

Unterrichtung durch die Bundesregierung

Bericht der Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1990

Inhalt

	Seite
I. Auftrag und Zusammenfassung	3
1. Auftrag	3
2. Zusammenfassung	3
II. Natürliche und zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition	5
III. Bergbauliche Altlasten in den neuen Bundesländern	5
1. Radon im Freien und in Gebäuden	6
2. Radioaktivität durch Bergbaualtlasten	6
3. Gesundheitliche Auswirkungen des Bergbaus	6
IV. Zivilisatorische Strahlenexposition	7
1. Kerntechnische Anlagen	7
1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen	7
1.2 Jahresabgaben radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen	7
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 Forschung, Technik und Haushalt	10
3.1 Industrieerzeugnisse und technische Strahlenquellen	10
3.2 Störstrahler	10
4. Berufliche Tätigkeit	10
5. Besondere Vorkommnisse	11
6. Fall-out von Kernwaffenversuchen	11
V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl .	12

	Seite
Tabellen	13
Abbildungen	35
Anhang:	
A Strahlendosis und Strahlenwirkung	37
1. Strahlendosis und ihre Einheiten	37
2. Externe und interne Bestrahlung	38
3. Stochastische und nicht-stochastische Strahlenwirkung	39
4. Genetisch vererbare Defekte	39
5. Induktion von Leukämie und Krebs	40
6. Risikoabschätzung	41
7. Effektive Dosis	42
B Erläuterung der benutzten Fachausdrücke	43

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 1990 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 und zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition (Kapitel II),
- die bergbaulichen Altlasten in den neuen Bundesländern (Kapitel III)
- die zivilisatorische Strahlenexposition (Kapitel IV) und
- 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.

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 Jahre 1990 ist in der Tabelle 1 nach den verschiedenen Strahlenquellen

aufgeschlüsselt. Die effektive Dosis aus natürlichen Strahlenquellen, die im Gegensatz zur genetisch signifikanten Dosis auch die Strahlenexposition der Organe und somit auch der Lunge durch Radon berücksichtigt, beträgt im Mittel 2,4 mSv mit einer mittleren Schwankung von ca. 1 mSv. Die durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin hervorgerufene effektive Dosis von 1,5 mSv ist wegen der unvermeidbaren Unsicherheiten der Erhebungsdaten mit einer Schwankungsbreite von ca. 50 % behaftet (siehe Kapitel IV.2). Bei den übrigen Beiträgen zur zivilisatorischen Strahlenexposition liegen die tatsächlichen Werte unter den in der Tabelle angegebenen oberen Grenzen. Die in der Zusammenfassung dargestellten Beiträge zur zivilisatorischen Strahlenexposition gelten auch für die neuen Bundesländer.

Als zusammenfassendes Ergebnis ist für das Jahr 1990 folgendes festzustellen:

- Die durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl veränderte Strahlenexposition der Bevölkerung ging von 5 % im Jahre 1986 auf ca. 1 % der natürlichen Strahlenexposition (2,4 mSv) im Berichtsjahr 1990 zurück.
- Eine statistisch gesicherte Veränderung der Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland aus den übrigen Beiträgen (siehe Tabelle 1) ist gegenüber den Vorjahren bei Berücksichtigung der Ungenauigkeiten, mit denen die Hauptbeiträge zu dieser Dosis behaftet sind, nicht feststellbar.
- Der Beitrag zur mittleren effektiven Dosis durch die Radonkonzentrationen in Wohnungen bedingt ca. 50 % der effektiven Dosis natürlichen Ursprungs.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch Kernkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur effektiven Dosis der Bevölkerung blieb auch im Jahr 1990 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.
- Der größte Beitrag der zivilisatorischen Strahlenexposition wird durch die Anwendung ionisierender Strahlen in der Medizin, vor allem durch die Röntgendiagnostik, verursacht. 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 zwar, daß sich wesentliche, die Strahlenbelastung beeinflussende Para-

- meter (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.
- Obwohl die Anzahl der beruflich strahlenexponierten Personen weiterhin zugenommen hat, bleibt der Anteil der beruflichen Strahlenexposition am Beitrag der zivilisatorischen Strahlenexposition unter einem Prozent.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch die in den vergangenen Jahrzehnten in der Atmosphäre durchgeführten Kernwaffenversuche zur effektiven Dosis ist weiterhin rückläufig. Im Jahr 1990 wurden keine Kernwaffenversuche in der Atmosphäre durchgeführt.

Tabelle 1

**Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland
im Jahr 1990**

	Mittlere effektive Dosis mSv
1. Natürliche Strahlenexposition	
1.1 durch kosmische Strahlung	ca. 0,3
1.2 durch terrestrische Strahlung von außen im Mittel	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 im Mittel	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 inkorporierte natürliche radioaktive 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 besondere Vorkommnisse	0
2.6 durch Fall-out von Kernwaffenversuchen	< 0,01
2.6.1 von außen im Freien	< 0,01
2.6.2 durch inkorporierte radioaktive Stoffe	< 0,01
Summe der zivilisatorischen Strahlenexposition	ca. <u>1,55</u>
3. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl im Mittel	
3.1 von außen	ca. 0,02
3.2 durch inkorporierte radioaktive Stoffe	< 0,01
Summe der Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl	ca. <u>0,025</u>

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

***) Abschätzungen in der ehemaligen DDR zeigten, daß die durchschnittliche Strahlenexposition durch medizinische Anwendungen nicht mehr als 1 mSv (effektive Dosis) betrug bei etwas geringerer Untersuchungshäufigkeit als in der Bundesrepublik Deutschland. Daraus folgt, daß durch die Herstellung der Einheit Deutschlands der Durchschnittswert nicht wesentlich verändert wurde.

II. Natürliche und zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

Während des Berichtszeitraumes wurden in den *alten Bundesländern* keine Erkenntnisse über eine Änderung der Strahlenexposition der Bevölkerung durch natürliche und zivilisatorisch veränderte Strahlenquellen bekannt. Auch die Einschätzung der Strahlenexposition durch Radon und dessen Zerfallsprodukte muß nicht korrigiert werden. Dies beruht auf zahlreichen weiteren Messungen der Radonkonzentration in Wohnungen, die infolge von Alarmmeldungen der Medien (USA: „jährlich 20 000 Lungenkrebstote durch Radon“) von der beunruhigten Bevölkerung angefordert wurden. Ab Oktober 1988 bis Ende 1990 gingen am Institut für Strahlenhygiene des Bundesamtes für Strahlenschutz ca. 1 600 Anforderungen zur Radonmessung aus den alten Bundesländern ein. Die Messungen wurden mit Aktivkohledosimetern durchgeführt, die in der Regel drei Tage exponiert und dann am Institut ausgewertet werden.

Bis Ende 1990 wurden rund 1 400 Messungen durchgeführt. Auf der Basis dieser Ergebnisse erhält man als arithmetischen Mittelwert über alle Wohn- und Aufenthalt Räume (Keller ausgenommen) eine Radonkonzentration von 55 Bq/m³. Dabei traten Einzelwerte bis 3 100 Bq/m³ auf. Der Anteil der Wohnungen, die über dem Wert von 250 Bq/m³ liegen, den die Strahlenschutzkommission als Obergrenze des Normalbereiches der Radonkonzentration bezeichnet, beträgt der jetzigen Erhebung nach rund 3%. Dies ist vor

allem auf die überproportionale Nachfrage an Messungen in Gebieten mit bekannt erhöhter Strahlenexposition (z. B. Fichtelgebirge, Eifel, Neuwieder Becken) zurückzuführen.

Die in ausgewählten Wohnungen durchgeführten Sanierungsmaßnahmen wurden auch im Berichtszeitraum fortgesetzt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, daß die Radonkonzentration durch bauliche Maßnahmen auf ein Drittel bis ein Zehntel des Ausgangswertes gesenkt werden konnte.

In den *neuen Bundesländern* wurde bis Ende 1990 in rund 7 000 Häusern die Radonkonzentration bestimmt, wobei der überwiegende Teil der Messungen (rund 6 000 Häuser) in den Uranbergbaugebieten im Süden der ehemaligen DDR durchgeführt wurde. In diesen Regionen liegen die Mittelwerte in den einzelnen Gemeinden geologisch und/oder bergbaubedingt im Bereich von 50—300 Bq/m³. In Wohngebieten des Regierungsbezirks Cottbus, der in geologischer Hinsicht typisch für große Gebiete des Norddeutschen Tieflands ist, beträgt die mittlere Radonkonzentration vergleichsweise 39 Bq/m³.

Die Auswirkung der bergbaulichen Altlasten auf die natürliche Strahlenexposition im südlichen Teil der ehemaligen DDR wird im Kapitel III näher erläutert.

III. Bergbauliche Altlasten in den neuen Bundesländern

Eine überdurchschnittliche Umweltradioaktivität wird in den Bergbaugebieten in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt durch geologische Besonderheiten und durch den Abraum des dort seit Jahrhunderten betriebenen Erzbergbaus verursacht. Die radiologische Umweltbelastung wurde durch den sehr intensiv betriebenen Uranbergbau unmittelbar nach dem 2. Weltkrieg erheblich verstärkt. Selbst der unter Beachtung von Strahlenschutzgrundsätzen betriebene neuzeitliche Uranbergbau führte zu weiteren lokalen Umweltbelastungen durch umfangreiche Abraumhalden.

Radon sammelt sich in durch den Erzabbau entstandenen unterirdischen Hohlräumen und gelangt durch Spalten in die Gebäude und in die Umgebungsluft. Auch unkontrollierte Materialnutzungen von Abbaugesteinen für Bauzwecke und die Errichtung von Wohngebäuden auf teilweise jahrhundertalten Abraumhalden führen zu einer punktuellen hohen Radonbelastung der Bevölkerung.

Die „Verdachtsflächen“ umfassen etwa 1 400 km², verteilt in einem Gebiet von etwa 10 000 km². Neben Tausenden von Abraumhalden und oberflächenna-

hen bergbaulichen Auffahrungen handelt es sich um Hunderte von Standorten ehemaliger bergbaulicher Anlagen und Umschlagplätze sowie eine Reihe von industriellen Absetzanlagen und Rückstände der Erzaufbereitung. Der weitaus größte Teil dieser Flächen und Anlagen befindet sich nicht mehr in aktivem Betrieb und wird im folgenden als „Altlast“ bezeichnet.

Veranlaßt durch die Besorgnis der Bevölkerung der betroffenen Gebiete über die Auswirkungen der alten und neuen Hinterlassenschaften des Bergbaus und durch die berufliche Strahlenexposition der Beschäftigten im Uranbergbau wurden im Berichtsjahr 1990 vom Bundesamt für Strahlenschutz umfangreiche Untersuchungen in Angriff genommen. Gemäß dem deutschen Einigungsvertrag vom 31. August 1990 ist die radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung der bergbaulichen Altlasten als Bundesaufgabe im Sinne der §§ 2 und 11 Abs. 9 des Strahlenschutzvorsorgegesetzes aufzufassen.

Schwerpunktmäßig werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Radon im Freien und in Gebäuden (Radon-Programm),
- Radioaktivität durch Bergbaualllasten (Altlastenkataster),
- Gesundheitliche Auswirkungen des Bergbaus.

1. Radon im Freien und in Gebäuden

Die in den Jahren 1985 bis 1990 durchgeführten Langzeitmessungen von Radon 222 in der bodennahen Atmosphäre in Gebieten¹⁾ des Uranbergbaues und der -aufbereitung ergaben Werte in einem Bereich von 10 bis 370 Bq/m³, die deutlich über den für die mittel- und norddeutschen Gebiete gefundenen Werten (10 bis 15 Bq/m³) liegen. In einem vom Bergbau unbeeinflussten Gebiet mit oberflächennah gleicher geologischer Formation wurde eine Radonkonzentration bis zu 100 Bq/m³ gemessen.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden 1990 Radonmessungen in Gebäuden in Bergbaugebieten und in Nichtbergbaugebieten im Süden der neuen Bundesländer durchgeführt. Bis Ende 1990 wurden rund 6 000 Gebäude (Wohngebäude, Schulen, Kindergärten, öffentliche Einrichtungen und Arbeitsräume) in einem Screeningverfahren (24-Stunden-Messungen) untersucht. Die Radonkonzentration in Bergbaugebieten unterscheidet sich nicht signifikant von der in geologisch vergleichbaren Nichtbergbaugebieten. Jedoch können sich in Einzelfällen in Gebäuden aus Abbaugestein und auf Abraum des Altbergbaus hohe Konzentrationen ergeben. So wurden in der alten sächsischen Bergbaustadt Schneeberg, dem Ort mit der höchsten Kontamination, in ca. 2% der untersuchten Häuser Radonkonzentrationen über 10 000 Bq/m³ im Wohnbereich festgestellt. Im Rahmen eines von der Bundesregierung mit 6 Millionen DM geförderten Pilotprojektes ist dort die Erprobung von Sanierungsmaßnahmen in besonders belasteten Gebäuden eingeleitet worden.

