

## Unterrichtung durch die Bundesregierung

### Bericht der Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1992

#### Inhalt

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

---

	Seite
<b>Abbildungen</b> .....	13
<b>Tabellen</b> .....	31
<b>Anhang</b>	
<b>A. Strahlendosis und Strahlenwirkung</b> .....	40
1. Strahlendosis und ihre Einheiten .....	40
2. Externe und interne Bestrahlung .....	41
3. Stochastische und deterministische Strahlenwirkung .....	42
4. Genetisch vererbare Defekte .....	42
5. Induktion von Leukämie und Krebs .....	43
6. Risikoabschätzung .....	44
7. Effektive Dosis .....	45
<b>B. Erläuterung der benutzten Fachausdrücke</b> .....	46

## 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 1992 wird hiermit vorgelegt. Er umfaßt die wichtigsten Informationen und Änderungen im Bereich der Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung gegenüber den Vorjahren. Umfassenderes Datenmaterial wird jeweils in den ausführlichen Jahresberichten über „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ wiedergegeben.

### 2. Zusammenfassung

Der Bericht behandelt

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

Die natürliche Strahlenexposition setzt sich zusammen aus der Strahlenexposition von außen durch die kosmische und terrestrische Komponente 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. Insbesondere Radon in Gebäuden und natürlich radioaktive Stoffe aus Bergbau- und Verarbeitungsprozessen können zur Erhöhung der mittleren Strahlenexposition beitragen. Die bisher durchgeführten Messungen haben ergeben, daß in nicht mehr als 2 % der Wohnungen in Deutschland die Radonkonzentration in der Raumluft über einem Wert von 250 Bq/m<sup>3</sup> liegt; diesen Wert sieht die Strahlenschutzkommission als Obergrenze des Normalbereichs an. Darüberliegende Werte treten überwiegend in Gebäuden in Bergbaugebieten und in Gebieten mit geogen erhöhten Radon-Vorkommen auf.

Die mittlere effektive Jahresdosis der durch Radonfolgeprodukte beruflich exponierten Überwachten betrug im Berichtsjahr 1992 5,4 mSv und lag damit weit unter dem gesetzlich festgelegten Dosisgrenzwert von 50 mSv pro Jahr.

Für das Flugpersonal, das ausschließlich auf den wichtigsten nördlichen Flugrouten zwischen Europa, USA und Asien unterwegs ist, läßt sich eine mittlere jährliche Strahlenexposition von etwa 5 mSv abschätzen.

Die Beiträge zur zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung resultieren aus dem Betrieb kerntechnischer Anlagen, aus der Anwendung ionisierender Strahlung und radioaktiver Stoffe in Medizin, Forschung, Technik und Haushalt sowie aus dem Fall-out von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre und dem Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl im Jahr 1986.

Die Strahlenexposition der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992 ist in der Abbildung 1 nach den verschiedenen Quellen aufgeschlüsselt. Die mittlere effektive Jahresdosis der Bevölkerung beträgt ca. 4 mSv, wobei die natürlichen und medizinischen Strahlenquellen mit einer effektiven Dosis im Millisievert-Bereich die Hauptbeiträge liefern, während sich Dosisbeiträge der weiteren Strahlenquellen im Mikrosievert-Bereich bewegen. Eine statistisch gesicherte Veränderung der Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland ist aus den Beiträgen gegenüber den Vorjahren bei Berücksichtigung der Ungenauigkeiten, mit denen die Hauptbeiträge zu dieser Dosis behaftet sind, nicht festzustellen.

Einzelergebnisse für das gesamte Bundesgebiet im Jahr 1992 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die effektive Dosis aus natürlichen Strahlenquellen beträgt im Mittel ca. 2,4 mSv pro Jahr. Das radioaktive Edelgas Radon und seine kurzlebigen Folgeprodukte liefern über Inhalation den Hauptbeitrag zur Strahlenexposition natürlichen Ursprungs mit einer effektiven Dosis von ca. 1,4 mSv mit einer erheblichen Variationsbreite (Spitzenwerte der effektiven Dosis bei 10 mSv).
- Die zivilisatorische Strahlenexposition ist mit einem Beitrag von ca. 1,55 mSv im Jahr etwa 40 % niedriger als die natürliche Strahlenexposition. Der größte Beitrag wird durch die Anwendung ionisierender Strahlen und radioaktiver Stoffe in der Medizin, vor allem durch die Röntgendiagnostik, verursacht. Die effektive Dosis beträgt etwa 1,5 mSv und ist wegen der unvermeidbaren Unsicherheiten der Erhebungsdaten mit einer Schwankungsbreite von ca. 50 % behaftet. In der konventionellen Röntgendiagnostik ist durch technischen Fortschritt und durch Qualitätssicherung die Dosis pro Untersuchung deutlich zurückgegangen. Andererseits treten moderne Verfahren immer mehr in den Vordergrund, die eine deutlich umfangreichere diagnostische Information liefern und zum

Teil sogar Therapiemethoden darstellen, allerdings auch dosisintensiver sind.

- Der Beitrag der Strahlenexposition durch Kernkraftwerke und sonstige kerntechnische Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung blieb auch im Jahr 1992 deutlich unter 1 % der zivilisatorischen Strahlenexposition. Die Jahresemissionen radioaktiver Stoffe lagen bei allen kerntechnischen Anlagen unterhalb, bei den meisten weit unterhalb der genehmigten Werte.
- Die Anzahl der beruflich strahlenexponierten Personen hat sich kaum verändert. Der Anteil der beruflichen Strahlenexposition am Beitrag der

zivilisatorischen Strahlenexposition bleibt weiterhin unter einem Prozent.

- Die durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl veränderte mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung ging von 5 % im Jahr 1986 auf unter 1 % der natürlichen Strahlenexposition (2,4 mSv) zurück.
- Der Beitrag der Strahlenexposition durch die in den vergangenen Jahrzehnten in der Atmosphäre durchgeführten Kernwaffenversuche zur effektiven Dosis ist weiterhin rückläufig. Im Jahr 1992 wurden keine Kernwaffenversuche in der Atmosphäre durchgeführt.

## II. Natürliche Strahlenexposition

Durch natürliche Strahlenquellen ist der Mensch einer mittleren effektiven Dosis von 2,4 mSv pro Jahr ausgesetzt. Je nach Höhenlage des Aufenthaltsortes und der geologischen Beschaffenheit des Untergrunds unterliegt die natürliche Strahlenexposition starken Schwankungen.

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

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

Die kosmische Komponente besteht im wesentlichen aus direkter Gammastrahlung. In Meereshöhe errechnet sich die aus der Gammastrahlung resultierende effektive Dosis zu 0,24 mSv pro Jahr. Die durch Neutronen (0,03 mSv pro Jahr) und kosmische Radionuklide (0,01 mSv pro Jahr) verursachten Beiträge zur kosmischen Strahlenexposition sind von untergeordneter Bedeutung. Im Weltdurchschnitt erhält man unter Berücksichtigung der höhenbezogenen Bevölkerungsdichte (UNSCEAR 1993) eine jährliche effektive Dosis von 0,38 mSv (direkt ionisierende Komponente 0,3 mSv; Neutronenkomponente 0,08 mSv).

Die terrestrische Komponente der externen Strahlenexposition wird im wesentlichen durch die Gammastrahlung des Kalium-40 sowie durch die Strahlung der Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232 verursacht. Der Gehalt an Kalium-40 im Boden schwankt zwischen 40 und 1 000 Bq pro Kilogramm Trockenmasse (TM). Für die Zerfallsreihe des Uran-238 ist vor allem der Gehalt an Radium-226 im Boden von Bedeutung; er schwankt in Deutschland zwischen 10 und 200 Bq je Kilogramm (TM). Der Gehalt an Thorium-232 aus der Thorium-Reihe liegt zwischen 8 und 80 Bq pro Kilogramm (TM). Neuere Berechnungen für das Jahr 1992 ergeben für die Summe der mittleren effektiven Dosis, verursacht durch terrestrische Strahlung von außen, den für Deutschland repräsentativen Wert von 0,41 mSv pro

Jahr, wobei die effektive Dosis durch Aufenthalt im Freien 0,07 mSv und in Gebäuden 0,34 mSv beträgt. Dabei nimmt man eine Aufenthaltsdauer von 5 Stunden pro Tag im Freien und 19 Stunden in Gebäuden an. Bei der Berechnung der effektiven Dosis geht man von einer mittleren Ortsdosisleistung im Freien von 60 nSv pro Stunde (Variationsbreite 12—420 nSv pro Stunde) und in Gebäuden von 80 nSv pro Stunde (Variationsbreite 17—460 nSv pro Stunde) aus. In Gebieten Sachsens und Thüringens wurden Ortsdosisleistungen von 80—230 nSv pro Stunde über landwirtschaftlich genutzten Flächen gemessen, während über Granitmassiven mit einer erhöhten spezifischen Aktivität der Radioisotope von Radium, Thorium und Kalium bis zu 380 nSv pro Stunde ermittelt wurden. Ein Beispiel für die Verteilung der Ortsdosisleistung zeigt Abbildung 2.

Die interne Strahlenexposition des Menschen aus natürlichen Quellen beträgt im Mittel 1,7 mSv pro Jahr. Allein auf das radioaktive Edelgas Radon und seine Zerfallsprodukte entfallen ca. 1,4 mSv pro Jahr (effektive Dosis durch Aufenthalt im Freien 0,2 mSv; effektive Dosis durch Aufenthalt in Gebäuden 1,15 mSv). Den Hauptanteil liefern die kurzlebigen Folgeprodukte des Radon-222 (Halbwertszeit 3,8 Tage). Das Radon-222 ist ein Tochterprodukt des Radium-226 und gelangt durch Diffusion aus dem Erdboden in die bodennahe Luft. Radon und seine Zerfallsprodukte werden mit der Atemluft aufgenommen. Während das Radon selbst zum größten Teil wieder ausgeatmet wird, scheiden sich seine Zerfallsprodukte vorwiegend in verschiedenen Bereichen des Atemtraktes ab. Die beim radioaktiven Zerfall auftretende, biologisch besonders wirksame Alphastrahlung führt zu einer Strahlenexposition des Atemtraktes. Etwa 50 % der gesamten natürlichen Strahlenexposition entfallen auf die Exposition des Atemtraktes durch die kurzlebigen Zerfallsprodukte des Radon. Andere Organe werden durch Radon und Zerfallsprodukte nicht nennenswert belastet.

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

### III. Zivilisatorisch veränderte natürliche Strahlenexposition

#### 1. Radioaktive Stoffe in Baumaterialien und Industrieprodukten

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

Der Gehalt an Radium-226, Thorium-232 und Kalium-40 in Natursteinen, Baustoffen und Industrieprodukten geht aus Tabelle 1 hervor. Die spezifische Aktivität natürlicher Radionuklide schwankt innerhalb der Stoffarten in einem großen Bereich. Unter den Baustoffen natürlichen Ursprungs weisen saure Magmageschiebe, insbesondere Granite, vergleichsweise hohe Gehalte an natürlichen Radionukliden auf.

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

#### 2. Radon in Gebäuden

Die Inhalation von Radon-222 und seinen Zerfallsprodukten ist die dominierende Komponente natürlicher Strahlenexposition der Bevölkerung. Ausgehend von Erhebungsmessungen in den alten Bundesländern empfiehlt die Strahlenschutzkommission, bei Überschreitungen des Normalbereiches der Radonkonzentration im Wohn- und Aufenthaltsbereich von Gebäuden (Langzeitmittelwert über 250 Bq/m<sup>3</sup>) zu prüfen, ob Sanierungsmaßnahmen mit vertretbarem Aufwand durchführbar sind. Dabei sind Dringlichkeit und Umfang dieser Maßnahmen abhängig von der Höhe der Radonkonzentration.

Zur Gewährleistung der Strahlenschutzvorsorge setzte das Bundesamt für Strahlenschutz 1992 die 1990 begonnenen Meßprogramme zur Erfassung der Radonkonzentration in Gebäuden fort:

Im Rahmen des Projektes „Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altla-

sten“ wurden bis Ende 1992 in 250 Kommunen und ca. 30 000 Gebäuden der neuen Bundesländer Kurzzeitmessungen (Screeningmessungen) der Aktivitätskonzentration von Radon in Gebäuden durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten zu Übersichtszwecken in Gebieten, die möglicherweise durch Bergbau und dessen Folgeindustrien beeinflusst sind sowie in geologisch mit den Bergbaugebieten vergleichbaren Regionen und sonstigen Gebieten, deren Untersuchung zur Bewertung der geogenen Beeinflussung der Radonkonzentration in Gebäuden erforderlich ist. Es wurden Aktivkohledosimeter 24 Stunden lang bei geschlossenen Fenstern und Türen exponiert. Diese zu Übersichtszwecken erhobenen Meßwerte sind somit nicht mit dem Empfehlungswert der Strahlenschutzkommission von 250 Bq/m<sup>3</sup> in Raumluft vergleichbar, da dieser Wert auf Langzeitmessungen in normal belüfteten Räumen beruht.

