

Unterrichtung durch die Bundesregierung

Bericht der Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1991

Inhalt

	Seite
I. Auftrag und Zusammenfassung	3
1. Auftrag	3
2. Zusammenfassung	3
II. Natürliche Strahlenexposition	5
III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition	5
1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten	5
2. Radon in Gebäuden	6
3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus	6
IV. Zivilisatorische Strahlenexposition	7
1. Kerntechnische Anlagen	7
1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen	7
1.2 Jahresableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen .	8
1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen	8
2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin	9
3. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in For- schung, Technik und Haushalt	10
3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen	10
3.2 Störstrahler	10
4. Berufliche Tätigkeit	11
5. Besondere Vorkommnisse	12
6. Fall-out von Kernwaffenversuchen	12
V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl	13

	Seite
Tabellen	14
Abbildungen	35
Anhang	
A. Strahlendosis und Strahlenwirkung	38
1. Strahlendosis und ihre Einheiten	38
2. Externe und interne Bestrahlung	39
3. Stochastische und nicht-stochastische Strahlenwirkung	40
4. Genetisch vererbare Defekte	40
5. Induktion von Leukämie und Krebs	41
6. Risikoabschätzung	42
7. Effektive Dosis	43
B. Erläuterung der benutzten Fachausdrücke	44

I. Auftrag und Zusammenfassung

1. Auftrag

Das Strahlenschutzvorsorgegesetz vom 19. Dezember 1986 (BGBl. I S. 2610), zuletzt geändert durch das Gesetz zum Einigungsvertrag vom 23. September 1990 (BGBl. II S. 885), sieht die jährliche Berichterstattung durch den Bundesminister 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 1991 wird hiermit vorgelegt. Er umfaßt die wichtigsten Informationen und Änderungen im Bereich der Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung gegenüber den Vorjahren und berücksichtigt auch die entsprechenden Ergebnisse in den neuen Bundesländern. 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 zusammen aus der Strahlenexposition von außen durch die kosmische und terrestrische Komponente der natürlichen Strahlung und aus der Strahlenexposition von innen durch die Aufnahme natürlich radioaktiver Stoffe in den Körper. 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 aus natürlichen Strahlenquellen. Insbesondere Radon in Gebäuden und natürlich radioaktive Stoffe in Gebieten des Bergbaus können zur Erhöhung der mittleren natürlichen Strahlenexposition beitragen. Die bisher durchgeführten Messungen haben ergeben, daß in nicht mehr als 1,5 % 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 in Gebäuden in Bergbaugebieten und geologisch vergleichbaren Gebieten auf.

Die mittlere effektive Jahresdosis der Personen, deren Exposition durch Radon und seine Folgeprodukte bei

ihrer beruflichen Tätigkeit überwacht wird, betrug im Berichtsjahr 1991 6,8 mSv und lag damit weit unter dem gesetzlich festgelegten Dosisgrenzwert von 50 mSv pro Jahr. Für das Fluggpersonal läßt sich auf den wichtigsten nördlichen Flugrouten zwischen Europa, USA und Asien eine mittlere jährliche Strahlenexposition von etwa 5 mSv abschätzen.

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 vom 25. April 1986.

Die Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1991 ist in der Tabelle 1 nach den verschiedenen Quellen aufgeschlüsselt. Dort werden die Beiträge der mittleren effektiven Dosis aufgeführt, die im Gegensatz zur genetisch signifikanten Dosis auch die Strahlenexposition der Organe berücksichtigen. Die mittlere effektive Jahresdosis der Bevölkerung beträgt ca. 4 mSv, wobei die natürlichen und medizinischen Strahlenquellen mit einer effektiven Dosis im Millisievert-Bereich die Hauptbeiträge liefern, während sich Dosisbeiträge der weiteren Strahlenquellen im Mikrosievert-Bereich bewegen. Eine statistisch gesicherte Veränderung der Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland ist aus den Beiträgen gegenüber den Vorjahren bei Berücksichtigung der Ungenauigkeiten, mit denen die Hauptbeiträge zu dieser Dosis behaftet sind, nicht festzustellen.

Einzelerggebnisse für das gesamte Bundesgebiet im Jahr 1991 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die effektive Dosis aus natürlichen Strahlenquellen beträgt im Mittel 2,4 mSv pro Jahr mit einer mittleren Schwankung von ca. 1 mSv. Das radioaktive Edelgas Radon und seine kurzlebigen Folgeprodukte liefern über Inhalation den Hauptbeitrag zur Strahlenexposition natürlichen Ursprungs mit einer effektiven Dosis von im Mittel 1,3 mSv mit erheblicher Schwankungsbreite.
- Der größte Beitrag der zivilisatorischen Strahlenexposition wird durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin, vor allem durch die Röntgendiagnostik, verursacht. Die effektive Dosis beträgt etwa 1,5 mSv und ist wegen der unvermeidbaren Unsicherheiten der Erhebungsdaten mit einer Schwankungsbreite von ca. 50 % behaftet. Die Untersuchung des Instituts für Strahlenhygiene des Bundesamtes für Strahlenschutz „Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland durch medizinische Maßnahmen, insbesondere in der

- Röntgendiagnostik“ zeigt, daß sich wesentliche, die Strahlenbelastung beeinflussende Parameter (z. B. Zahl und Qualität der Untersuchungen, Untersuchungsmethoden) verbessert haben. Die daraus resultierende Verringerung der Dosis kann derzeit noch nicht rechnerisch als exakter Zahlenwert dargestellt werden.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch Kernkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur effektiven Dosis der Bevölkerung blieb auch im Jahr 1991 unter 1 % des Beitrages der zivilisatorischen Strahlenexposition. Die Jahresemissionen radioaktiver Stoffe lagen bei allen kerntechnischen Anlagen unterhalb, bei den meisten weit unterhalb der genehmigten Werte.
 - Obwohl die Anzahl der beruflich strahlenexponierten Personen weiterhin zugenommen hat, bleibt der Anteil der beruflichen Strahlenexposition am Beitrag der zivilisatorischen Strahlenexposition unter einem Prozent.
 - Die durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl veränderte Strahlenexposition der Bevölkerung ging von 5 % im Jahre 1986 auf unter 1 % der natürlichen Strahlenexposition (2,4 mSv) im Berichtsjahr 1991 zurück.
 - Der Beitrag der Strahlenexposition durch die in den vergangenen Jahrzehnten in der Atmosphäre durchgeführten Kernwaffenversuche zur effektiven Dosis ist weiterhin rückläufig. Im Jahr 1991 wurden keine Kernwaffenversuche in der Atmosphäre durchgeführt.

Tabelle 1

**Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland
im Jahr 1991**

Quelle der Strahlenexposition	Mittlere effektive Dosis mSv
1. Natürliche Strahlenexposition	
1.1 durch kosmische Strahlung (in Meereshöhe)	ca. 0,3
1.2 durch terrestrische Strahlung von außen	ca. 0,5
durch Aufenthalt im Freien (5 h/Tag)	ca. 0,1
durch Aufenthalt in Gebäuden (19 h/Tag)	ca. 0,4
1.3 durch Inhalation von Radon-Folgeprodukten	ca. 1,3
durch Aufenthalt im Freien (5 h/Tag), vorläufige Abschätzung	ca. 0,2
durch Aufenthalt in Gebäuden (19 h/Tag)	ca. 1,1
1.4 durch Ingestion natürlich radioaktiver Stoffe	ca. 0,3
Summe der natürlichen Strahlenexposition	ca. <u>2,4</u>
2. Zivilisatorische Strahlenexposition	
2.1 durch kerntechnische Anlagen	< 0,01
2.2 durch Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin	ca. 1,5 *)
2.3 durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Forschung, Technik und Haushalt (ohne 2.4)	< 0,01
2.3.1 Industrieerzeugnisse	< 0,01
2.3.2 technische Strahlenquellen	< 0,01
2.3.3 Störstrahler	< 0,01
2.4 durch berufliche Strahlenexposition (Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung)	< 0,01
2.5 durch Fall-out von Kernwaffenversuchen	< 0,01
2.5.1 von außen im Freien	< 0,01
2.5.2 durch inkorporierte radioaktive Stoffe	< 0,01
Summe der zivilisatorischen Strahlenexposition	ca. <u>1,5</u>
3. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl ...	ca. 0,02

*) Der Schwankungsbereich dieses Wertes beträgt ca. 50 %.

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 Untergrunds unterliegt die natürliche Strahlenexposition starken Schwankungen.

Die natürliche Strahlenexposition setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen, wobei zwischen der externen Strahlenexposition kosmischen und terrestrischen Ursprungs und der internen Strahlenexposition durch Inkorporation radioaktiver Stoffe über Inhalation und Ingestion unterschieden wird.

Die externe Strahlenexposition des Menschen beträgt im Mittel 0,8 mSv pro Jahr. Sie wird in Meereshöhe mit einem Dosisanteil von 0,3 mSv pro Jahr (Ortsdosisleistung 34—36 nSv pro Stunde) fast zur Hälfte durch die kosmische Komponente hervorgerufen, deren wesentlicher Anteil aus durchdringender Gammastrahlung besteht. Die terrestrische Komponente der externen Strahlenexposition wird im wesentlichen durch die Gammastrahlung des Kalium 40, dessen Gehalt im Boden zwischen 40 und 1 000 Bq pro Kilogramm schwankt, sowie durch die Strahlung von Radionukliden aus den Zerfallsreihen des Uran 238, Uran 235 und Thorium 232 verursacht. Der Radiumgehalt des Bodens schwankt im Mittel zwischen 10 und 200 Bq je Kilogramm. Die terrestrische Komponente verursacht eine mittlere Strahlenexposition von 0,5 mSv pro Jahr, wobei die mittlere Gamma-Ortsdosisleistung im

Freien 50—60 nSv pro Stunde und in Gebäuden 60—70 nSv pro Stunde beträgt. In Bergbaugebieten Sachsens und Thüringens wurden 70—200 nSv pro Stunde über landwirtschaftlich genutzten Flächen gemessen, während über Granitmassiven mit erhöhter Konzentration von Radium, Thorium und Kalium bis zu 380 nSv pro Stunde ermittelt wurden.

Die interne Strahlenexposition des Menschen aus natürlichen Quellen beträgt im Mittel 1,6 mSv pro Jahr, wobei allein auf das radioaktive Edelgas Radon und seine Zerfallsprodukte 1,3 mSv entfallen. Den Hauptbeitrag liefern die kurzlebigen Zerfallsprodukte des radioaktiven Edelgases Radon 222 (Halbwertszeit 3,8 Tage) des Tochterproduktes von Radium 226, das durch Diffusion aus dem Erdboden in die bodennahe Luft gelangt. Als reaktionsträges Edelgas hat es selbst nur eine geringe Radiotoxizität, da es im Körper nur schwach gebunden und nicht angereichert wird. Das Radon und seine Zerfallsprodukte werden mit der Atemluft aufgenommen. Während das Radon selbst zu einem großen Teil wieder ausgeatmet wird, scheiden sich seine Zerfallsprodukte zum größten Teil innerhalb der Atmungsorgane ab und tragen dort aufgrund energiereicher Alphastrahlung mit etwa 50 % zur gesamten natürlichen Strahlenexposition bei. Kalium 40 sowie die Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Uran 238 und Thorium 232 werden über Trinkwasser und Nahrung (Ingestion) aufgenommen und rufen eine mittlere effektive Jahresdosis von 0,3 mSv hervor.

III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten

Zum Schutz der Bevölkerung gegen ionisierende Strahlen werden seit mehr als 15 Jahren im alten und neuen Bundesgebiet Untersuchungen über die Strahlenexposition durch radioaktive Stoffe in Baumaterialien, Industrieprodukten und industriellen Abfallstoffen durchgeführt. Ziel ist es, eine Erhöhung der Strahlenexposition der Bevölkerung zu vermeiden und bei Materialien mit einer überdurchschnittlich hohen spezifischen Aktivität an radioaktiven Stoffen über eine Weiterverwendung unter Einhaltung der Forderungen des Strahlenschutzes zu entscheiden.

Der Gehalt an Radium 226, Thorium 232 und Kalium 40 in Natursteinen, Baustoffen und Industrieprodukten geht aus Tabelle 2 hervor. Die spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide schwankt inner-

halb der Stoffarten in einem großen Bereich. Unter den Baustoffen natürlichen Ursprungs weisen saure Magmageschiefer, insbesondere Granite, vergleichsweise hohe Gehalte an natürlichen Radionukliden auf.

In Abfallprodukten aus industriellen Verarbeitungsprozessen können sich radioaktive Stoffe anreichern, die bei Einsatz als Sekundärrohstoffe im Bauwesen eine erhöhte Strahlenexposition der Bevölkerung hervorrufen. In Einzelfällen wurden zum Beispiel an älteren Bauten, deren Wände Schlacke der Kupferschieferverhüttung enthalten, Ortsdosisleistungen von mehr als 500 nSv pro Stunde gemessen. Dieser Wert liegt im oberen Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenexposition (siehe Kap. II). Vergleichsweise beträgt die Ortsdosisleistung bei Verwendung konventioneller Baustoffe weniger als 250 nSv pro Stunde.

2. Radon in Gebäuden

Die Inhalation von Radon 222 und seinen Zerfallsprodukten ist die dominierende Komponente natürlicher Strahlenexposition der Bevölkerung. Die deutsche Strahlenschutzkommission verabschiedete deshalb am 30. Juni 1988 Grundsätze zur Begrenzung der durch Radon und seine Zerfallsprodukte hervorgerufenen Strahlenexposition. Sie definierte Radonkonzentrationen bis 250 Bq/m^3 in Wohnungen als „Normalbereich“ und empfahl bei Überschreitungen Maßnahmen zur Reduzierung mit konzentrationsangepaßter Dringlichkeit.

Im Zuge der Ermittlungen zur Strahlenschutzvorsorge setzte das Bundesamt für Strahlenschutz 1991 die mit unterschiedlichen Zielsetzungen bereits 1990 und früher begonnenen Meßprogramme zur Erfassung der Radonkonzentration in Gebäuden fort:

Im Rahmen des Projektes „Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten“ wurden bis Ende 1991 in 163 Kommunen und ca. 21 000 Wohnungen der neuen Bundesländer Übersichtsmessungen (sogenannte Screeningmessungen) der Aktivitätskonzentration von Radon in Gebäuden durchgeführt. Die Untersuchungen dienten zur Schaffung einer Übersicht in Gebieten, die möglicherweise durch den Bergbau und dessen Folgeindustrien beeinflußt sind, sowie in geologisch mit den Bergbaugebieten vergleichbaren Regionen und sonstigen Gebieten, deren Untersuchung zur Bewertung der geogenen Beeinflussung der Radonkonzentration in Gebäuden erforderlich ist. Die bei den Messungen verwendeten Dosimeter wurden 24 Stunden bei geschlossenen Fenstern und Türen exponiert. Die hier zu Übersichtszwecken erhobenen Meßwerte führen im allgemeinen zu einer Überschätzung der Langzeitbelastung und sind nicht mit der von der Strahlenschutzkommission empfohlenen Obergrenze des Normalbereiches der Radonkonzentration von 250 Bq/m^3 in Raumluft vergleichbar, da dieser Empfehlungswert auf Langzeitmessungen in normal belüfteten Räumen beruht.