2. Radioaktivität durch Bergbaualllasten

Für eine Bewertung der radiologischen Folgen der Bergbaualllasten werden bei Betrieben und öffentlichen Einrichtungen vorhandene Daten erfaßt und zur Vervollständigung der Datenbasis ergänzende Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß auch in den „Verdachtsgebieten“ die Strahlenbelastung meist im Normalbereich liegt.

Messungen der Ortsdosisleistung und Einzelnuklidbestimmungen (U-238, Ra-226 und teilweise Pb-210 und Po-210) in Boden-, Wasser- und Pflanzenproben weisen jedoch örtlich begrenzte Stellen mit überdurchschnittlich erhöhter Radioaktivität (Maximalwert: 10 000 Bq/kg Ra-226 im Trockenboden) auf. In wenigen Fällen wurden Grundwasserkontaminationen in der Umgebung der großen Absetzanlagen festgestellt (Maximalwert: U-238 1,17 mg/l; Ra-224 + Ra-226 1,3 Bq/l). Langjährige Messungen von Uran

¹⁾ Aue, Königstein, Crossen/Oberrothenbach, Seelingstädt und Ronneburg.

und Radium in Fließgewässern der Bergbaugebiete weisen bei den großen Vorflutern Elbe, Mulde, Weiße Elster und Pleiße keine nennenswerte Erhöhung über das natürliche Niveau auf (U-238: 0,01—0,05 mg/l und Ra-224 + Ra-226: 0,01—0,09 Bq/l). In den Zuflüssen zu den o. g. Hauptvorflutern wird aufgrund der geringen Abflussumengen eine höhere Radionuklidkonzentration gemessen (U-238: 0,03—0,8 mg/l und Ra-224 + Ra-226: 0,02—0,43 Bq/l).

3. Gesundheitliche Auswirkungen des Bergbaus

Die seit dem Mittelalter bekannte „Schneeberger Bergsucht“ bei Bergleuten aus den sächsischen Silberminen wurde 1879 als Bronchialkrebs erkannt und ist seit 1925 als entschädigungspflichtige Berufskrankheit anerkannt. Sie wird auf die Inhalation von Radon und seiner kurzlebigen Folgeprodukte in Kombination mit faser- und evtl. arsenhaltigen Mineralstäuben zurückgeführt.

Seit 1989/90 werden von der Bundesregierung zwei Forschungsprojekte gefördert, die eine detaillierte Datengrundlage für eine Abschätzung des Lungenkrebsrisikos der Wohn- und Arbeitsbevölkerung in strahlenexponierten Gegenden Deutschlands und für die Konzeption geeigneter Vorsorge- und Sanierungsmaßnahmen schaffen sollen.

Seit 1990 werden in einer Vorstudie alle in der Südregion der ehemaligen DDR verfügbaren bevölkerungsstatistischen, radiologischen und medizinischen Datenquellen gesichert und auf Vollständigkeit und Validität geprüft. Anhand dieser Datenbasis soll der Zusammenhang zwischen der Erkrankungshäufigkeit und der Strahlenexposition durch Radon analysiert werden. Erste Ergebnisse lassen eine hohe Fallzahl an Lungenkrebs erkrankten bei Beschäftigten der Wismut-AG erkennen; von über 7 000 Lungenkrebsfällen wurden bis Ende 1990 etwa 5 300 Fälle als Berufskrankheit anerkannt und entschädigt. Jedoch ist nach Prüfung des nationalen Krebsregisters der ehemaligen DDR eine im Vergleich zur genannten Fallzahl höhere Dunkelziffer nicht erfaßter berufsbedingter Bronchialkarzinome zu erwarten. Außerdem sind nach Aufzeichnungen der Wismut-AG ca. 15 000 Bergleute an Silikose erkrankt. Das bei Wismut-Beschäftigten beobachtete erhöhte Krebsrisiko soll ab 1992 in einer Hauptphasenstudie durch personenbezogene Untersuchungen geklärt werden. Dabei sind schwerpunktmäßig Risikoabschätzungen in Abhängigkeit von der Dosis, vom Lebensalter bei Expositionsbeginn und von Risikofaktoren wie Rauchen und Staubexposition sowie Latenzzeitbestimmungen vorgesehen.

Ein weiteres Projekt befaßt sich mit der Wohnraumbelastung durch Radon und deren Einfluß auf die Genese des Lungenkrebses. In Fall-Kontroll-Studien werden Risikofaktoren anhand von Wohn- und Rauchbiographien analysiert und die Radonkonzentration mittels Aktivkohledosimetern gemessen. Die Untersuchungen werden in ausgewählten Regionen des alten Bundesgebietes sowie in Sachsen und Thüringen durchgeführt.

IV. Zivilisatorische Strahlenexposition

1. Kerntechnische Anlagen

1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

Die für das Jahr 1990 ermittelten Werte für die Abgabe radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen zeigen, daß die von den zuständigen Behörden festgelegten Höchstwerte für die jährlichen Emissionen in allen Fällen eingehalten wurden. Die tatsächlichen Jahresabgaben liegen im allgemeinen deutlich unter den Genehmigungswerten, wie beispielsweise für Kernkraftwerke der Vergleich zwischen den Werten der Tabelle 2 und üblichen Genehmigungswerten von ca. 10^{15} Becquerel für Edelgase, ca. $3 \cdot 10^{10}$ Bq für Aerosole und ca. 10^{10} Bq für Iod 131 zeigt.

Die für 1990 aus den Jahresabgaben nach der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ berechneten Werte der Strahlenexposition liegen im Bereich der entsprechenden Werte des Vorjahres. Die oberen Werte der Strahlenexposition für Einzelpersonen durch Emissionen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen 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.

In den neuen Bundesländern erfolgte die Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen nach dem im Normativ Technischen Dokument 38.220.56-84 „Berechnung der Strahlenexposition durch Abgabe radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken“ festgelegten Verfahren. Hierbei wurden Modelle verwendet, die den internationalen Empfehlungen (ICRP 26 und ICRP 30) entsprechen und international angewendeten Modellen äquivalent sind.

Der Beitrag der kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland sowie im angrenzenden Ausland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland lag auch 1990 deutlich unter $10 \mu\text{Sv}$ pro Jahr (Tabelle 1).

1.2 Jahresabgaben radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen

Die Abgaben 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. Für die neuen Bundesländer waren im Jahre 1990 nach Atomgesetz und Einigungsvertrag Art, Umfang und Methoden zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen auf der Grundlage der mit zeitlichen Befristungen fortgeltenden Genehmigungen festgelegt. Die in den alten Bundesländern 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. In den neuen Bundesländern wurden die von den Betrieben durchzuführenden Messungen durch behördliche Inspektionen überprüft.

Die für 1990 ermittelten Jahresabgaben radioaktiver Stoffe in Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken sind in den Tabellen 2 und 3 angegeben und nach Nuklidgruppen aufgeschlüsselt. Sie liegen in der Größenordnung der Abgaben der Vorjahre und unterschreiten im allgemeinen deutlich die entsprechenden Genehmigungswerte. In Tabelle 4a sind die Daten über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Kernforschungszentren Karlsruhe, Jülich und Rossendorf im Jahr 1990 zusammengefaßt. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus den übrigen Forschungsreaktoren in den alten Bundesländern betragen im Mittel nur einige Prozent der Ableitungen von Kernkraftwerken. Die im Vergleich zu den anderen Kernforschungszentren relativ hohen Aerosol- und Iod-131-Werte im ZfK Rossendorf sind auf die Isotopenproduktion zurückzuführen. In Tabelle 4b sind die entsprechenden Abwasserdaten im Jahr 1990 zusammengestellt. Tabelle 5 enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 1990 in Grenz-nähe, d. h. bis zu einer Entfernung von 30 km zur deutschen Grenze, die in Tabelle 6 aufgeführten kerntechnischen Anlagen in Betrieb. Das Kernkraftwerk Mühleberg wurde trotz der größeren Entfernung zur deutschen Grenze mitberücksichtigt, weil es im Einzugsgebiet des Rheins liegt. Über die Jahresemissionen kerntechnischer Anlagen in EG-Ländern

berichtet die Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Die Jahresabgaben 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 nach dem in der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ bzw. für die neuen Bundesländer nach dem im Normativ Technischen Dokument 38.220.56-84 festgelegten Verfahren ermittelt.

Die in den Tabellen 7 bis 11 angegebenen Expositionswerte für die kerntechnischen Anlagen in den alten Bundesländern 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 in den Tabellen 7 bis 9 angegebenen Expositionswerte für die kerntechnischen Anlagen in den neuen Bundesländern stellen ebenfalls obere Werte dar, die nach den Berechnungsgrundlagen des Normativ Technischen Dokuments für die kritische Bevölkerungsgruppe analog der ungünstigsten Einwirkungsstelle nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift für die Referenzperson zu erwarten sind (gleiche Belastungspfade, gleiche Dosisfaktoren, analoge Berechnungsgrundlagen, ausgenommen die Ermittlung der Gammasubmersion nach dem Halbraummmodell).

Die Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Jahr 1990 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft enthält Tabelle 7. Angegeben ist die effektive Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die Schilddrüsendosis für Kleinkinder über sämtliche relevanten Expositionspfade: Gammastrahlung aus der Abluftfahne (Gammasubmersion), Gammastrahlung am Boden abgelagerter radioaktiver Stoffe, Inhalation und Ingestion.

Tabelle 7 zeigt für die alten Bundesländer als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene jeweils 2 μSv bei den Standorten Isar und Philippsburg, der den Grenzwert der Strahlenschutzverordnung von 300 μSv um den Faktor 150 unterschreitet. Für Klein-

kinder ergeben sich um bis zu einem Faktor 2 höhere Werte der effektiven Dosis. Dies ist überwiegend auf den Dosisbeitrag von Kohlenstoff 14 über den Ingestionspfad zurückzuführen. Für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes ergeben die Rechnungen als größten Wert 4 μSv , ebenfalls bei den Standorten Isar und Philippsburg; dies sind ca. 0,5 % des Dosisgrenzwertes für die Schilddrüse.

Die für die Kernkraftwerke Rheinsberg und Greifswald ermittelte Strahlenexposition für Erwachsene und Kleinkinder geht ebenfalls aus Tabelle 7 hervor. Für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes ergeben die Rechnungen als größten Wert 40 μSv ; dies sind ca. 5 % des Dosisgrenzwertes für die Schilddrüse.

In Tabelle 8 sind die aus den Abgaben radioaktiver Stoffe mit Abwasser aus Kernkraftwerken resultierenden Werte der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder zusammengestellt; hierbei wurden ebenfalls ungünstige Verzehrs- und Lebensgewohnheiten angenommen, insbesondere für Erwachsene ein hoher Konsum an Flußfisch, der in der Kühlwasserfahne gefangen wird und für beide Gruppen der Aufenthalt von 1 000 Stunden am Flußufer oder auf Wiesen in Flußnähe. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt in den alten Bundesländern 0,5 μSv beim Kernkraftwerk Neckarwestheim, zu dem 2 Reaktorblöcke gehören. Die vergleichsweise höheren Werte bei neueren Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren resultieren aus unvermeidbaren Tritiumemissionen im Vorfluter mit geringen Abflüssen. Unterschiede zum Vorjahr sind durch Änderungen in den Emissionen und in den Vorfluterabflüssen bedingt. Für die neuen Bundesländer ergibt sich der größte Wert der effektiven Dosis mit 0,6 μSv beim Kernkraftwerk Rheinsberg.

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 μSv für Erwachsene und Kleinkinder im Mündungsgebiet des Neckars ermittelt; am Unterlauf der Weser wurden für Erwachsene 0,6 μSv und für Kleinkinder 0,8 μSv berechnet, an Rhein, Donau und Main liegen die effektiven Dosen bei 0,2 μSv . 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 9 angegebenen Werte für die entsprechenden Strahlenexpositionen durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernforschungszentren stammen aus den Jahresberichten und aus zusätzlichen Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Kernforschungszentren Karlsruhe und Jülich. Die Tabelle weist für die effektive Dosis im Jahr 1990 über sämtliche relevanten Expositionspfade als größten Wert an der ungünstigsten Einwirkungsstelle bei der Kernforschungsanlage Jülich für Erwachsene 2,8 μSv , für Kleinkinder 4,6 μSv auf; im Vorjahr waren es für Erwachsene 8,9 μSv und für Kleinkinder 11,8 μSv . Als größten Wert für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes ergaben die Berechnungen für 1990 beim

Kernforschungszentrum Karlsruhe an der ungünstigsten Einwirkungsstelle 23 μSv .

