen.
- c) SIEMENS AG, Brennelementewerk Hanau.
- d) SIEMENS AG.
- e) Abgabewert liegt nicht vor.
- +) Kleiner als angegebener Wert.
- *) Aktivitätsabgabe unterhalb der Nachweisgrenze.

Abbildung IV.7

Strahlenexposition im Jahr 1996 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft

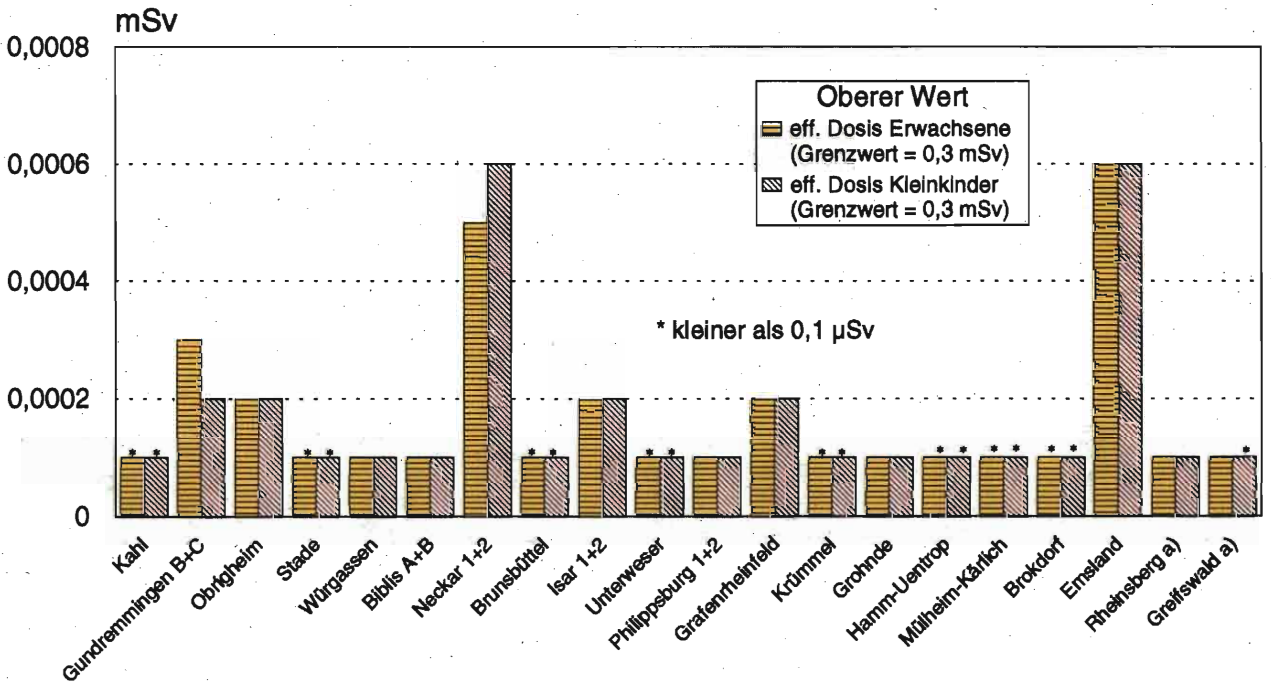


a) Berechnet für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen.

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

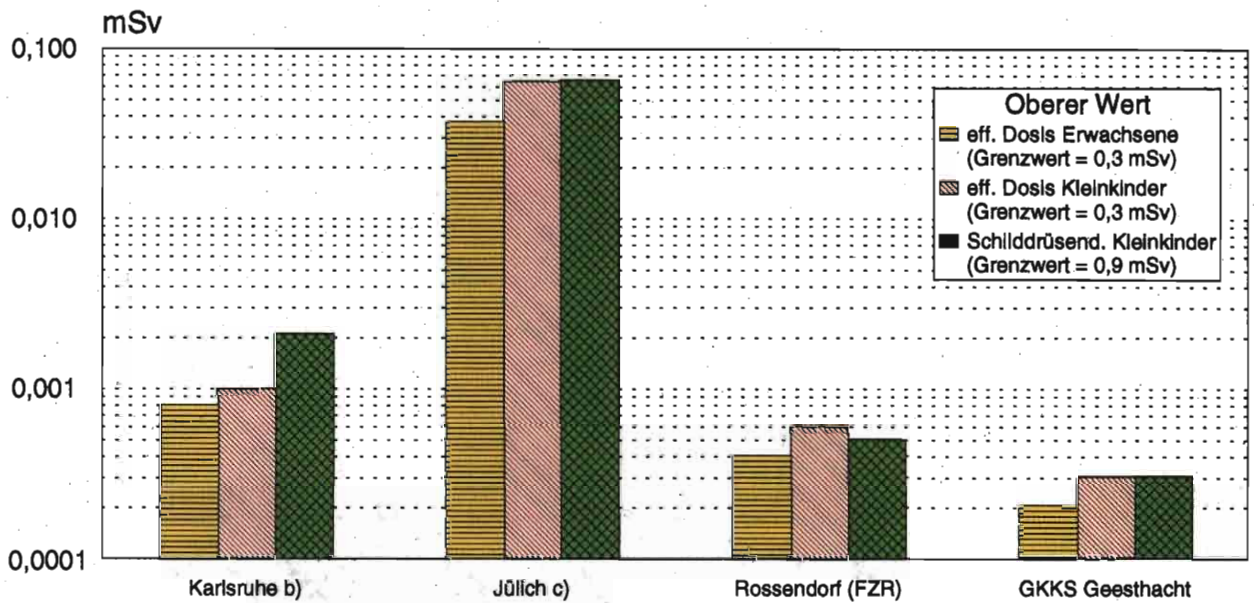
Strahlenexposition im Jahr 1996 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser



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 1996 in der Umgebung von Forschungszentren durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft a)



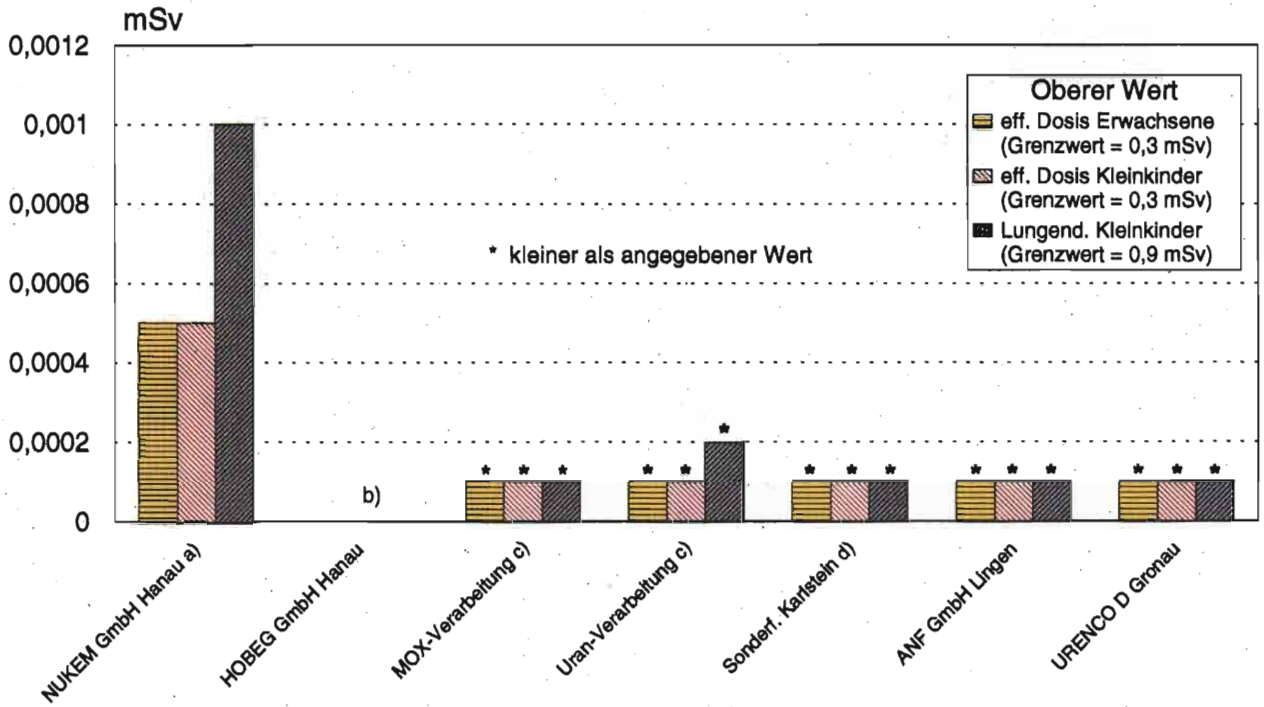
a) Entnommen aus den Jahresberichten 1996 sowie nach Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf und Geesthacht.

b) Einschl. Wiederaufarbeitungsanlage.

c) Einschl. Versuchsreaktor AVR.