In bergbaulich geprägten Gebieten betrug die mittlere durch Screeningmessungen bestimmte Radonkonzentration bei deutlich mehr als der Hälfte der Wohnungen im Erdgeschoß weniger als 250 Bq/m^3 , bei einigen Prozenten der Wohnungen mehr als $1 000 \text{ Bq/m}^3$. Die höchsten Radonkonzentrationen wurden in Gebäuden gemessen, die altbergbaulich, insbesondere durch oberflächennahe bergmännische Auffahrungen, beeinflußt sind. In einigen Fällen wurden kurzzeitig Spitzenwerte über $100 000 \text{ Bq/m}^3$ gemessen.

In bergbaufreien Granitgebieten des Erz- und Fichtelgebirges wurden dagegen flächenhaft höhere Mittelwerte der Radonkonzentration in Häusern festgestellt, ohne daß mit den Bergbaugebieten vergleichbare Spitzenwerte gemessen wurden.

In den bergbaufreien Vergleichsgebieten in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt (außerhalb der Granitregionen) sowie in Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern lagen fast alle Meßwerte unter 250 Bq/m^3 .

Über die Screeningmessungen hinaus wurden auf Anforderungen von Bürgern, Firmen, Schulen und sonstigen Einrichtungen in den alten und neuen Bundesländern ca. 1 100 Messungen durchgeführt. Die in den neuen Bundesländern durchgeführten 400 Langzeitmessungen (Meßdauer einige Monate bis ein Jahr) dienten vorwiegend der Überprüfung solcher Situationen, in denen aufgrund von Screeningmessungen eine Überschreitung des Normalbereiches der Radonkonzentration in Gebäuden zu erwarten war. Die Ergebnisse der Langzeitmessungen liegen im allgemeinen deutlich (im Einzelfall bis zum Faktor 10) unter den Radonkonzentrationen, die am gleichen Ort bei Screeningmessungen ermittelt wurden. Für eine statistisch gesicherte Aussage über die prozentualen Anteile der Gebäude in bestimmten Bereichen der Langzeitkonzentration reicht der vorhandene Datenumfang jedoch noch nicht aus.

Um die in der Mitte der 80er Jahre in den alten Bundesländern durchgeführten Radonmessungen zu ergänzen, sind in den neuen Bundesländern ca. 1 700 Wohnungen nach Zufallsprinzip ausgewählt worden. Mit den Messungen wurde begonnen.

Die mittlere Radonkonzentration für Gesamtdeutschland beträgt etwa 50 Bq/m^3 , wobei im alten und neuen Bundesgebiet außerhalb der Bergbaugebiete Spitzenwerte von ca. $3 000 \text{ Bq/m}^3$ festgestellt wurden.

Die bisherigen Meßergebnisse lassen die Einschätzung zu, daß in maximal 1,5 % der Wohnungen in Deutschland der von der Strahlenschutzkommission als Obergrenze des Normalbereiches bezeichnete Wert von 250 Bq/m^3 überschritten wird.

3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus

Umgebungsüberwachung an den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH

Die Sanierungsbetriebe der Wismut GmbH ermittelten unter Kontrolle der zuständigen Landesbehörden im Berichtsjahr 1991 die Ableitung radioaktiver Stoffe und die durch die bergbaulichen Tätigkeiten insgesamt verursachte radioaktive Kontamination der Betriebsflächen und des Umlandes.

Die für das Jahr 1991 ermittelten Werte für die Abgabe radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus den Betrieben der Wismut GmbH zeigen, daß die von den zuständigen Behörden festgelegten Genehmigungswerte der jährlichen Emissionen in keinem Fall überschritten wurden (Tabellen 3 und 4). Im allgemeinen liegen die Jahresabgaben sogar deutlich unter den Genehmigungswerten. Bei Abluft werden sie in einzelnen Fällen bis zu 50 %, bei Abwasser bis zu 70 % ausgeschöpft.

Kontrollmessungen in der Umgebung der Betriebe haben gezeigt, daß durch radioaktive Ableitung von Uran und Radium 226 mit den Abwässern in den großen Vorflutern der Bergbaugebiete (Elbe, Mulde, Weiße Elster und Pleiße) keine oder nur geringfügige Veränderungen der natürlichen Aktivitätskonzentration dieser Radionuklide verursacht werden. In den

unmittelbar durch Ableitungen betroffenen kleineren Zuflüssen zu den o. g. Gewässern tritt aufgrund der geringeren Abflusssmengen eine im Vergleich zum natürlichen Pegel deutlich erhöhte Aktivitätskonzentration dieser Radionuklide auf. Jedoch resultiert daraus keine Gefährdung, da diese Gewässer nicht genutzt werden. Unter der Annahme der Nutzung der großen Vorfluter als Trinkwasser ergibt sich eine theoretisch ermittelte effektive Jahresdosis von 0,01 bis 0,04 mSv.

Die im Rahmen der Umgebungsüberwachung in den Bergbaugebieten ermittelte Aktivitätskonzentration von Radon 222 in der bodennahen Atemluft übersteigt häufig den für große Gebiete Mittel- und Norddeutschlands charakteristischen Wertebereich von 8—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. Inversion 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 dem für das Gebiet typischen Schwankungsbereich von 25—100 Bq/m³. Ähnliche Werte wurden auch in bergbaufreien Gebieten im Süden der neuen Bundesländer festgestellt, die im Hinblick auf die geologischen Verhältnisse mit den Bergbaugebieten vergleichbar sind. Die durch Ableitung von Radon 222 mit der Abluft verursachte mittlere effektive Dosis für den Erwachsenen im Bergbaugebiet ist daher geringer als 1 mSv pro Jahr. Höhere Strahlenexpositionen können nur punktuell, z. B. bei ständigem Aufenthalt in der unmittelbaren Nähe von Abwetterschächten und industriellen Absetzanlagen auftreten. Die durch die Freisetzung von langlebigen Alpha-Strahlern bzw. von radioaktiv kontaminiertem Staub verursachte Strahlenexposition ist vernachlässigbar gering. Aus den bisher durchgeführten Untersuchungen ergibt sich, daß radioaktive Kontaminatio-

nen überwiegend auf kleine Bereiche des Betriebsgeländes sowie Objekte der Wismut GmbH beschränkt sind.

Altlastenkataster

Im Einigungsvertrag vom 31. August 1990 wurde der § 11 des Strahlenschutzvorsorgegesetzes durch den Absatz 9 ergänzt. Danach obliegt dem Bund im Bereich der neuen Bundesländer die Ermittlung der aus bergbaulicher Tätigkeit in Gegenwart natürlicher radioaktiver Stoffe stammenden Umweltradioaktivität. Das für diese Aufgabe zuständige Bundesamt für Strahlenschutz führt hierzu seit 1991 das Projekt „Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten (Altlastenkataster)“ durch. In der ersten Projektphase wurden zunächst vorhandene Daten gesichert, aufbereitet und in einer Bundesdatenbank zur bergbaubedingten Umweltradioaktivität gespeichert:

- Rund 8 000 Objekte des Bergbaus (meist Halden) wurden mit Kenndaten erfaßt. 34 Gebiete des Uran- und Altbergbaus („Verdachtsflächen“) wurden im Maßstab 1 : 10 000 kartographiert und nach Auswertung ihrer Kenndaten von einer ursprünglichen Verdachtsfläche von 1 500 km² auf Untersuchungsgebiete mit einer Gesamtfläche von insgesamt 250 km² begrenzt.
- An drei Standorten typischer bergbaulicher Altlasten wurden Meßprogramme zur Beurteilung der radiologischen Situation, Erprobung der Untersuchungsmethoden sowie zur Abschätzung der Untersuchungskosten durchgeführt.

Von der Strahlenschutzkommission sind 1991 Empfehlungen ausgesprochen worden¹⁾, die Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe kontaminierter Materialien und Objekte aus dem Uranerzbergbau enthalten.

IV. Zivilisatorische Strahlenexposition

1. Kerntechnische Anlagen

1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

In den neuen Bundesländern wurden erstmals im Jahr 1991 bei der Überwachung der Emissionen und Immissionen kerntechnischer Anlagen die in den alten Ländern geltenden rechtlichen Regelungen angewandt. Die Berechnung der Strahlenexposition in der Umgebung der Anlagen erfolgte 1991 einheitlich nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung.

Aus den für das Jahr 1991 ermittelten Werten für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwas-

ser aus kerntechnischen Anlagen geht hervor, daß die von den zuständigen Behörden festgelegten Höchstwerte für die jährlichen Emissionen in allen Fällen eingehalten wurden. Die tatsächlichen Jahresableitungen liegen im allgemeinen deutlich unter den Genehmigungswerten, wie beispielsweise für Kernkraftwerke der Vergleich zwischen den Werten der Tabelle 5 und üblichen Genehmigungswerten von ca. 10¹⁵ Becquerel für Edelgase, ca. 3 · 10¹⁰ Bq für Aerosole und ca. 10¹⁰ Bq für Iod 131 zeigt. Die Kernkraftwerke in den neuen Bundesländern waren im Laufe des Jahres 1990 endgültig abgeschaltet worden.

¹⁾ Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 23 (in Vorbereitung).

Die für 1991 aus den Jahresableitungen nach der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung“ für eine Referenzperson berechneten Werte der Strahlenexposition haben die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Dosisgrenzwerte nicht überschritten 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 in den meisten Fällen 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 1991 deutlich unter $10 \mu\text{Sv}$ pro Jahr (Tabelle 1).

1.2 Jahresableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen

Die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Einrichtungen 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, Probenahme, 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 1991 ermittelten Jahresableitungen radioaktiver Stoffe in Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken sind in den Tabellen 5 und 6 angegeben und nach Nuklidgruppen aufgeschlüsselt. Sie liegen in der Größenordnung der Ableitungen der Vorjahre und unterschreiten im allgemeinen deutlich die entsprechenden Genehmigungswerte. Der Rückgang der Ableitungen der Kernkraftwerke Greifswald und Rheinsberg ist auf deren endgültige Abschaltung im Jahr 1990 zurückzuführen. In Tabelle 7a sind die Daten über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Kernforschungszentren Karlsruhe, Jülich und Rossendorf für das Jahr 1991 zusammengefaßt. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus den übrigen Forschungsreaktoren betragen im Mittel nur einige Prozent der Ableitungen von Kernkraftwerken. In Tabelle 7b sind die entsprechenden Abwasserdaten im Jahr 1991 zusammengestellt. Tabelle 8 enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 1991 in Grenznähe, d. h. bis zu einer Entfernung von 30 km zur deutschen Grenze, die in Tabelle 9 aufgeführten kerntechnischen Anlagen in Betrieb. Das Kernkraft-

werk Mühleberg wurde trotz der größeren Entfernung zur deutschen Grenze mitberücksichtigt, weil es im Einzugsgebiet des Rheins liegt. Über die Jahresemissionen kerntechnischer Anlagen in EG-Ländern berichtet die Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Die Jahresableitungen 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 in der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ festgelegten Verfahren ermittelt.

Die in den Tabellen 10 bis 14 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, welche ungünstige Ernährungsgewohnheiten und Aufenthaltszeiten beinhalten, berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Jahr 1991 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft enthält Tabelle 10. Angegeben ist die effektive Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die Schilddrüsendosis für Kleinkinder über sämtliche relevanten Expositionspfade: Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammassubmersion), Gammastrahlung am Boden abgelagerter radioaktiver Stoffe, Inhalation und Ingestion.

Tabelle 10 zeigt als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene $8 \mu\text{Sv}$ beim Kernkraftwerk Würgassen; dies sind rund 3 % des Grenzwertes nach Strahlenschutzverordnung. Für Kleinkinder ergeben sich für die effektive Dosis $15 \mu\text{Sv}$ (entsprechend 5 % des Dosisgrenzwertes), für die Schilddrüsendosis $20 \mu\text{Sv}$ (entsprechend rund 2 % des Dosisgrenzwertes). Das Kernkraftwerk Würgassen war im Jahr 1990 nur etwa 10 Wochen in Betrieb gewesen. Daher sind die Ableitungen und dementsprechend auch die resultierenden Dosiswerte im Jahr 1991, in dem diese Anlage wieder voll in Betrieb war, höher als im Vorjahr.

In Tabelle 11 sind die aus den Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abwasser aus Kernkraftwerken resultierenden oberen Werte der effektiven Dosis für Erwach-

sene und Kleinkinder zusammengestellt. Hierbei wurden ebenfalls ungünstige Verzehr- und Lebensgewohnheiten angenommen, insbesondere für Erwachsene ein hoher Konsum an Flußfisch, der in der Kühlwasserfahne gefangen wird und für beide Personengruppen der Aufenthalt von 1 000 Stunden am Flußufer oder auf Wiesen in Flußnähe. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt jeweils $0,7 \mu\text{Sv}$ bei den Kernkraftwerken Neckarwestheim und Gundremmingen. Die relativ hohen Werte bei einigen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren resultieren aus unvermeidbaren Tritiumemissionen in Vorfluter mit geringen Abflüssen.

Entsprechend der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung wurde auch die Strahlenexposition am Unterlauf der Flüsse näher betrachtet, wobei jeweils sämtliche Emittenten berücksichtigt wurden. Die höchste effektive Dosis wurde mit etwa $2 \mu\text{Sv}$ für Erwachsene und Kleinkinder im Mündungsgebiet des Neckars ermittelt; am Unterlauf der Weser wurden für Erwachsene $0,6 \mu\text{Sv}$ und für Kleinkinder $0,8 \mu\text{Sv}$ berechnet, an Rhein, Donau und Main liegen die effektiven Dosen bei $0,2 \mu\text{Sv}$. 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 Tabelle 12 angegebenen Werte für die entsprechenden Strahlenexpositionen durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernforschungszentren stammen aus den Jahresberichten und aus zusätzlichen Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Kernforschungszentren Karlsruhe, Jülich und Rossendorf. Die Tabelle weist für die effektive Dosis im Jahr 1991 als höchsten Wert $9,4 \mu\text{Sv}$ (ca. 3 % des Grenzwertes) für Erwachsene und $18 \mu\text{Sv}$ (6 % des Grenzwertes) für Kleinkinder beim Forschungszentrum Rossendorf auf. Der höchste Wert der Schilddrüsens dosis für Kleinkinder ergibt sich mit $170 \mu\text{Sv}$ (ca. 19 % des Grenzwertes) ebenfalls beim Forschungszentrum Rossendorf.