Bei der Ermittlung der Strahlenexposition durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft des Kernforschungszentrums Rossendorf wurden die Ergebnisse von Windkanaluntersuchungen berücksichtigt, die sich auf den Standort der nächstgelegenen Bevölkerungsgruppe (ZfK Wohnsiedlung, ca. 300 m vom Zaun) beziehen. Hierbei ergab sich ein oberer Wert für die effektive Dosis von 7 μSv für Erwachsene und von 30 μSv für Kleinkinder. Berechnungen nach dem Normativ Technischen Dokument für das ZfK Rossendorf ergaben als höchsten Wert für die Schilddrüsenedosis eines Kleinkindes 800 μSv ; dies sind ca. 90 % des Dosisgrenzwertes für die Schilddrüse. Analoge Berechnungen nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift ergaben für die Schilddrüsenedosis des Kleinkindes 250 μSv ; Ursache dieses Unterschiedes ist ein in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift gewählter, etwa dreimal kleinerer Transferfaktor Futter/Milch für Iod-131 . Der Dosiswert von 800 μSv ist auf die relativ hohen Ableitungen von Iod-131 mit der Abluft sowie ihrer gegenüber Kernkraftwerken schlechteren atmosphärischen Verdünnung zurückzuführen. Die tatsächlich auftretende Strahlenexposition der Schilddrüse des Kleinkindes ist weit unter dem oben genannten errechneten Wert, da am betrachteten Standort (Siedlung ZfK) keine Weidewirtschaft betrieben wird, die aber bei der Berechnung den Hauptanteil zur Gesamtexposition liefert.

Für die Strahlenexposition über das Abwasser aus Kernforschungszentren ergibt die Abschätzung aufgrund von Meßwerten, die bei radioökologischen Untersuchungen gewonnen wurden, einen oberen Wert von 20 μSv pro Jahr. Für das ZfK Rossendorf wurde die Strahlenexposition über das Abwasser nach dem Normativ Technischen Dokument berechnet. Die effektive Dosis für den Erwachsenen beträgt 3,3 μSv und für das Kleinkind 1,6 μSv .

Für die kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe in Hanau, Karlstein, Lingen und Gronau sind in Tabelle 10 die für die ungünstigste Einwirkungsstelle berechneten oberen Werte der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die oberen Werte der Lungendosis für Kleinkinder durch die Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft angegeben. Bei den Berechnungen für den Standort Hanau wurden Ergebnisse aus neuesten Untersuchungen der Ausbreitungsverhältnisse vor Ort und im Windkanal berücksichtigt. Der höchste Wert der effektiven Dosis beträgt 6 μSv für Erwachsene, der höchste Wert der Lungendosis 25 μSv für Kleinkinder.

Die durch die Abgaben von Alphastrahlern mit dem Abwasser bedingten Werte der effektiven Dosis von Erwachsenen und Kleinkindern sind in Tabelle 11 aufgeführt. In den Vorjahren wurde für die Berechnungen angenommen, daß Trinkwasser und Wasser zur Viehtränke und zur Beregnung landwirtschaftlicher Flächen direkt aus der Abwasserfahne der Kläranlage Hanau entnommen wird. Für die diesjährigen Abschätzungen wurden aufgrund der tatsächlich am Standort vorliegenden Verhältnisse diese Nutzungen erst nach vollständiger Durchmischung der Abwasserfahne mit dem Main unterstellt. Unter dieser

Annahme errechnet sich ein Wert von weniger als 0,1 μSv für die effektive Dosis. An der ungünstigsten Einwirkungsstelle am Standort Hanau ergibt sich ein theoretisch ermittelter Wert von 0,5 μSv für die effektive Dosis.

Die durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) hervorgerufene Strahlenexposition der in der Umgebung lebenden Personen beträgt ca. 1 % des in der Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz (VOAS) festgelegten Grenzwertes von 1 μSv pro Jahr.

Der Betrieb kerntechnischer Anlagen in Nachbarländern (Tabelle 6) führte 1990 nach den Berechnungen gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung auf Bundesgebiet zu oberen Werten der effektiven Dosis im Mikrosievert-Bereich. Für die Schilddrüsenedosis eines Kleinkindes über sämtliche relevanten Expositionspfade errechnet sich ein oberer Wert von 15 μSv pro Jahr; den größten Beitrag zur Schilddrüsenedosis 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 1990 im Mittel ca. 1,5 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, die durch repräsentative Erhebungen über die Häufigkeit der wichtigsten röntgendiagnostischen Untersuchungen und der dabei benötigten Dosen ersetzt werden sollen. Erhebungen hierzu werden derzeit vom Bundesamt für Strahlenschutz durchgeführt.

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 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. Die u. a. vorgeschriebene Prüfung der Abbildungsqualität von Röntgenbildern durch die ärztlichen Stellen mit anschließender Beratung der Röntgenstrahlenanwender zeigt bereits positive Wirkung. Auch das vom Deutschen Bundestag geforderte „Röntgennachweiseft“ ist eingeführt worden, um so Wiederholungsuntersuchungen auf das notwendige Maß zu begrenzen.

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

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 unterlassener Röntgendiagnostik ist ungleich höher als das rechnerische Risiko einer geringen Strahlenexposition. Für die strahlenintensivere, interventionelle Radiologie, also therapeutische Maßnahmen (meist an den Blutgefäßen), gilt dies in noch höherem Maß, 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, kerami-

sche 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 (Anzeigespflicht 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 wird mit einer effektiven Dosis von weniger als 10 μSv pro Jahr abgeschätzt.

4. Berufliche Tätigkeit

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 357 000 (alte Bundesländer: 320 000, neue Bundesländer: 37 000), davon im Bereich Medizin 237 000 (alte Bundesländer: 212 000, neue Bundesländer: 25 000). Die Abbildungen 1 a und 1 b zeigen den Verlauf seit 1981 für die alten und neuen Bundesländer. Die Angaben für die neuen Bundesländer für die Zeit vor Oktober 1990 stammen aus Berichten des ehemaligen Staatlichen Amtes für Atomsicherheit und Strahlenschutz.

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 0,3 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, daß bei dem größten Teil aller Überwachten (in den alten Bundesländern ca. 85 %) 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 90 %, 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 1,7 mSv (alte Bundesländer).

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) im Berichtsjahr betrug 107 Personen-Sv (alte Bundesländer: 92 Personen-Sv; neue Bundesländer: 15 Personen-Sv). Die Beiträge typischer Tätigkeitszweige zur Kollektivdosis zeigen die Abbildungen 2a und 2b. Einige Angaben über die berufliche Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken sind in den Tabellen 12a und 12b enthalten.

Personen, bei denen aufgrund ihres Umgangs mit offenen radioaktiven Stoffen eine Inkorporation nicht ausgeschlossen werden kann, werden durch Messungen im Ganzkörperzähler oder durch Untersuchungen der Ausscheidungen überwacht. Die Zahl dieser Personen betrug weniger als 10 % der mit Personendosimetern überwachten Personen. Bei weniger als 1 % dieses Personenkreises wurde eine Inkorporation von mehr als 5 % des Grenzwertes der zulässigen Jahresaktivitätszufuhr festgestellt. Der Beitrag der Strahlenexposition durch inkorporierte radioaktive Stoffe zur gesamten beruflichen Strahlenexposition war daher vergleichsweise gering.

Personen, bei denen aufgrund ihrer beruflichen Tätigkeit eine Aktivitätszufuhr oberhalb 10 % des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr nicht auszuschließen war, wurden auch in den neuen Bundesländern durch Messungen im Ganzkörperzähler und Analysen der Ausscheidungen überwacht.

In der regelmäßigen Inkorporationsüberwachung der amtlichen Meßstelle befanden sich 315 Personen (langjährig ca. 400 Personen). Weitere Inkorporationsmessungen wurden auf betrieblicher Ebene vorgenommen.

Die effektive Dosis aus den Inkorporationsmeßwerten, nach Referenzverfahren berechnet, lag 1990 im Mittel bei 0,19 mSv (langjährig zwischen 0,2 und 0,3 mSv/a). Nur bei der Herstellung und Anwendung von radioaktivem Iod konnten Schilddrüsenbelastungen oberhalb 10 % des Dosisgrenzwertes ermittelt werden (<3 % der Überwachten). Durch das niedrige Niveau ist der Beitrag der Strahlenexposition infolge inkorporierter radioaktiver Stoffe an der gesamten Strahlenexposition vergleichsweise gering.

In den neuen Bundesländern wird nach fortgeltendem Recht der ehemaligen DDR die im Bergbau und bei anderen Tätigkeiten auftretende Strahlenexposition durch radioaktive Stoffe, insbesondere Radon und seine Folgeprodukte überwacht (siehe Kapitel III). 1990 wurden ca. 18 000 Personen dosimetrisch überwacht. Die Kollektivdosis betrug ca. 150 Personen-Sv.

Die Äquivalent-Dosisleistung bei Flügen in einer Höhe von etwa 10—12 km bei geomagnetischen Breiten vom Äquator bis zu 70° Nord liegt im Bereich von 2 µSv/h bis 16 µSv/h. Die Intensität der Höhenstrahlung hängt u. a. von der geomagnetischen Breite und der Flughöhe ab. Bei Annahme einer mittleren Äquivalentdosisleistung von 8 µSv/h und einer Flugzeit von 500—800 Stunden im Jahr läßt sich für das Flugpersonal eine mittlere jährliche Strahlenexposition von etwa 5 mSv abschätzen. Nach gegenwärtiger Rechtslage gehört das Flugpersonal nicht zu den beruflich strahlenexponierten Personen. Nach der neuen Empfehlung der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP Nr. 60 von 1991) und Überlegungen bei der Europäischen Gemeinschaft sollte diese Personengruppe jedoch als beruflich strahlenexponiert angesehen werden.

5. Besondere Vorkommnisse

Eine Übersicht über besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe im Jahr 1990, die dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit von den zuständigen Landesbehörden (alte Bundesländer) gemeldet worden sind, enthält Tabelle 13. Sie enthält auch die besonderen Vorkommnisse in den neuen Bundesländern gemäß den Angaben des ehemaligen Staatlichen Amtes für Atomsicherheit und Strahlenschutz bzw. — nach dem 3. Oktober 1990 — der gemeinsamen Einrichtung der neuen Länder (Bereich Strahlenschutz). Die Übersicht dient dazu, mögliche Fehlerquellen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aufzuzeigen, um vergleichbare Vorkommnisse zu vermeiden.

6. Fall-out von Kernwaffenversuchen

1990 wurden 17 unterirdische Kernwaffenversuche durchgeführt. Aus diesen unterirdischen Versuchen resultiert keine zusätzliche Strahlenexposition des Menschen in der Bundesrepublik Deutschland.

Der allgemeine Pegel der Umweltradioaktivität durch die früheren Kernwaffenversuche in der Atmosphäre ist in den letzten 20 Jahren ständig zurückgegangen. Die langlebigen Fall-out-Radionuklide sind im menschlichen Körper aber noch immer nachweisbar. Ihr Beitrag an der gesamten Strahlenexposition des Menschen ist gering (weniger als 0,2 %).

V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

In der Nacht vom 25. zum 26. April 1986 ereignete sich in Block 4 des Kernkraftwerkes Tschernobyl in der Ukraine/UdSSR ein Unfall, in dessen Folge eine große Menge radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre freigesetzt wurde. Diese Stoffe wurden auf dem Weg der atmosphärischen Verfrachtung über große Teile Europas verteilt. Bedingt durch regional differierende Wettersituationen traten stark unterschiedliche Aktivitätskonzentrationen in der Luft sowie durch Ablagerung in anderen Umweltbereichen und in Lebensmitteln auf.

Das infolge des Reaktorunfalls deponierte Caesium 134 und Caesium 137 war durch radioaktiven Zerfall Ende 1990 auf etwa 20 % bzw. 90 % der jeweiligen Ausgangswerte zurückgegangen und verursachte 1990 in der Bundesrepublik Deutschland eine externe Strahlenexposition, die im Mittel zu einer effektiven Dosis von 0,02 mSv führte (Tabelle 1) und entsprechend der unterschiedlichen Ablagerung von Radiocäsium regional variiert. Im Jahre 1986 hatte die mittlere effektive Dosis 0,07 mSv betragen.

Die mittlere monatliche Caesiumzufuhr über Grundnahrungsmittel ist 1990 auf ca. 50 Bq pro Monat zurückgegangen und nimmt weiterhin langsam ab. In speziellen Lebensmitteln (Wildfleisch, Waldpilze) aus eng begrenzten Gebieten sind auch 1990 teilweise höhere Caesiumwerte aufgetreten; besondere Ernährungsgewohnheiten können daher Abweichungen von den durchschnittlichen Zufuhrwerten bedingen.