- In 65 % der Wohnungen im Erdgeschoß der bergbaulich geprägten Gebiete betrug die mittlere Radonkonzentration weniger als 250 Bq/m<sup>3</sup> und in etwa 10 % der Wohnungen mehr als 1 000 Bq/m<sup>3</sup>. Die höchsten Radonkonzentrationen wurden in Gebäuden gemessen, die altbergbaulich, insbesondere durch oberflächennahe bergmännische Auffahrungen beeinflusst sind. In Kellern dieser Gebäude traten im Tagesverlauf kurzzeitige Spitzenwerte bis zu einigen hunderttausend Bq/m<sup>3</sup> auf. Auch in Wohnungen wurden kurzzeitig über 100 000 Bq/m<sup>3</sup> gemessen.
- In Granitgebieten des Erz- und Fichtelgebirges wurden die höchsten auf große Flächen bezogenen Radonwerte ermittelt, ohne daß ähnlich hohe Spitzenwerte wie in den Altbergbaugebieten auftraten. Rund ein Drittel der Meßwerte lagen dort unter 250 Bq/m<sup>3</sup> und ca. 25 % über 1 000 Bq/m<sup>3</sup>.
- In den bergbaufreien Vergleichsgebieten in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt sowie in Gebieten in Mecklenburg-Vorpommern lagen 81–85 % der Meßwerte unter 250 Bq/m<sup>3</sup>.

Auf Anforderung von Bürgern, Firmen, Schulen und sonstigen Einrichtungen wurden in den alten und neuen Bundesländern 58 bzw. 420 Messungen in Gebäuden durchgeführt, deren Dauer über die von Screeningmessungen hinausgehen. Die in den neuen Bundesländern durchgeführten Messungen dienten vorwiegend zur Überprüfung solcher Situationen, in denen aufgrund der Screeningmessungen eine Überschreitung des Normalbereiches der Radonkonzentration in Gebäuden zu befürchten ist.

Zur Ergänzung der Mitte der 80er Jahre in den alten Bundesländern durchgeführten Radonmessungen sind in den neuen Bundesländern ca. 1 700 Wohnungen nach Zufallsprinzip ausgewählt worden. Bis zum Ende des Berichtszeitraumes wurden 925 Messungen

ausgewertet, wobei ein regionaler Durchschnittswert von 49 Bq/m<sup>3</sup> ermittelt wurde.

In der alten Bergbaustadt Schneeberg, in der eine erhebliche Zahl von Gebäuden sehr hohe Radonkonzentrationen aufweist, ist 1990 vom BMU ein Projekt initiiert worden, von dem Beispielwirkung auf andere Orte erwartet wird. Im Vordergrund dieses Projektes steht das modellhafte Erproben wirksamer und kostengünstiger Methoden zur Senkung der Radonkonzentration. Im Jahr 1992 wurden im Rahmen des Projektes drei Häuser komplett saniert und mit der Sanierung weiterer Gebäude begonnen. In den sanierten Gebäuden wurden die Radonkonzentrationen von ursprünglich mehreren tausend Bq/m<sup>3</sup> im Wohnbereich durch kombinierte baukonstruktive und lufttechnische Verfahren auf Werte im Normalbereich gesenkt.

### 3. Radioaktive Stoffe in der Umwelt als Folge des Bergbaus

#### *Umgebungsüberwachung an den Sanierungsbetrieben der Wismut GmbH*

Die Sanierungsbetriebe der Wismut GmbH ermittelten unter Kontrolle der zuständigen Landesbehörden im Berichtsjahr 1992 die Ableitung radioaktiver Stoffe und die durch die bergbaulichen Tätigkeiten insgesamt verursachte radioaktive Kontamination der Betriebsflächen und des Umlandes.

Die für das Jahr 1992 ermittelten Werte für die Abgabe radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus den Betrieben der Wismut GmbH zeigen, daß die von den zuständigen Behörden festgelegten Genehmigungswerte der jährlichen Emissionen in keinem Fall überschritten wurden (Abbildungen 3 und 4). Wie im Vorjahr liegen die Jahresabgaben deutlich unter den Genehmigungswerten. Die aus den übrigen bergbaulichen Anlagen (vor allem industrielle Absetzanlagen, Halden) freigesetzte Radonaktivität wird aus den Ra-226-Konzentrationen der deponierten Materialien unter Zugrundelegung der unter konservativen Annahmen abgeleiteten normierten Freisetzungsrate (1 Bq Rn-222/m<sup>2</sup>·sec pro Bq Ra-226/g Material) mit einer theoretisch möglichen Radonfreisetzung von  $2 \cdot 10^{15}$  Bq pro Jahr abgeschätzt.

Kontrollmessungen in der Umgebung der Betriebe haben gezeigt, daß durch Ableitung von Uran und Radium-226 mit den Abwässern in den großen Vorflutern der Bergbaugebiete (Elbe, Mulde, Weiße Elster und Pleiße) keine oder nur geringfügige Veränderungen der natürlichen Aktivitätskonzentration dieser Radionuklide verursacht werden. In den unmittelbar durch Ableitungen betroffenen kleineren Zuflüssen zu den o. g. Gewässern tritt aufgrund der geringeren Abflüßmengen eine im Vergleich zum natürlichen Pegel deutlich erhöhte Aktivitätskonzentration dieser Radionuklide auf. Jedoch resultiert daraus keine Gefährdung, da diese Gewässer nicht genutzt werden. Unter der Annahme der Nutzung der großen Vorfluter als Trinkwasser ergibt sich eine theoretisch ermittelte effektive Jahresdosis von 0,01 bis 0,04 mSv.

Die im Rahmen der Umgebungsüberwachung in den Bergbaugebieten ermittelte Aktivitätskonzentration von Radon-222 in der bodennahen Atemluft übersteigt häufig den für große Gebiete Mittel- und Norddeutschlands charakteristischen Wertebereich von 8—23 Bq/m<sup>3</sup>. Auf Betriebsflächen und in der unmittelbaren Nähe von Abwetterschächten, industriellen Absetzanlagen und einigen großflächigen Halden wurden insbesondere bei ungünstigen atmosphärischen Bedingungen (z. B. Inversion in Tallagen) Spitzenwerte bis zu 500 Bq/m<sup>3</sup> Radon-222 festgestellt. Wie durch Messungen und Modellrechnungen nachgewiesen wurde, liegen in geringer Entfernung von diesen Objekten die Werte für die Radonkonzentration bereits wieder in dem für das Gebiet typischen Schwankungsbereich von 25—100 Bq/m<sup>3</sup>. Ähnliche Werte wurden auch in bergbaufreien Gebieten im Süden der neuen Bundesländer festgestellt, die im Hinblick auf die geologischen Verhältnisse mit den Bergbaugebieten vergleichbar sind. Aus den von der Wismut GmbH durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung der radioaktiven Kontamination von Anlagen (z. B. Halden usw.) und Betriebsflächen, die nach methodischen Vorgaben des Bundesamtes für Strahlenschutz durchgeführt wurden, ergibt sich, daß bei den noch in Besitz der Wismut GmbH befindlichen Betrieben und Anlagen radioaktive Kontaminationen überwiegend auf Betriebsgelände sowie Objekte beschränkt sind.

#### *Altlastenkataster*

Gemäß Einigungsvertrag vom 31. August 1990 wurde der § 11 des Strahlenschutzvorsorgegesetzes durch den Absatz 9 ergänzt. Danach obliegt dem Bund im Bereich der neuen Bundesländer die großräumige Ermittlung der aus bergbaulicher Tätigkeit in Gegenwart natürlicher radioaktiver Stoffe stammenden Umweltradioaktivität. Das für diese Aufgabe zuständige Bundesamt für Strahlenschutz führt hierzu seit 1991 das Projekt „Radiologische Erfassung, Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten (Altlastenkataster)“ durch.

In einer ersten Projektphase wurden 1991/92 durch Auswertung vorhandener Unterlagen ca. 8 000 Objekte (ca. 6 500 Halden, Standorte ehemaliger Aufbereitungsanlagen, industrielle Absetzanlagen und Ersatzverladestellen) identifiziert, ihre Daten zur Lage, Größe und Radioaktivität — soweit verfügbar — gesichert, aufbereitet und in einer Bundesdatenbank zur bergbaubedingten Umweltradioaktivität gespeichert.

Zur Überprüfung der Daten werden in einer zweiten Projektphase (Verifikation) durch Begehung und Inspektion der erfaßten Objekte für die Bewertung der radiologischen Relevanz erforderliche Informationen kontrolliert, ggf. korrigiert bzw. ergänzt. Im Rahmen dieser Prüfungen werden auch für radiologische Erstbewertungen Screening-Messungen (Gamma-Dosisleistungsmessungen) durchgeführt. Unter Anwendung der von der Strahlenschutzkommission herausgegebenen Grundsätze und Richtwerte, die zur Beurteilung radioaktiver Kontaminationen infolge des

Uranerzbergbaus herangezogen werden können, wurden radiologische Bewertungskriterien abgeleitet, um die Gruppe der im Rahmen der Bundesaufgabe intensiver zu untersuchenden Objekte und Flächen zu bestimmen. Bei Anwendung dieser Kriterien auf die

Objekte und Flächen, für die die Verifikation bereits abgeschlossen wurde, ergibt sich, daß nur ein kleiner Teil der erfaßten Objekte weiter untersucht werden muß und die weiter zu untersuchende Fläche insgesamt auch deutlich kleiner als 250 km<sup>2</sup> sein wird.

## IV. Zivilisatorische Strahlenexposition

### 1. Kerntechnische Anlagen

#### 1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse für kerntechnische Anlagen

Aus den für das Jahr 1992 ermittelten Werten für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen geht hervor, daß die von den zuständigen Behörden festgelegten Höchstwerte für die jährlichen Emissionen in allen Fällen eingehalten wurden. Die tatsächlichen Jahresableitungen liegen im allgemeinen deutlich unter den Genehmigungswerten, wie beispielsweise für Kernkraftwerke der Vergleich zwischen den Werten der Abbildung 5 und üblichen Genehmigungswerten von ca. 10<sup>15</sup> Bq für Edelgase, ca. 3 · 10<sup>10</sup> Bq für Aerosole und ca. 10<sup>10</sup> Bq für Iod-131 zeigt. Die Kernkraftwerke in den neuen Bundesländern waren im Laufe des Jahres 1990 endgültig abgeschaltet worden; seit 1991 werden bei der Überwachung der Emissionen und Immissionen kerntechnischer Anlagen die in den alten Ländern geltenden rechtlichen Regelungen auch in den neuen Ländern angewandt.

Die für 1992 aus den Jahresableitungen nach der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung“ für eine Referenzperson berechneten Werte der Strahlenexposition haben die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Dosisgrenzwerte unterschritten und betragen in der Regel bei der effektiven Dosis und bei den einzelnen Organosen weniger als 10 % des jeweiligen Dosisgrenzwertes. Damit sind die oberen Werte der Strahlenexposition durch Ableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen in den meisten Fällen deutlich kleiner als die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland.

Der Beitrag der kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland sowie im angrenzenden Ausland zur mittleren effektiven Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland lag auch 1992 deutlich unter 10 µSv pro Jahr (Abb. 1).

#### 1.2 Jahresableitungen radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen

Die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen werden nach der „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen“ von den Betreibern

der einzelnen Anlagen ermittelt und an die zuständigen Aufsichtsbehörden berichtet. Einzelheiten über Umfang der Messungen, Meßverfahren, Probenahme, Instrumentierung und Dokumentation der Meßergebnisse sind in Regeln des Kerntechnischen Ausschusses festgelegt. Die von den Betreibern der Anlagen vorzunehmenden Messungen werden durch Kontrollmessungen behördlich beauftragter Sachverständiger entsprechend der Richtlinie über die „Kontrolle der Eigenüberwachung radioaktiver Emissionen aus Kernkraftwerken“ überprüft.

Die für 1992 ermittelten Jahresableitungen radioaktiver Stoffe in Abluft und Abwasser von Kernkraftwerken sind in den Abbildungen 5 und 6 angegeben und nach Nuklidgruppen aufgeschlüsselt. Sie liegen in der Größenordnung der Ableitungen der Vorjahre und unterschreiten im allgemeinen deutlich die entsprechenden Genehmigungswerte. In Abbildung 7a sind die Daten über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf und Geesthacht für das Jahr 1992 zusammengefaßt. Die Ableitungen radioaktiver Stoffe aus den übrigen Forschungsreaktoren betragen im Mittel nur einige Prozent der Ableitungen von Kernkraftwerken. In Abbildung 7b sind die entsprechenden Abwasserdaten im Jahr 1992 zusammengestellt. Abbildung 8 enthält Angaben über die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Abluft und Abwasser aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben.

Im benachbarten Ausland waren Ende 1992 in Grenznähe, d. h. bis zu einer Entfernung von 30 km zur deutschen Grenze, die in Tabelle 2 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 Jahresableitungen der schweizerischen Anlagen werden in den jährlichen Berichten der Eidgenössischen Kommission zur Überwachung der Radioaktivität veröffentlicht.

#### 1.3 Berechnete obere Werte der Strahlenexposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen

Aus den Ergebnissen der Emissionsüberwachung wird die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung der kerntechnischen Anlagen für die in der Strahlenschutzverordnung definierte Referenzperson nach dem Verfahren ermittelt, das in der

„Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen“ festgelegt ist.