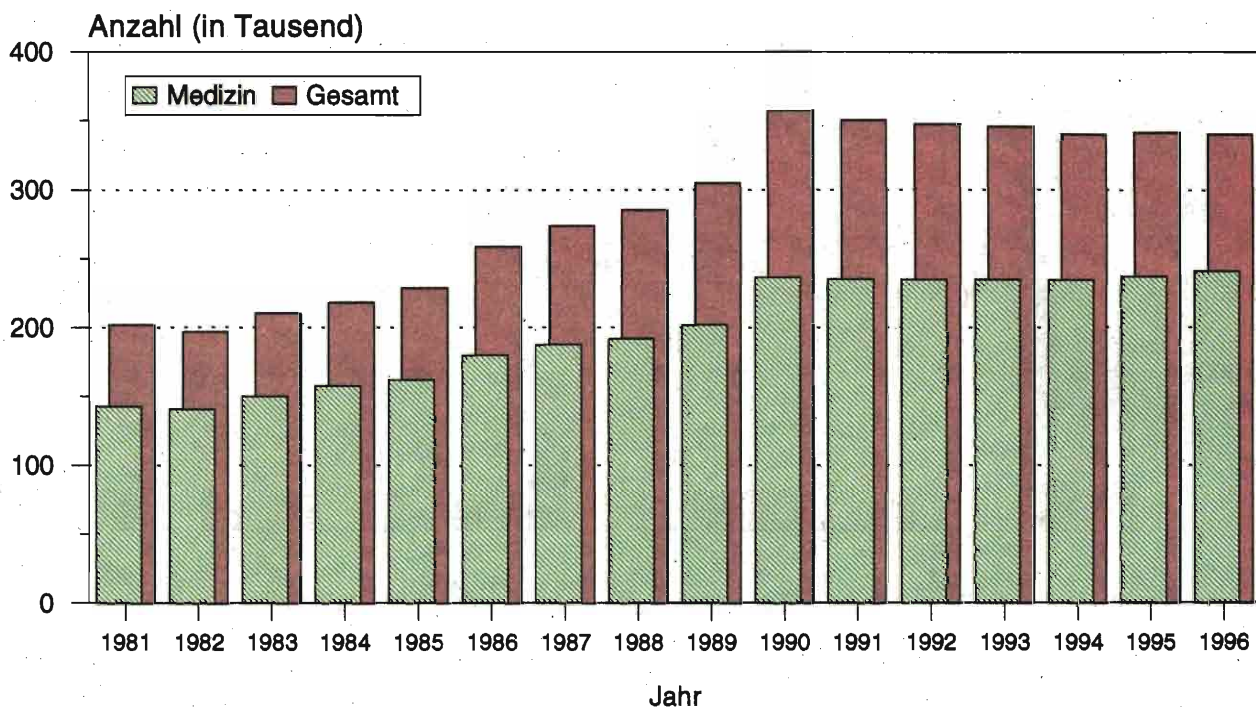
Abbildung IV.10

Strahlenexposition im Jahr 1996 in der Umgebung der kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft



- a) Brennelementproduktion eingestellt.
- b) Aus dem Geltungsbereich des Atomgesetzes entlassen.
- c) SIEMENS AG, Brennelementwerk Hanau.
- d) SIEMENS AG.

Abbildung IV.11

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

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

Jahreskollektivdosis in Personen-Sv

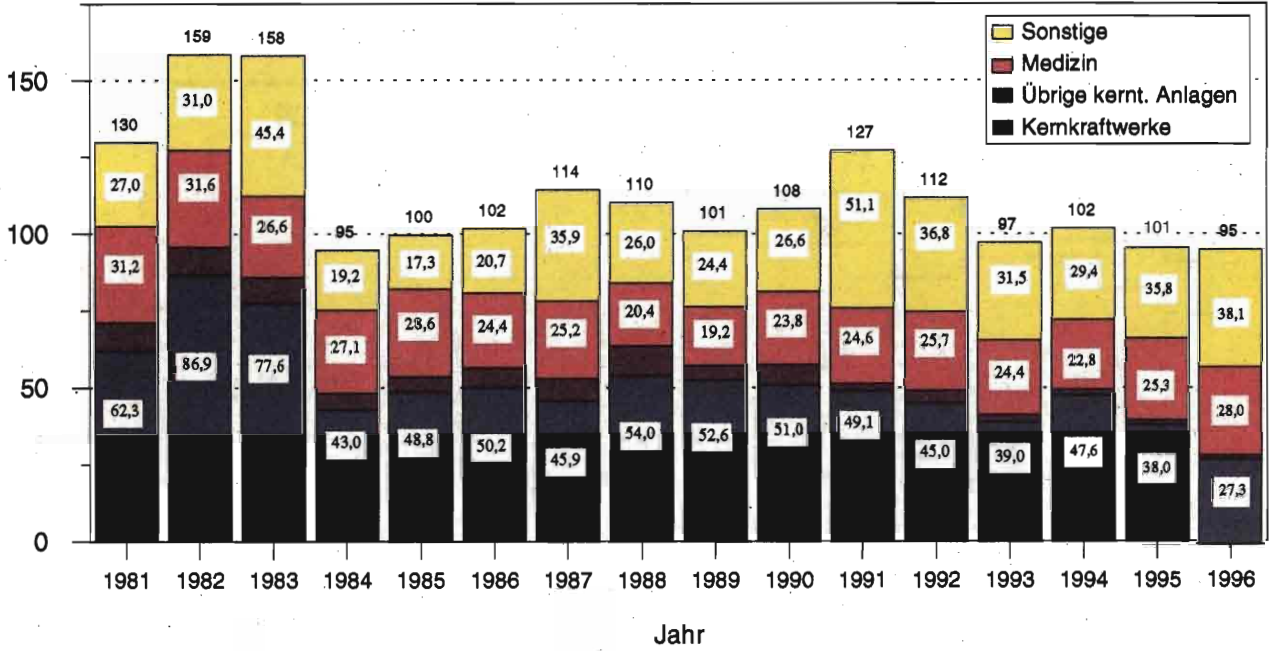
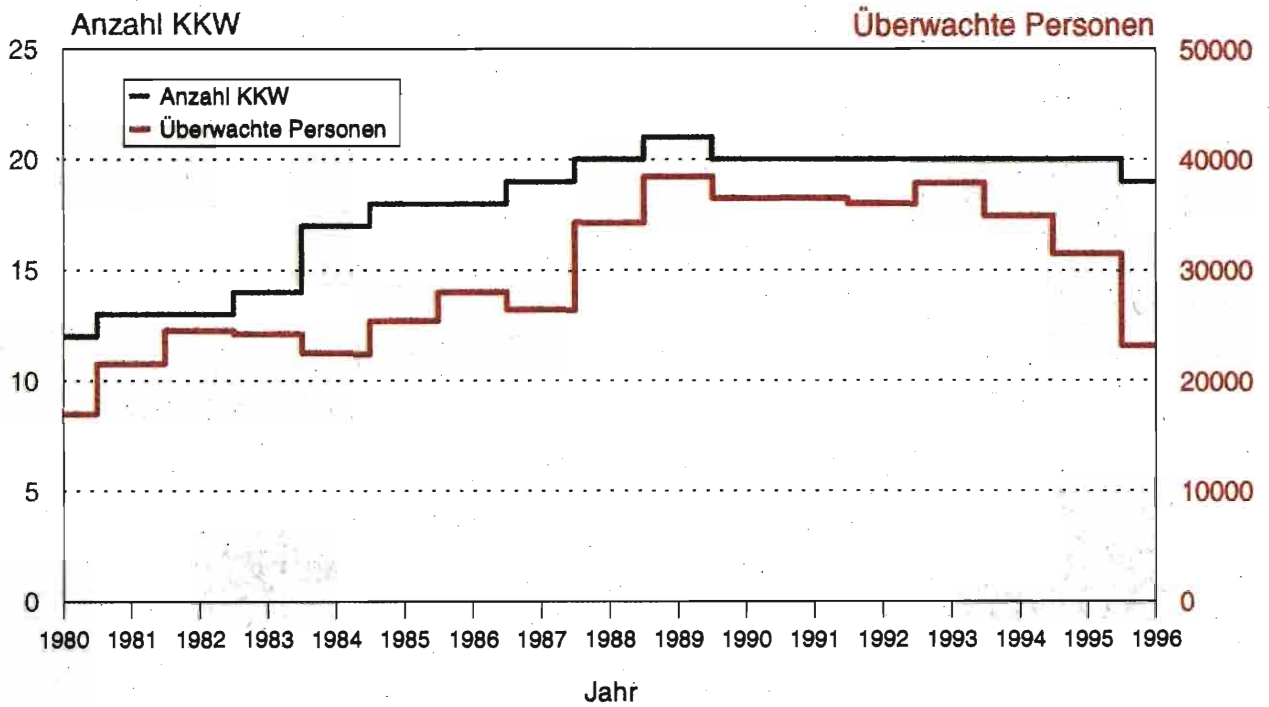