Seit dem Reaktorunfall in Tschernobyl wird von einer Reihe von Ganzkörpermeßeinrichtungen in der Bundesrepublik Deutschland in verschiedenen Gebieten der zeitliche Verlauf des Caesium 134- und Caesium 137-Gehaltes im Menschen verfolgt. Über die Ergebnisse wurde regelmäßig in Vierteljahresberichten des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung berichtet. Im Verlauf des Jahres 1990 ist die Ganzkörperaktivität bei allen Personengruppen auf ca. 0,003 mSv, entsprechend 10 % des Maximalwertes, der um die Jahresmitte 1987 auftrat, zurückgegangen. Regionale Unterschiede haben sich weiterhin abgeschwächt (Tabelle 14). Für viele der ausgemessenen Personen liegt die Kontamination bereits unter der Nachweisgrenze. Die aus der Inkorporation von Caesium 134 und Caesium 137, einschließlich des Beitrages der durch den Reaktorunfall bedingten Zufuhr von Strontium 90, berechnete mittlere jährliche effektive Dosis beträgt weniger als 0,01 mSv.

Die mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland durch den Reaktorunfall hat 1990 im bundesweiten Mittel ca. 1 % der durchschnittlichen natürlichen Strahlenexposition von 2,4 mSv pro Jahr betragen.

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

Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1990

Kernkraftwerk	Edelgase Bq	Aerosole ^{a)} Bq	Iod 131 Bq	¹⁴ CO ₂ Bq	Tritium Bq
Kahl ^{b)}	—	6,9 E03	—	—	—
Gundremmingen A ^{c)}	—	2,9 E06	—	—	1,5 E10
Lingen ^{c)}	—	2,3 E01	—	—	1,2 E08
Obrigheim	1,3 E11	4,0 E06	4,4 E04	5,5 E09	2,3 E11
Stade	2,2 E12	4,6 E07	2,8 E06	1,9 E10	1,1 E12
Würgassen	6,1 E11	4,5 E07	1,9 E07	4,9 E10	9,5 E10
Biblis A	3,9 E12	1,1 E07	2,7 E06	1,2 E10	4,6 E11
Biblis B	5,9 E12	4,1 E05	5,0 E05	8,4 E09	1,3 E11
Neckar 1	1,8 E13	2,7 E06	2,6 E07	6,4 E09	5,1 E11
Brunsbüttel	4,8 E12	5,4 E07	2,0 E07	3,2 E11	8,9 E10
Isar 1	2,0 E08	6,3 E06	5,5 E05	3,8 E11	4,3 E11
Unterweser	3,2 E12	1,9 E06	2,9 E05	3,0 E10	1,1 E12
Philippsburg 1	1,4 E10	7,3 E07	1,4 E06	3,1 E11	5,2 E10
Grafenrheinfeld	4,8 E12	8,3 E06	2,2 E06	2,1 E11	4,6 E11
Krümmel	6,9 E11	5,1 E06	6,0 E07	1,5 E11	7,9 E10
Gundremmingen B und C	7,0 E12	n. n.	1,5 E07	9,7 E11	2,0 E11
Grohnde	1,4 E11	1,0 E05	n. n.	6,6 E10	7,6 E11
Hamm-Uentrop ^{d)}	5,8 E10	3,9 E05	1,8 E06	9,7 E08	5,8 E11
Philippsburg 2	1,1 E11	4,5 E05	n. n.	8,7 E10	1,6 E12
Mülheim-Kärlich ^{d)}	n. n.	n. n.	n. n.	4,9 E09	2,7 E11
Brokdorf	4,1 E11	3,7 E05	7,0 E05	1,1 E11	1,1 E11
Isar 2	2,2 E11	3,7 E04	n. n.	2,8 E11	8,9 E11
Emsland	9,8 E10	6,0 E05	n. n.	1,4 E11	4,8 E11
Neckar 2	2,1 E11	3,6 E06	2,3 E05	5,0 E10	5,8 E11
Rheinsberg	2,1 E13	5,0 E06	2,3 E07	—	—
Greifswald	<3,6 E14	<6,2 E08	<5,2 E09	—	—

^{a)} Halbwertszeit > 8 Tage, ohne Jod 131, einschließlich Strontium und Alpha-Strahler.^{b)} Stillstand seit November 1985.^{c)} Stillstand seit Januar 1977.^{d)} Stillstand seit September 1988.

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

1,3 E11 bedeutet $1,3 \cdot 10^{11}$.

Tabelle 3

**Abgabe radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken
in der Bundesrepublik Deutschland
im Jahr 1990**
(Summenwerte, Tritium und α -Strahler)

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

^{a)} Anlage stillgelegt.

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

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

Tabelle 4a

**Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernforschungszentren
in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1990**

Kernforschungszentrum	Edelgase Bq	Aerosole Bq	Iod 131 Bq	Iod 129 Bq	Tritium Bq	Kohlenstoff 14 Bq	Strontium 90 Bq
Kernforschungszentrum Karlsruhe (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage)	9,5 E14	2,7 E07 ^{a)}	1,3 E07	9,6 E07	1,0 E13	6,9 E10	<2,1 E06
Kernforschungsanlage Jülich (einschließlich Versuchsreaktor AVR)	9,2 E11	1,6 E06	1,1 E08	—	3,4 E12	1,1 E11	2,1 E03
ZfK Rossendorf	5,0 E14	3,2 E09	2,7 E10	b)	2,7 E12	b)	b)

^{a)} Alpha-Strahler: 5,6 E05 Bq.

^{b)} Nicht bestimmt.

Tabelle 4b

**Abgabe radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernforschungszentren
in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1990**

Kernforschungszentrum	Spalt- und Aktivierungs- produkte (außer Tritium) Bq	Tritium Bq	α -Strahler Bq
Karlsruhe (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage) ..	5,3 E08 ^{a)}	3,1 E13	9,6 E05 ^{b)}
Jülich	7,2 E08	3,0 E11	<2,2 E07
ZfK Rossendorf	9,5 E07 ^{c)}	1,8 E11	4,0 E05

^{a)} β -Bruttomessung.

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

^{c)} Abgabe von C-14; 1,3 E09 Bq.

Tabelle 5

Abgabe radioaktiver Stoffe (Alpha-Aktivität) aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1990

Betrieb	Abluft Bq	Abwasser Bq
NUKEM GmbH Hanau ^{a)}	2,4 E04	} 6,4 E07
HOBEG GmbH Hanau ^{a)}	5,5 E03	
SIEMENS AG Brennelementewerk Hanau		
— Betriebsteil MOX-Verarbeitung ^{b)}	< 1,8 E04	5,5 E05
— Betriebsteil Uran-Verarbeitung ^{c)}	7,4 E07	1,5 E09
— Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein ^{d)}	< 1,7 E05	7,0 E07
ANF GmbH (Lingen)	< 1,2 E04	< 1,0 E06
URENCO D (Gronau)	2,4 E04	7,6 E03

^{a)} Brennelementproduktion eingestellt seit 1988.

^{b)} Vormalig ALKEM GmbH.

^{c)} Vormalig RBU Werk I.

^{d)} Vormalig RBU Werk II.

Tabelle 6

Kerntechnische Anlagen im benachbarten Ausland

(Stand: 31. Dezember 1990)

Land	Anlage/Standort	Entfernung zur deutschen Grenze
Schweiz	Kernkraftwerk Beznau (2 Blöcke)	ca. 6 km
	Paul Scherrer Institut Villigen/Würenlingen ^{a)}	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 (3 Blöcke)	ca. 12 km
Niederlande	Kernkraftwerk Dodewaard	ca. 20 km
	Urananreicherungsanlage Almelo	ca. 15 km

^{a)} Vormalig Eidg. Institut für Reaktorforschung.

Tabelle 7

**Strahlenexposition im Jahr 1990 in der Umgebung von Kernkraftwerken
durch die Abgabe 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
Lingen	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Obrigheim	1	2	2
Stade	0,1	0,2	0,2
Würgassen	1	2	3
Biblis A, B	0,4	0,6	0,7
Neckar 1, 2	0,8	1	1
Brunsbüttel	1	2	3
Isar 1, 2	2	4	4
Unterweser	0,1	0,2	0,2
Philippsburg 1, 2	2	4	4
Grafenrheinfeld	0,5	1	1
Krümmel	0,6	1	1
Gundremmingen A, B, C	1	2	3
Grohnde	0,4	0,7	0,7
Hamm-Uentrop	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Mülheim-Kärlich	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Brokdorf	0,4	0,8	0,8
Emsland	0,2	0,4	0,4
Rheinsberg ^{b)}	0,03	0,04	0,2
Greifswald ^{b)}	0,3	1,4	40

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

^{b)} Berechnet nach dem Normativ Technischen Dokument 38.220.56-84.

Tabelle 8

**Strahlenexposition im Jahr 1990 in der Umgebung von Kernkraftwerken
durch die Abgabe 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	der effektiven Dosis für Kleinkinder µSv
Kahl	0,2	< 0,1
Gundremmingen A, B und C	0,4	0,1
Obrigheim	0,2	0,3
Stade	< 0,1	< 0,1
Würgassen	0,2	0,2
Biblis A und B	0,1	< 0,1
Neckar 1 und 2	0,5	0,5
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
Krümmel	< 0,1	< 0,1
Grohnde	0,1	0,1
Hamm-Uentrop	< 0,1	< 0,1
Mülheim-Kärlich	< 0,1	< 0,1
Brokdorf	< 0,1	< 0,1
Emsland	0,4	0,4
Rheinsberg ^{a)}	0,6	0,6
Greifswald ^{a)}	0,02	0,02

^{a)} Berechnet nach dem Normativ Technischen Dokument 38.220.56-84.

Tabelle 9

**Strahlenexposition im Jahr 1990 in der Umgebung von Kernforschungszentren
durch die Abgabe radioaktiver Stoffe mit der Abluft**

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

Kernforschungszentrum	Oberer Wert		
	der effektiven Dosis		der Schilddrüsens dosis
	für Erwachsene µSv	für Kleinkinder µSv	für Kleinkinder µSv
Kernforschungszentrum Karlsruhe ^{a)} (einschließlich Wiederaufarbeitungsanlage) ..	1,5	1,6	23
Kernforschungsanlage Jülich ^{a)} (einschließlich Versuchsreaktor AVR)	2,8	4,6	5,0
Kernforschungszentrum Rossendorf ^{b)}	7	30	800 ^{c)}

^{a)} Entnommen den Jahresberichten 1990 sowie nach Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Kernforschungszentren Karlsruhe und Jülich.

^{b)} Berechnet nach dem Normativ Technischen Dokument 38.220.56-84.

^{c)} Berechnet nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 StrlSchV ergibt sich ein Wert von 250 µSv.

Tabelle 10

Strahlenexposition im Jahr 1990 in der Umgebung der kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe durch die Abgabe 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)	< 0,1	< 0,1	0,1
HOBEG GmbH (Hanau)	< 0,1	< 0,1	< 0,1
SIEMENS AG Brennelementewerk Hanau			
Betriebsteil MOX-Verarbeitung ^{a)}	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Betriebsteil Uran-Verarbeitung ^{b)}	6	4	25
Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein ^{c)}	< 0,1	< 0,1	< 3
ANF GmbH (Lingen)	< 0,1	< 0,1	< 0,1
URENCO D (Gronau)	< 0,1	< 0,1	< 0,1

- a) Vormalis ALKEM GmbH.
- b) Vormalis RBU Werk I.
- c) Vormalis RBU Werk II.

Tabelle 11

Strahlenexposition im Jahr 1990 in der Umgebung kernbrennstoffverarbeitender Betriebe durch die Abgabe 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 ^{a)}	< 0,1
Betriebsteil Uran-Verarbeitung ^{b)}	< 0,1
Betriebsteil Sonderfertigung Karlstein ^{c)}	< 0,1
ANF (Lingen)	—
URENCO D (Gronau)	< 0,1

- a) Vormalis ALKEM GmbH.
- b) Vormalis RBU Werk I.
- c) Vormalis RBU Werk II.