Die in den Abbildungen 9 bis 12 angegebenen Expositionswerte stellen obere Werte dar, die gemäß § 45 Abs. 2 StrlSchV für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen ermittelt wurden. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind die Stellen in der Umgebung einer Anlage, bei denen aufgrund der Verteilung der abgeleiteten radioaktiven Stoffe in der Umgebung durch Aufenthalt oder durch Verzehr dort erzeugter Lebensmittel die höchste Strahlenexposition der Referenzperson zu erwarten ist. Bei der Berechnung dieser Werte wurden die in Anlage XI StrlSchV genannten Expositionspfade und die Lebensgewohnheiten der Referenzperson, welche ungünstige Ernährungsgewohnheiten und Aufenthaltszeiten beinhalten, berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Berechnung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Jahr 1992 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft enthält Abbildung 9. Angegeben ist die effektive Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die Schilddrüsendosis für Kleinkinder über sämtliche relevanten Expositionspfade: Gammastrahlung aus der Abluffahne (Gammassubmersion), Gammastrahlung am Boden abgelagerter radioaktiver Stoffe, Inhalation und Ingestion. Abbildung 9 zeigt als größten Wert der effektiven Dosis für Erwachsene 12  $\mu\text{Sv}$  beim Kernkraftwerk Würzassen; dies sind 4 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Für Kleinkinder ergeben sich für die effektive Dosis 20  $\mu\text{Sv}$  (entsprechend rund 7 % des Dosisgrenzwertes), für die Schilddrüsendosis 24  $\mu\text{Sv}$  (rund 3 % des Dosisgrenzwertes).

In Abbildung 10 sind die aus den Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Abwasser aus Kernkraftwerken resultierenden oberen Werte der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder zusammengestellt. Hierbei wurden ebenfalls ungünstige Verzehr- und Lebensgewohnheiten angenommen, insbesondere für Erwachsene ein hoher Konsum an Flußfisch, der in der Kühlwasserfahne gefangen wird, und für beide Personengruppen der Aufenthalt von 1 000 Stunden am Flußufer oder auf Wiesen in Flußnähe. Der größte Wert der effektiven Dosis beträgt 0,6  $\mu\text{Sv}$  bei dem Kernkraftwerk Emsland. Die relativ hohen Werte bei einigen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren resultieren aus unvermeidbaren Tritiumemissionen in Vorfluter mit geringen Abflüssen. Unterschiede zum Vorjahr sind durch Änderungen in den Emissionen und in den Vorfluterabflüssen bedingt.

Entsprechend der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung wurde die Strahlenexposition am Unterlauf der Flüsse näher betrachtet, wobei jeweils sämtliche Emittenten berücksichtigt wurden. Die höchste effektive Dosis wurde mit etwa 2  $\mu\text{Sv}$  für Erwachsene und Kleinkinder im Mündungsgebiet des Neckar ermittelt; am Unterlauf der Weser wurden für Erwachsene 0,4  $\mu\text{Sv}$  und für Kleinkinder 0,6  $\mu\text{Sv}$  berechnet, an Rhein, Donau und Main liegen die effektiven Dosen bei

0,2  $\mu\text{Sv}$ . Zu den höheren Werten trägt vor allem die äußere Bestrahlung auf Überschwemmungsgebieten bei, die im wesentlichen durch Ablagerungen in früheren Jahren bedingt ist.

Die in Abbildung 11 angegebenen Werte für die entsprechenden Strahlenexpositionen durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren stammen aus den Jahresberichten und aus zusätzlichen Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf und Geesthacht. Die Abbildung weist für die effektive Dosis im Jahr 1992 als höchsten Wert 1,1  $\mu\text{Sv}$  (ca. 0,4 % des Grenzwertes) für Erwachsene und 1,9  $\mu\text{Sv}$  (ca. 0,6 % des Grenzwertes) für Kleinkinder beim Forschungszentrum Jülich auf. Der höchste Wert der Schilddrüsendosis für Kleinkinder ergibt sich mit 4,9  $\mu\text{Sv}$  (ca. 0,5 % des Grenzwertes) ebenfalls beim Forschungszentrum Jülich.

Für die Strahlenexposition über das Abwasser aus Forschungszentren ergibt die Abschätzung aufgrund von Meßwerten, die bei radioökologischen Untersuchungen gewonnen wurden, einen oberen Wert von 20  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr.

Für die kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe in Hanau, Karlstein, Lingen und Gronau sind in Abbildung 12 die für die ungünstigste Einwirkungsstelle berechneten oberen Werte der effektiven Dosis für Erwachsene und Kleinkinder sowie die oberen Werte der Lungendosis für Kleinkinder durch die Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft angegeben. Der höchste Wert der effektiven Dosis beträgt 2  $\mu\text{Sv}$  für Erwachsene (ca. 0,7 % des Grenzwertes), der höchste Wert der Lungendosis 6  $\mu\text{Sv}$  für Kleinkinder (ca. 0,7 % des Grenzwertes).

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

Die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und mit dem Abwasser aus dem Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist in Abbildung 13 aufgeführt. Der durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft ermittelte obere Wert der effektiven Dosis für Erwachsene betrug 1992 3,4  $\mu\text{Sv}$ , für Kleinkinder 5,8  $\mu\text{Sv}$ ; dies sind ca. 1 % bzw. 2 % des Grenzwertes nach der Strahlenschutzverordnung. Die Lungendosis errechnete sich zu 33  $\mu\text{Sv}$  für Erwachsene und 65  $\mu\text{Sv}$  für Kleinkinder (ca. 4 % bzw. 7 % des Grenzwertes). Aus den Ableitungen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser wurden 1992 obere Werte der effektiven Dosis unterhalb von 0,1  $\mu\text{Sv}$  für Erwachsene und Kleinkinder berechnet.

Bei den Kernbrennstoff-Zwischenlagern Ahaus und Gorleben sowie bei Faßlagern wie z. B. Gorleben, Mitterteich oder Faßlagern innerhalb kerntechnischer Anlagen treten im Normalbetrieb keine nennenswerten Emissionen radioaktiver Stoffe auf; daher ist die



hieraus resultierende Strahlenexposition der Bevölkerung vernachlässigbar gering. Meßbar ist im allgemeinen nur die Gammadosisleistung in unmittelbarer Nähe dieser Anlagen. Bei Zwischenlagern wie z. B. Abklingbecken für Brennelemente oder Anlagen zur Abfallkonditionierung, die sich innerhalb von Kernkraftwerken, Kernforschungszentren und sonstigen kerntechnischen Betrieben befinden und in deren Fortluftführung bzw. Abluftplan und ggf. Abwasserbehandlung einbezogen sind, werden die Emissionen in den bilanzierten Ableitungen des jeweiligen Standortes erfaßt und bei der Ermittlung der Strahlenexposition der Bevölkerung berücksichtigt.

Der Betrieb kerntechnischer Anlagen in Nachbarländern (Tabelle 2) führte 1992 unter Anwendung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung auf Bundesgebiet zu oberen Werten der effektiven Dosis im Mikrosievert-Bereich. Für die Schilddrüsendosis eines Kleinkindes über sämtliche relevanten Expositionspfade errechnet sich ein oberer Wert von 30  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr; den größten Beitrag zur Schilddrüsendosis 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 1992 im Mittel ca. 1,5 mSv (effektive Dosis). Der größte Anteil an der zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung resultiert aus der medizinischen Röntgendiagnostik. Da sich die medizinisch bedingte Strahlenexposition sehr ungleichmäßig auf die Bevölkerung verteilt, und zudem ältere Personen viel stärker betroffen sind als jüngere, läßt sich aus der mittleren Pro-Kopf-Exposition ein Strahlenrisiko nur ableiten, wenn man die Individual- und Altersverteilung der betroffenen Bevölkerungsgruppen berücksichtigt.

Der in Abbildung 1 angegebene Zahlenwert für die mittlere effektive Dosis beruht auf groben Schätzungen. Repräsentative Erhebungen über die Häufigkeit röntgendiagnostischer Untersuchungen wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz 1988—1992 durchgeführt, und die Daten laufend aktualisiert. Die bei den Untersuchungen auftretenden Dosen werden derzeit vom Bundesamt für Strahlenschutz und im Rahmen von Forschungsvorhaben ermittelt.

Die Häufigkeit von Röntgenuntersuchungen nimmt weiter zu. Zwar zeichnet sich bei manchen klassischen Röntgenuntersuchungen des Bauchraums ein rückläufiger Trend ab, was auf den vermehrten Einsatz alternativer Untersuchungsverfahren, insbesondere Sonographie und Endoskopie zurückzuführen ist. Andererseits gibt es eine Zunahme sowohl bei konventionellen als auch modernen, dosisintensiven Untersuchungsverfahren, wie Computertomographie

und digitaler Subtraktionsangiographie sowie der interventionellen 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 dosisparender Untersuchungstechniken, z. B. durch den Einsatz von empfindlicheren Röntgenbildverstärkern und verbesserten Film-Foliensystemen, zurückzuführen ist.

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

Die Nuklearmedizin liefert aufgrund der vergleichsweise niedrigeren Anwendungsfrequenzen einen wesentlich geringeren Beitrag zur Strahlenexposition der Bevölkerung. Er liegt etwa bei einem Zehntel des Betrages der durch die Röntgendiagnostik verursachten Strahlenexposition (ausgedrückt als mittlere effektive Dosis).

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

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

#### 3.1 Industrierzeugnisse und technische Strahlenquellen

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

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

#### 3.2 Störstrahler

Störstrahler sind Geräte oder Einrichtungen, die Röntgenstrahlen erzeugen, ohne daß sie zu diesem Zweck betrieben werden (z. B. Elektronenmikroskope und Hochspannungsgleichrichter); sie unterliegen einer grundsätzlichen Genehmigungspflicht, sofern eine Bauartzulassung nicht vorliegt. Zu den Störstrahlern gehören auch Kathodenstrahlröhren in Bildschirmgeräten.

Der Beitrag von Störstrahlern zur Strahlenexposition der Bevölkerung führt zu einer effektiven Dosis von weniger als 10  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr.

### 4. Berufliche Tätigkeit

#### Personendosisüberwachung

Alle beruflich strahlenexponierten Personen, bei denen die Möglichkeit einer erhöhten Strahlenexposition von außen besteht, werden mit Personendosimetern überwacht, die von den sechs zuständigen amtlichen Personendosismeßstellen ausgegeben und ausgewertet werden. Die Zahl der überwachten Per-

sonen betrug (gerundet) im Berichtsjahr insgesamt 347 000, davon im Bereich Medizin 235 000. Abbildung 14 zeigt den Verlauf seit 1981 für die alten und ab 1990 einschließlich der neuen Bundesländer.

Die nachstehenden Dosisangaben beziehen sich auf Photonenstrahlen, da diese in nahezu allen Kontrollbereichen die Dosis bestimmen. Dosisbeiträge durch Neutronen- und Betastrahler sind nur in wenigen Fällen von Bedeutung. Die mittlere Jahres-Personendosis aller Überwachten betrug 0,32 mSv. Bei der Beurteilung dieses Mittelwertes ist jedoch zu beachten, daß bei dem größten Teil aller Überwachten (ca. 83 %) 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, was in allen Bundesländern im Bereich Medizin auf etwa 89 %, in nichtmedizinischen Bereichen etwa 70 % der Überwachten zutrifft. 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 1,87 mSv.

Die Summe der Jahresdosiswerte aller Überwachten (Kollektivdosis) im Berichtsjahr betrug 112 Personen-Sv.

Die Beiträge typischer Tätigkeitszweige zur Kollektivdosis zeigt die Abbildung 15. Einige Angaben über die berufliche Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken sind in der Abbildung 16 enthalten.

#### Inkorporationsüberwachung

Personen, bei denen aufgrund ihrer beruflichen Tätigkeit eine Aktivitätszufuhr oberhalb 10 % des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr nicht ausgeschlossen werden konnte, wurden nach den Richtlinien für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zu den §§ 62 und 63 StrlSchV durch Messungen in Ganz- und Teilkörperzählern und durch Analysen der Ausscheidungen überwacht. Bei Inkorporationsmessungen wurden nur geringfügige aus beruflicher Aktivitätszufuhr stammende Körpergehalte radioaktiver Stoffe ermittelt. Die Aktivitätszufuhren, die diesen Körpergehalten entsprechen, liegen unterhalb 1 % des Grenzwertes der Jahresaktivitätszufuhr.

#### Berufliche Strahlenexposition durch Radonfolgeprodukte in den neuen Bundesländern

In den neuen Bundesländern wird gemäß Einigungsvertrag vom 31. August 1990 nach fortgeltendem Recht der ehemaligen DDR die im Bergbau und bei anderen Tätigkeiten durch Inhalation kurzlebiger Radonfolgeprodukte auftretende Strahlenexposition überwacht. 1992 waren davon ca. 4 500 Personen betroffen, von denen fast 75 % Sanierungsarbeiten in den Betrieben der Wismut GmbH ausführten.

Die berufliche Strahlenexposition wurde aus den am Arbeitsplatz gemessenen Konzentrationen der poten-

tiellen Alphaenergie \*) der kurzlebigen Radonfolgeprodukte und den entsprechenden Aufenthaltszeiten der Beschäftigten ermittelt. Die Umrechnung der Exposition in entsprechende Dosiswerte erfolgt gemäß ICRP-Publikation 32. Etwa ein Viertel der Beschäftigten der Wismut GmbH wurde 1992 mit personengebundenen Geräten (am Körper getragene spezielle Meßgeräte mit akkumulatorgetriebener Probenahmepumpe, Filter, Kernspur- und Thermolumineszenzdetektoren) zur Messung des Zeitintegrals der potentiellen Alphaenergiekonzentration, der externen Strahlenexposition durch Gammastrahlung sowie der Konzentration der langlebigen Alphastrahler überwacht.

Die Kollektivdosis aller beruflich durch Radonfolgeprodukte strahlenexponierten Personen betrug 1992 ca. 24 Personen-Sv. Mehr als 18 Personen-Sv erhielten allein die Beschäftigten der Wismut GmbH. Bei diesen wurden auch die Expositionen durch langlebige Alphastrahler und durch externe Strahlung berücksichtigt, die bei den Beschäftigten in den Nichturanbergbaubetrieben und in den sonstigen überwachten Einrichtungen mit Expositionen durch Radonfolgeprodukte im allgemeinen nur einen vernachlässigbaren Beitrag liefern.