Abbildung IV.13

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken



Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

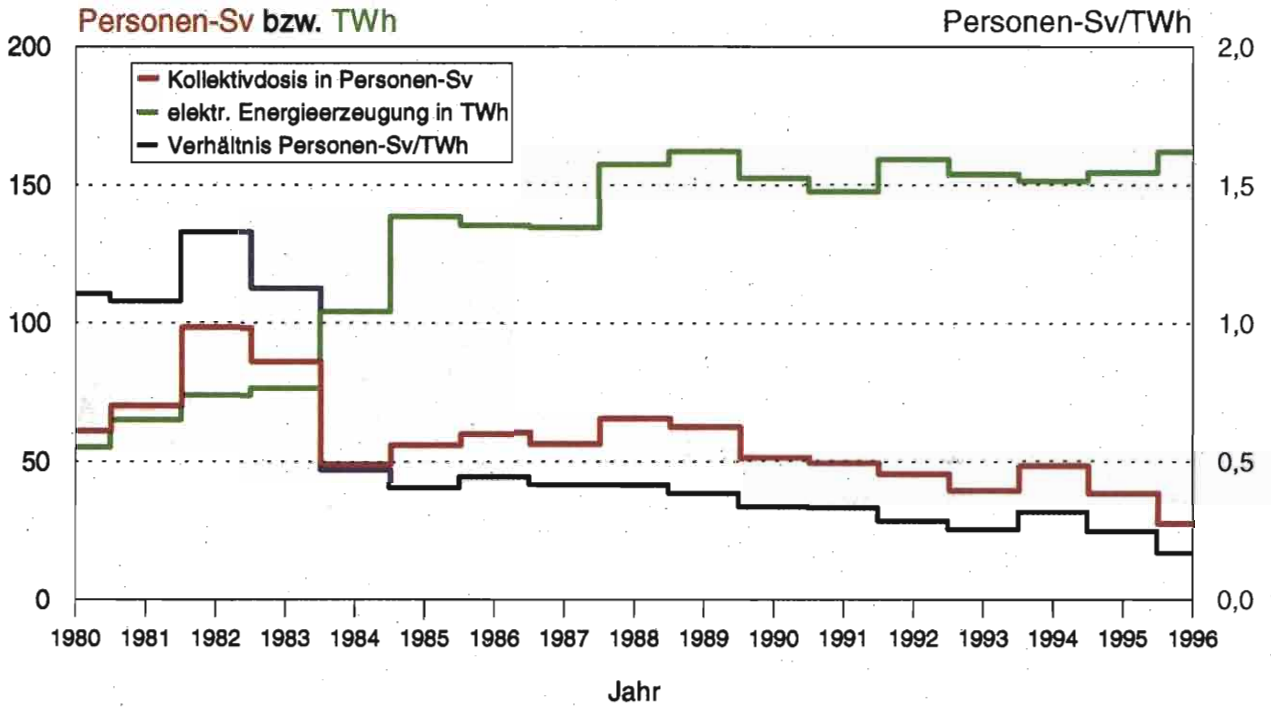
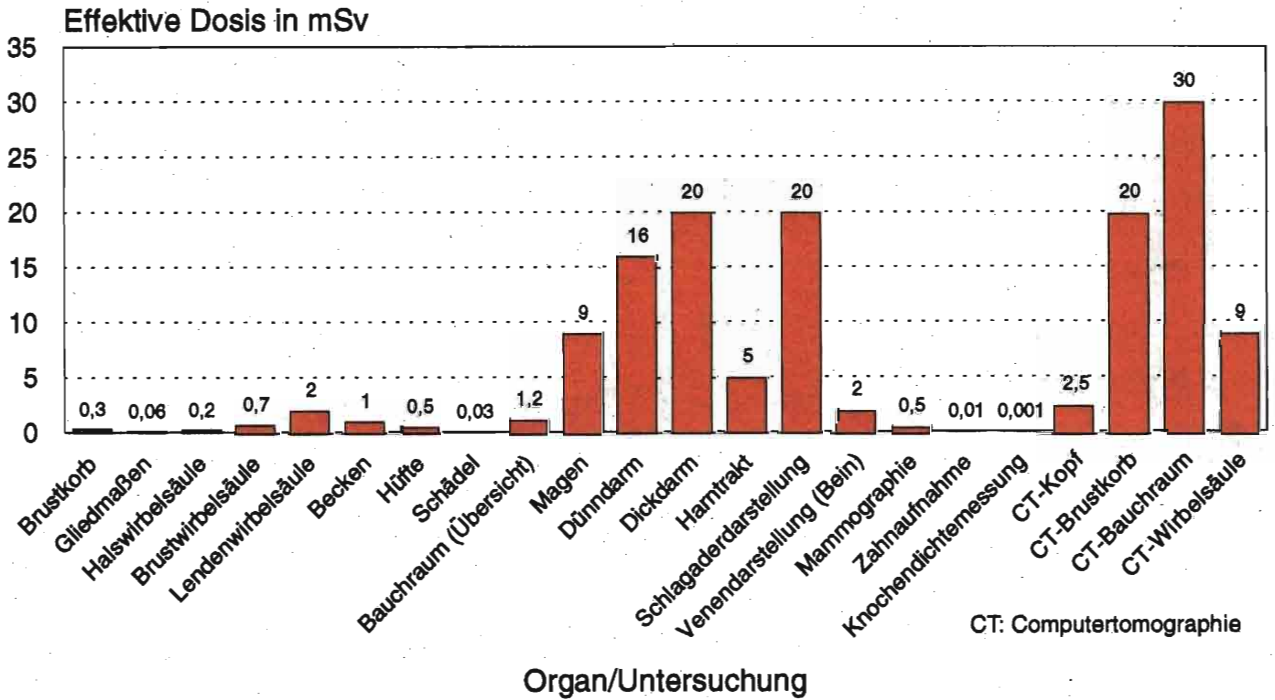