Für die kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe in Hanau, Karlstein, Lingen und Gronau sind in Tabelle 13 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 $3 \mu\text{Sv}$ für Erwachsene (1 % des Grenzwertes), der höchste Wert der Lungendosis $12 \mu\text{Sv}$ für Kleinkinder (1,3 % des Grenzwertes).

Die durch die Ableitungen von Alphastrahlern mit dem Abwasser bedingten Werte der effektiven Dosis von Erwachsenen und Kleinkindern in der Umgebung kernbrennstoffverarbeitender Betriebe sind in Tabelle 14 aufgeführt. Wie im Vorjahr liegen auch 1991 die Werte der effektiven Dosis in der Umgebung aller kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe bei jeweils weniger als $0,1 \mu\text{Sv}$. In Übereinstimmung mit der am Standort vorliegenden landwirtschaftlichen Nutzung wurde bei der Dosisberechnung von einer vollständigen Durchmischung der Abwasserfahne mit dem Main ausgegangen.

Die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und mit dem Abwasser aus dem Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist in Tabelle 15 aufgeführt. Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft ermittelte obere Wert der effektiven Dosis für Erwachsene betrug 1991 $2,3 \mu\text{Sv}$, für Kleinkinder $3,6 \mu\text{Sv}$; dies sind ca. 1 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Die Lungendosis betrug mit $19 \mu\text{Sv}$ für Erwachsene und $37 \mu\text{Sv}$ für Kleinkinder ca. 2 bzw. ca. 4 % des Grenzwertes. Aus den Ableitungen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser wurden 1991 obere Werte der effektiven Dosis unterhalb von $0,1 \mu\text{Sv}$ für Erwachsene und Kleinkinder berechnet.

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

Der Betrieb kerntechnischer Anlagen in Nachbarländern (Tabelle 9) führte 1991 unter Anwendung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung auf Bundesgebiet zu oberen Werten der effektiven Dosis im Mikrosievert-Bereich. Für die Schilddrüsens dosis eines Kleinkindes über sämtliche relevanten Expositionspfade errechnet sich ein oberer Wert von $15 \mu\text{Sv}$ pro Jahr; den größten Beitrag zur Schilddrüsens dosis liefert der Weide-Kuh-Milch-Pfad. Bei den im Rahmen der Umgebungsüberwachung durchgeführten Messungen des Radioiodgehaltes von Milchproben aus grenznahen Weidegebieten wurde im Berichtszeitraum Iod 131 in Milch nicht nachgewiesen.

2. Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin

Die zivilisatorische Strahlenexposition der Bevölkerung durch die medizinische Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe betrug im Jahr 1991 im Mittel ca. $1,5 \text{ mSv}$ (effektive Dosis). Der größte Anteil an der zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung resultiert aus der medizinischen Röntgendiagnostik.

Der in Tabelle 1 angegebene Zahlenwert für die mittlere effektive Dosis beruht auf groben Schätzungen. Repräsentative Erhebungen über die Häufigkeit röntgendiagnostischer Untersuchungen wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz 1988—1990 durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Erhebung

sind in den Tabellen 16 und 17 dargestellt. Die bei den Untersuchungen auftretenden Dosen werden derzeit vom Bundesamt für Strahlenschutz und im Rahmen von Forschungsvorhaben ermittelt.

Einerseits zeichnet sich bei manchen Röntgenuntersuchungen ein rückläufiger Trend ab. Ursache hierfür sind sowohl eine strengere Indikationsstellung von seiten der Ärzte aufgrund eines gestiegenen Strahlenschutzbewußtseins als auch eingeführte alternative Untersuchungsverfahren, insbesondere Sonographie und Endoskopie und in noch geringem aber zunehmendem Maß die Magnetresonanztomographie. Andererseits gibt es eine Zunahme moderner, dosisintensiver Untersuchungsverfahren, wie Computertomographie und digitale Subtraktionsangiographie sowie die interventionelle Radiologie. Letztere werden vorwiegend bei älteren Patienten durchgeführt, wodurch sich das Langzeitstrahlenrisiko bezüglich der Tumorentstehung vermindert. Trotzdem kann ein Rückgang der Strahlenexposition des einzelnen untersuchten Patienten angenommen werden, der auf die Einführung dosissparender Untersuchungstechniken, z. B. durch den Einsatz von empfindlicheren Röntgenbildverstärkern und verbesserten Film-Foliensystemen, zurückzuführen ist.

Auch die gesetzlichen Vorschriften (Röntgenverordnung und Strahlenschutzverordnung) haben sich auf die Strahlenexposition des einzelnen und der Gesamtheit positiv ausgewirkt. Die neue Röntgenverordnung vom 8. Januar 1987 (BGBl. I S. 114), zuletzt geändert durch Verordnung vom 19. Dezember 1990 (BGBl. I S. 2949), beinhaltet zahlreiche weitere Maßnahmen zur Verbesserung des Strahlenschutzes in der Röntgendiagnostik, die durch entsprechende Richtlinien konkretisiert sind. Dadurch sind von gesetzgeberischer Seite her die Voraussetzungen zur Verbesserung der ärztlichen Fachkunde und der Kenntnisse des medizinischen Hilfspersonals im Strahlenschutz geschaffen und in der Folge Verbesserungen der Untersuchungsverfahren bzw. Untersuchungstechniken mit angeregt. Darüber hinaus sind weitere Vorschriften über Sachverständigenprüfungen, über technische Standards von Röntgeneinrichtungen und über qualitätssichernde Maßnahmen erlassen worden. Einen sehr wichtigen Beitrag zur Verbesserung der diagnostischen Bildqualität und zur Minimierung der Strahlenexposition der Patienten leisten die nach den Vorschriften der Röntgenverordnung neu eingerichteten ärztlichen Stellen. Hier werden regelmäßig die Aufzeichnungen über die Abnahmeprüfungen und die Ergebnisse der Konstanzprüfung, sowie stichprobenartig ausgewählte Patientenaufnahmen begutachtet. Die dabei ausgesprochenen Verbesserungsvorschläge, z. B. zur Einführung von dosissparenden Film-Folien-Systemen, zeigen bereits positive Wirkung. Auch das vom Deutschen Bundestag geforderte „Röntgennachweisheft“ ist eingeführt worden, um so Wiederholungsuntersuchungen auf das notwendige Maß zu begrenzen.

Die Nuklearmedizin liefert aufgrund der vergleichsweise niedrigeren Anwendungsfrequenzen einen wesentlich geringeren Beitrag zur Strahlenexposition der Bevölkerung. Er liegt etwa bei einem Zehntel des Betrages der durch die Röntgendiagnostik verursach-

ten Strahlenexposition (ausgedrückt als mittlere effektive Dosis).

Bei der Wertung der Strahlenexposition durch medizinische Maßnahmen ist jedoch zu berücksichtigen, daß daraus ein Strahlenrisiko für den einzelnen resultiert, welches bei gewissenhafter Indikationsstellung gegenüber dem Nutzen für seine Gesundheit in den Hintergrund tritt. Das Risiko einer nicht (rechtzeitig) erkannten Krankheit wegen z. B. unterlassener Röntgendiagnostik ist ungleich höher als das rechnerische Risiko einer vertretbaren zusätzlichen Strahlenexposition. Für die strahlenintensivere interventionelle Radiologie, also therapeutische Maßnahmen (meist an den Blutgefäßen), gilt dies in noch höherem Maße, da sie risikobehaftete Operationen einschließlich Narkose ersetzen kann.

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

3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen

Bestimmte Industrieerzeugnisse, wie z. B. wissenschaftliche Instrumente, elektronische Bauteile, Leuchtstoffröhren, Rauch- und Feuermelder, keramische Gegenstände u. a., enthalten radioaktive Stoffe verschiedener Art und Aktivität. Der Umgang mit diesen Erzeugnissen wird durch ein differenziertes Anzeige- und Genehmigungssystem geregelt, bei dem auch ein genehmigungsfreier Umgang z. B. durch Bauartzulassung möglich ist. Die Einhaltung der Vorschriften der Strahlenschutzverordnung gewährleistet, daß der Umgang mit diesen radioaktiven Industrieerzeugnissen einschließlich Antistatika, keramischen Gegenständen und Zahnmassen weniger als 10 μSv pro Jahr zur effektiven Dosis der Bevölkerung beiträgt.

Bei einigen technischen Prozessen werden Strahlenquellen zur Messung und Steuerung (z. B. Füllstand-, Dicke- und Dichtemessung) oder zur Qualitätskontrolle bei der zerstörungsfreien Materialprüfung eingesetzt. Der Umgang mit diesen technischen Strahlenquellen unterliegt meistens der Genehmigungspflicht (Anzeigepflicht bei geringer Radioaktivität oder bei bauartzugelassenen Geräten); die damit verbundenen Auflagen garantieren, daß auch der hieraus resultierende Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung niedriger als 10 μSv pro Jahr ist.

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 grundsätzlichen Genehmigungspflicht, sofern eine Bauartzulassung nicht vorliegt. Zu den Störstrahlern gehören auch Kathodenstrahlröhren in Bildschirmgeräten.

Der Beitrag von Störstrahlern zur Strahlenexposition der Bevölkerung führt zu einer effektiven Dosis von weniger als 10 μ Sv pro Jahr.

4. Berufliche Tätigkeit

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 in den alten und neuen Bundesländern ausgegeben und ausgewertet werden. Die Zahl der überwachten Personen betrug (gerundet) im Berichtsjahr insgesamt 350 000 (alte Bundesländer: 318 000, neue Bundesländer: 32 000), davon im Bereich Medizin 235 000 (alte Bundesländer: 214 000, neue Bundesländer: 21 000). Die Abbildungen 1 a und 1 b zeigen den Verlauf seit 1981 für die alten und neuen Bundesländer.

Die nachstehenden Dosisangaben beziehen sich auf Photonenstrahlen, da diese in nahezu allen Kontrollbereichen die Dosis bestimmen. Dosisbeiträge durch Neutronen- und Betastrahler sind nur in wenigen Fällen von Bedeutung. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,36 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, daß bei dem größten Teil aller Überwachten (in den alten Bundesländern ca. 82%) während des ganzen Jahres die untere Meßbereichsgrenze des Personendosimeters von 0,2 mSv nicht überschritten wird. In diesen Fällen setzen die Meßstellen für die Personendosis den Wert Null fest; dies betrifft in den alten Bundesländern im Bereich Medizin etwa 89%, in nichtmedizinischen Bereichen etwa 70% der Überwachten. Bei den verbleibenden Personen ergibt sich eine ausgeprägte Häufigkeit kleiner Dosiswerte. Bildet man einen Mittelwert nur für die Überwachten mit von Null verschiedenen Jahrespersonendosiswerten, so ergibt sich eine mittlere Jahres-Personendosis von 2,18 mSv (alte Bundesländer).

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) im Berichtsjahr betrug 126 Personen-Sv (alte Bundesländer: 123 Personen-Sv; neue Bundesländer: 3 Personen-Sv). Die Beiträge typischer Tätigkeitszweige zur Kollektivdosis zeigen die Abbildungen 2 a und 2 b. Nähere Angaben zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken sind in den Tabellen 18 a und 18 b enthalten.

Inkorporationsüberwachung

Personen, bei denen aufgrund ihrer beruflichen Tätigkeit eine Aktivitätszufuhr oberhalb 10% des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr nicht ausgeschlossen werden konnte, wurden nach den Richtlinien für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zu den §§ 62 und 63 StrlSchV durch Messungen in Ganz- und Teilkörperzählern und durch Analysen der Ausscheidungen überwacht.

Bezogen auf die Zahl der mit Personendosimetern überwachten Personen war die Zahl dieser Personen, die sich in der Inkorporationsüberwachung befanden, kleiner als 10%.

Bei weniger als 1% der überwachten Personen wurden Inkorporationen von mehr als 5% des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr festgestellt.

In den neuen Bundesländern ist bei den kontrollierten Beschäftigten aus den Meßwerten für die Körperaktivität von Einzelnukliden ein Trend zu geringeren Aktivitätszufuhren erkennbar, was u. a. auf den reduzierten Umgang mit radioaktiven Stoffen bzw. die Außerbetriebsetzung von Anlagen zurückzuführen ist. Aus der mittleren Körperaktivität von Einzelnukliden läßt sich unter der Annahme einer einmaligen Aktivitätszufuhr über Inhalation gemäß den Empfehlungen der ICRP-30 eine mittlere effektive Dosis von 0,16 mSv für die überwachten Personen abschätzen.

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 im Bergbau und bei anderen Tätigkeiten auftretende Strahlenexposition durch Inhalation kurzlebiger Radonfolgeprodukte überwacht. 1991 waren davon ca. 7 300 Personen betroffen, von denen mehr als 70% Sanierungsarbeiten in den Betrieben der Wismut GmbH ausführten.

Die berufliche Strahlenexposition wurde aus den am Arbeitsplatz gemessenen Konzentrationen der potentiellen Alphaenergie²⁾ der kurzlebigen Radonfolgeprodukte und den entsprechenden Aufenthaltszeiten der Beschäftigten ermittelt. Die Umrechnung der Exposition in entsprechende Dosiswerte erfolgt gemäß ICRP-Publikation 32. Einzelne Beschäftigte der Wismut GmbH wurden 1991 mit personengebundenen Geräten (am Körper getragene spezielle Meßgeräte mit akkumulatorgetriebener Probenahmepumpe, Filter, Kernspur- und Thermolumineszenzdetektoren) zur Messung des Zeitintegrals der potentiellen Alphaenergiekonzentration, der externen Strahlenexposition durch Gammastrahlung sowie der Konzentration der langlebigen Alphastrahler überwacht.

Die Kollektivdosis aller beruflich durch Radonfolgeprodukte strahlenexponierten Personen betrug 1991 ca. 50 Personen-Sv. Mehr als 40 Personen-Sv erhielten allein die Beschäftigten der Wismut GmbH. Bei diesen wurden auch die Expositionen durch langlebige Alphastrahler und durch externe Strahlung berücksichtigt, die bei den Beschäftigten in den Nichturanbergbaubetrieben und in den sonstigen überwachten Einrichtungen mit Expositionen durch Radonfolge-

²⁾ Die potentielle Alphaenergie eines kurzlebigen Radonfolgeprodukt-Atoms ist die Summe der Energien aller Alpha-Teilchen, die beim Zerfall dieses Atoms bis zum Pb-210 entstehen. Die potentielle Alphaenergiekonzentration eines beliebigen Gemisches von kurzlebigen Radonfolgeprodukten ist die Summe der potentiellen Alphaenergien aller Atome der Folgeprodukte pro Luftvolumen.

produkte im allgemeinen nur einen vernachlässigbaren Beitrag liefern.