Die mittlere effektive Jahresdosis aller durch Radonfolgeprodukte beruflich exponierten Überwachten betrug 5,4 mSv und lag damit weit unter dem in der Verordnung über die Gewährleistung von Atom Sicherheit und Strahlenschutz — VOAS — festgelegten Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A von 50 mSv pro Jahr. Die höchste mittlere effektive Jahresdosis erhielten die Beschäftigten der Wismut GmbH und des übrigen Bergbaus in dieser Region mit jeweils 5,5 mSv, gefolgt von den Beschäftigten in Schauhöhlen und Schaubergwerken (5,0 mSv), in Wasserwirtschafts- und Schachtbaubetrieben (jeweils 4,8 mSv), in wissenschaftlichen Einrichtungen (4,7 mSv) und in Bergsicherungsbetrieben (3,5 mSv). In allen Tätigkeitsbereichen mit Ausnahme des Nichturanbergbaus wurde eine Senkung der mittleren effektiven Jahresdosis gegenüber dem Vorjahr erreicht. Je nach Tätigkeitsbereich waren bis zu 9 % der beruflich durch Radonfolgeprodukte strahlenexponierten Personen einer jährlichen effektiven Dosis von mehr als 15 mSv (Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B gemäß VOAS) ausgesetzt, wobei der höchste Anteil in den Betrieben der Wasserwirtschaft auftrat.

#### *Strahlenexposition des Flugpersonals*

Die Höhe der Strahlenexposition wird maßgeblich durch Flughöhe, Flugdauer und die geomagnetische Breite bestimmt. Der Strahlenpegel ist im Bereich des

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

Äquators am niedrigsten und steigt mit der zunehmenden geomagnetischen Breite an. So liegt die Äquivalent-Dosisleistung bei Flügen in einer Höhe von etwa 10—12 km bei geomagnetischen Breiten vom Äquator bis zu 70° Nord im Bereich von 2  $\mu\text{Sv/h}$  bis 16  $\mu\text{Sv/h}$ . Bei Annahme einer mittleren Äquivalentdosisleistung von 8  $\mu\text{Sv/h}$  und einer Flugzeit von 500—800 Stunden im Jahr läßt sich für das Flugpersonal auf solchen Routen eine mittlere jährliche Strahlenexposition von etwa 5 mSv abschätzen. Nach gegenwärtiger Rechtslage, bei der die natürliche Strahlenexposition unberücksichtigt bleibt, gehört dieses Flugpersonal nicht zu den beruflich strahlenexponierten Personen. Nach der neuen Empfehlung der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP-60) und Überlegungen bei der Europäischen Gemeinschaft sollte diese Personengruppe künftig als beruflich strahlenexponiert angesehen werden. Nach Verabschiedung der neuen Euratom-Grundnormen werden im Rahmen der dadurch erforderlichen Revision des deutschen Strahlenschutzrechtes den EG-Vorgaben entsprechende Regelungen aufgenommen.

#### **5. Besondere Vorkommnisse**

Eine Übersicht über besondere Vorkommnisse im Anwendungsbereich der Strahlenschutzverordnung (beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe) im Jahr 1992, die dem Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit von den zuständigen Landesbehörden gemeldet worden sind, enthält Tabelle 3. Die Übersicht dient dazu, mögliche Fehlerquellen beim Umgang mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aufzuzeigen, um vergleichbare Vorkommnisse zu vermeiden. Die im Rahmen besonderer Vorkommnisse von Einzelpersonen erhaltenen Strahlenexpositionen haben nicht zu einer Erhöhung der mittleren jährlichen Strahlenexposition der Bevölkerung geführt.

#### **6. Fall-out von Kernwaffenversuchen**

1992 wurden insgesamt 8 unterirdische Kernwaffenversuche durchgeführt, davon 6 in den USA und 2 in China. Frankreich, Rußland und Kasachstan haben 1992 auf Kernwaffenversuche verzichtet. Aus den unterirdischen Versuchen resultiert keine zusätzliche Strahlenexposition der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland.

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

## V. Strahlenexposition durch den Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl

Die mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung durch den Reaktorunfall von Tschernobyl wird 1992 fast ausschließlich durch die Bodenstrahlung des deponierten Radiocaesium verursacht. Caesium-137 leistet mit über 80 % den Hauptbeitrag zur Bodenstrahlung, da aufgrund seiner langen physikalischen Halbwertszeit von 30 Jahren immer noch 87 % der 1986 deponierten Aktivität vorliegen. Caesium-134 hingegen ist auf 13 % des Ausgangswertes der deponierten Aktivität zurückgegangen (Isotopenverhältnis von Caesium-137 und Caesium-134 im Jahr 1992: 1:0,08). Unter Berücksichtigung der Abschirmeffekte, die durch Rauigkeit des Bodens, Einwanderung des Radiocaesiums in den Boden sowie Aufenthalt in Gebäuden bedingt sind, ergibt sich eine mittlere effektive Dosis der Bevölkerung durch Bodenstrahlung zu weniger als 0,02 mSv pro Jahr. Diese liegt somit unter 1 Prozent der mittleren natürlichen Strahlenexposition. Südlich der Donau und in einigen Gebieten des Bayerischen Waldes und Ostdeutschlands kann die Bodenstrahlung infolge örtlich und zeitlich begrenzter starker Regenfälle zur Zeit des Durchzugs der radioaktiven Wolke bis um einen Faktor 10 höher sein, die aus der Bodenstrahlung resultierende effektive Dosis liegt jedoch bei höchstens 10 % der natürlichen Strahlenexposition.

Grundnahrungsmittel wie Milch, Gemüse, Getreide, Obst und Fleisch aus landwirtschaftlicher Produktion sind durch Radiocaesium aus dem Reaktorunfall nur noch geringfügig kontaminiert. Die Meßwerte der spezifischen Aktivität bzw. Aktivitätskonzentration von Caesium-137 liegen in den meisten Fällen weit unter 1 Becquerel pro Kilogramm bzw. Liter. Im Durchschnitt wird mit der Gesamtnahrung weniger als 0,5 Bq Caesium-137 pro Tag zugeführt. Die daraus resultierende Ingestionsdosis bewegt sich im Mikrosievert-Bereich (siehe Tabelle 4: i. a.  $< 2 \mu\text{Sv/a}$ ) und ist gegenüber der Strahlenexposition von 380  $\mu\text{Sv}$  durch Ingestion natürlich radioaktiver Stoffe (Kalium-40, radioaktive Isotope von Uran und Thorium und deren Folgeprodukte) vernachlässigbar klein. In stark betroffenen Gebieten des süddeutschen Raumes und dort besonders in moorigen Gegenden sind auch in diesem Jahr vereinzelt Spitzenaktivitäten von einigen hundert bis zu einigen tausend Becquerel Caesium-137 in Wildfleisch, Wildpilzen und in Raubfischen aus stehenden Gewässern zu verzeichnen, weshalb besondere Ernährungsgewohnheiten Abweichungen von der durchschnittlichen Aktivitätszufuhr über Ingestion bedingen können. Doch auch für diese Fälle läßt sich eine effektive Jahresdosis von maximal einigen zehn Mikrosievert berechnen.

Abbildung 1

Mittlere effektive Dosis der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992: ca. 4,0 mSv