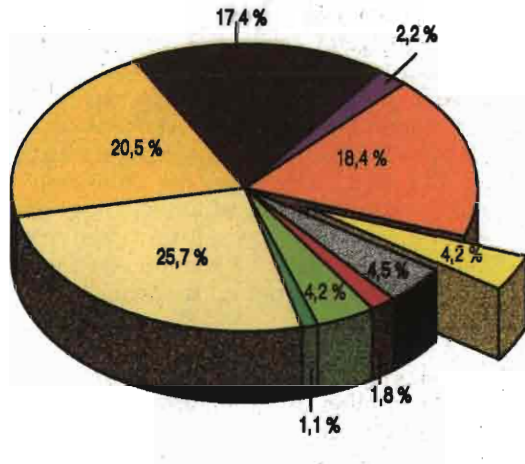
Abbildung IV.15

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

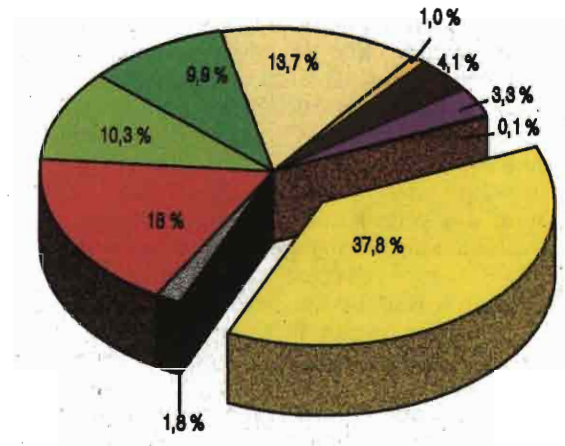


Prozentuale Verteilung der Röntgenuntersuchungen und ihr Anteil an der kollektiven effektiven Dosis in Deutschland 1994

Häufigkeit



Kollektive effektive Dosis



■ Thorax	■ Extremitäten	■ Skelett (sonstiges)	■ Magen/Darm Trakt	■ Abdomen (sonstiges)
■ Angiographie	■ Mammographie	■ Computer-Tomographie	■ Zähne	■ Sonstiges

V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

Die mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung durch den Reaktorunfall von Tschernobyl wurde 1996 fast ausschließlich durch die Bodenstrahlung des im Jahr 1986 deponierten Radiocäsiums verursacht, andere Radionuklide spielen keine Rolle mehr. Dabei verursachte Cäsium-137 mehr als 90 % der Bodenstrahlung, da aufgrund seiner physikalischen Halbwertszeit von 30 Jahren noch 80 % der 1986 deponierten Aktivität vorliegen. Cäsium-134 hingegen ist auf weniger als 4 % des Ausgangswertes zurückgegangen. Bei ausschließlicher Berücksichtigung des physikalischen Zerfalls nahm die äußere Strahlenexposition gegenüber dem Vorjahr um ca. 4 % 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.

Grundnahrungsmittel wie Milch, Gemüse, Getreide, Obst und Fleisch sind durch Radiocäsium aus dem Reaktorunfall nur noch geringfügig kontaminiert. Die Meßwerte der spezifischen Aktivität bzw. Aktivitätskonzentration von Cäsium-137 liegen wie im Vorjahr in den meisten Fällen unter 1 Bq pro Kilogramm Frischmasse bzw. pro Liter. Im Durchschnitt wird mit der Gesamtnahrung eine Aktivität von ca. 0,2 Bq Cäsium-137 pro Tag zugeführt, woraus eine Ingestionsdosis von 0,001 mSv pro Jahr resultiert, die gegenüber der mittleren Strahlenexposition von ca. 0,3 mSv durch Ingestion natürlich radioaktiver Stoffe (Kalium-40, radioaktive Isotope von Uran und Thorium und deren Folgeprodukte) vernachlässigbar klein ist.