Die mittlere effektive Jahresdosis aller durch Radonfolgeprodukte beruflich exponierten Überwachten betrug 6,8 mSv und lag damit weit unter dem in der Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz — VOAS — festgelegten Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A von 50 mSv pro Jahr. Die höchste mittlere effektive Jahresdosis erhielten die Beschäftigten der Wismut GmbH mit 7,9 mSv, gefolgt von den Beschäftigten in Wasserwirtschaftsbetrieben (6,6 mSv), in Schauhöhlen und Schaubergwerken (5,8 mSv), in Bergsicherungsbetrieben (4,7 mSv), in sonstigen Einrichtungen (vorwiegend medizinische und wissenschaftliche Institutionen, 4,3 mSv) und im Bereich des übrigen Bergbaus in dieser Region (3,6 mSv). Je nach Tätigkeitsbereich sind 2—14 % der beruflich durch Radonfolgeprodukte strahlenexponierten Personen einer jährlichen effektiven Dosis von mehr als 15 mSv (Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B gemäß VOAS) ausgesetzt, wobei die in Betrieben der Wismut GmbH und der Wasserwirtschaft überwachten Personen den höchsten Prozentsatz auf sich vereinigen.

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 der zunehmenden geomagnetischen Breite an. So liegt die Äquivalent-Dosisleistung bei Flügen in einer Höhe von etwa 10—12 km bei geomagnetischen Breiten vom Äquator bis zu 70° Nord im Bereich von 2 μ Sv/h bis 16 μ Sv/h. Bei Annahme einer mittleren Äquivalentdosisleistung von 8 μ Sv/h und einer Flugzeit von 500—800 Stunden im Jahr läßt sich für das Flugpersonal auf solchen Routen eine mittlere jährliche Strahlenexposition von etwa 5 mSv abschätzen. Nach gegenwärtiger Rechtslage gehört dieses Flugpersonal nicht zu den beruflich strahlenexponierten Personen. Nach der neuen Empfehlung der Internationalen

Kommission für Strahlenschutz (ICRP-60) und Überlegungen bei der Europäischen Gemeinschaft sollte diese Personengruppe künftig als beruflich strahlenexponiert angesehen werden. Nach Verabschiedung der neuen Euratomgrundnormen werden im Rahmen der dadurch erforderlichen Revision des deutschen Strahlenschutzrechtes entsprechende Regelungen berücksichtigt.

5. Besondere Vorkommnisse

Eine Übersicht über besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe im Jahr 1991, die dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit von den zuständigen Landesbehörden (alte und neue Bundesländer) gemeldet worden sind, enthält Tabelle 19. Die Übersicht dient dazu, mögliche Fehlerquellen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aufzuzeigen, um vergleichbare Vorkommnisse zu vermeiden. Die im Rahmen besonderer Vorkommnisse von Einzelpersonen erhaltenen Strahlenexpositionen haben nicht zu einer Erhöhung der mittleren jährlichen Strahlenexposition der Bevölkerung geführt.

6. Fall-out von Kernwaffenversuchen

1991 wurden insgesamt 14 unterirdische Kernwaffenversuche durchgeführt, davon 8 in den USA und 6 in der Südsee. Die Sowjetunion hatte erklärt, einseitig alle Atomwaffenversuche einzustellen. Demzufolge sind im Berichtsjahr keine sowjetischen Kernexplosionen bekannt geworden. Aus den unterirdischen Versuchen resultiert keine zusätzliche Strahlenexposition der Personen in der Bundesrepublik Deutschland.

Der allgemeine Pegel der Umweltradioaktivität durch die früheren Kernwaffenversuche in der Atmosphäre ist in den letzten 20 Jahren ständig zurückgegangen. Ihr Anteil an der gesamten Strahlenexposition des Menschen beträgt weniger als 0,2 %.

V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

Die infolge des Reaktorunfalls deponierten Radionuklide Caesium 137, Caesium 134 und Strontium 90 waren durch radioaktiven Zerfall Mitte 1991 auf etwa 89, 18 und 88 % der jeweiligen Ausgangswerte zurückgegangen. Zum Zeitpunkt der Deposition betrug das Verhältnis dieser Radionuklide in der o. g. Reihenfolge 1:0,53:0,01. Die aus der Deposition von Radiocaesium resultierende externe Strahlenexposition beträgt 1991 weniger als 0,02 mSv (1986: 0,07 mSv) und variiert regional entsprechend der unterschiedlich hohen Ablagerungsrate. Südlich der Donau sowie in begrenzten Gebieten des Bayerischen Waldes und Ostdeutschlands kann die Dosis, je nach örtlichen Gegebenheiten, in Einzelfällen um eine Größenordnung höher sein.

Grundnahrungsmittel sind durch Radiocaesium aus dem Fallout des Reaktorunfalls nur noch geringfügig kontaminiert. Strontium 90 in Nahrungsmitteln stammt überwiegend aus dem Atombomben-Fallout. In Milch pendelt sich die Aktivitätskonzentration von Caesium 137 auf einen Wert von 0,5 Bq/l ein; in Fleisch aus landwirtschaftlicher Produktion sowie weiteren Grundnahrungsmitteln liegt die spezifische Aktivität von Caesium 137 überwiegend um bzw. weit unter 1 Bq/kg Frischmasse. Entsprechend beträgt die mittlere tägliche Caesiumzufuhr über Grundnahrungsmittel weniger als 1 Bq. Wildfleisch, Wildpilze sowie auch Raubfische aus eng begrenzten Gebieten weisen auch 1991 höhere Caesiumwerte im Bereich von

einigen zehn bis zu einigen tausend Becquerel pro Kilogramm auf, weshalb besondere Ernährungsgeohnheiten Abweichungen von den durchschnittlichen Zufuhrwerten bedingen können.

Seit dem Reaktorunfall in Tschernobyl wird von einer Reihe von Ganzkörpermeßeinrichtungen in der Bundesrepublik Deutschland in verschiedenen Gebieten der zeitliche Verlauf des Caesium 137- und Caesium 134-Gehaltes im Menschen verfolgt. 1991 betrug die Ganzkörperaktivität bei den untersuchten Personengruppen 2—3 μ Sv (Tabelle 20), entsprechend 7—10 % des Maximalwertes, der um die Jahresmitte 1987 auftrat. Regionale Unterschiede haben sich weiterhin abgeschwächt. Für viele der ausgemessenen Personen liegt die Kontamination bereits unter der Nachweisgrenze.

Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland durch den Reaktorunfall wird 1991 fast ausschließlich durch die Bodenstrahlung des deponierten Radionuklids Caesium 137 verursacht und beträgt im bundesweiten Mittel weniger als 1 % der durchschnittlichen natürlichen Strahlenexposition von 2,4 mSv pro Jahr.

Südlich der Donau kann die Dosis, je nach örtlichen Gegebenheiten, in Einzelfällen bis zu einem Faktor 10 höher sein.

Tabelle 1: siehe Kapitel I

Tabelle 2

Bandbreite der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide in Baustoffen und Industrieprodukten

Material	RA-226 (Bq/kg) ^{a)}	Th-232 (Bq/kg) ^{a)}	K-40 (Bq/kg) ^{a)}
Baustoffe natürlichen Ursprungs			
saure Magmages Steine	30— 500	17—310	380—4 000
basische Gesteine	<10— 36	<10— 37	100— 380
Naturgips, Anhydrit	2— 13	1— 11	7— 130
Kalkstein, Marmor	4— 41	2— 20	<40— 240
Kies, Sand	1— 700	1— 64	3—1 200
Lehm, Ton	16—2 000	18— 90	30—1 300
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, Gasbeton	6— 80	1— 60	40— 800
Zement	10— 330	11—200	<40— 500
Kalk, Kalkhydrat	13— 60	2— 93	20— 600
Sonstige Industrieprodukte, Rohstoffe			
Düngemittel	<20—1 000	<20— 30	<40—8 000
Rohphosphate	100—2 000	<20—100	<40— 900
Steinkohle	<20— 30	<20—<50	<40— 200
Braunkohle	1— 51	1— 58	<4— 220
Koks	20— 30	<20	40— 80
Industrielle Abfallstoffe			
Bergbauabraum	<30—5 900	27—100	40—1 200
Braunkohlefilteraschen	4— 200	6—150	12— 610
Schlacke	12—2 100	6—340	10— 960
Hüttenbims	110— 230	24— 62	180— 190
Rotschlamm	<280—1 000	<250—800	1—1 000

^{a)} bezogen auf Trockenmasse

Tabelle 3

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Sanierungsbetrieben der WISMUT GmbH
(Genehmigungswert in Klammern)**

Sanierungsbetrieb	Abwetter bzw. Abluftmengen (m ³ pro Jahr)	Abgabe radioaktiver Stoffe	
		Rn-222 [Bq]	langlebige Alphastrahler [Bq] ^{a)}
Aue	1,4 E10 (3,7 E10)	5,1 E11 (1,5 E15)	1,6 E08 (1,7 E10)
Königstein BT Königstein	2,2 E10 (2,4 E10)	2,2 E14 (3,4 E14)	1,4 E08 (1,0 E09)
Ronneburg (einschließlich Drosen) ..	4,7 E10 (1,4 E11)	3,1 E14 (7,0 E14)	5,2 E08 (5,0 E09)
Seelingstädt BT Seelingstädt	1,35 E09 (1,0 E10)	1,17 E12 b)	5,7 E07 (9,0 E08)
BT Crossen ^{c)}	—	—	—

a) Uran-Isotope, Thorium 230, Radium 226, Polonium 210

b) keine Grenzwertfestlegung

c) keine Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft (Abriß der Betriebsgebäude)

Die aus den übrigen bergbaulichen Anlagen (vor allem industrielle Absetzanlagen, Halden) freigesetzte Radonaktivität wird aus den Ra-226-Konzentrationen der deponierten Materialien unter Zugrundelegung der unter konservativen Annahmen abgeleiteten normierten Freisetzungsrates (1 Bq Rn-222/m² · sec pro Bq Ra-226/g Material) mit einer theoretisch möglichen Radonfreisetzung von $2 \cdot 10^{15}$ pro Jahr abgeschätzt.

Tabelle 4

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser
aus den Sanierungsbetrieben der WISMUT GmbH
(Genehmigungswert in Klammern)**

Sanierungsbetrieb	Abgabe radioaktiver Stoffe	
	Uran [kg]	Ra-226 [Bq]
Aue	5,2 E03 (1,0 E04)	1,1 E09 (5,3 E09)
Königstein	1,8 E03 (6,5 E03)	1,1 E10 (2,1 E10)
Ronneburg	7,3 E03 (1,1 E04)	1,2 E09 (7,5 E09)
Drosen	4,1 E02 (2,0 E03)	3,4 E08 (1,5 E09)
Seelingstädt BT Seelingstädt	3,8 E03 (8,2 E03)	5,8 E09 (1,2 E10)
BT Crossen	3,3 E01 (4,0 E03)	1,3 E07 (7,5 E08)

Tabelle 5

Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1991

Kernkraftwerk	Edelgase Bq	Aerosole ^{a)} Bq	Iod 131 Bq	¹⁴ CO ₂ Bq	Tritium Bq
Kahl ^{b)}	n. b.	1,8 E04	n. b.	n. b.	n. b.
Rheinsberg ^{c)}	n. n.	6,4 E04	n. n.	n. b.	n. b.
Gundremmingen A ^{d)}	n. b.	1,3 E06	n. b.	n. b.	5,8 E09
Lingen ^{d)}	n. b.	6,9 E01	n. b.	n. b.	1,3 E08
Obrigheim	5,0 E10	8,6 E06	1,0 E05	2,8 E09	1,0 E11
Stade	1,9 E12	2,1 E07	6,1 E07	2,4 E10	4,3 E11
Würgassen	2,1 E12	1,7 E08	1,6 E08	2,3 E11	3,9 E11
Greifswald ^{c)}	n. n.	1,3 E08	n. n.	3,3 E10	6,8 E10
Biblis A	4,5 E12	1,4 E07	n. n.	9,3 E09	3,1 E11
Biblis B	2,5 E12	1,0 E07	1,5 E06	2,4 E10	2,4 E11
Neckar 1	1,1 E13	2,5 E06	4,8 E04	5,7 E09	5,5 E11
Brunsbüttel	1,3 E12	2,3 E07	3,1 E07	2,6 E11	6,2 E10
Isar 1	1,2 E09	1,9 E06	1,7 E05	2,9 E11	5,6 E11
Unterweser	2,7 E12	2,1 E06	5,6 E04	7,4 E10	1,2 E12
Philippsburg 1	1,3 E11	2,3 E07	2,4 E06	4,4 E11	6,1 E10
Grafenrheinfeld	5,1 E10	3,3 E06	1,1 E06	1,5 E11	4,4 E11
Krümmel	4,5 E11	3,9 E07	7,7 E07	2,3 E11	9,9 E10
Gundremmingen B und C	1,3 E11	n. n.	9,2 E05	1,1 E12	3,8 E11
Grohnde	1,1 E12	n. n.	n. n.	9,8 E10	7,3 E11
Hamm-Uentrop ^{e)}	2,6 E10	8,0 E05	n. n.	1,3 E08	1,7 E11
Philippsburg 2	4,8 E11	3,7 E05	1,8 E05	5,2 E10	1,4 E12
Mülheim-Kärlich ^{f)}	n. n.	n. n.	n. n.	2,4 E09	1,8 E11
Brokdorf	7,2 E11	1,2 E06	8,4 E05	1,6 E11	2,2 E11
Isar 2	2,4 E11	1,3 E04	n. n.	4,6 E11	9,5 E11
Emsland	1,1 E11	3,9 E05	n. n.	2,1 E11	6,7 E11
Neckar 2	2,5 E12	8,8 E05	3,4 E04	4,9 E10	6,8 E11

^{a)} Halbwertszeit > 8 Tage, ohne Iod 131, einschließlich Strontium und Alpha-Strahler

^{b)} Betrieb beendet 1985

^{c)} Betrieb beendet 1990

^{d)} Betrieb beendet 1977

^{e)} Betrieb beendet 1988

^{f)} 1991 nicht in Betrieb

n. n.: nicht nachgewiesen (kleiner oder gleich Nachweisgrenze)

n. b.: nicht bestimmt

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken
in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1991**

(Summenwerte, Tritium und α -Strahler)

Kernkraftwerk	Spalt- und Aktivierungsprodukte (außer Tritium) Bq	Tritium Bq	Alpha-Strahler Bq
Siedewasserreaktoren			
Kahl ^{a)}	2,1 E07	1,1 E10	—
Lingen ^{a)}	4,4 E06	9,8 E07	—
Würgassen	5,2 E08	4,6 E11	1,3 E06
Brunsbüttel	4,6 E08	2,9 E11	1,9 E06
Isar 1	6,9 E07	4,0 E11	1,0 E06
Philippsburg 1	2,5 E08	6,3 E11	—
Krümmel	1,5 E07	9,5 E11	—
Gundremmingen ^{b)} (Block B und C)	5,0 E08	3,0 E12	—
Druckwasserreaktoren			
Obrigheim	1,5 E08	8,9 E11	—
Stade	4,9 E08	2,9 E12	—
Biblis Block A	2,0 E08	9,9 E12	—
Biblis Block B	3,6 E08	8,4 E12	—
Neckar 1	8,4 E07	1,4 E13	—
Unterweser	3,6 E08	1,1 E13	—
Grafenrheinfeld	4,7 E07	1,4 E13	—
Grohnde	9,3 E07	1,6 E13	6,9 E05
Philippsburg 2	1,8 E08	1,7 E13	—
Mülheim-Kärlich	6,6 E07	4,9 E11	—
Brokdorf	—	1,5 E13	—
Isar 2	3,9 E06	8,6 E12	—
Emsland	3,3 E06	8,3 E12	—
Neckar 2	1,4 E07	1,8 E13	—
Rheinsberg ^{c)}	4,4 E07	n. b.	n. b.
Greifswald Block 1 bis 5 ^{d)}	6,1 E08	2,0 E11	n. b.
Hochtemperaturreaktor			
Hamm-Uentrop	4,3 E06	6,6 E09	—

^{a)} Anlage stillgelegt

^{b)} Block A stillgelegt (geringfügige Abgaben sind in den für Block B und C angegebenen Daten enthalten)

^{c)} Anlage seit Juni 1990 außer Betrieb

^{d)} Anlage seit Dezember 1990 außer Betrieb

n. b.: nicht bestimmt

Wird kein Zahlenwert angegeben, liegt die Aktivitätsabgabe unterhalb der Nachweisgrenze.