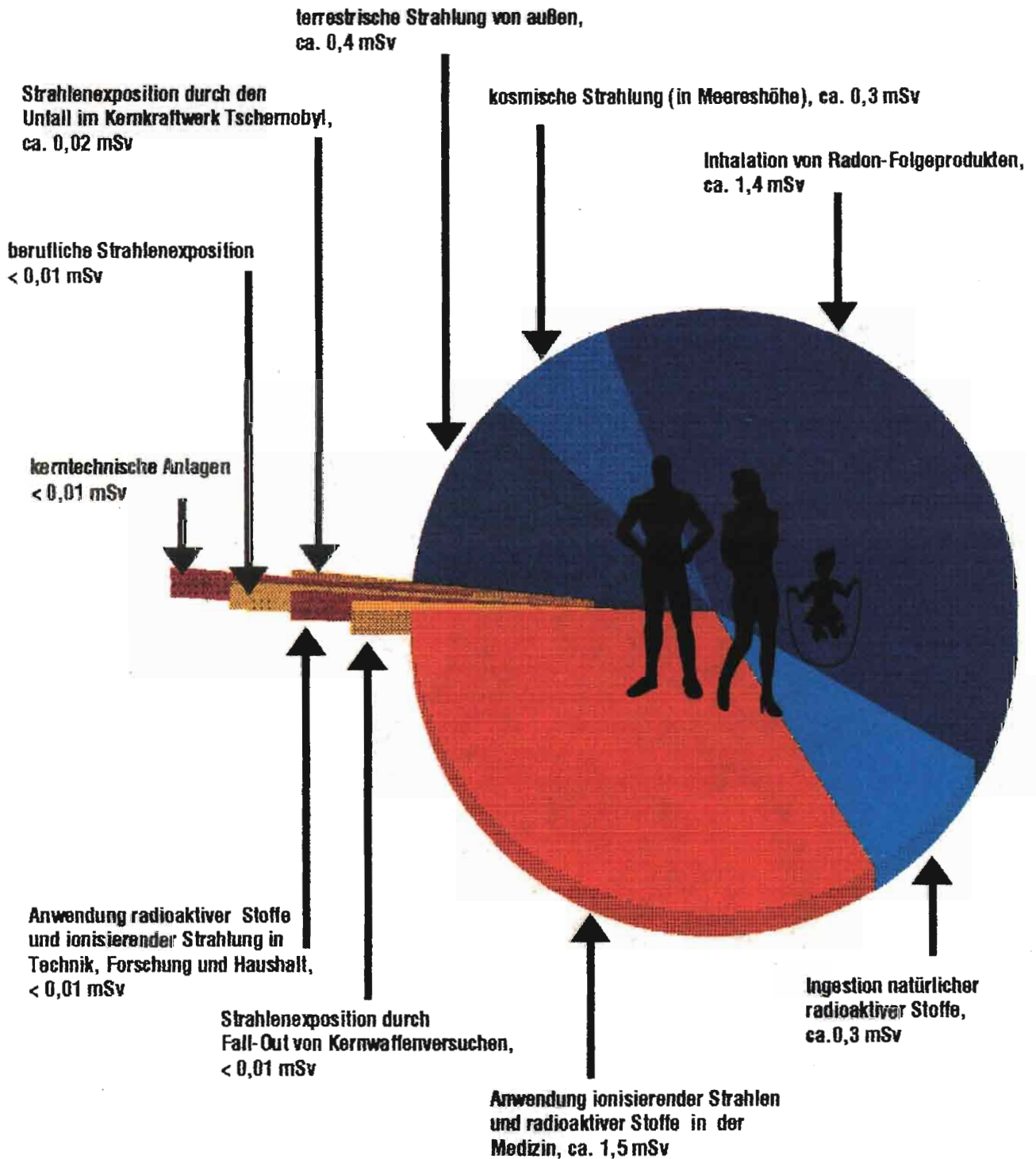


Abbildung 2

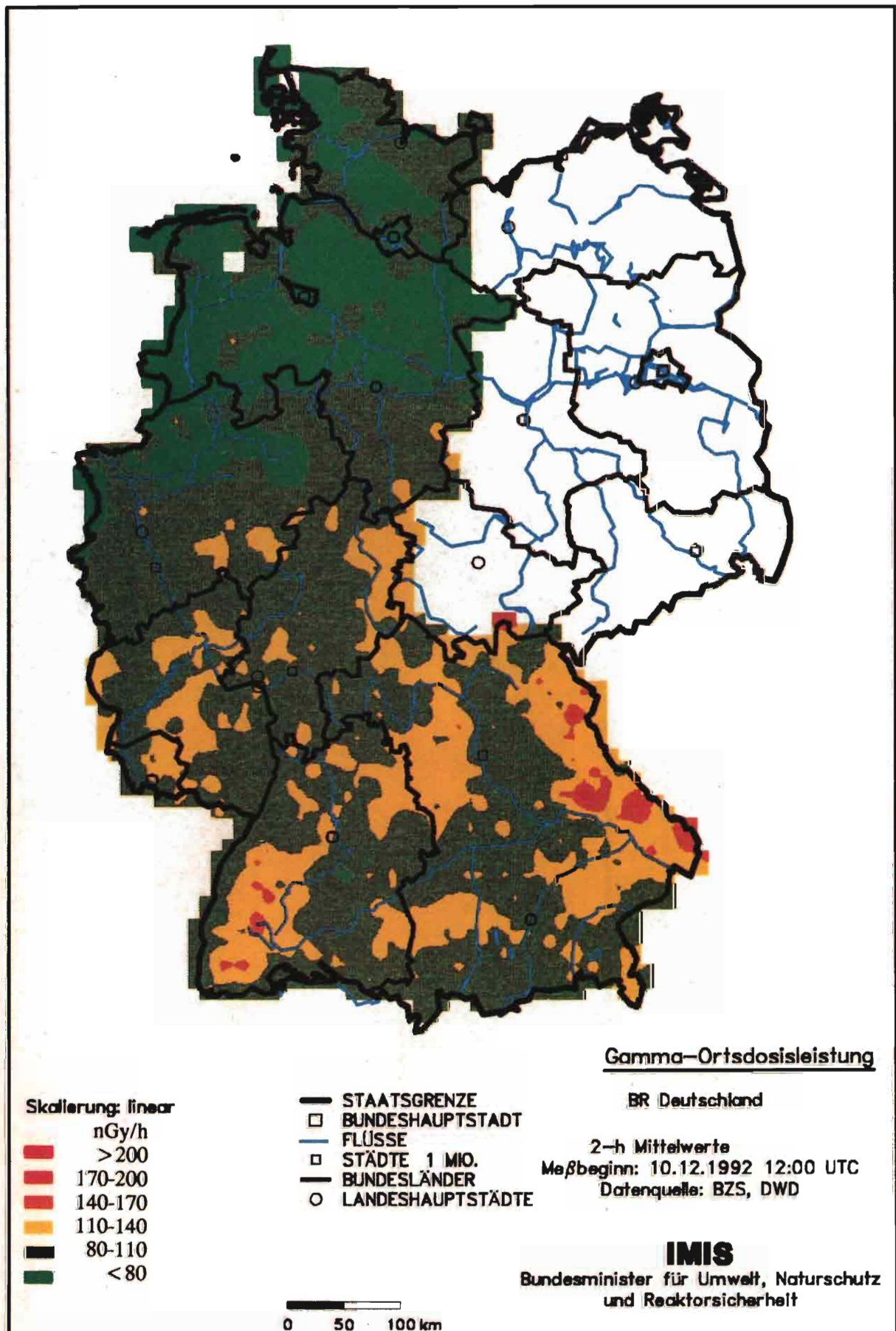
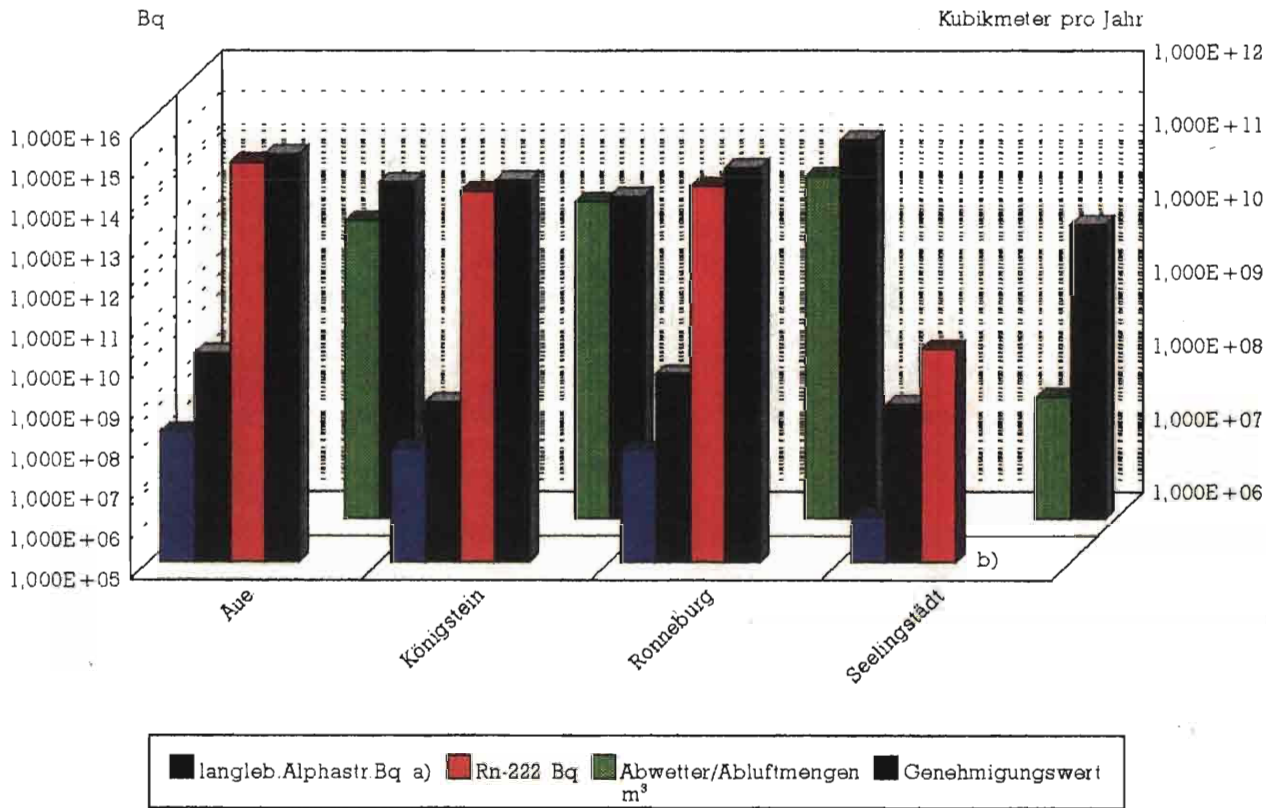


Abbildung 3

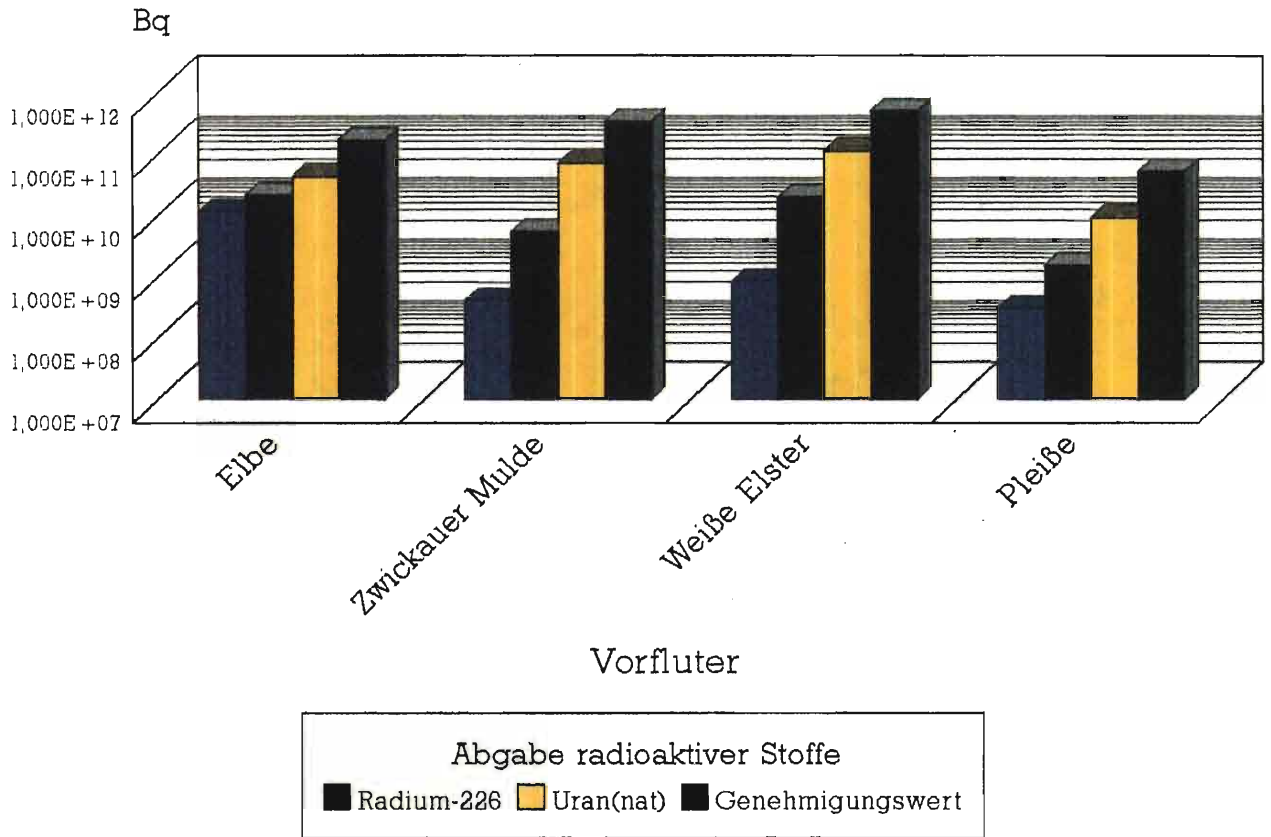
**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus den Sanierungsbetrieben der WISMUT GmbH im Jahr 1992**



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

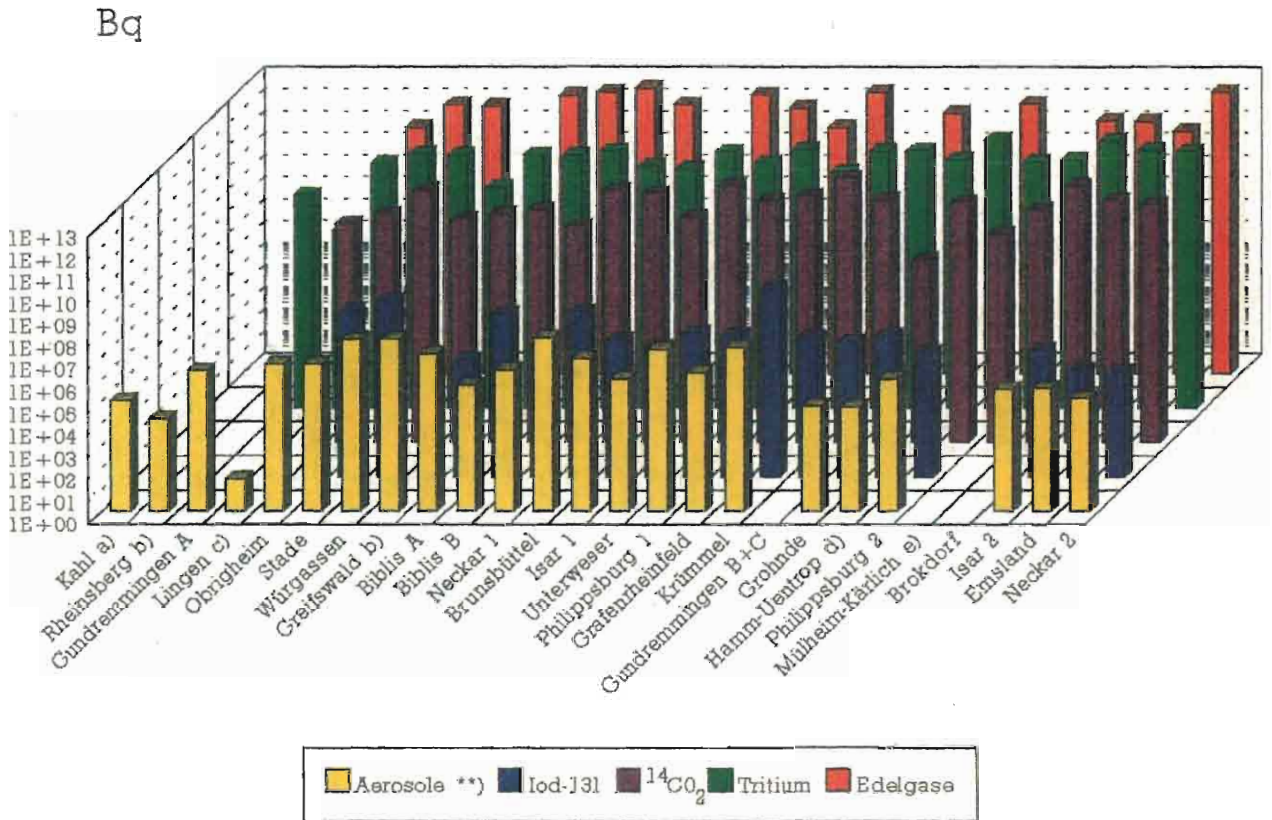
b) keine Grenzwertfestlegung

Abbildung 4

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus den Sanierungsbetrieben der WISMUT GmbH  
im Jahr 1992**



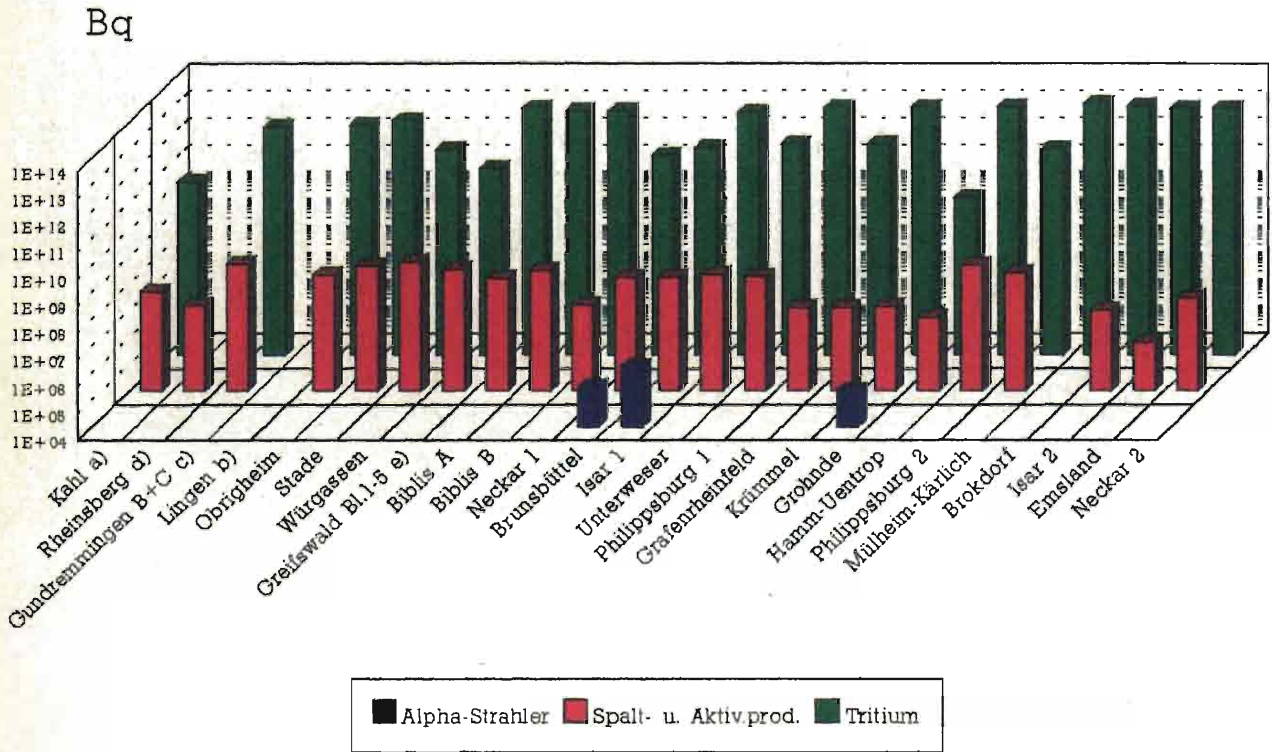
Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Kernkraftwerken im Jahr 1992



a) Betrieb beendet 1985; b) Betrieb beendet 1990; c) Betrieb beendet 1977; d) Betrieb beendet 1988; e) 1992 nicht in Betrieb  
 \*\*) Halbwertszeit >8 Tage, ohne Iod-131, einschl. Strontium und Alpha-Strahler