In Nahrungsmitteln aus Waldgebieten und vereinzelt auch bei Fischen aus Binnenseen sind weiterhin spezifische Cäsium-137-Aktivitäten von einigen hundert, in einigen Arten von Wildpilzen und in Wildfleisch bis zu einigen tausend Bq/kg Frischmasse zu verzeichnen, weshalb besondere Ernährungsgewohnheiten Abweichungen von der durchschnittlichen Aktivitätszufuhr über Ingestion bedingen können. Ein Verzehr von z. B. 200 g Maronenhölzlingen 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: Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 14)

1. Strahlendosis und ihre Einheiten

Beim radioaktiven Zerfall von instabilen Nukliden werden energiereiche Teilchen emittiert. Bei Radionukliden, die aus kerntechnischen Anlagen freigesetzt werden, sind dies vor allem Alpha- und Beta-Teilchen sowie die Photonen der Gamma-Strahlung. Durch Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung erzeugen Photonen im bestrahlten Material energiereiche Elektronen und Positronen. Beim Durchgang der elektrisch geladenen Teilchen (Alpha- und Beta-Teilchen, Elektronen und Positronen) durch Materie wird die kinetische Energie der Teilchen diskontinuierlich in vielen Teilbeträgen auf die Materie übertragen. Es kommt dabei zur Ionisation und Anregung von Atomen und 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 Gamma-Strahlung) und dicht ionisierende Strahlung (z. B. Alpha-Teilchen). 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 in diesem Volumenelement. Die verwendete Doseinheit 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 Doseinheit 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. Alpha-Teilchen) wesentlich wirksamer sein können als ionisierende Strahlen mit niedrigem LET (locker ionisierende Strahlen, z. B. Beta- und Gamma-Strahlung) bei gleicher Energiedosis. Dies gilt für die einzelnen biologi-

schen Effekte in unterschiedlichem Maße. Für die Abschätzung von Strahlenrisiken, für Grenzwertfestlegungen und für Strahlenschutzmessungen erschien es daher notwendig, neben der Energiedosis auch die Strahlenqualität, d. h. die Strahlenart und -energie, zu berücksichtigen. Der lineare Energietransfer gilt vereinbarungsgemäß als physikalische Kenngröße der Strahlenqualität. Er kennzeichnet die vom Dosisbegriff nicht erfaßte Konzentration der auf die Materie übertragenen Energie längs der Teilchenbahnen. Aus diesen Gründen ist neben der Energiedosis D die Äquivalentdosis H für Strahlenschutz-zwecke eingeführt worden. Die Äquivalentdosis ergibt sich aus der gemessenen oder berechneten Energiedosis durch Multiplikation mit einem von der Strahlenqualität abhängigen Bewertungsfaktor Q.

$$H = Q \cdot D$$

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

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

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

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 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 Röntgen-

strahlung 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 Gamma-Strahlung, der Bewertungsfaktor 10 für Neutronen und der Bewertungsfaktor 20 für Alpha-Teilchen 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. Externe und interne 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. Gamma-Strahlung hat wie Röntgen-Strahlung die Fähigkeit, den gesamten Körper zu durchdringen und ihn mit geschwächerter Intensität wieder zu verlassen, während Alpha- und Beta-Teilchen relativ zu den Körperdimensionen nur eine geringe Eindringtiefe besitzen. Bei Alpha-Strahlung 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 Alpha-Bestrahlung bereits außerhalb der Reichweite der Alpha-Teilchen. Bei Beta-Strahlung 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 Beta-Strahlung von außen für das Strahlenrisiko ohne Bedeutung. Radionuklide, bei deren Zerfall Alpha- bzw. Beta-Strahlung entsteht, sind jedoch dann für das Strahlenrisiko relevant, wenn sie mit der Nahrung, dem Trinkwasser oder durch Atmung dem Körper zugeführt werden und die Bestrahlung von innen erfolgt. Zur Bestimmung der Strahlendosis ist es bei einer Inkorporation der radioaktiven Stoffe notwendig, die Verteilung der Radionuklide und ihre Verweildauer im Organismus und in einzelnen Organen sowie Geweben genau zu kennen. Die Biokinetik, die sich vor allem aus dem Stoffwechselverhalten und anderen biologischen Vorgängen ergibt, muß bei der Dosisabschätzung für die Strahlenexposition von innen berücksichtigt werden. Neben zahlreichen, u. a. altersabhängigen biokinetischen Parametern gehen in die Dosisermittlung die physikalischen Eigenschaften der Strahlung und die physikalischen Halbwertszeiten der Radionuklide ein.

Radionuklide mit einer langen physikalischen Halbwertszeit und einer zusätzlich langen Verweildauer

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

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

Die Konzentration der Ionisations- und Anregungsprozesse ionisierender Teilchen auf den Nahbereich der Teilchenbahnen (s. Kennzeichnung der Strahlenqualität durch den linearen Energietransfer) hat bei mikroskopischer Betrachtungsweise auch die Bedeutung einer von Zelle zu Zelle statistisch variierenden Anzahl der Teilchendurchgänge; die Energiedosis gibt nur den räumlichen Mittelwert der massebezogenen Energiedeposition an. Bei einer Energiedosis von 10 mGy erfährt z. B. nur einer unter ca. 40 Zellkernen des Querschnitts $60 \mu\text{m}^2$ den Durchgang eines Alpha-Teilchens der Anfangsenergie 5 MeV . Erst bei wesentlich höheren Dosen – für Alpha-Teilchen bei etwa 50 mGy – kommt es ebensooft vor, daß ein Zellkern von einem bzw. von zwei oder mehr Alpha-Teilchen 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 Gamma-Strahlung im Dosisbereich unterhalb etwa 3 mGy und bei 14 MeV Neutronen unterhalb etwa 50 mGy auf. Bei Alpha-Strahlung (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 Alpha-Teilchen emittieren, von besonderer Relevanz (hot particles).