Tabelle 12a

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

Tabelle 12b

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

Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
3. 1. 1990	Störung in der Blendensteuerung eines med. Linearbeschleunigers	Unzureichende Stabilität der Halterung von Schaltern	Keine, da Monitor Strahlung abschaltete	Verbesserung der Halterung
4. 1. 1990	Abriß einer Bohrlochsonde mit einer Cf-252-Strahlenquelle in 800 m Tiefe	Riß des Halteseils nach Verklemmen der Sonde	Keine, da die Quelle am 31. 3. 1990 unverseht geborgen wurde	
10. 1. 1990	Während routinemäßiger Überprüfung der Steuereinheit einer fernbedienten medizinischen Applikations-einrichtung fuhr Quelle nicht in Endstellung	Quellenhalter war übermäßig gekrümmt	Exposition eines Mitarbeiters mit 0,3 mSv bei der erforderlichen Richtung des Quellenhalters	Auswertung des Vorkommnisses mit den Herstellern der Quelle
12. 1. 1990	Feststellung des Abrisses des Schutzrohrs in einer Brunnenbestrahlungsanlage	Korrosion des Schutzrohrs	Keine, die Sonde der Bestrahlungsanlage war unverseht und dicht	Einbau eines neuen Schutzrohrs mit neuer Bestrahlungs-sonde erfolgte
15. 1. 1990	Austritt von etwa 10 l mittelaktiver Abfalllösung innerhalb des Kontrollbereiches einer Einrichtung zur Isotopenproduktion	Abriß eines Schlauches als Folge der Verwendung einer ungeeigneten Schlauchklemme	Ganzkörperdosis bei zwei Mitarbeitern von 1,5 bzw. 2,5 mSv sowie Handdosis eines Mitarbeiters von 4 mSv	Dekontamination des Fußbodens und Auswechslung von 2 qm Fußbodenbelag zur Beseitigung der Restkontamination
24. 1. 1990	Freisetzung von ca. 800 GBq Kr-85 in das innere Containment einer Kr-85-Anreicherungsanlage und anschließende Abgabe über die Abluft in die Umgebung	Abriß eines Verbindungsschlauches nach Druckaufbau infolge eines durch einen Bedienfehler verschlossenen Ventils	vernachlässigbar, da eine sehr starke Verdünnung in der Abluft erfolgte	Technische Veränderung der Anlage wurde veranlaßt sowie eine Belehrung über die Einhaltung der Betriebsvorschriften
31. 1. 1990	Leckage an einem Ventil eines UF ₆ -Behälters in einer kerntechnischen Einrichtung (Resultierende Alphaaktivität in der Luft: 26 Bq/cbm)	Defekt an der Kupplung des Drehantriebes für den UF ₆ -Zylinder mit nachfolgenden Leckagen des Ventilsitzes eines Behälterventils wegen Überhitzung	Keine; Personal trug Schutzmasken; sofortige Dekontamination war erfolgreich	Verhalten der verantwortlichen Personen korrekt

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
11. 2. 1990	Verlust einer zur Füllstandsmessung in einem Kalksteinsilo eingesetzten Cs-137-Strahlenquelle (85 MBq)	Lösung der Verschlussschraube an der Sonde bei gleichzeitiger Beschädigung des Schutzrohres durch Abrieb	Die Suchmaßnahmen verliefen ergebnislos, die Quelle gelangte vermutlich in das Mahlgut einer Rohmühle und wurde vollständig zermahlen	Im Mahlgut war keine Aktivität feststellbar, radiologische Folgen sind durch eine Vermischung nicht zu erwarten
13. 2. 1990	Freisetzung von 2 TBq Tritium innerhalb einer Tritiumbox. Bis auf ca. 1,6 GBq wurde die Aktivität am in der Box befindlichen Adsorber gebunden	Zerplatzen eines Adsorptionsröhrchens beim Aufheizen	Infolge der Kontamination der Laborluft geringfügige Inkorporation bei einem Mitarbeiter. Berechnete effektive Dosis: 0,02 mSv	Es wurden technische Veränderungen zur Vermeidung derartiger Vorkommnisse vorgenommen
13. 2. 1990	Störung an einem med. Afterloading-Gerät	Defekt zwischen Antriebsrad und Antriebsseil	Keine Exposition des Personals; Exposition der Patienten geringer als vorgesehene Therapiedosis	Bei Geräten gleicher Bauart wird vom Hersteller eine Änderung durchgeführt, die eine Wiederholung eines derartigen Störfalles ausschließt.
22. 2. 1990	Fund einer Pu-242 Strahlenquelle (43 M Bq) im Arbeitsraum eines ehemaligen Mitarbeiters in einer kerntechnischen Einrichtung	Mangelhafte Nachweisführung	Keine, da Personen mit der Quelle nicht in Berührung kamen	Quelle wurde in das Quellenlager überführt
24. 2. 1990	Diebstahl von 3 Pellets aus einer kerntechnischen Anlage		Keine	Verstärkte Kontrolle und Ausführung vorgesehener Objektsicherungsmaßnahmen
24. 2. 1990	Kontamination eines Laborraumes mit Ni-63	Benutzung eines ungeeigneten Lösungsmittels bei Reinigungsvorgang an einen ECD-Detektor	Labor/Laboreinrichtung mußte dekontaminiert werden	Unvorhersehbare, unzulässige Manipulation
27. 2. 1990	Fund eines alten Strahlenmeßgerätes, in dem eine Ra-226-Prüfquelle enthalten war	Herkunft und frühere Benutzer waren nicht mehr zu ermitteln	Aufgrund des Fundortes und der Kontaminationsfreiheit nicht zu erwarten	Gerät wurde zur Erfassung als radioaktiver Abfall sichergestellt

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
März 1990	Erhöhte Exposition der Hände bei Wischtest an umschlossenen Pm-147-Strahlern	Nicht ausreichende Schutzmaßnahmen	Nicht zu erwarten, da Jahresgrenzwert um weniger als 70 % überschritten	Einsatz verstärkter Schutzmaßnahmen; vorgesehene Werkzeug, Handschuhe, Beschränkung der Teilkörperdosis bis Ende 1991
1. 3. 1990	Verkehrsunfall eines LKW mit Anhänger auf einer Autobahn	Unangepaßte Geschwindigkeit bei Windstärke 8 bis 10	Keine; Versandstücke wurden nicht beschädigt	
2. 3. 1990	Feststellung des Verlustes einer umschlossenen Strahlenquelle (1,2 GBq Cs-137) aus einer Füllstandsmeßeinrichtung in einem Kalibetrieb	Abriß der Quellenhalterung an einer Schweißnaht und Herabfallen in das Fördergut	Quellensuche verlief ohne Ergebnis, wahrscheinlich befindet sich die Quelle noch in einem untertägigen Bunker	Dosimetrische Kontrolle des Fördergutes (u. a. am Magnetabscheider) wurde veranlaßt, die Förderung ist jedoch seit Mitte 1990 eingestellt
6. 3. 1990	Verlust einer radioaktiven Sendung von I-125 mit 1,48 MBq	Vermutlich Falschlieferung	Vermutlich keine	
14. 3. 1990	Zerstörung einer Glasapparatur in einem radiochemischen Labor und Freisetzung von ca. 3 GBq C-14	Konstruktive Mängel der Apparatur	Inkorporation von C-14 bei drei Mitarbeitern mit 1,4 mSv, 1,3 mSv und 0,16 mSv effektive Dosis	Änderung der Apparatur und Verbesserung der Abluftführung veranlaßt
16. 3. 1990	Inkorporation von 260 MBq Tc-99m	Aufnahme eines offensichtlich mit Absicht radioaktiv kontaminierten Getränkes	Exposition von 4 mSv; gesundheitliche Schäden nicht zu erwarten	Einschränkung der Zugangsmöglichkeiten zu radioaktiven Stoffen
19. 3. 1990	Umstürzen von Versandstücken mit radioaktiven Arzneimitteln im Laderaum eines LKW	Fehlende Ladungssicherung	Keine, da der radioaktive Inhalt nicht freigesetzt wurde	Untersuchungen im Hinblick auf künftige Transporte noch nicht abgeschlossen
21. 3. 1990	Ungeplante Strahlenexposition eines Mitarbeiters bei Wartungsarbeiten im Servicekorridor einer radiochemischen Anlage	Die erhöhte Dosisleistung an einem System zur Aktivitätsrückhaltung wurde durch den Mitarbeiter nicht ausreichend berücksichtigt	Exposition des Mitarbeiters mit einer Ganzkörperdosis von 12,5 mSv	Maßnahmen zur Vermeidung eines Aktivitätsaufbaus an der Anlage und eingehende Belehrung der Mitarbeiter über die Einhaltung der Vorschriften

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
22. 3. 1990	Nach Auslösung einer Havarieabsenkung des Quellenkorbes einer Großbestrahlungsanlage blieb dieser in der Mitte des Wasserpools hängen	Verklebten der Fallbremse infolge Abnutzungserscheinungen	geringfügige Exposition von drei Mitarbeitern bei der anschließenden, unter dosimetrischer Kontrolle erfolgten Behebung	Technische Revision und Verbesserung der Fallbremse erfolgte
22. 3. 1990	Auffinden eines auf einem Privatgrundstück vergrabenen Behälters, in dem radioaktive Stoffe (Na-22 und Ra-226) vermutet wurden	Herkunft der Stoffe unbekannt	Nicht zu erwarten, die Analyse wies die Radionuklide Na-22 und Ra-226 nach, jedoch lagen die Aktivitäten unterhalb der Freigrenze	staatsanwaltschaftliche Ermittlungen laufen
24. 3. 1990	Kontamination einer Nachbarzelle in einer kerntechnischen Forschungseinrichtung	Nicht schließendes Magnet-Absperrventil in der Druckluftversorgungsleitung	Keine	Überprüfung des Magnetventils incl. elektr. Ansteuerung in allen Zellen; Einbau zusätzlicher Handventile; Erweiterung der Betriebsanweisung
27. 3. 1990	Fund eines Mo-99/Tc-99m-Generators	Nachlässigkeit bei der Diebstahlsicherung während der Anlieferung	Keine, Generator unversehrt	Ordnungswidrigkeitenverfahren gegen Fahrer
27. 3. 1990	Abhandenkommen eines Versandstückes mit einem Tc-99m-Generator mit ca. 6,5 GBq aus einem Fahrzeug	Diebstahl	Keine, Versandstück wurde mit lediglich außen beschädigter Verpackung wiedergefunden	
31. 3. 1990	Abhandenkommen eines Ra-226-Schulpräparates in einer Fachoberschule (Aktivität 330 kBq)	Diebstahl oder versehentliche Entsorgung mit dem Hausmüll	Keine	Bei üblichem Umgang mit dem bauartzugelassenen Präparat erscheint eine Gefährdung von Personen unwahrscheinlich
3. 4. 1990	Ungeplante, kontinuierliche Freisetzung von ca. 740 GBq Kr-85 aus einer Kr-Anreicherungsanlage in die Atmosphäre im Zeitraum von 16 Stunden	Defekt an einem Ventil durch Einsatz eines ungeeigneten Plastmaterials	Keine Strahlenexposition von Personen	Ersatz des Ventils wurde vorgenommen

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
3. 4. 1990	Zerstörung einer umschlossenen Strahlenquelle (5 GBq Kr-85) einer Flächenmassemeßeinrichtung in einem Walzwerk durch einen Materialüberstand des zu messenden stählernen Endlosbandes	Fehlerhafte Heftnaht des Endlosbandes	Keine, da sich Personen zum Zeitpunkt der Zerstörung der Quelle nicht in der Nähe aufhielten	Es wurden zusätzliche Materialabweiser angebracht. Der Betrieb prüft, ob der weitere Einsatz einer radiometrischen Einrichtung notwendig ist.
9. 4. 1990	Innerhalb eines Zeitraumes von 12 Stunden Freisetzung von 70 TBq Xe-133 aus einer radiochemischen Anlage	Gasleck	Überschreitung des betrieblichen Schwellenwertes für die Umgebungsüberwachung um den Faktor 2	Die zunächst verfügte Sperrung der Anlage konnte nach Klärung der Ursachen und deren Beseitigung aufgehoben werden
17. 4. 1990	Freisetzung von ca. 250 MBq Cs-137 in einem radiochemischen Labor mit Kontamination des Labors und benachbarter Räumlichkeiten	Aerosolbildung beim Öffnen und Umfüllen einer Ampulle Cs-Nitrat (4,8 TBq), vermutlich ausgelöst durch lokale Überhitzung beim Anbohren	Inkorporation bei 7 Mitarbeitern (0,04–0,53 mSv effektive Dosis) äußere Strahlenexposition von 3 Mitarbeitern (0,5–0,9 mSv)	Es waren umfangreiche Dekontaminationsarbeiten erforderlich. Die Technologie der Öffnung von Ampullen wurde geändert
25. 4. 1990	Fund radioaktiver Abfälle auf einer Mülldeponie	Verstoß gegen Vorschriften	Keine, da Aktivität weitgehend abgeklungen	Eine Verwarnung wurde ausgesprochen. Die vorschriftsmäßige Beseitigung der radioaktiven Reststoffe ist durch den Genehmigungsinhaber nachzuweisen
Mai 1990	Fund radioaktiv kontaminierter Aluminiumschlacke	Lieferung von kontaminierten Stoffen aus dem Ausland; Aktivität von 5 Bq/g	Keine; Aktivität unter Freigrenze	Produkt wird nur industriell weiterverarbeitet
7. 5. 1990	Diebstahl eines Meßgerätes mit einem radioaktiven Strahler von 370 MBq	Einbruch	Wahrscheinlich keine, gezielter Diebstahl zur weiteren Nutzung des Gerätes wird vermutet	
13. 5. 1990	Diebstahl eines PKW mit radioaktivem Versandstück (I-125 mit 370 kBq)		Nicht zu erwarten, da Aktivität kleiner als das 10fache der Freigrenze	