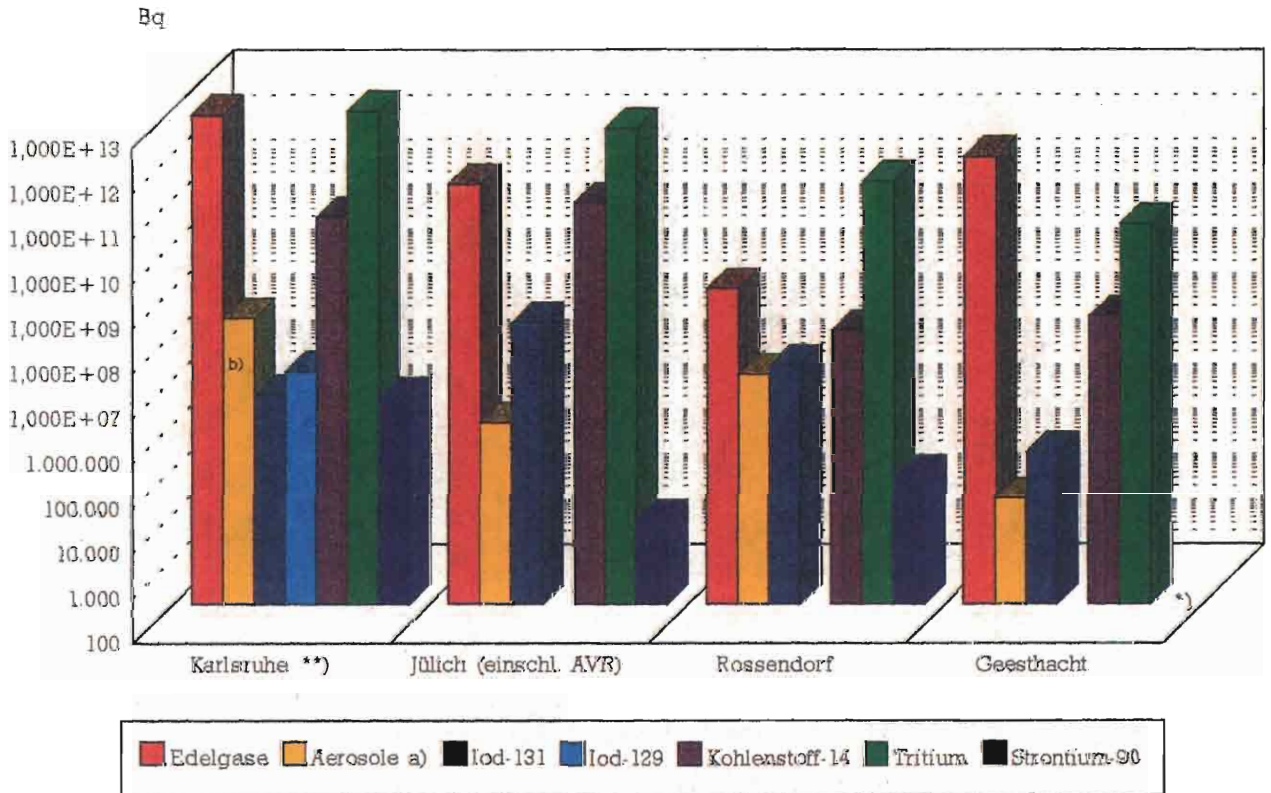
Abbildung 6

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland  
im Jahr 1992  
(Summenwerte, Tritium und Alphastrahler)**



- a) Anlage stillgelegt; b) Anlage stillgelegt, 1992 keine Abwasserabgabe  
 c) Block A stillgelegt (geringfügige Abgaben sind in den für Block B+C angegebenen Daten enthalten)  
 d) Anlage seit Juni 1990 außer Betrieb; e) Anlage seit Dezember 1990 außer Betrieb

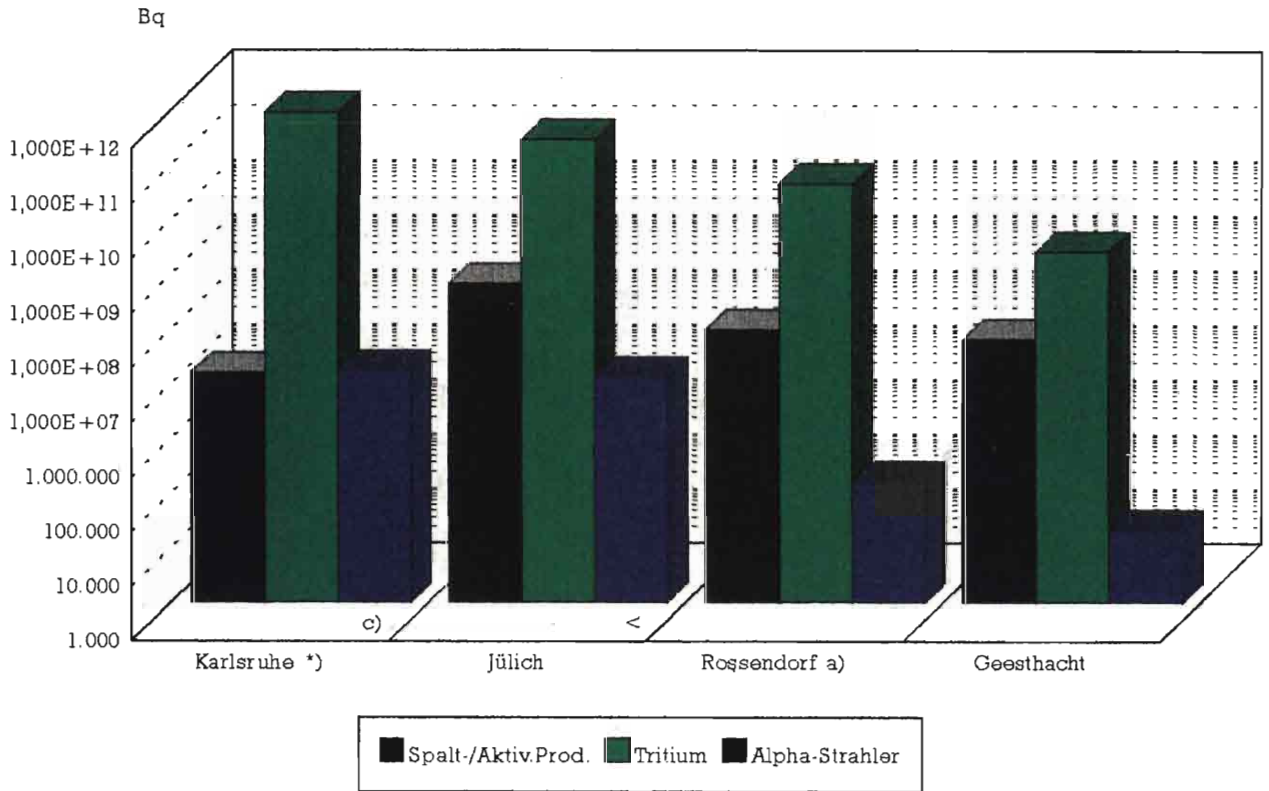
**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft aus Forschungszentren in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992**



- a) HWZ >8d; b) davon Alphastrahler: 8,5 E06 Bq
- \*) nicht nachgewiesen (kleiner oder gleich Nachweisgrenze)
- \*\*\*) einschl. Wiederaufarbeitungsanlage

Abbildung 7 b

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Forschungszentren in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992**



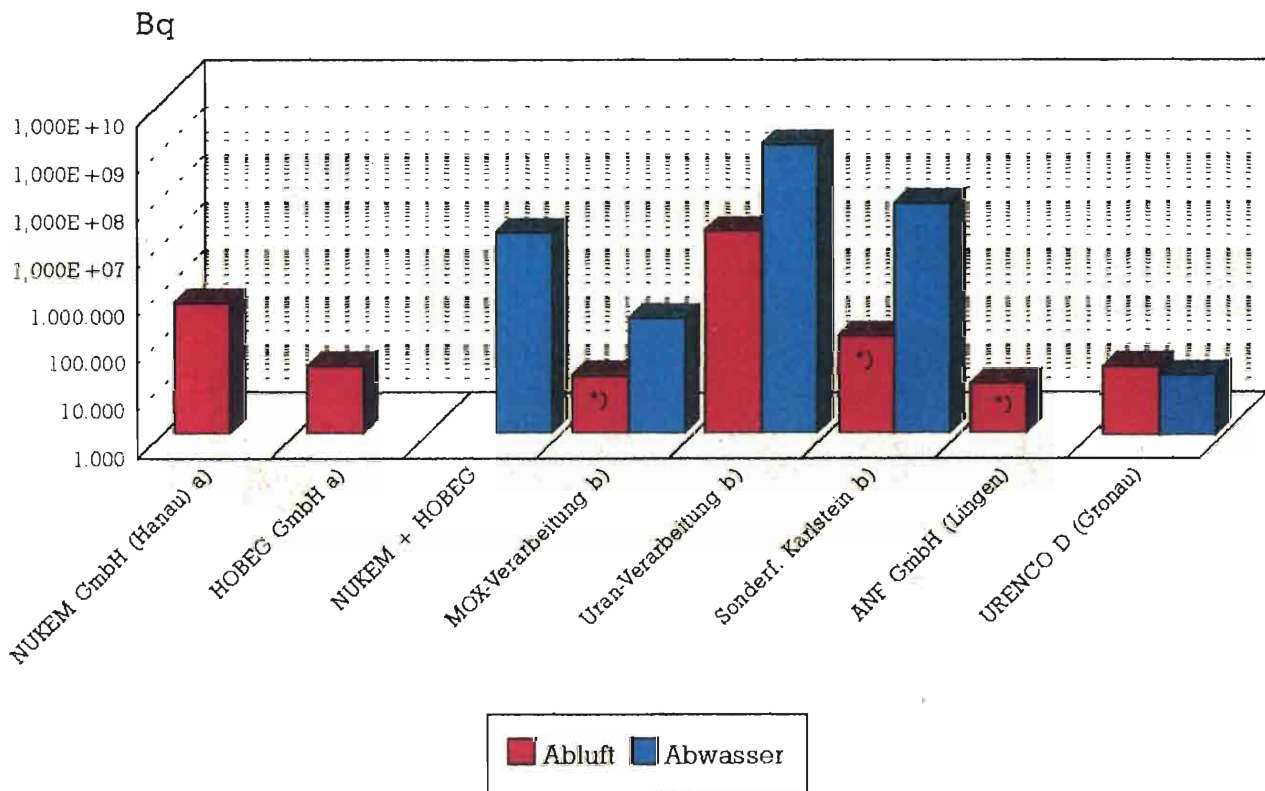
a) vormals ZfK Rossendorf

b) einschl. der Radionuklide aus der Isotopenproduktion und Forschungseinrichtung