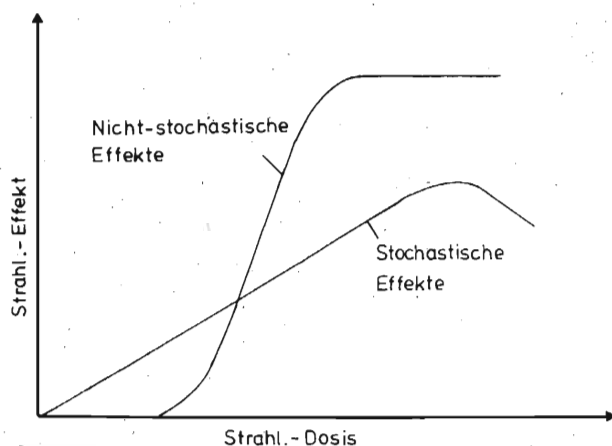
3. Stochastische und deterministische Strahlenwirkung

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 (Abbildung A-1). Oberhalb der Schwellendosis steigt die Zahl der Effekte 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 (Abbildung A-1). Für den Strahlenschutz sind die stochastischen Strahlenwirkungen daher von

Abbildung A-1

Schematische Darstellung der Dosiswirkungsbeziehungen für stochastische und deterministische Effekte



entscheidender Bedeutung. Ihr Auftreten unterliegt einer Zufallsverteilung, d. h. in einem Kollektiv gleich exponierter Personen werden sie mit einer durch den statistischen Erwartungswert nur angenähert voraus-sagbaren Häufigkeit beobachtet. Als „Risiko“ wird im Strahlenschutz die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer stochastischen Strahlenwirkung bei der Einzelperson bezeichnet; den Quotienten Risiko/Äquivalentdosis nennt man „Risikoeffizient“.

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

4. Genetisch vererbare Defekte

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

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

Die Versuchsergebnisse an Mäusen sind in überwiegendem Maße nach Strahlendosen im Bereich von 1 Gy und höher gewonnen worden, im allgemeinen hat eine Bestrahlung mit hoher Dosisleistung 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 in Keimzellen des Menschen und der Maus ist nach identischen Bestrahlungsbedingungen und Strahlendosen etwa gleich groß.

Aufgrund der vorhandenen Erkenntnisse über den Wirkungsmechanismus ionisierender Strahlung und der Entstehung der Mutationen in Keimzellen, die zu vererbaren Defekten führen, steht es in der wissenschaftlichen Diskussion heute weitgehend außer Zweifel, daß eine Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellendosis existiert und damit auch bei niedrigen Dosen und niedriger Dosisleistung mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit Mutationen auftreten können. Es ist gezeigt worden, daß bei einer chronischen Bestrahlung über 300 Tage mit Gamma-Strahlen 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.

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 in-

dividuelle Krebserkrankung durch die vorausgegangene Bestrahlung verursacht ist.

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

Es wird beobachtet, daß vor allem myeloische Leukämien (akute und chronische Erscheinungsformen), aber auch akute lymphatische Leukämien, nach Bestrahlung vermehrt auftreten. Dagegen sind chronisch-lymphatische Leukämien nicht erhöht beobachtet worden. Die 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 0,5 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 0,5 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 überwiegenderem Maße durch Alpha-Strahlung hervorgerufen. Auch bei der Induktion von Knochentumoren liegen Erfahrungen nach Exposition durch Alpha-Strahlen vor. In diesem Falle sind Untersuchungen nach Be-

handlung mit Radiumpräparaten durchgeführt worden. Das Radium wurde injiziert und hat sich vor allem im Knochengewebe abgelagert.

6. Risikoabschätzung

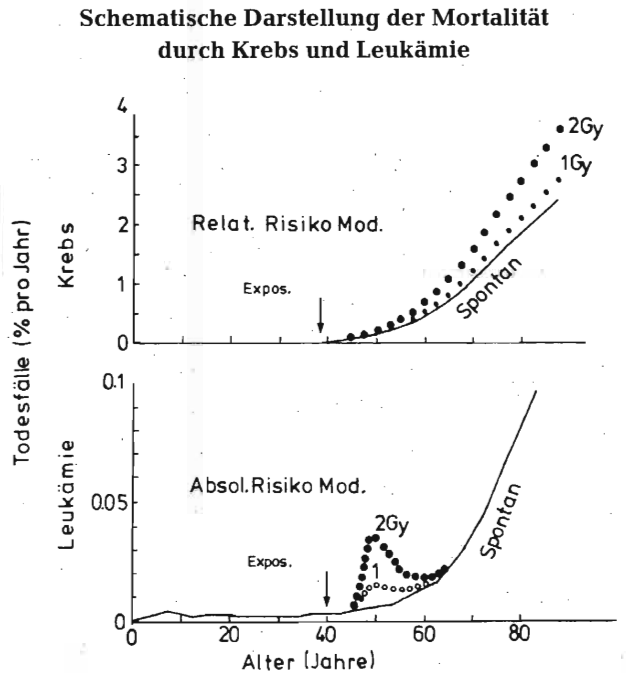
Für die Risikoabschätzung wird außer bei Leukämie und Knochentumoren von einem sogenannten relativen Risikomodell ausgegangen. Für Leukämien und Knochentumoren dagegen wird das absolute Risikomodell zur Risikoabschätzung eingesetzt. Bei dem letzteren Risikomodell geht man davon aus, daß nach einer Latenzzeit die Rate an Erkrankungen über der „spontanen“ Rate liegt, nach einer weiteren Periode aber keine zusätzlichen strahlenbedingten Erkrankungen auftreten (Abbildung 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 (Abbildung 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 maximale Risikoabschätzung dar.