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
22. 5. 1990	Feststellung der Beschädigung einer Brunnenbestrahlungsanlage (Quetschung der Sonde) und Abriß des unteren Sondenteils mit 11 Quellen (7,4 TBq) Co-60	Bei unsachgemäßem Pumpenwechsel wurde Sonde gequetscht und an der vermutlich korrodierten Sondenrohrverbindung geteilt	Keine, im Hinblick auf die Beschaffenheit der Strahlensquellen zunächst nicht zu erwarten	Das abgerissene Sondenteil befindet sich in einer Tiefe von 122 m, wodurch die Bergung erschwert ist
22. 5. 1990	Bei einer fernbedienten medizinischen Applikations-einrichtung ließ sich die Quelle nach der Bestrahlung nicht automatisch in den Abschirmbehälter zurückfahren und mußte manuell zurückgeführt werden	Kontaktfehler im elektronischen Steuerteil	Keine filmdosimetrisch nachweisbare Exposition durch die manuelle Rückführung	Gerät wurde ersetzt, Exposition des Patienten wurde bei nachfolgender Bestrahlung ausgeglichen
23. 5. 1990	Vermuteter Verlust von 5 Durchstrahlungseinrichtungen in einer Behörde (ausgerüstet mit Am-241-Strahlensquellen von je 11 GBq)	Rückgabe der Geräte an den Hersteller, ohne die Nachweisunterlagen entsprechend zu berichtigen	Keine	Nachforschungen des Gemeinsamen Landeskriminalamtes klärten Verbleib auf, die Geräte sind unversehrt
30. 5. 1990	Unsachgemäßer Transport eines 8 GBq C-14 Präparates als Handgepäck im Zugverkehr	Unkenntnis der Vorschriften	vernachlässigbar	Belehrung über Transportvorschriften erfolgte
Juni 1990	Ausfall der Lüftungsanlage in einer Co-60-Sterilisationsanlage	Gewitterregen	Keine	
1. 6. 1990	Fund von 7 Tc-99 m-Generatoren sowie einer Tc-99 m-Generatorsäule auf einer Mülldeponie	Unzulässige Entsorgung von radioaktiven Stoffen auf einer konventionellen Mülldeponie	Keine, da die Generatoren ständig abgeschirmt waren und Aktivität inzwischen unter Freigrenze	Die Generatoren und die Generatorsäule werden entsorgt. Die Buchführung des ehemaligen Genehmigungsinhabers wurde überprüft
1. 6. 1990	Kontamination einer Person in einer kerntechnischen Einrichtung	Leichte Kontamination beim Ausziehen der Schutzkleidung nach Schwächeanfall	Keine, da Kontamination sehr gering	

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
5. 6. 1990	Freisetzung von ca. 625 kBq Uran aus Glühofen in einer kerntechnischen Einrichtung aufgrund einer Verstaubung im Glühraum	Verstaubung infolge plötzlicher Blasenbildung, die von dem unterdruckerzeugenden Sprühwäscher nicht ausreichend abgesaugt wurde	Inkorporation <10% des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr	Regelmäßige Kontrolle der Absaugleitung zwischen Ofen und Sprühwäscher und Reinigung bei Bedarf vorgesehen
5. 6. 1990	Freisetzung von 9,6 GBq I-131 aus dem Bereich einer Isotopenproduktionsanlage	Unschlaggemäßes Eindampfen einer Spaltproduktlösung zur Gewinnung mittellegiger Spaltprodukte	Berechnung der Exposition von relevanten Bezugspersonen ergab unter Zugrundelegung der Messung von Umweltproben eine maximale Dosis von 12 µSv	Inkorporationen wurden nicht nachgewiesen, gegen den verursachenden Mitarbeiter wurde ein Disziplinarverfahren durchgeführt
7. 6. 1990	Ermittlung einer Quartalsdosis von 26 mSv einer beruflich strahlenexponierten Person der Kat. B (Bereich Isotopenproduktion)	Konnte nicht aufgeklärt werden	Registrierung als ungeplante Personendosis von 26 mSv	Ausrüstung mit sofort auswertbaren Dosimetern wurde veranlaßt
11. 6. 1990	Fund einer Co-60-Strahlers auf dem Gelände eines ehemaligen Tonwerkes	Nicht genehmigte Entsorgung	Keine, da Strahler in Abschirmung	Gelände wurde vorsorglich abgesucht, Bleibehälter wurden ordnungsgemäß entsorgt
12. 6. 1990	Fund kontaminierter Bleiabschirmbehälter	Organisationsmangel beim Verwender	Keine, wegen geringfügiger Aktivität	Ermittlungsverfahren eingeleitet
13. 6. 1990	Fund von 5 Ampullen mit C-14 mit einer Aktivität von 11 MBq in einer Problemmüllsammelstelle	Unzulässige Entsorgung	Keine, da Behälter verschlossen und unversehrt	Ampullen wurden ordnungsgemäß entsorgt
29. 6. 1990	Kontamination des Bodens durch UO ₂ -Pulver (3,5 MBq) in einer kerntechnischen Einrichtung	Austreten aus nicht ausreichender Abdichtung des Rundschnellsiebes bei Pulverstau	Inhalation <5% des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr	Schauglas zur Kontrolle der Pulvermenge und Verlagerung des Netzschalters
Juli 1990	Auslösen der Not-Aus-Funktion während des Quellenwechsels an einem Afterloading-Gerät	Versehentliches Betätigen der „Not-Aus“-Taste	gering; Strahlenexposition kleiner als 1 mSv	Die „Not-Aus“-Taste wurde vom Hersteller mit einem Schutzbügel versehen, der eine zufällige Betätigung verhindert

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
Juli 1990	Verlust von zwei bauartzugelassenen Statikeleminatorpistolen Po-210 mit 370 M Bq	Vermutlich Diebstahl	Nicht zu erwarten, solange das Gerät nicht vorsätzlich zerstört und Material inkorporiert wird	
5. 7. 1990	Bei radiometrischer Kontrolle einer Brunnenbestrahlungsanlage Feststellung lokaler Kontamination von Lagermedium und Sondenrohr	Undichtheit einer Strahlenquelle vermutlich durch Spannungsrißkorrosion	Keine Exposition oder Kontamination von Personen und keine Kontamination des Wassers und der Umgebung. Quelle befand sich in dichter Sonde	Sachgemäße Bergung der Quelle und Neukapselung zur Abfallkonditionierung
9. 7. 1990	Kontamination von Bereichen des Betriebsgeländes in einem Wismut-Aufbereitungsbetrieb und des Vorfluters mit schwach radioaktiven Aufbereitungsrückständen (<10 Bq Ra-226/g)	Bruch einer Bergeleitung durch Materialverschleiß	Keine	Umbau des Absetzbeckens veranlaßt sowie Kontrolle der Leitung vor dem Anfahren, die Kontaminationen wurden beseitigt
9. 7. 1990	Verlust von radioaktiven Stoffen aus Lehrmittelsammlung	Vermutlich Diebstahl	Nicht zu erwarten, solange das Am-241-Präparat nicht vorsätzlich zerstört und das Material inkorporiert wird	
25. 7. 1990	Inkorporation von 7 kBq Ce-141	Versehentliche Einspritzung	Teilkörperdosis von ca. 20 mSv am Finger einer Laborantin	Operativ wurde ca. die Hälfte der Aktivität entfernt
August 1990	Fehlen eines Prüfstrahlers für ein Strahlenmeßgerät (ca. 520 kBq Cs-137)	Vermutlich Diebstahl	Wegen der Beschaffenheit und der geringen Aktivität des Strahlers von wenig mehr als der Freigrenze nicht zu erwarten	Nachforschungen blieben erfolglos
1. 8. 1990	Störung an einem Afterloading-Gerät in einem Krankenhaus	Fehler beim Wechsel des radioaktiven Strahlers	Exposition des Personals (2 Personen) ca. 1,5 mSv	Störung wurde behoben; organisatorische Verbesserungen

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
3. 8. 1990	Ausfall der Stromversorgung bei einer kerntechnischen Einrichtung	Ausfall der Lüftung durch Ausfall eines Notstromaggregates bei Arbeiten am Stromnetz durch Übertemperatur-Überwachung am Kühlkreislauf des Notstromaggregates	Keine; keine Erhöhung der Raumluftaktivität nach Lüftungsausfall	Kontaktaufnahme mit dem Hersteller des Aggregates, um einem Wiederholungsfall vorzubeugen
3. 8. 1990	Fehlfunktion eines Türkontakt-Schalters zum Bestrahlungsraum mit Linear-Beschleuniger	Bei der Montage wurde ein neu eingebauter Schalter mit Gips verschmutzt, so daß es zu einer Fehlfunktion kam	Keine; Fehlfunktion wurde bei der täglichen Routinekontrolle entdeckt	
3. 8. 1990	Kontamination des Geländes um den Vorfluter in einem Wismut-Aufbereitungsbetrieb mit schwach radioaktiven Aufbereitungsrückständen (< 10 Bq Ra-226/g)	Bruch der Bergeleitung durch äußerlich nicht erkennbaren Materialverschleiß	Keine	Umbau des Absetzbeckens beschleunigt; die Kontaminationen wurden beseitigt
3. 8. 1990	Austritt von 35 Kubikmeter inaktiven Löschwassers im unterirdischen Teil des Endlagers für radioaktive Abfälle	Platzen einer Feuerlöschleitung nach einer Feuerlöschübung	Keine Strahlenexpositionen und keine Beeinträchtigung der eingelagerten radioaktiven Stoffe	Das ausgetretene Wasser wurde vom Salz gebunden und kam nicht mit radioaktiven Stoffen in Berührung
9. 8. 1990	Störung an einem Afterloading-Gerät in einem Krankenhaus	Schlüsselschalter und Notaus-Motor defekt, Knickstelle an Führungsschlauch	Keine	Strahlenquelle mit Hilfe eines Ferngreifers geborgen; organisatorische Verbesserungen; defekte Teile wurden erneuert
10. 8. 1990	Bei einem Afterloading-Gerät ließen sich nach Stromausfall die Pellets nicht mehr vollständig in den Tresor zurückführen	Leck im pneumatischen System	Exposition bei Patienten und Arzt weniger als 0,05 mSv	

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
14. 8. 1990	Beim Ausbau von Strahlungsquellen aus einer Brunnenbestrahlungsanlage fiel eine Co-60-Quelle außen auf die Kühlrippen des Containers	Fehlerhafte Ankopplung	Exposition eines Mitarbeiters bei Bergung der Quelle mittels Manipulator (0,8 mSv)	Belehrung der Mitarbeiter über Einhaltung der vorgeschriebenen Ausbautechnologie
16. 8. 1990	Geringe Freisetzung von Uran bei Test von Incore-Detektoren	Überhitzung eines Röhrenofens in einer kerntechnischen Einrichtung nach Versagen des Temperaturkonstanthalters	Keine, da Kontamination unter Grenzwert	Die Ausfallsicherheit der Temperaturregelungen wurde bei allen Öfen zusätzlich kontrolliert
27. 8. 1990	AUC-Verstaubung während Reparaturarbeiten am Wirbelschichtofen mit erhöhter Raumluftaktivität (AUC = Ammoniumuranylcarbonat)	Verstopfung der N ₂ -Zufuhrleitung zur AUC-Einspeisung durch AUC	Keine; bei den Reparaturarbeiten wurden Atemschutzmasken getragen	Vor Reparaturarbeiten an druckführenden Anlagenteilen vorherige Druckentlastung
30. 8. 1990	Bei Bohrlochmessung Abriß einer Sondenkombination (Am-241-Be/Cs-137) in 3300 m Tiefe	Verklemmung der Sonde	Keine	Sonde konnte geborgen werden
September 1990	Verlust eines radioaktiven Strahlers in einer Schule	Schüler hat in einem unbemerkten Augenblick Strahler samt Bleiabschirmung an sich genommen	Keine	Schulleitung wurde auf ihre Sorgfaltspflicht hingewiesen, wonach radioaktive Stoffe, sofern sie nicht benutzt werden, unter Verschluss zu halten sind
4. 9. 1990	Unfall eines Lastzuges mit radioaktiven Arzneimitteln auf einer Autobahn	Abkommen von der Fahrbahn aus ungeklärten Gründen	Keine, da die radioaktiven Versandstücke unbeschädigt geborgen wurden	Hinweise auf Verstöße gegen einschlägige Vorschriften liegen nicht vor
5. 9. 1990	Auf dem Gelände eines Braunkohlentagebaus Abriß einer Bohrlochsonde (37 GBq Am-241-Be-Quelle) in 73,6 m Tiefe	Verklemmung der Sonde	Im Hinblick auf die Beschaffenheit des Strahlers und die Lage des Bohrloches nicht zu erwarten	Fangversuche wurden eingestellt und die Verluststelle im Kartenwerk markiert. Bohrloch verschloß sich