c) Pu-238, Pu-239/240 und Pu-241 \*) einschl. Wiederaufbereitungsanlage

Abbildung 8

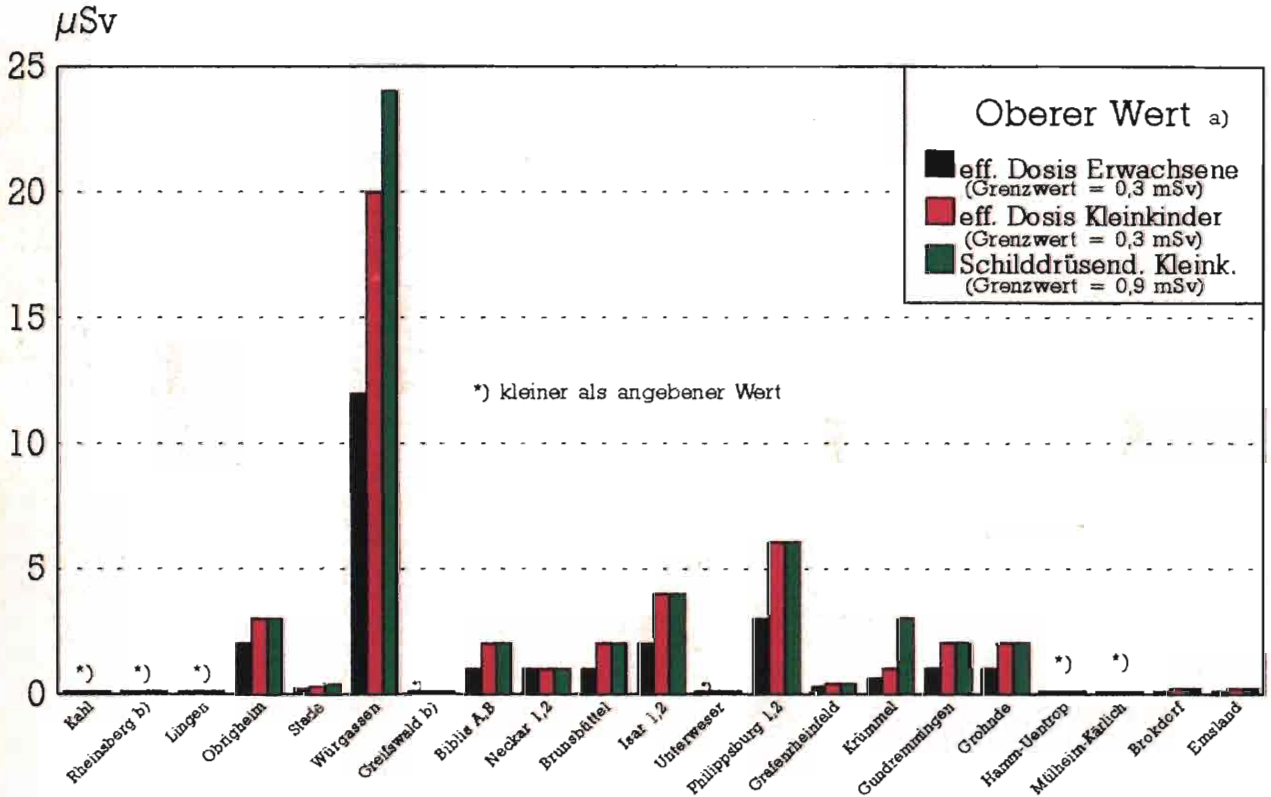
**Ableitung radioaktiver Stoffe (Alpha-Aktivität) aus kernbrennstoffverarbeitenden Betrieben in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1992**



- a) Brennelementproduktion 1988 eingestellt
- b) SIEMENS AG, Brennelementwerk Hanau
- \*) kleiner als angegebener Wert

Abbildung 9

### Strahlenexposition im Jahr 1992 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft

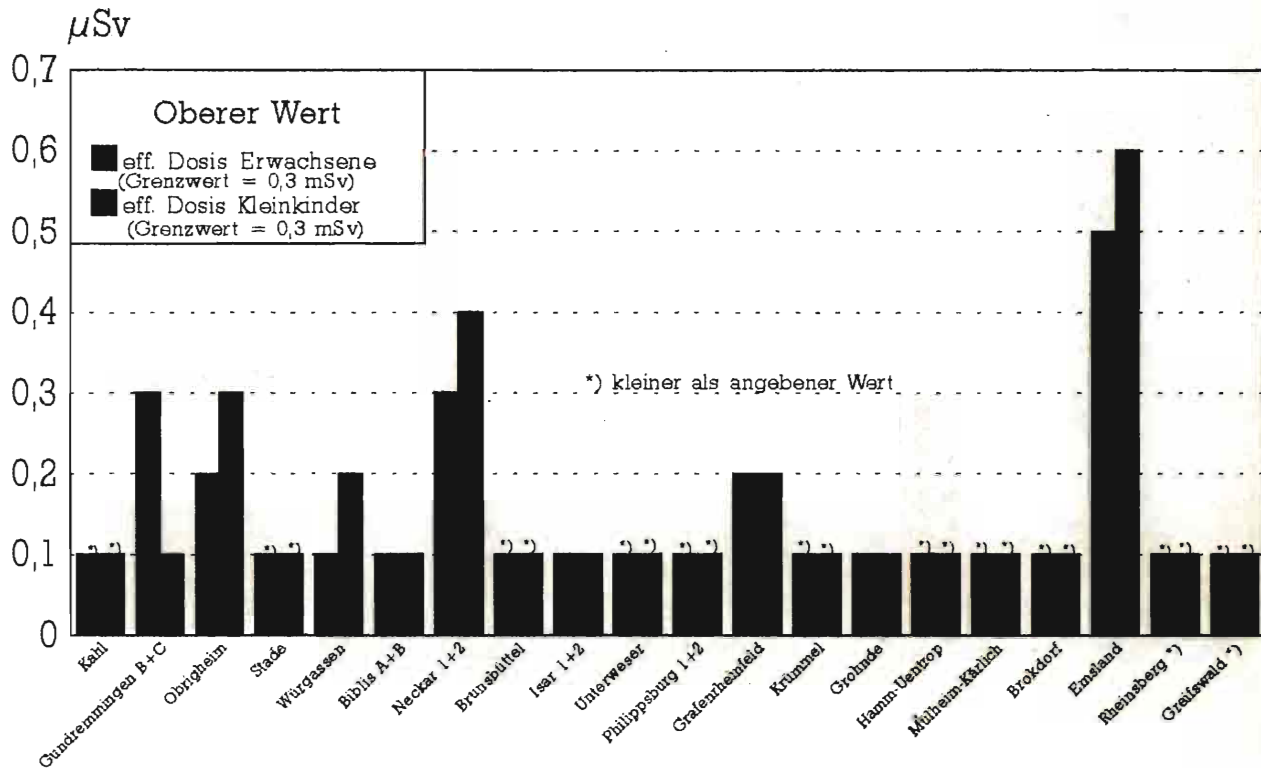


a) berechnet für eine Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen

b) aus den Jahren vor 1990 (Greifswald) bzw. vor 1984 (Rheinsberg) liegen keine Werte für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft vor, deshalb unvollständige Berechnung der Strahlenexposition für Expositionspfade von Radionukliden, die in den Vorjahren akkumuliert wurden.

Abbildung 10

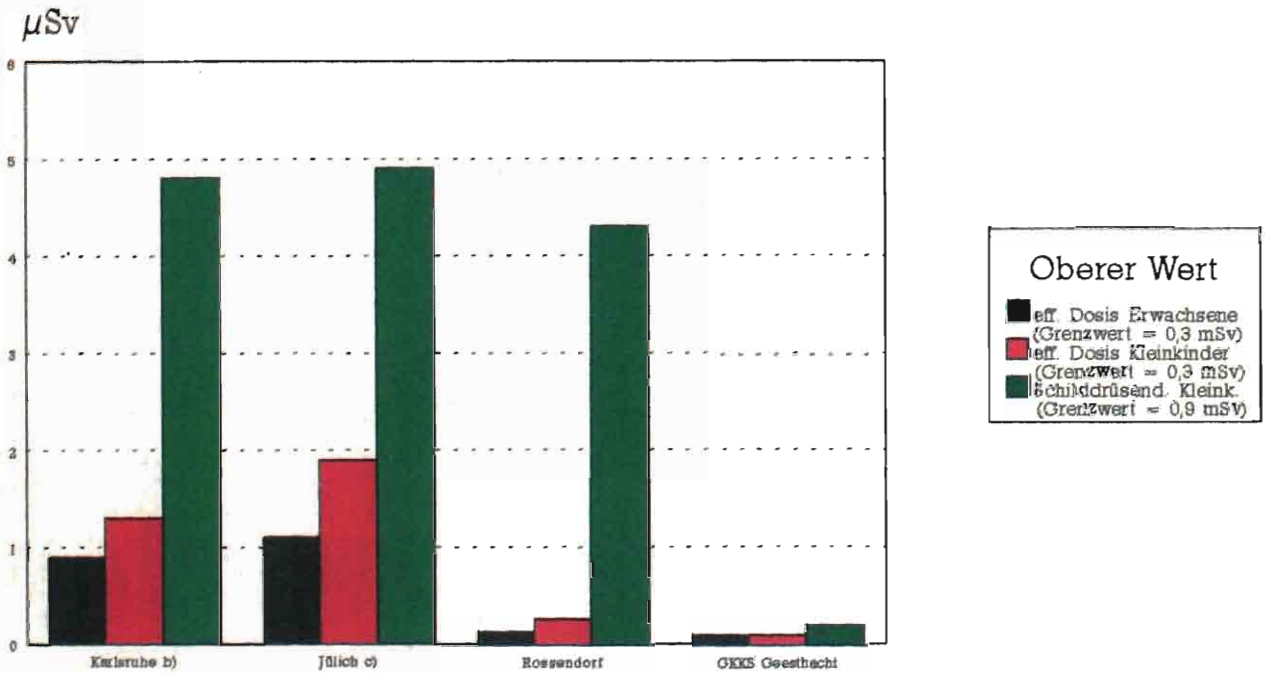
**Strahlenexposition im Jahr 1992 in der Umgebung von Kernkraftwerken durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser**



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

Abbildung 11

**Strahlenexposition im Jahr 1992 in der Umgebung von Forschungszentren durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft a)**

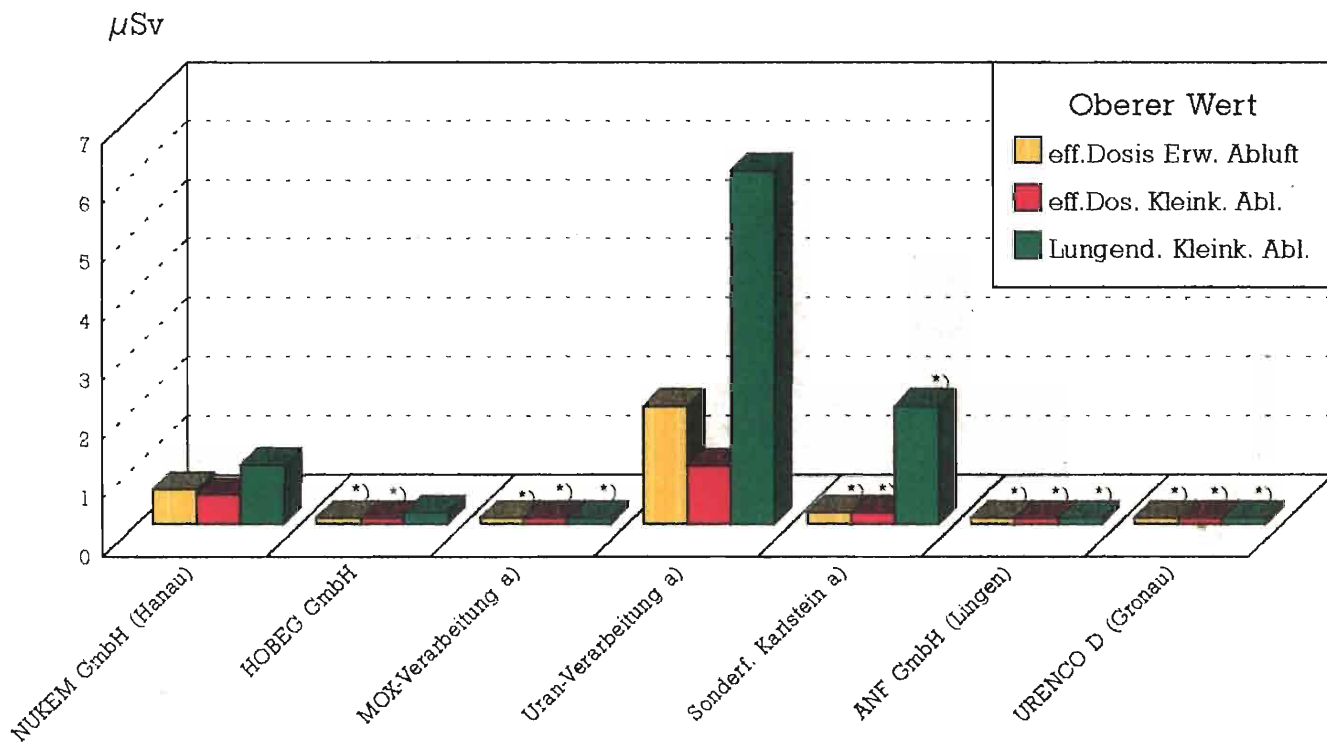


- a) Entnommen den Jahresberichten 1992 sowie nach Angaben der Strahlenschutzabteilungen der Forschungszentren Karlsruhe, Jülich, Rossendorf und Geesthacht  
 b) einschl. Wiederaufarbeitungsanlage; c) einschl. Versuchsreaktor AVR



Abbildung 12

**Strahlenexposition im Jahr 1992 in der Umgebung der kernbrennstoffverarbeitenden Betriebe durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft**