Tabelle 7 a

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernforschungszentren
in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1991**

	Edelgase Bq	Aerosole ^{a)} Bq	Iod 131 Bq	Iod 129 Bq	Tritium Bq	Kohlen- stoff 14 Bq	Stron- tium 90 Bq
Kernforschungszentrum Karlsruhe (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage)	9,9 E12	2,3 E08 ^{b)}	5,0 E06	3,8 E07	1,3 E13	3,9 E10	3,6 E07
Forschungszentrum Jülich (einschließlich Versuchsreaktor AVR)	2,4 E11	1,6 E06	1,4 E08	—	1,3 E12	3,0 E10	3,8 E03
Kernforschungszentrum Geesthacht	6,8 E11	7,1 E04	2,7 E05	n. n.	2,2 E10	1,3 E08	n. n.
Forschungszentrum Rossendorf	<1,1 E13	3,3 E08	3,9 E09	—	4,0 E12	<5,0 E10	n. n.

^{a)} HWZ > 8 d

^{b)} Alphastrahler: 1,2 E06 Bq

n. n.: nicht nachgewiesen (kleiner oder gleich Nachweisgrenze)

Tabelle 7 b

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernforschungszentren
in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1991**

	Spalt- und Aktivierungsprodukte (außer Tritium) Bq	Tritium Bq	Alpha-Strahler Bq
Kernforschungszentrum Karlsruhe (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage) .	3,9 E08 ^{a)}	1,6 E13	1,5 E06 ^{b)}
Forschungszentrum Jülich	8,5 E08	3,5 E11	<1,9 E07
Kernforschungszentrum Geesthacht	5,0 E08	8,2 E09	2,0 E05
Forschungszentrum Rossendorf	4,0 E07 ^{c)}	1,0 E11	<2,9 E05

^{a)} β -Bruttomessung

^{b)} Pu-238 und Pu-239/240

^{c)} Abgabe von C-14: < 4,8 E08 Bq

Tabelle 8

**Ableitung radioaktiver Stoffe (Alpha-Aktivität)
aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben
in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1991**

Betrieb	Abluft Bq	Abwasser Bq
NUKEM GmbH (Hanau) ^{a)}	3,9 E05	} 2,7 E07
HOBEG GmbH ^{a)}	1,8 E04	
SIEMENS AG Brennelementewerk Hanau		
Betriebsteil MOX-Verarbeitung	<1,8 E04	4,9 E05
Betriebsteil Uran-Verarbeitung	3,6 E07	8,6 E08
Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein ..	<1,4 E05	1,4 E08
ANF GmbH (Lingen)	<1,1 E04	—
URENCO D (Gronau)	2,1 E04	6,8 E03

^{a)} Brennelementeproduktion 1988 eigestellt

Tabelle 9

**Kerntechnische Anlagen im benachbarten Ausland
(Stand 31. Dezember 1991)**

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

Tabelle 10

**Strahlenexposition im Jahr 1991 in der Umgebung von Kernkraftwerken
durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft**

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis hierbei höchstens 300 Mikrosievert
und die Schilddrüsendosis höchstens 900 Mikrosievert pro Jahr betragen)

Kernkraftwerk	Oberer Wert ^{a)}		
	der effektiven Dosis		der Schilddrüsendosis
	für Erwachsene µSv	für Kleinkinder µSv	für Kleinkinder µSv
Kahl	<0,1	<0,1	<0,1
Rheinsberg	<0,1	<0,1	<0,1
Lingen	<0,1	<0,1	<0,1
Obrigheim	1	2	2
Stade	0,1	0,2	0,4
Würgassen	8	15	20
Greifswald	0,2	0,3	0,3
Biblis A, B	0,7	1	1
Neckar 1, 2	0,8	1	1
Brunsbüttel	1	2	2
Isar 1, 2	2	4	4
Unterweser	0,2	0,4	0,4
Philippsburg 1, 2	3	6	6
Grafenrheinfeld	0,4	0,7	0,7
Krümmel	1	2	3
Gundremmingen A, B, C	1	2	3
Grohnde	1	2	2
Hamm-Uentrop	<0,1	<0,1	<0,1
Mülheim-Kärlich	<0,1	<0,1	<0,1
Brokdorf	0,6	1	1
Emsland	0,3	0,5	0,5

^{a)} berechnet für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen

Tabelle 11

**Strahlenexposition im Jahr 1991 in der Umgebung von Kernkraftwerken
durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser**

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis hierbei höchstens
300 Mikrosievert pro Jahr betragen)

Kernkraftwerk	Oberer Wert der effektiven Dosis für Erwachsene µSv	Oberer Wert der effektiven Dosis für Kleinkinder µSv
Kahl	<0,1	<0,1
Gundremmingen A, B und C	0,7	0,1
Obrigheim	0,2	0,3
Stade	<0,1	<0,1
Würgassen	0,1	0,1
Biblis A und B	0,1	<0,1
Neckar 1 und 2	0,7	0,7
Brunsbüttel	<0,1	<0,1
Isar 1 und 2	0,1	0,1
Unterweser	<0,1	<0,1
Philippsburg 1 und 2	0,1	0,1
Grafenrheinfeld	0,2	0,2
Krümmler	<0,1	<0,1
Grohnde	0,3	0,3
Hamm-Uentrop	<0,1	<0,1
Mülheim-Kärlich	<0,1	<0,1
Brokdorf	<0,1	<0,1
Emsland	0,3	0,3
Rheinsberg *)	0,1	0,2
Greifswald *)	<0,1	<0,1

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

Tabelle 12

**Strahlenexposition im Jahr 1991 in der Umgebung von Kernforschungszentren
durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft^{a)}**

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis hierbei höchstens 300 Mikrosievert
und die Schilddrüsendosis höchstens 900 Mikrosievert pro Jahr betragen)

	Oberer Wert		
	der effektiven Dosis		der Schilddrüsendosis
	für Erwachsene µSv	für Kleinkinder µSv	für Kleinkinder µSv
Kernforschungszentrum Karlsruhe (einschließlich Wiederaufbereitungsanlage) ..	1,1	1,3	11
Forschungszentrum Jülich (einschließlich Versuchsreaktor AVR)	0,64	1,1	4,1
Kernforschungszentrum Geesthacht	<0,1	<0,1	<0,1
Forschungszentrum Rossendorf (FZR)	9,4	18	170

a) entnommen den Jahresberichten 1991 sowie nach Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Kernforschungszentren Karlsruhe, Jülich und Rossendorf

Tabelle 13

Strahlenexposition im Jahr 1991 in der Umgebung der kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis höchstens 300 Mikrosievert und die Lungendosis höchstens 900 Mikrosievert pro Jahr betragen)

Betrieb	Oberer Wert		
	der effektiven Dosis		der Lungendosis
	für Erwachsene μSv	für Kleinkinder μSv	für Kleinkinder μSv
NUKEM GmbH (Hanau)	0,5	0,5	1
HOBEG GmbH (Hanau)	<0,1	<0,1	0,1
SIEMENS AG Brennelementewerk Hanau			
Betriebsteil MOX-Verarbeitung	<0,1	<0,1	<0,1
Betriebsteil Uran-Verarbeitung	3	2	12
Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein	<0,1	<0,1	<2
ANF GmbH (Lingen)	<0,1	<0,1	<0,1
URENCO D (Gronau)	<0,1	<0,1	<0,1

Tabelle 14

Strahlenexposition im Jahr 1991 in der Umgebung kernbrennstoffverarbeitender Betriebe durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser

(Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis höchstens 300 Mikrosievert pro Jahr betragen)

Betrieb	Oberer Wert der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder μSv
NUKEM GmbH Hanau (einschließlich HOBEG)	<0,1
SIEMENS AG Brennelementewerk Hanau	
Betriebsteil MOX-Verarbeitung	<0,1
Betriebsteil Uran-Verarbeitung	<0,1
Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein	<0,1
ANF GmbH (Lingen)	—
URENCO D (Gronau)	<0,1

Tabelle 15

Ableitung radioaktiver Stoffe aus dem Endlager Morsleben im Jahr 1991

Nuklid	Abluft Bq	Abwasser Bq
Tritium	$1,0 \cdot 10^{11}$	$3,0 \cdot 10^6$
Kohlenstoff-14	$1,4 \cdot 10^9$	n. b.
langlebige Aerosole	$3,5 \cdot 10^7$	n. b.
Radon-Folgeprodukte	$2,0 \cdot 10^{10}$	n. b.
Nuklidgemisch (außer Tritium)	n. b.	$2,05 \cdot 10^5$

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle 16

**Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen in Deutschland (alte Bundesländer)
1988 bis 1990, aufgliedert nach Anwenderbereichen (Angaben in Tausend)**

Untersuchungsstellen	Untersuchungen (in Tsd.)	
	Teilsummen	Summen
1 Ambulante kurative Medizin		69 300^{a)}
1.1 Kassenpatienten, Humanmedizin	41 600	
1.2 Kassenpatienten, Zahnmedizin	17 300	
1.3 Privatpatienten, Humanmedizin	5 200	
1.4 Privatpatienten, Zahnmedizin	2 800	
1.5 Arbeits-/Schulunfälle	2 400	
2 Stationäre Krankenversorgung		16 900
2.1 Akut-Krankenhäuser >50 Betten	14 900	
2.2 Akut-KH <50 Betten	200	
2.3 Sonderkrankenhäuser	1 800	
3 Sonstige Röntgenstellen		2 000
3.1 Bundeswehr	400	
3.2 Gesundheitsämter	1 200	
3.3 Arbeits-/Vorsorgemedizin	200	
3.4 Sonstiges	200	
Summe		88 200

^{a)} davon Zahnuntersuchungen: 20 100

Aus: B. Bauer, C. Tsavachidis, Häufigkeit von Röntgen- und Alternativuntersuchungen, Röntgenpraxis, im Druck

Tabelle 17

**Häufigkeit von Röntgen-Untersuchungen bei den wichtigsten Anwendern 1988 bis 1990,
aufgegliedert nach Körperteilen und Untersuchungsart**
(Angaben in Tausend)

Untersuchung	Ärzte	Zahnärzte	Krankenhäuser	Gesundheits- ämter	Summen
Thorax	6 481	—	7 602	1 208	15 291
Extremitäten	15 204	136	2 211	—	17 551
Wirbelsäule	7 856	—	786	—	8 642
Becken	3 811	—	347	—	4 158
Hüfte	985	—	299	—	1 284
Schädel	3 944	3 495	843	—	8 282
Abdomen	1 605	—	523	—	2 128
Ösophagus/Magen	1 163	—	124	—	1 287
Darm	518	—	92	—	610
Galle	165	—	120	—	285
Harntrakt	1 415	—	497	—	1 912
Angiographie	523	—	444	—	967
Mammographie	2 884	—	80	—	2 964
CT-Schädel	442	—	317	—	759
CT; Sonstige	729	—	410	—	1 139
Sonstige	1 333	—	196	—	1 529
Zahnaufnahmen	156	16 413	12	—	16 581
Summe	49 214	20 044	14 903	1 208	85 369

Die Auswertung umfaßt 97 % der ermittelten Gesamtzahl an Röntgenuntersuchungen.

Aus: B. Bauer, C. Tsavachidids, Häufigkeit von Röntgen- und Alternativuntersuchungen, Röntgenpraxis, in Druck

Tabelle 18 a

**Daten zur beruflichen Strahlenexposition in den Leistungskernkraftwerken
der alten Bundesländer**

Jahr	Anzahl Kraftwerke	Überwachte Personen	Kollektivdosis in Sv	elektrische Energieerzeugung in GWh
1980	10	13 822	51	43 345
1981	11	18 105	62	53 081
1982	11	21 458	87	62 976
1983	12	21 203	78	64 329
1984	15	19 617	43	92 252
1985	16	22 343	49	125 709
1986	16	24 607	50	124 465
1987	17	22 949	46	123 333
1988	20	30 823	54	145 275
1989	21	33 032	53	149 453
1990	20	32 318	41	147 243
1991	20	33 666	48	147 447

Tabelle 18 b

**Daten zur beruflichen Strahlenexposition in den Leistungskernkraftwerken
der neuen Bundesländer**

Jahr	Anzahl Kraftwerke	Überwachte Personen	Kollektivdosis in Sv	elektrische Energieerzeugung in GWh
1980	2	3 279	10	11 889
1981	2	3 428	8	11 902
1982	2	3 023	11	10 849
1983	2	3 022	8	12 230
1984	2	2 873	6	11 740
1985	2	3 114	7	12 739
1986	2	3 384	10	10 908
1987	2	3 523	10	11 210
1988	2	3 545	11	11 738
1989	2	5 441	9	12 287
1990	1	4 217	10	5 036
1991	—	—	—	—