Die vielfältigen epidemiologischen Untersuchungen haben ergeben, daß eine statistisch signifikante und damit zahlenmäßig bestimmbare Erhöhung maligner Erkrankungen im allgemeinen erst im Dosisbereich von einigen Zehntel bis einem Sievert eintritt. In niedrigeren Dosisbereichen, die für die berufliche Strahlenexposition (einige mSv/a bis einige 10 mSv/a) und vor allem für Expositionen der Bevölkerung etwa in der Umgebung kerntechnischer Anlagen (einige 10 µSv/a) von Bedeutung sind, müssen daher die Strahlenrisiken durch rechnerische Extrapolation, ausgehend von diesen höheren Strahlendosen, ermittelt werden. Ferner sind die statistisch signifikanten epidemiologischen Daten der Leukämie- und Krebserhöhung nicht nur nach Exposition mit hohen Strahlendosen, sondern häufig auch nach Bestrahlung mit hoher Dosisleistung erhalten worden. Da die Exposition am Arbeitsplatz und in noch stärkerem Maße in der Umwelt bei niedriger Dosisleistung stattfindet, ergeben sich hier zusätzliche Schwierigkeiten bei der Extrapolation zur Ermittlung der Risikokoeffizienten.

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

Für die Extrapolation wird angenommen, daß eine Schwellendosis nicht existiert und daß die Dosiswirkungsbeziehung für die Eintrittswahrscheinlichkeit stochastischer Effekte auch in diesem niedrigen Do-

Abbildung A-2



sisbereich linear mit der Strahlendosis verläuft. Aufgrund unserer wissenschaftlichen Kenntnisse ist eine solche Annahme für den Strahlenschutz sinnvoll, der Beweis dafür steht aber noch aus. Um der niedrigen Dosisleistung im niedrigen Dosisbereich Rechnung zu tragen, werden für den Risikokoeffizienten häufig Reduktionsfaktoren von 2 bis 3 eingesetzt. 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 zugrunde gelegt.

Unter dieser Annahme ist eine Risikoabschätzung durch Extrapolation, ausgehend von den Daten bei hohen Strahlendosen, zu geringen Strahlendosen hin möglich. Es ergeben sich dann Risikokoeffizienten, die im Bereich von 200 bis 1000 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 Auslegungsfällen im Bereich von einigen 10 µSv. Es müssen also Extrapolationen über mehrere Größenordnungen der Dosis (etwa um den Faktor 10^4) vorgenommen werden, um von dem Dosisbereich mit epidemiologisch ermit-

telten Daten in den Dosisbereich dieser Exposition zu kommen.

Wiederholte Berichte, daß die Zahl der Leukämieerkrankungen bei Kindern in der Umgebung von Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland erhöht sei, sind bisher mit epidemiologischen Methoden nicht bestätigt worden. Allerdings werden in Großbritannien in der Umgebung von Wiederaufarbeitungsanlagen und älteren Anlagen erhöhte Raten an Leukämien bei Kindern beobachtet. Die Strahlenexposition der Bevölkerung ist jedoch so gering, daß durch sie diese Erhöhung nicht erklärt werden kann. Andere Erklärungsansätze (etwa berufliche Strahlenexposition der Eltern; Umweltfaktoren, die an den Standorten vorhanden, aber unabhängig von der Anlage sind) wurden entwickelt, können aber nicht als gesichert gelten.

In der Bundesrepublik Deutschland werden derzeit Studien¹⁾ zum Thema „Kindliche Leukämie in der Umgebung Kerntechnischer Anlagen“ durchgeführt.

Die Breite des Schätzintervalls für den Risikoeffizienten 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 Risikoeffizienten nicht erheblich beeinflußt hat, tragen die Gründe 2 und 3 in erheblichem Maße zur Erhöhung bei. Der Risikoeffizient liegt dann etwa um den Faktor 3 bis 5 höher als früher angenommen.

¹⁾ Studie des Instituts für Medizinische Statistik und Dokumentation der Universität Mainz (Autor: Professor Jörg Michaelis) „Untersuchungen der Häufigkeit von Krebserkrankungen im Kindesalter in der Umgebung westdeutscher kerntechnischer Anlagen 1980 bis 1990“ Mainz 1992. Diese Studie kann beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit angefordert werden.

7. Effektive Dosis²⁾

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

Kritisch eingewendet wird, daß die Wichtungsfaktoren auf das Mortalitätsrisiko und nicht auf das Morbiditätsrisiko durch Leukämie und Krebs abstellen. Für einzelne Organe, z.B. die Schilddrüse, bei denen die Therapie der betreffenden Tumoren gute Erfolge erzielt, würden die Wichtungsfaktoren für die Morbidität größer als für die Mortalität sein. Für Organe und Gewebe mit ungünstiger Therapieprognose der Tumoren wäre diese Situation umgekehrt. Allerdings würde auch bei Berücksichtigung des Morbiditätsrisikos definitionsgemäß die Summe aller Wichtungsfaktoren 1,0 betragen. Der Risikoeffizient 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.

²⁾ Gemäß ICRP-60 tritt anstelle des Begriffs „effektive Äquivalentdosis“ der Begriff „effektive Dosis“.

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
Median	Siehe Zentralwert
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. Dezember 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
Zentralwert	Mittelwert, unterhalb dessen ebensoviel kleinere Werte wie oberhalb größere Werte liegen