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
11. 9. 1990	Während einer Reparatur an einer fernbedienten medizinischen Applikationseinrichtung ließ sich die ausgefahrene Strahlenquelle nicht mehr bewegen	Verklebten des Transportkabels, das angerissen war	Keine filmdosimetrisch nachweisbare Exposition während der Behebung der Störung; Patienten waren nicht betroffen	Der Quellenhalter wurde vom Transportkabel getrennt und die Quelle entfernt, das Transportkabel wurde erneuert
18. 9. 1990	Kontaminationsereignis bei Filterwechsel, Oberflächenkontamination von max. 75 Bq/cm ² Uranstaub auf dem Boden	Filter war verklemmt, dadurch wurde der Wartungssack beim Herausziehen des Filters beschädigt	Inhalation <5% des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr, keine Aktivitätsverschleppung aus dem Gebäude	Organisatorische Verbesserungen
18. 9. 1990	Bei Werkstoffprüfarbeiten mit einem Strahlengerät fiel der Strahler (Ir-192 mit 1,4 TBq) aus dem Ausfahrerschlauch	Geräteschaden infolge unsachgemäßer Handhabung	3 beruflich strahlenexponierte Personen erhielten Strahlendosen weit unterhalb der Grenzwerte (0,2—3,8 mSv)	
21. 9. 1990	Verkehrsunfall eines PKW-Kombi auf einer Autobahn	Fahrfehler	Keine; Versandstücke wurden nicht beschädigt	
4. 10. 1990	Kontamination von 6 m ² Fläche durch ca. 20 l Uranyl-nitratlösung (ca. 420 g U/l, 2% U-235), durch nicht vollständig geschlossene Armaturen in einer kerntechnischen Einrichtung	Überfüllung eines Zwischenlagerbehälters	Keine; Raumluftaktivität nicht erhöht; kein Überschreiten der Abluftgrenzwerte (Tageswerte)	Personalbelehrung zur Vermeidung der Wiederholung, langfristig Steuerung über Füllstandskontrolle
8. 10. 1990	Austritt von I-131-kontaminierten Fäkalien (ca. 400 MBq) aus einem undichten Abflußrohr im Keller einer nuklearmedizinischen Therapieklunik	Beschädigung des Rohrs bei Bauarbeiten im Keller	Keine, da sich Personen zum Zeitpunkt des Austritts nicht im Keller aufhielten	Absperrung des Kellers und Beseitigung der Kontamination durch Abklingen sowie Sperrung der Fäkalien-spüle bis zur erfolgten Abdichtung

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
9. 10. 1990	Abhandenkommen der Justiereinrichtung einer Panzerhaubitze bei einer kanadischen Panzerdivision während eines Manövers. Radioaktiver Stoff: Tritium Aktivität 370 MBq	Vermutlich Entwendung	Gering, da die Einrichtung unbeschädigt blieb und kein Tritium ausgetreten ist	
14. 10. 1990	Justiereinrichtung unbeschädigt wieder aufgefunden			
12. 10. 1990	Überlaufen von flüssigem hochaktivem Abfall (HAW) durch Druckaufbau im Behälter in einer kerntechnischen Einrichtung	Bei Wartungsarbeiten an der Abluftleitung der HAW-Behälter wurde das Abluftventil geschlossen und nach Beendigung der Arbeiten nicht wieder geöffnet	Keine, da keine Aktivität in die Umgebung abgegeben wurde, wie umfangreiche Messungen ergaben	
16. 10. 1990	Abriß einer 111 MBq Cs-137 Bohrlochsonde. Hindernis in ca. 16 m Tiefe bei Arbeiten in einem Braunkohletagebau	Sonde stieß auf ein Hindernis	Im Hinblick auf die Beschaffenheit des Strahlers und die Lage des Bohrloches nicht zu erwarten	Keine Fangversuche möglich, da sich das nicht verrohrte Bohrloch verschloß. Verluststelle wurde im Kartenwerk markiert. Verursacher war nicht zu ermitteln
22. 10. 1990	Verlust von 3 radioaktiven Strahlern in einer Schule Am-241: 333 kBq; Co-60: 3,7 MBq; Sr-90: 111 kBq	vermutlich Diebstahl	vermutlich keine	Schlüsselgewalt für radioaktive Präparate ausschließlich an Strahlenschutzbeauftragten der Schule
3. 11. 1990	Beschädigung eines Versandstückes mit einem Tc-99 m-Generator mit 5,6 GBq beim Transport	Unfall	Keine; es wurde lediglich die Verpackung beschädigt	
7. 11. 1990	Störung an der Bestrahlungsuhr einer Gamma-bestrahlungsanlage	Gerätedefekt	Keine; Abschaltung vor gewählter Bestrahlungszeit	Austausch der defekten Uhr

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
28. 11. 1990	Beschädigung eines radioaktiven Versandstückes mit Natriumchromat auf Flughafengelände	Heruntergefallen von der Palette und Beschädigung durch nachfolgendes Fahrzeug	Keine; Bergung erfolgte mit Schutzkleidung	Kontaminierte Fläche wurde versiegelt und gesperrt; Nuklid hat kurze Halbwertszeit
6. 12. 1990	Störung an After-loading-Gerät in einem Krankenhaus	Bei morgendlicher Funktionskontrolle fielen beim Ausfahren der Quelle Verbindungsschlauch und Testapplikator zu Boden. Der Testapplikator zerbrach (Kunststoff) und der Strahlerhalter löste sich, so daß die Quelle am Boden lag und sich nicht mehr in den Tresor zurückbringen ließ.	Gering: Strahlenbelastung ca. 20 µSv bei dem bergenden Personal	In Zukunft wird eine Vorrichtung verwendet werden, die verhindert, daß Applikator und Führungsschlauch beim Ausfahren der Quelle zu Boden fallen können
10. 12. 1990	Kontaminationsereignis am Oxidationsofen eines Brennelementewerks	Bedienungsfehler des Personals. Die Absperrklappe des Beschickungsbehälters war nicht vollständig geschlossen und verriegelt	Bodenfläche von ca. 14 m ² und Anlagestrukturen wurden kontaminiert. Kontamination des Personals sowie Kontaminationsverschleppung konnte aufgrund von Sofortmaßnahmen vermieden werden	Belehrung der Mitarbeiter. Es wird geprüft, ob technische Maßnahmen gegen Wiederholung möglich sind
12. 12. 1990	Inkorporation bei der Verletzung von 2 Personen und Freisetzung von radioaktiven Stoffen bei einer Explosion im Sprühwäscher des Systems Schrott- und Filtrataufbereitung in einer kerntechnischen Einrichtung	Zu niedriger Füllstand im Wäscher und zu hoher Feststoffgehalt im Wäschersumpf	Wundkontamination bei einer Person; effektive Dosis: 6 mSv	Technische Verbesserungen
14. 12. 1990	Kontamination von 3 Bq/cm ² an Stoßbremsen aus einem Kernkraftwerk	Anlieferung aus dem Ausland; dort höhere Werte für Oberflächenkontamination zulässig	Keine; Kontamination geringfügig über Grenzwert (0,5 Bq/cm ²)	Die Stoßbremsen wurden dekontaminiert

noch Tabelle 13

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1990**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung der radiol. Folgen/Bemerkungen
1	2	3	4	5
19. 12. 1990	Beim vorgesehenen Ausbau einer Brunnenbestrahlungsanlage wurde Versandung der zwei im Brunnen vorhandenen Sonden festgestellt	Rohrbruch der Brunnenförderleitung führte zur Versandung des Brunnens	Keine, da sich die Quellen weiterhin abgeschirmt im Brunnen befinden	Brunnen wurde vom Wassernetz getrennt; Sonde wurde mittels Spülwanne freigespült, um Quellenbergung zu ermöglichen
30. 12. 1990	Fund eines mit dem Warnzeichen für ionisierende Strahlung versehenen Behältnisses (Schulpräparat)	Vorrichtung wurde wahrscheinlich bei Renovierungsarbeiten entwendet	Keine, da durch Messung außerhalb des Schutzbehälters keine Strahlung festgestellt wurde	Wegen der Verstöße gegen Strahlenschutzverordnung wurde Ermahnung ausgesprochen

Tabelle 14

**Mittlere effektive Dosis durch inkorporiertes Caesium 134 und Caesium 137 in μSv
im Jahre 1990 als Folge des Reaktorunfalls in Tschernobyl**

	Voralpen- gebiet	München	Karlsruhe	Homburg/ Saar	Frankfurt	Berlin	Hamburg	Köln	Düssel- dorf	Mainz
Männer	—	7	4	—	<3*	4*	—	3*	2*	4*
Frauen	—	3	2	—	<3*	3*	—	2*	2*	3*
Kinder und Jugendliche	—	—	—	—	<4*	—	—	—	—	—