Tabelle 19

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
5. 1. 1991	Unbekannter Verbleib einer zur Füllstandsmessung eingesetzten Cs-137-Strahlenquelle mit 0,3 GBq nach erfolgter Stilllegung der Anlage	Mangelhafte Nachweisführung	Keine; Nachforschungen ergaben, daß die Strahlenquelle von einem anderen Betrieb übernommen worden war	
8. 1. 1991	Erhöhte Raumluftaktivität in einem Arbeitsraum einer kerntechnischen Einrichtung	Durch Vibration verursachte Lockerung der Flanschschrauben an einer Dosierschnecke	Inkorporation von 13 Bq Pu bei einem Mitarbeiter mit einer effektiven Dosis von 1,6 mSv	Vorkehrung gegen Wiederholung durch Flanschbefestigung mit selbstsichernden Muttern
8. 1. 1991	Defekter Strahlenaustrittsverschluß eines Dickenmeßgerätes	Unsachgemäßer Einbau der Antriebseinheit für den Strahlenausstrittsverschluß	Vier Personen erhielten eine Teilkörperdosis (Hände und Arme) von maximal 1,1 mSv	Ordnungsgemäßer Einbau der Antriebseinheit; zusätzliche Abschirmung des Strahlenshalters bei allen Reparatur- und Wartungsarbeiten angewiesen
22. 1. 1991	Bei Materialprüfarbeiten löste sich der Strahlenkollimator und fiel auf den Ausfahrtschlauch, wodurch der Rücktransport der Strahlenquelle blockiert wurde	Unachtsamkeit	FilmDOSimetrisch ermittelte Dosen: 700 mSv, 60 mSv und Null. Chromosomenanalytisch nur bei der hochexponierten Person 60 mSv nachgewiesen	Keine Erklärung für die Dosisunterschiede. Zuverlässigkeit im Sinne der StrlSchV in Frage gestellt. Im Wiederholungsfall Genehmigungsentzug
24. 1. 1991	Bei der Simulation einer Bestrahlung an einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung fuhr die Strahleratruppe nach Beendigung des Programms nicht bis in die Abschirmung zurück	Beschaffenheit des Strahlerhalters genügte nicht den Anforderungen	Keine, da der Vorgang nur simuliert wurde	Herstellerfirma hat alle betroffenen Strahlerhalter ausgetauscht
24. 1. 1991	Zerstörung einer Flasche mit I-131-Lösung	Fehlbedienung der Abfülleinrichtung	Geringe Schilddrüsenedosis (ca. 0,2 µSv); Grenzwert: 300 mSv	

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
24. 1. 1991	In einem Krankenhaus wurden zwei Radium-226-Strahlenquellen von je 370 MBq bei der Rücklage in den Tresor eingeklemmt und beschädigt	Unachtsamkeit	Im Bereich des Tresors Überschreitung des Grenzwertes der Oberflächenkontamination. Vorsorgliche Inkorporationsuntersuchungen blieben ohne Befund	Kontamination wurde beseitigt. Alle Radiumstrahler wurden zur Entsorgung gegeben
5. 2. 1991	Erhöhte Raumluftaktivität in einem Arbeitsraum einer kerntechnischen Einrichtung	Einriß eines Handschuhes an einem Stift eines unbelegten Anschlusses einer Stromdurchführung in einem Handschuhkasten	Oberflächenkontamination im Bereich des Handschuhkastens	Abdecken des unbelegten Anschlusses mit einer Schutzkappe, Überprüfung aller Stromdurchführungen in den Handschuhkästen
14. 2. 1991	Auftreten einer ungewöhnlich hohen Dosisleistung bei der Patientenbestrahlung mit ultraharter Röntgenstrahlung an einem Linearbeschleuniger	Falsches Filter im Strahl aufgrund eines fälschlicherweise zusätzlich geschalteten Mikroschalters	Anstelle von 1,0 Gy wurde eine Dosis von 1,78 Gy appliziert. Der Mehrbetrag konnte durch die Folgebestrahlung am gleichen Tag ausgeglichen werden	In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma wurden technische Maßnahmen zur künftigen Vermeidung des Fehlers ergriffen
14. 2. 1991	Bei einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung fuhr während der Eingabe von Bestrahlungszeiten die Strahlenquelle ohne Zutun des Bedienungspersonals bei geöffneter Bestrahlungsraumtür aus	Fehler in der Software der elektronischen Steuerung der Einrichtung	Keine, da keine Personen bestrahlt wurden und Strahler über Notschalter sofort zurückgefahren wurde	Beseitigung der Fehlerquelle durch die Herstellerfirma an allen bereits in Betrieb befindlichen Einrichtungen
20. 2. 1991	Fund von zwei Fasern mit radioaktiven Abfällen (25. 2. 1991 zweites Faß gefunden)	Nicht ordnungsgemäße Entsorgung nach Firmenauflösung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung der radioaktiven Abfälle ist erfolgt
25. 2. 1991	Fund von 32 deformierten und mit Am-241 kontaminierten Ionisationsrauchmeldern auf einem Abrissgelände	Nicht ordnungsgemäße Entsorgung	Keine; die Fundorte wurden durch Bodenabtragung dekontaminiert	Wegen vorsätzlicher umweltgefährdender Abfallbeseitigung gemäß § 326 Abs. 2 StGB wurde Geldstrafe gegen Verursacher verhängt

noch Tabelle 19

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
27. 2. 1991	Vorübergehender Verlust eines Kartons mit 14 Ionisationsrauchmeldern auf dem Transportweg	Keine ordnungsgemäße Kennzeichnung des Kartons	Keine; Karton wurde unbeschädigt bei der Transportfirma gefunden	Neue Regelung über die Eintragung in die Beförderungspapiere getroffen
27. 2. 1991	Erhöhte Raumluftaktivität in einem Arbeitsraum einer kerntechnischen Einrichtung	Kontamination bei Handschuhwechsel	Oberflächenkontamination im Bereich des Handschuhkastens	Keine Folgen, da vorsorglich Schutzmasken getragen wurden
März 1991	Verschüttung einer Dichtemeßsonde (Cs-137) in einem Bergbaubetrieb	Vermutlich Abriß der Halterung durch Fördergut	Im Hinblick auf Beschaffenheit der Quelle und Lage in mehreren Metern Tiefe nicht zu erwarten	Bergung nicht möglich
8. 3. 1991	Erhöhte Exposition der Haut im unteren Halsbereich bei einem Mitarbeiter beim Experimentieren an einem Elektronensynchrotron	Verzögerung beim Schließen des Strahlenverschlusses nach Öffnen der Tür zum Experimentierraum nicht beachtet	Exposition durch sehr niederenergetische Strahlung, Erythemverlauf läßt keine schwerwiegenden gesundheitlichen Folgen befürchten	Anlage wurde sofort außer Betrieb genommen. Zwangsverzögerte Türverriegelung eingebaut
18. 3. 1991	Bei Reinigungsarbeiten in einem Erzbunker kamen 2 Mitarbeiter einer Reinigungsfirma zeitweise in den Strahlenbereich der Füllstandsmeßeinrichtung, die nicht gesichert war	Mangelnde Koordination zwischen den zuständigen Abteilungen des Betriebes	Exposition der Mitarbeiter betrug weniger als 1,5 mSv	Zukünftig wird Befahrerlaubnis mit der Maßgabe gefordert, vor jedem Einstieg die Meßeinrichtung zu sichern und zu überprüfen
26. 3. 1991	Abriß einer Bohrlochsonde mit einer Cs-137-Strahlenquelle (770 MBq) in 23 m Tiefe	Riß des Halteseils nach Verklemmen der Sonde	Im Hinblick auf die Beschaffenheit der Strahlenquelle und die Lage des Bohrloches nicht zu erwarten	Fangversuche waren ergebnislos. Verluststelle wurde im Kartenwerk markiert
2. 4. 1991	Abgabe von I-125-Abfällen mit dem Hausmüll	Fehlende Einweisung der Reinigungskraft	Nicht zu erwarten	Einweisung wurde durchgeführt

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
8. 4. 1991	Erhöhte Strahlenexposition eines Mitarbeiters bei der Umladung einer Ir-192-Strahlenquelle mit 4 TBq aus einem Gamma-radiographiegerät in den Quellenkontainer	Strahlerhalter wurde nicht vollständig in den Quellenkontainer überführt	Teilkörperexposition (Hand) mit einer Dosis von 43 mSv	
12. 4. 1991	Bestrahlung der Hand an einem Beschleuniger	Unachtsamkeit	Hohe Dosis, Blasenbildung an Fingern	Medizinische Behandlung
16. 4. 1991	Kontamination bei der Entsorgung eines Chemieabzugs in einer kerntechnischen Einrichtung	Unachtsamkeit	Raumluft- und Oberflächenkontamination. Inkorporation bei einem Mitarbeiter. Nach ärztlicher Untersuchung effektive Dosis auf 44 mSv abgeschätzt	Der Betroffene ist nicht mehr im Kontrollbereich tätig
18. 4. 1991	Kontaminationsereignis in einem Arbeitsraum einer kerntechnischen Einrichtung	Mechanische Beschädigung der Umhüllung einer Dose mit Spaltstoff beim Einbringen in einen „birdcage“ durch eine scharfe Kante am „birdcage“	Raumluft- und Oberflächenkontamination. Inkorporation bei 2 Mitarbeitern mit einer effektiven Dosis von 1,5 bzw. 0,2 mSv	Überprüfung aller „birdcages“ auf das Vorhandensein scharfer Kanten und ggf. Beseitigung
18. 4. 1991	In einem labormedizinischen Betrieb wurden zwei Gaschromatographen mit Ni-63-ECD entdeckt, für die der Besitzer keine Genehmigung hatte	Besitzerwechsel der Geräte erfolgte ohne Anzeige bei der zuständigen Behörde	Keine	Beide Geräte wurden vorerst bei der Herstellerfirma eingelagert. Bußgeldverfahren
25. 4. 1991	I-125-Inkorporation in einem Krankenhaus	Undichtheit eines I-125-Seeds	2 beruflich strahlenexponierte Personen erhielten eine effektive Dosis von 0,2 bzw. 0,7 mSv	
5. 5. 1991	Undichtheit eines Thallium-204-Strahlers (1,9 MBq) einer Schichtdickenmeßeinrichtung	Beschädigung der Umhüllung des Strahlers durch Fall auf den Fußboden infolge Verwendung einer ungeeigneten Greifzange	Keine	

noch Tabelle 19

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
10. 5. 1991	Nach Durchstrahlungsarbeiten ließ sich die Ir-192-Strahlenquelle (1 110 GBq) nicht in den Arbeitsbehälter zurückführen	Ungünstige Lage des Ausfahr-schlauches	Die an der Bergung der Quelle beteiligten Personen erhielten eine Dosis von 0,8 bzw. 0,4 mSv	Von der Herstellerfirma konnten keine Mängel am Gerät festgestellt werden
10. 5. 1991	Verschrottung einer Dickenmeßeinrichtung einer Papierfabrik ohne vorherigen Ausbau der Strahlenquelle (Kr-85, 1,85 GBq)	Nichtbeachtung der Strahlenschutzbestimmungen	Nicht zu erwarten	Strahlenschutzbeauftragter wurde verwart
23. 5. 1991	Unbeabsichtigte Abgabe von ca. 200 GBq Kr-85 über Abluftkamin	Fehlbedienung	Ausbreitungsrechnung durchgeführt. Personen und die Umwelt wurden durch diesen Vorfall nicht gefährdet	Technische Maßnahmen zur künftigen Vermeidung wurden veranlaßt
17. 6. 1991	Kontaminationsereignis in einem Arbeitsraum einer kerntechnischen Einrichtung	Undichte Umhüllung eines Behälters mit Mischoxid infolge Quetschung	Raumluft- und Oberflächenkontamination. Inkorporation bei 5 Personen mit einer effektiven Dosis von max. 2,2 mSv	Maßnahmen zur Verhinderung einer Wiederholung des Vorfalls eingeleitet
17. 6. 1991	Abgabe von ca. 15 MBq H-3 in die Kanalisation einer Forschungseinrichtung	Nichtbeachtung der vorgeschriebenen Entsorgung durch Gastwissenschaftler	Geringe Aktivitätskonzentration im Vorflutsystem	Maßnahmen zur Verhinderung einer Wiederholung des Vorfalls eingeleitet
20. 6. 1991	Kontamination des Erdreichs mit H-3, Cs-137, Pu-238 und Am-241 entlang des Abwasserkanals einer Forschungseinrichtung	Undichtigkeiten im Abwasserkanal	Keine Gefährdung von Personen und der Umwelt	Abwasserkanal wurde erneuert
26. 6. 1991	Bei einer beabsichtigten Bestrahlung mit einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung erreichte die Strahlenquelle nicht die Bestrahlungsposition	Aufgrund einer früheren Reparatur zu wenig Spiel zwischen Antriebsrad und Zahnrad, wodurch sich die Kugelkette verklemmte	Geringfügige Exposition des Patienten und des Personals	Überprüfung bzw. Austausch von Kugelkette, Schlauch und Applikator vor erneuter Verwendung

noch Tabelle 19

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
28. 6. 1991	Nach einer Bestrahlung mit einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung fuhr die Strahlenquelle nicht in die Abschirmung zurück	Hängenbleiben der Strahlenquelle im Transportschlauch im Bereich der Kopplung	Geringfügige Strahlenexposition der Hilfsperson bei der Bergung der Patientin. Hautdosis der Patientin weniger als 300 mSv	Überprüfung der Einrichtung eingeleitet
1. 7. 1991	Bei der Funktionsüberprüfung einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung erreichte die Strahlenquelle nicht die Bestrahlungsposition	Bruch des Adapters	Strahlenexposition weniger als 1 mSv	Ersatz des Adapters
1. 7. 1991	Bei Reparaturarbeiten an einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung wurde die Strahlenquelle aus der Abschirmung ausgefahren	Ungenügende Abstimmung zwischen den Mechanikern	Strahlenexposition zwischen 3 und 10 mSv	
2. 7. 1991	Verlust einer Po-210-Strahlenquelle von 4 MBq	Ungenügende Vorkehrung gegen Abhandenkommen	Nicht zu erwarten	Quellensuche ohne Ergebnis
11. 7. 1991	Verzögertes Schließen des Verschlusses bei einer medizinischen Gammastrahlungseinrichtung	Schwergängigkeit durch Korrosion	Geringfügig erhöhte Dosis des bestrahlten Patienten	Neue, verbesserte Verschlusstrommel eingebaut
18. 7. 1991	Fund von 4 Kr-85-Prüfstrahlern mit je 185 MBq im Müll eines Armeedepots	Vermutlich versehentlich in den Müll gelangt	Keine	Strahler wurden geborgen
5. 8. 1991	Aufenthalt eines Patienten im Bestrahlungsraum eines medizinischen Beschleunigers während des Probeaufs	Versehentliches Betreten des Bestrahlungsraumes	Strahlenexposition weniger als 1 mSv	Änderung der Strahlenschutzanweisung

noch Tabelle 19

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
12. 8. 1991	Beim Entsorgen radioaktiver Schrottteile in einer kerntechnischen Einrichtung kam es bei einem Mitarbeiter zur Inkorporation radioaktiver Stoffe	Nichtbeachtung der vorgeschriebenen Benutzung der Atemschutzmaske	Inkorporation von Pu-239 und Am-241 von insgesamt 150 Bq mit einer Dosis von 330 mSv an der Knochenoberfläche	Weiterbeschäftigung des Betroffenen unter Strahlenexposition vorübergehend untersagt
12. 8. 1991	Bei der Funktionsüberprüfung einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung wurde eine Störung des Pendelablaufs festgestellt	Fehlerhafte Funktionsbelegung eines Wahlschalters	Keine, da nur Überprüfung	Änderung durch Gerätehersteller eingeleitet
15. 8. 1991	Verlust eines Therapiestrahlers (Ru-106-Augenapplikator mit 20 MBq) in einem Krankenhaus	Strahler ist vermutlich mit Verbandsmaterial in den Abfall gelangt	Nicht zu erwarten	Arbeitstäbliche Bestands- und Abfallkontrolle angeordnet
20. 8. 1991	Freisetzung von Tritium aus einer Gaslichtquelle	Hohe Leckrate	Geringe Inkorporation bei einer Person (ca. 0,02 mSv)	Undichtheit wurde vor Weiterverarbeitung der Quelle festgestellt
5. 9. 1991	Verzögertes Schließen des Verschlusses bei einer medizinischen Gammastrahlungseinrichtung	Unzureichende Funktion der Steuerventile	Keine, da der Patient nach Aufforderung den Bestrahlungsraum verlassen konnte	Ursache nicht eindeutig ermittelbar; vergleichbare Störung an typgleichen Geräten nicht bekannt; vorsorglich Erneuerung der Ventile
5. 9. 1991	Erhöhte Strahlenexposition eines Mitarbeiters bei der Umladung von Strahlenquellen	Ungeeignete Umladetechnologie	Teilkörperexposition (Hand) mit einer Dosis von 981 mSv	Veränderung der Umladetechnologie. Beschränkung der Teilkörperexposition (Hand) bis Ende 1993
12. 9. 1991	Strahlenexposition eines Prüfers durch eine nicht in das Gammadiagnostikgerät zurückgeführte Strahlenquelle auf einer Baustelle	Zerbrochener Strahlerhalter, dadurch verblieb die vermeintlich zurückgeführte Strahlenquelle im Ausfahrtschlauch	Ein Prüfer erhielt eine Dosis von 40 mSv	Untersuchung des Strahlerhalters durch Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Ursache konnte nicht geklärt werden, vergleichbare Fälle nicht bekannt

noch Tabelle 19

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
12. 9. 1991	Vorübergehender Verlust von 6 Unterrichtsstrahlenquellen in einer Schule	Diebstahl durch einen Schüler	Keine, die Strahlenquellen wurden sichergestellt	
16. 9. 1991	Bei einem Brand an einer Textilfärbemaschine mit Flächengewichtsmeßeinrichtungen wurden 3,7 GBq Kr-85 freigesetzt	Technischer Defekt am Kühlsystem	Nicht zu erwarten	
24. 9. 1991	Austritt von gasförmigem F-18 aus einem Beschleuniger	Bruch des Targets	Geringfügige Freisetzung, ca. 50 MBq	
26. 9. 1991	Fund eines Prüfstrahlers (Sr-90, 7,5 MBq) auf einer Mülldeponie	Versehentlich in Abfall gelangt	Keine, da verpackt und unversehrt	
17. 10. 1991	Abriss von Brunnenbestrahlungsquellen (Co-60)	Materialbruch bei Bergungsversuch	Keine, da Quelle unversehrt	Andere Bergungsverfahren werden geprüft
23. 10. 1991	Fund eines Fasses mit radioaktiven Abfällen aus einem Krankenhaus in einer Müllverbrennungsanlage	Nichtbeachtung der Strahlenschutzbestimmungen	Keine, maximale Dosisleistung an der Faßoberfläche: 4 µSv/h	Maßnahmen zur Verhinderung einer Wiederholung des Vorfalls angeordnet
28. 10. 1991	Verschlußstörung an einer Gammastrahlungseinrichtung in einem Krankenhaus	Lösen des Preßluftschlauches	Geringfügige Exposition der Hilfsperson bei der Bergung des Patienten. Patientenüberexposition konnte in den nachfolgenden Bestrahlungen ausgeglichen werden	Bestrahlungseinrichtung wurde stillgelegt
18. 11. 1991	Verlust von 4 Pu-239-Strahlenquellen auf einer Baustelle mit einer Aktivität von jeweils 0,1 MBq	Mangelnde Vorkehrung gegen Abhandenkommen	Im Hinblick auf Beschaffenheit und Aktivität der Quellen nicht zu erwarten	Nachforschungen blieben ergebnislos
22. 11. 1991	Verschlußstörung bei einer medizinischen Gammastrahlungseinrichtung (Prototyp)	Technisches Versagen der Verschlußeinrichtung	Keine, da der Patient nach Aufforderung den Bestrahlungsraum verlassen konnte	Sperrung des Bestrahlungsraumes und eines kleinen Bereiches außerhalb des Bestrahlungsraumes. Reparatur der Anlage veranlaßt

noch Tabelle 19

noch Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1991

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
1	2	3	4	5
6. 12. 1991	Feststellung der Möglichkeit einer Fehlbestrahlung durch das Programmsystem einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung	Software kann unter besonderen Umständen die Schrittweite der Quellenbewegung falsch einstellen	Keine, da bei einer Kontrolle entdeckt	Hersteller hat Software verbessert
9. 12. 1991	Spontanänderung der Zerfallskorrektur an einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung	Ursache konnte nicht ermittelt werden (einmaliges Auftreten des Fehlers)	Keine, Patienten waren nicht betroffen	Neueingabe der Ausgangsdaten

Tabelle 20

Mittlere effektive Dosis durch inkorporiertes Caesium 134 und Caesium 137 in μSv im Jahre 1991 als Folge des Reaktorunfalls in Tschernobyl

	München	Karlsruhe	Frankfurt	Berlin	Köln
Männer	4	2	2 ^{a)}	4	2
Frauen	3	1	2 ^{a)}	3	1

^{a)} = Daten für einzelne Monate geschätzt und für das ganze Jahr hochgerechnet

Abbildung 1 a

Anzahl der mit Personendosimetern überwachten Personen insgesamt und in der Medizin (in Tsd.)

(alte Bundesländer)

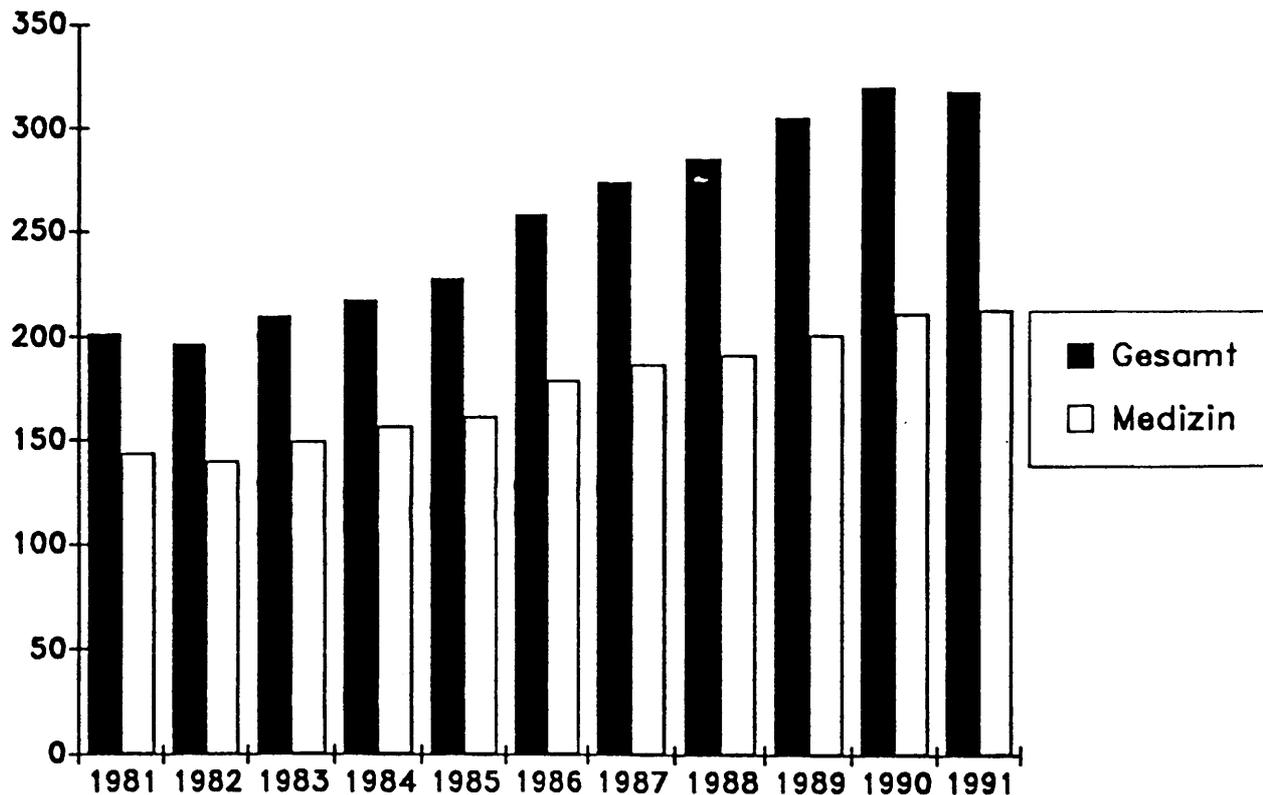


Abbildung 1 b

Anzahl der mit Personendosimetern überwachten Personen insgesamt und in der Medizin (in Tsd.)

(neue Bundesländer)