— = keine Messungen

* = Daten für einzelne Monate geschätzt

Abbildung 1a

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

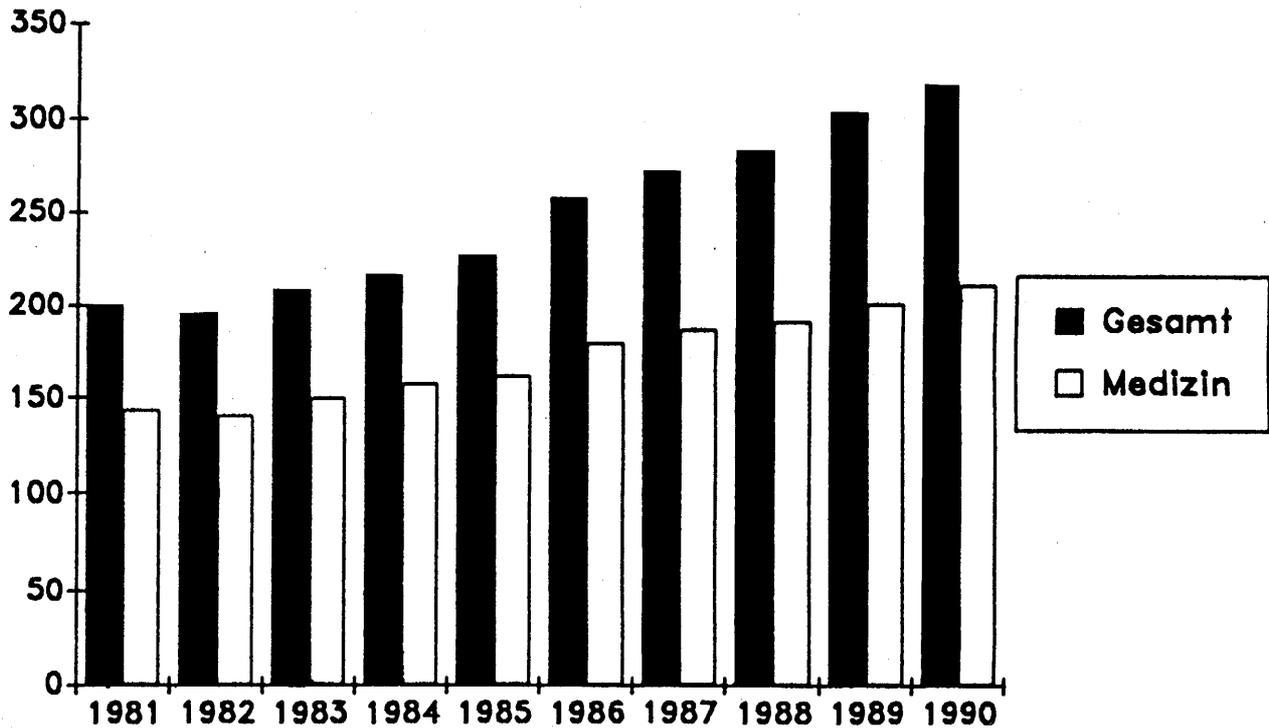


Abbildung 1b

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

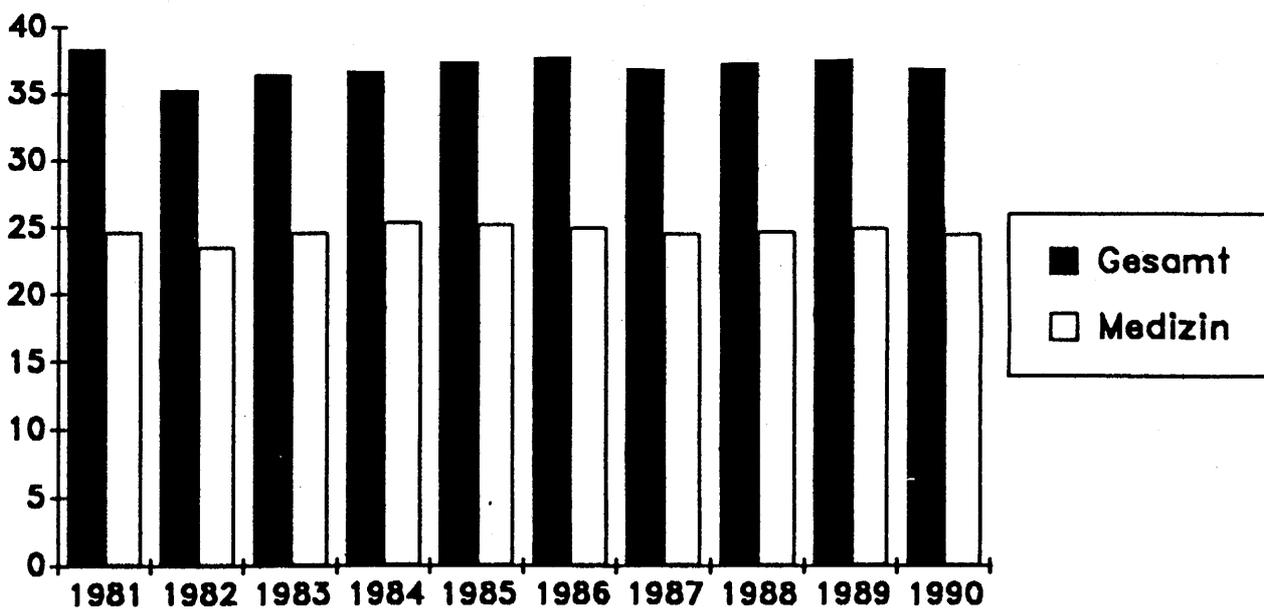


Abbildung 2a

Verteilung der Jahreskollektivdosis auf verschiedene Arbeitsbereiche (alte Bundesländer)

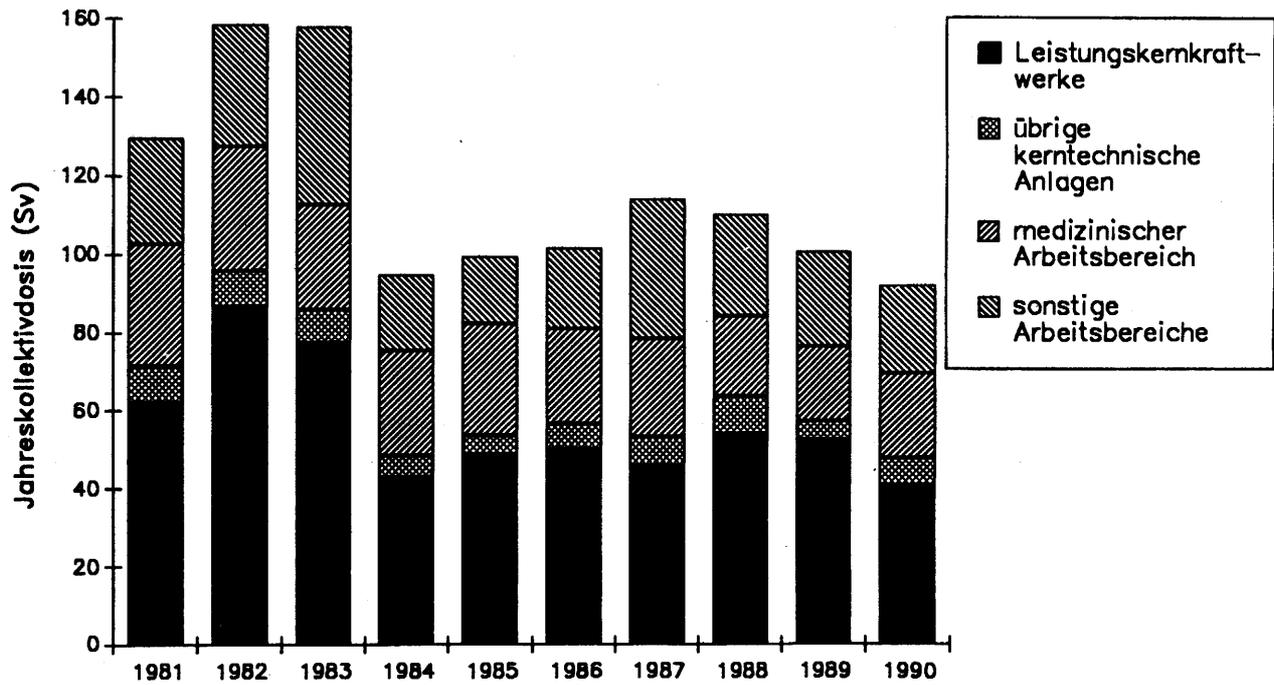
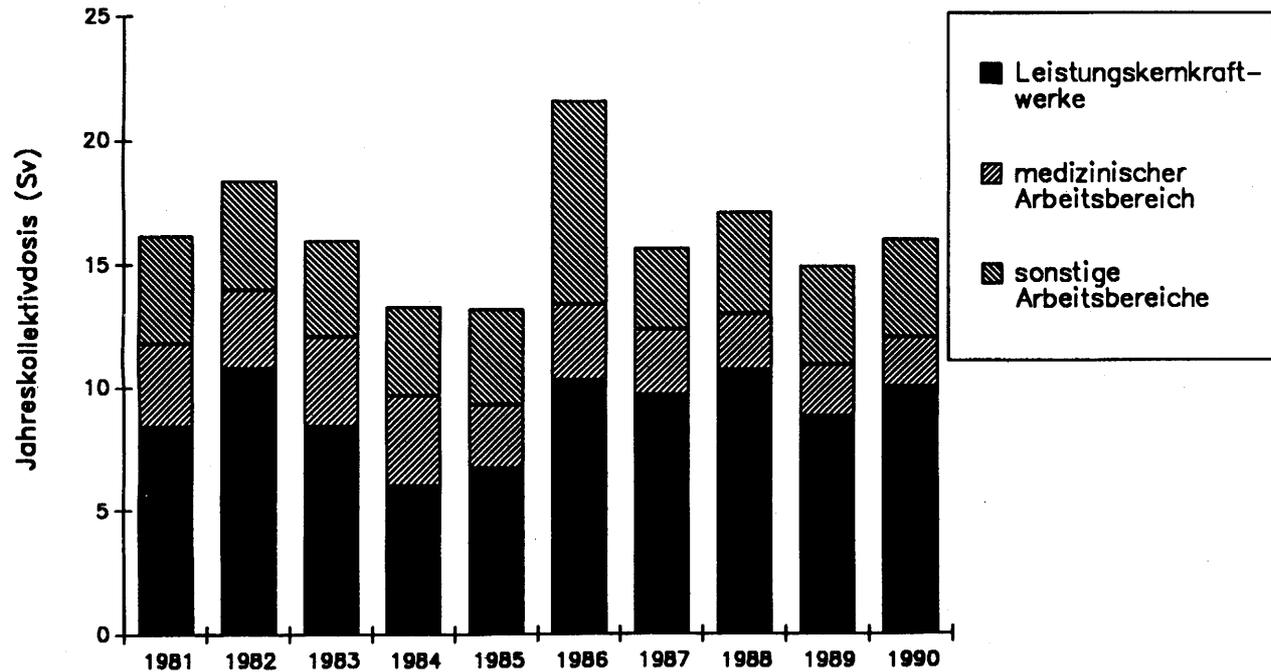


Abbildung 2b

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 Dosiswirkungen 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 $60 \mu^2$ 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 nicht-stochastische Strahlenwirkung

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

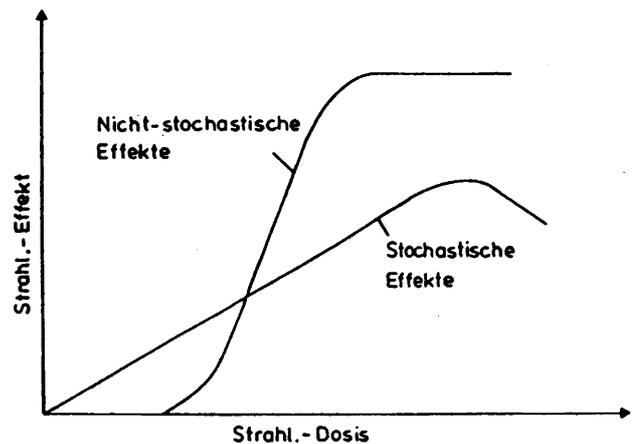
Bei einem zweiten Typ von Strahlenwirkungen, den stochastischen Effekten, wird davon ausgegangen, daß keine Schwellendosis besteht und daß die Wahrscheinlichkeit des Eintretens mit steigender Strahlendosis zunimmt. Auch bei kleinen Strahlendosen können also noch Wirkungen auftreten, wenn auch mit geringerer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

gruppen gegenübergestellt werden. Dann kann erkannt werden, ob und in welchem Ausmaß die Raten an Leukämie und Krebs nach Bestrahlung in der exponierten Gruppe erhöht sind. Auch hier ist auf individueller Basis eine qualitative Unterscheidung hinsichtlich der Frage, ob der Krebs strahlenbedingt ist oder nicht, nicht möglich. Es kann lediglich die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit der eine individuelle Krebserkrankung durch die vorausgegangene Bestrahlung verursacht ist.

Erschwert werden diese Untersuchungen dadurch, daß die Erkrankungen mit einer erheblichen Latenzzeit (5 bis 10 Jahre bei Leukämie und mehrere Jahrzehnte bei Krebs) auftreten können und damit analytisch, z. B. hinsichtlich der Anamnese, schwerer zugänglich werden. Da 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 Lungenepithelien. 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.

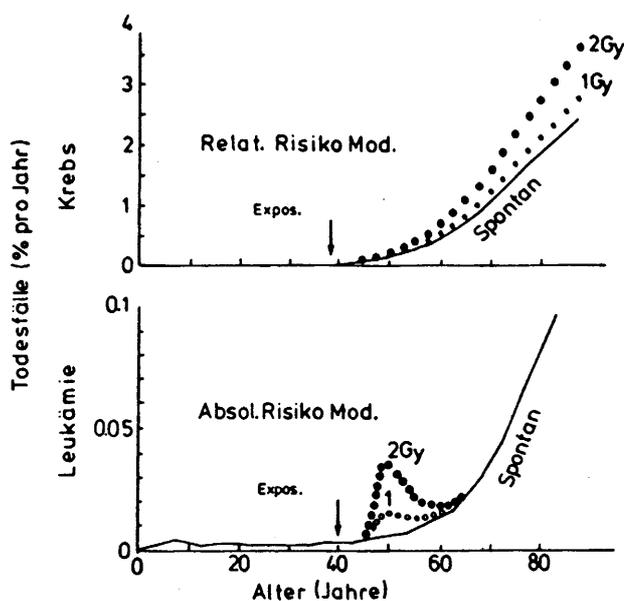
6. Risikoabschätzung

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.

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 Krebs-erhöhung 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.

Abbildung A-2:

Schematische Darstellung der Mortalität durch Krebs und Leukämie.



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 Bevölke-

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

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 mehrere Studien zum Thema „Kindliche Leukämie in der Umgebung Kerntechnischer Anlagen“ durchgeführt. Ergebnisse liegen aber noch nicht vor.¹⁾

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⁾ Absatz wurde gegenüber dem ursprünglichen Text aus dem SSK-Band 14 aktualisiert.

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. $1 \text{ Becquerel (Bq)} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Curie}$
Betastrahlung	Teilchenstrahlung, die aus beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Elektronen besteht
Betasubmersion	Strahlenexposition durch Betastrahlung von radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre
Curie	Alte Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Curie (Ci) liegt vor, wenn 37 Mrd. Atomkerne je Sekunde zerfallen. $1 \text{ Curie (Ci)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Becquerel}$
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
Gammastrahlung	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 Keimdrüsendosis pro Person in einer Bevölkerung, gewichtet für jede Einzelperson mit der Wahrscheinlichkeit der Kindeserwartung nach der Strahlenexposition
Gray	SI-Einheit der Energiedosis. $1 \text{ Gray (Gy)} = 100 \text{ Rad}$
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
Keimdrüsendosis	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 µC/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