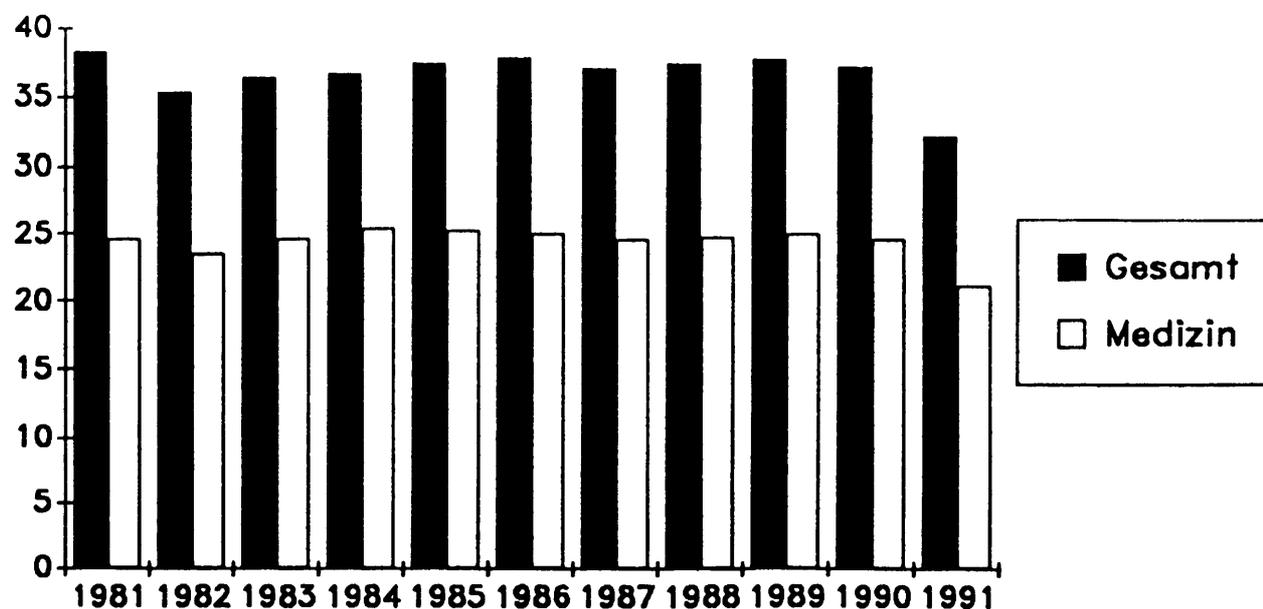


Abbildung 2a

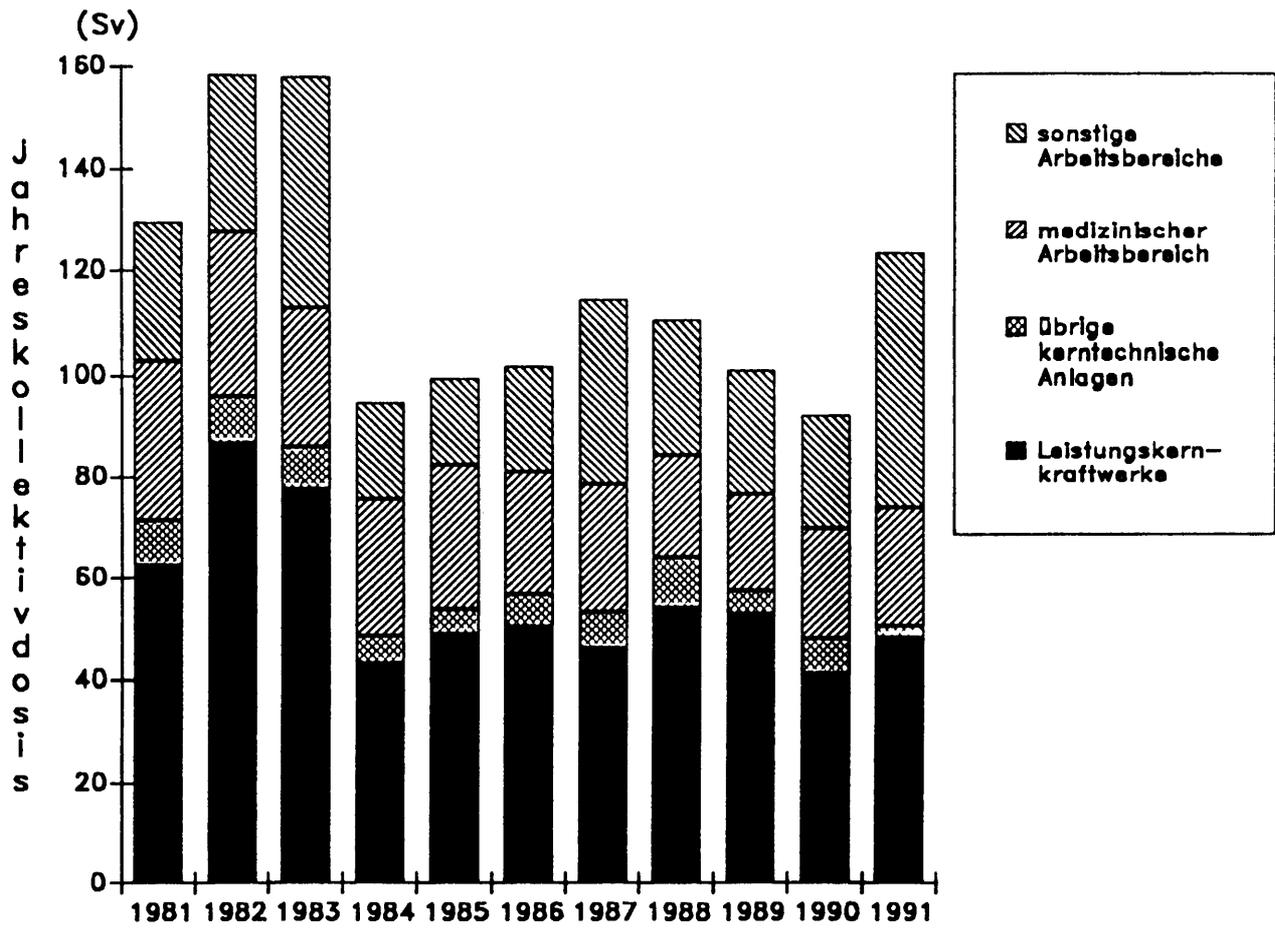
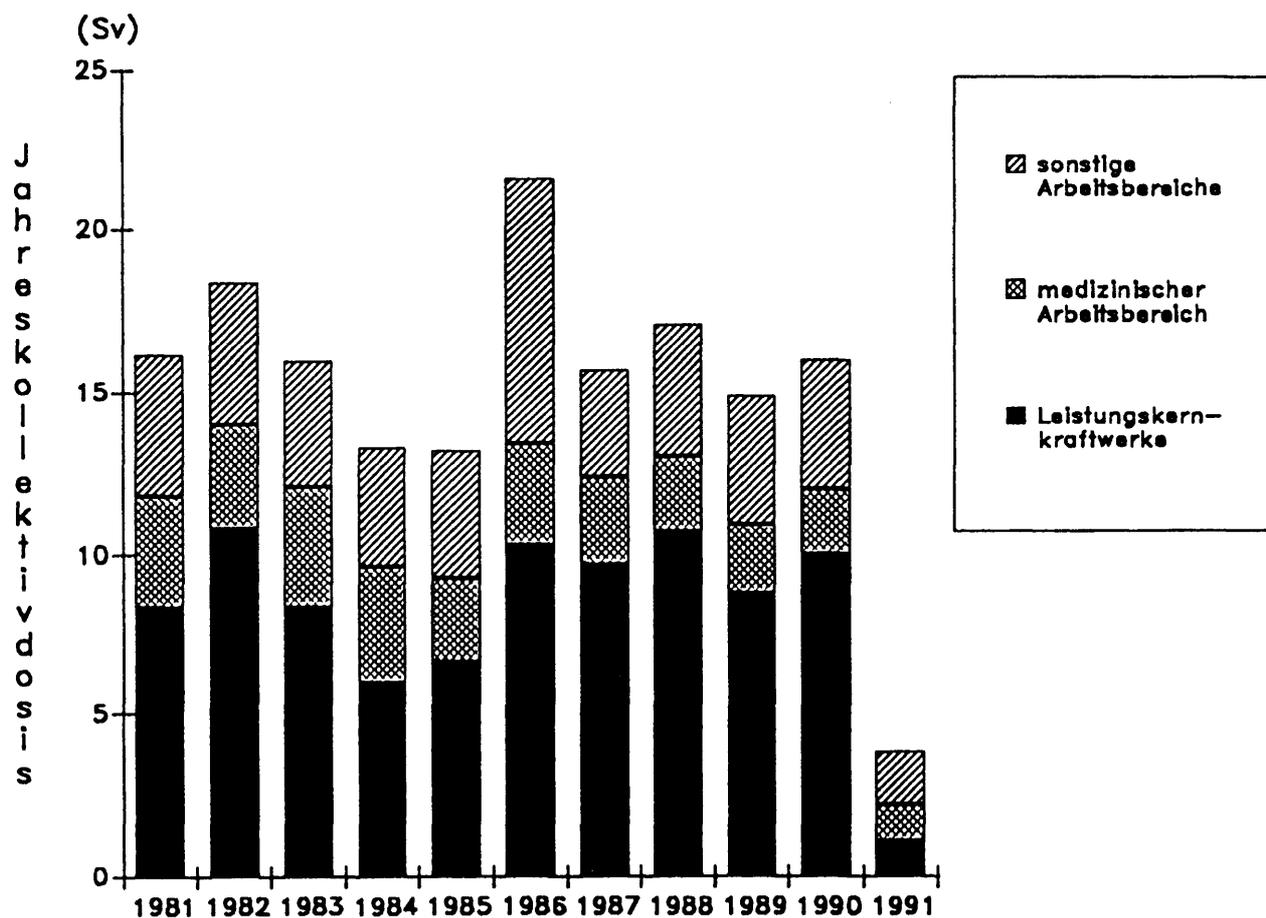
Verteilung der Jahreskollektivdosis auf verschiedene Arbeitsbereiche
(alte Bundesländer)

Abbildung 2b

Verteilung der Jahreskollektivdosis auf verschiedene Arbeitsbereiche
(neue Bundesländer)



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 biologischen Effekte in unterschiedlichem Maße. Für die Abschätzung von

Strahlenrisiken, für Grenzwertfestlegungen und für Strahlenschutzmessungen erschien es daher notwendig, neben der Energiedosis auch die Strahlenqualität, d. h. die Strahlenart und -energie, zu berücksichtigen. Der lineare Energietransfer gilt vereinbarungsgemäß als physikalische Kenngröße der Strahlenqualität. Er kennzeichnet die vom Dosisbegriff nicht erfaßte Konzentration der auf die Materie übertragenen Energie längs der Teilchenbahnen.

Aus diesen Gründen ist neben der Energiedosis D die Äquivalentdosis H für Strahlenschutz Zwecke eingeführt worden. Die Äquivalentdosis ergibt sich aus der gemessenen oder berechneten Energiedosis durch Multiplikation mit einem von der Strahlenqualität abhängigen Bewertungsfaktor Q .

$$H = Q \cdot D.$$

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

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

$$RBW = \frac{D_{\text{Ref}}}{D_{\text{Test}}}$$

(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 Ermitt-

lung der Äquivalentdosis festgelegt. Sie beziehen sich ebenso wie die RBW-Werte auf harte Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung. Die Zahlenwerte der Bewertungsfaktoren orientieren sich aus Sicherheitsgründen am oberen Wertebereich der experimentell erhaltenen RBW-Werte für die jeweilige Strahlenqualität. Nach der Strahlenschutzverordnung gilt für die Berechnung der Äquivalentdosis der in Anlage VII der Verordnung angegebene LET-abhängige Bewertungsfaktor $Q(L)$, der je nach Strahlenqualität Werte zwischen 1 und 20 besitzt. Ist das LET-Spektrum nicht genau bekannt, so darf näherungsweise der Bewertungsfaktor 1 für Beta- und 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 Röntgenstrahlung die Fähigkeit, den gesamten Körper zu durchdringen und ihn mit geschwächter 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 Eigenschaf-

ten 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 Ver-

teilung 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 Pu 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 (Abb. 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.

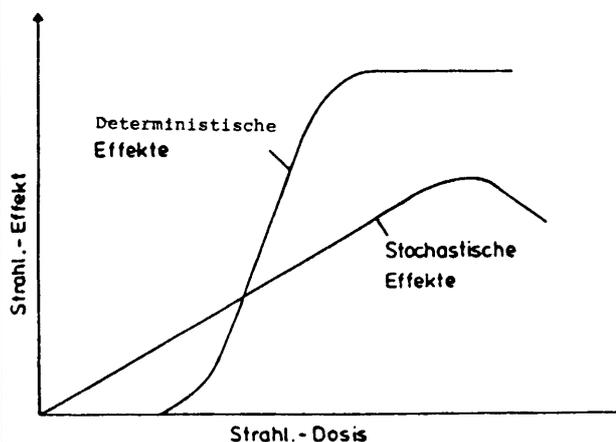
Bei einem zweiten Typ von Strahlenwirkungen, den stochastischen Effekten, wird davon ausgegangen, daß keine Schwellendosis besteht und daß die Wahrscheinlichkeit des Eintretens mit steigender Strahlendosis zunimmt. Auch bei kleinen Strahlendosen können also noch Wirkungen auftreten, wenn auch mit geringerer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

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

Abbildung A-1

Schematische Darstellung der Dosiswirkungsbeziehungen für stochastische und deterministische Effekte



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 überwiegender 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 individuelle Krebserkrankung durch die vorausgegangene Bestrahlung verursacht ist.

Erschwert werden diese Untersuchungen dadurch, daß die Erkrankungen mit einer erheblichen Latenzzeit (fünf bis zehn Jahre bei Leukämie und mehrere Jahrzehnte bei Krebs) auftreten können und damit analytisch, z. B. hinsichtlich der Anamnese, schwerer zugänglich werden. Da Leukämie 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.

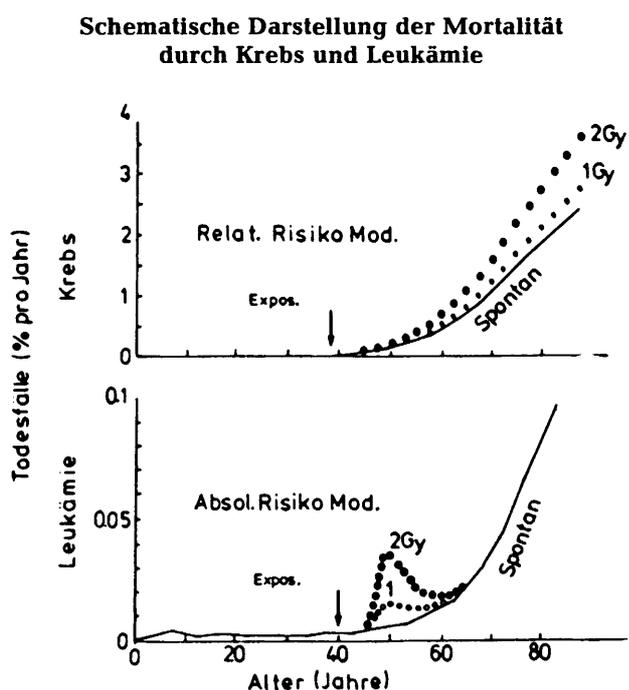
Neben dem Knochenmark (Induktion von Leukämie) und dem Brustgewebe zählen auch Lunge und die Epithelien der Bronchien zu den strahlenempfindlichen Geweben hinsichtlich der Induktion von Tumoren. Eine erhöhte Rate an Lungentumoren ist bei Bergarbeitern beobachtet worden, die in Bergwerken mit hohem Radongehalt 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 Lungeneithelien. Hierbei wird die Exposition in überwiegendem 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 Behandlung mit Radiumpräparaten durchgeführt worden. Das Radium wurde injiziert und hat sich vor allem im Knochengewebe abgelagert.

6. Risikoabschätzung

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

Abbildung A-2



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

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

Für die Extrapolation wird angenommen, daß eine Schwellendosis nicht existiert und daß die Dosiswirkungsbeziehung für die Eintrittswahrscheinlichkeit stochastischer Effekte auch in diesem niedrigen Dosisbereich linear mit der Strahlendosis verläuft. Aufgrund unserer wissenschaftlichen Kenntnisse ist eine solche Annahme für den Strahlenschutz sinnvoll, der Beweis dafür steht aber noch aus. Um der niedrigen Dosisleistung im niedrigen Dosisbereich Rechnung zu tragen, werden für den Risikokoeffizienten häufig Reduktionsfaktoren von 2 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 1 000 Todesfällen durch Leukämie und Krebs nach Ganzkörperexposition einer Million Menschen mit 10 mSv (1 rem) liegen (Risikokoeffizient: $2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ bis $1 \cdot 10^{-1}$ pro Sv). Bei Berücksichtigung dieses Bereiches des Risikokoeffizienten ergibt eine Strahlendosis von 10 mSv eine Erhöhung der Leukämie- und Krebstodesrate, die im Bereich von einem bis einigen Promille der „spontanen“ Leukämie- und Krebstodesrate unserer Bevölkerung liegt. Die Exposition der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen der Bundesrepublik Deutschland liegt beim bestimmungsgemäßen Betrieb einschließlich von Auslegungsfällen im Bereich von einigen 10 μ Sv. Es müssen also Extrapo-

lationen über mehrere Größenordnungen der Dosis (etwa um den Faktor 10^4) vorgenommen werden, um von dem Dosisbereich mit epidemiologisch ermittelten Daten in den Dosisbereich dieser Exposition zu kommen.

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) „Untersuchung der Häufigkeit von Krebserkrankungen im Kindesalter in der Umgebung westdeutscher kerntechnischer Anlagen 1980—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 eines radioaktiven Stoffes
Alphastrahler	Radionuklide, die Alphateilchen (Heliumatomkerne) aussenden
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
Curie	Alte Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Curie (Ci) liegt vor, wenn 37 Mrd. Atomkerne je Sekunde zerfallen. 1 Curie (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Becquerel
Dekontamination	Beseitigung oder Verminderung von radioaktiven Verunreinigungen
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 Gasen in der Atmosphäre
Ganzkörperdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel als Folge einer als homogen angesehenen Bestrahlung des ganzen Körpers
Genetisch signifikante Dosis	Mittlere jährliche Keimdrüsensdosis pro Person in einer Bevölkerung, gewichtet für jede Einzelperson mit der Wahrscheinlichkeit der Kindeserwartung nach der Strahlenexposition
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
Ionisierende Strahlen	Elektromagnetische- oder Teilchenstrahlen, welche die Bildung von Ionen bewirken können (z. B. Alphastrahlen, Betastrahlen, Gammastrahlen, Röntgenstrahlen)
Isotop	Abart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl
Keimdrüsensdosis	Mittelwert der Äquivalentdosis über die Keimdrüsen
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
Rad	Alte Einheit der Energiedosis. 1 Rad (rd) = 10 Milligray
Radioaktive Stoffe	Stoffe, die Radionuklide enthalten
Radioaktivität	Eigenschaft bestimmter chemischer Elemente bzw. Nuklide, ohne äußere Einwirkung Teilchen- oder Gammastrahlung aus dem Atomkern auszusenden
Radiographiegerät	Gerät zur zerstörungsfreien Durchstrahlungsprüfung von Materialien mittels Radionukliden
Radioiod	Radioaktive Iodisotope
Radionuklide	Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen
Rem	Alte Einheit der Äquivalentdosis. 1 Rem (rem) = 10 Millisievert
Röntgen	Alte Einheit der Ionendosis. 1 Röntgen (R) = 258 $\mu\text{C}/\text{kg}$
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. 1 Sievert (Sv) = 100 Rem, 1 Sievert = 1 000 Millisievert = 1 000 000 Mikrosievert
Somatisches Strahlenrisiko	Risiko der körperlichen Schädigung der von der Bestrahlung betroffenen Person, zur Unterscheidung vom genetischen Risiko, das für die Schädigung der Folgegenerationen besteht
Stochastisch	Zufallsabhängig
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