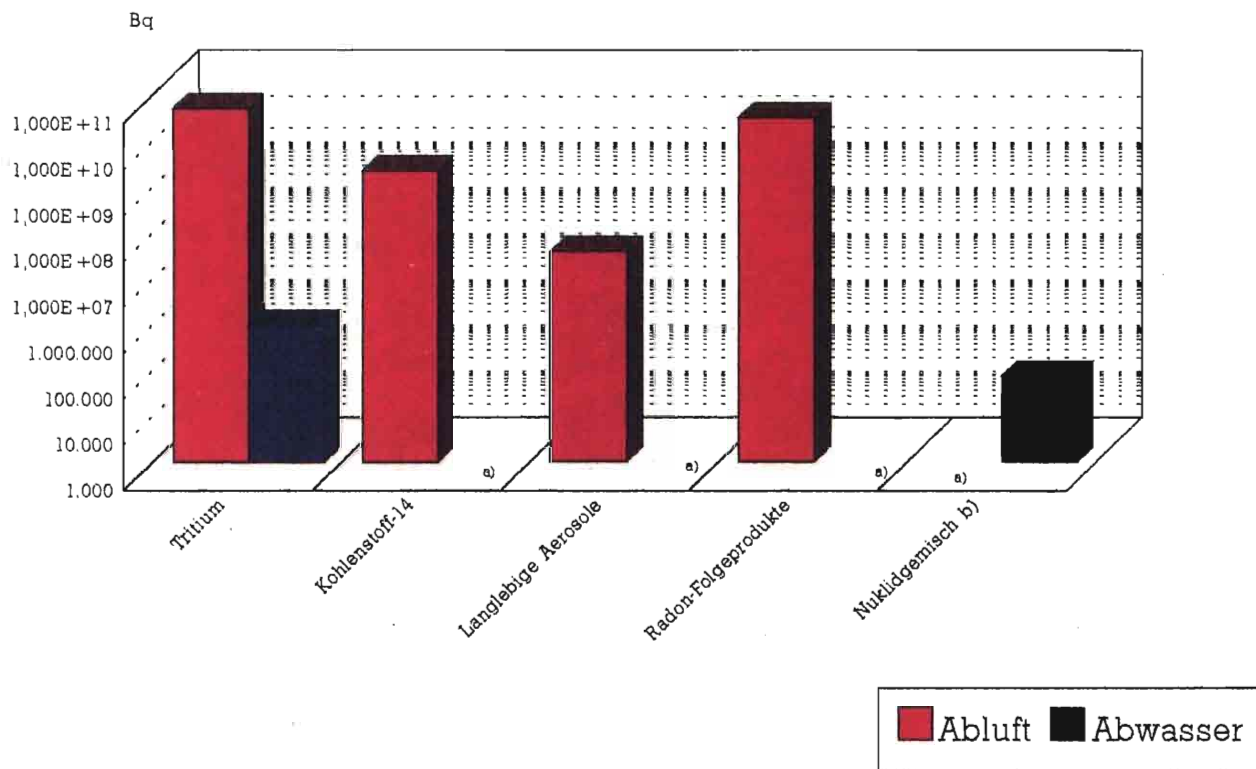
Nach der Strahlenschutzverordnung darf die effektive Dosis höchstens 300 Mikrosievert pro Jahr betragen.

\*) kleiner als angegebener Wert

a) SIEMENS AG, Brennelementewerk Hanau

Abbildung 13

## Ableitung radioaktiver Stoffe aus dem Endlager Morsleben im Jahr 1992



a) nicht bestimmt  
b) außer Tritium

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

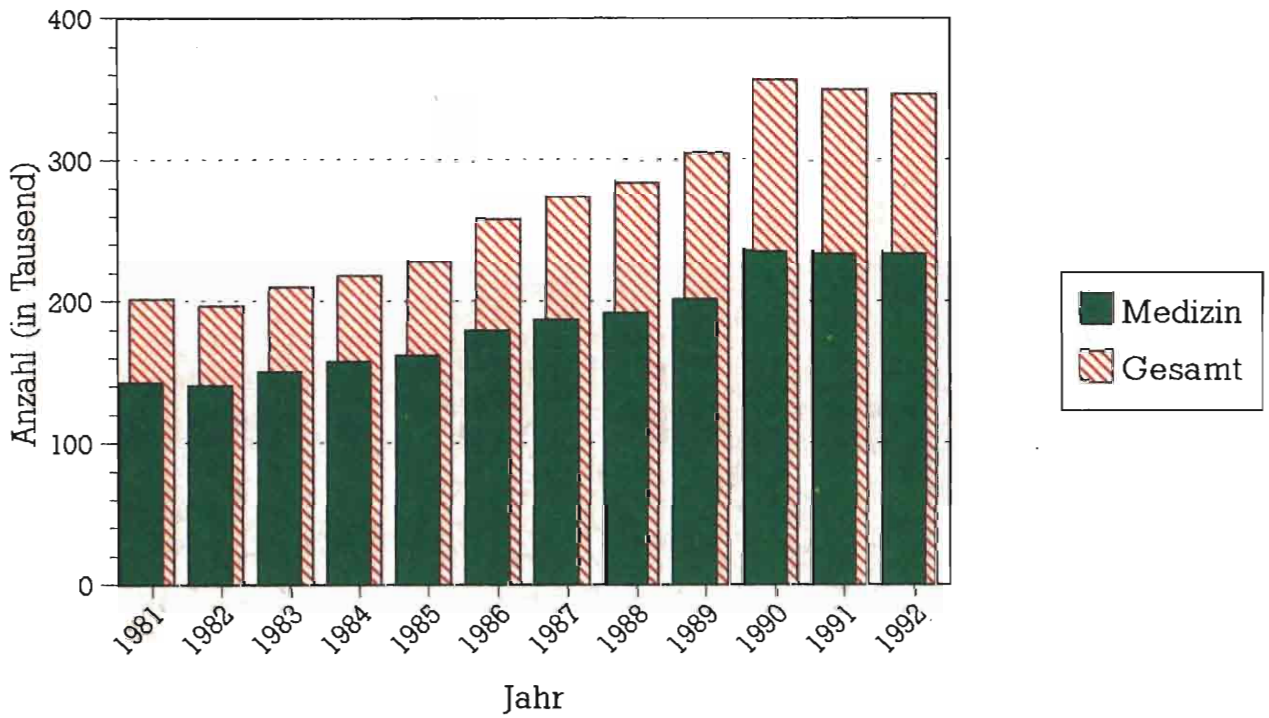


Abbildung 15

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

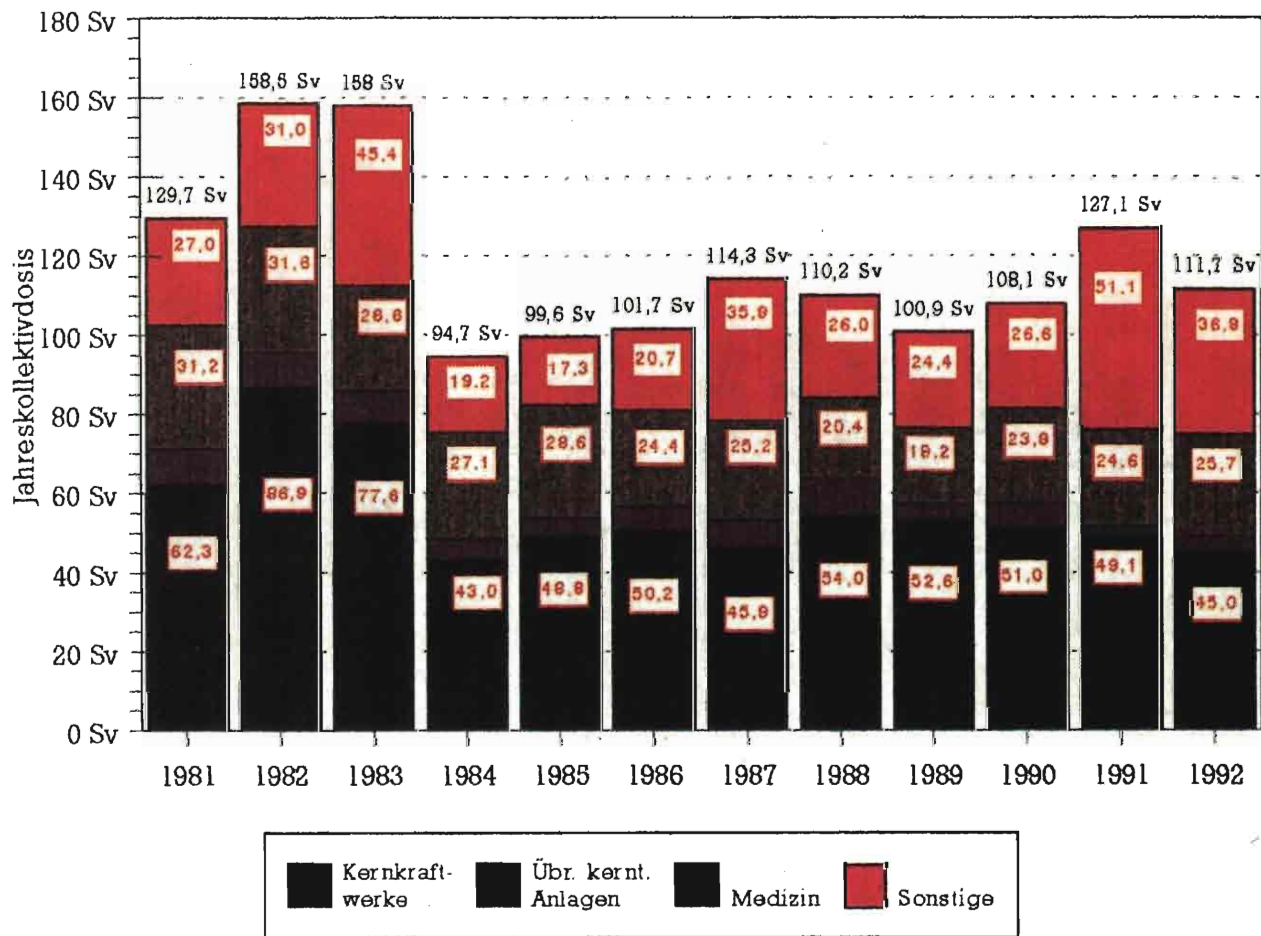


Abbildung 16a

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

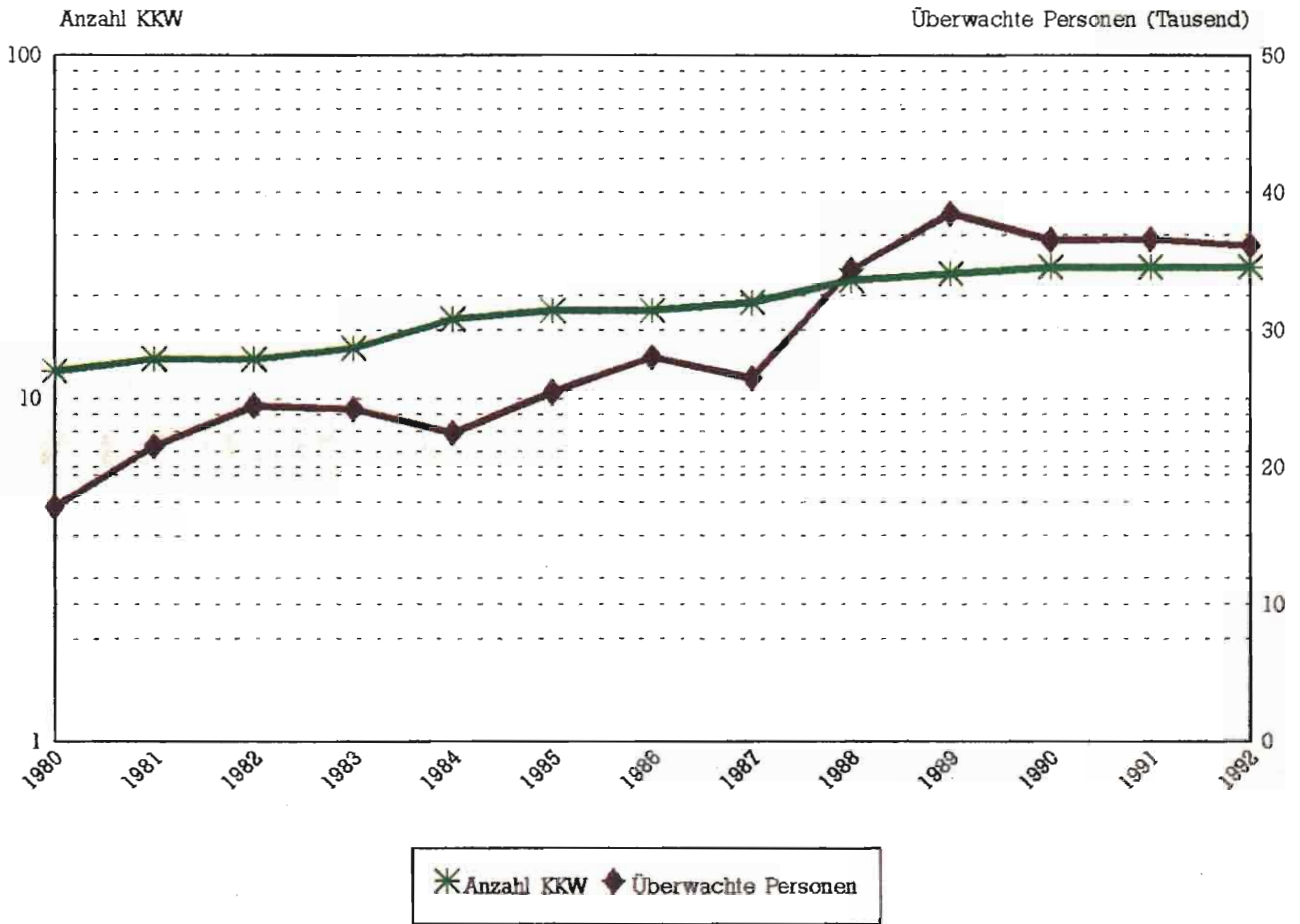


Abbildung 16b

Daten zur beruflichen Strahlenexposition in Leistungskernkraftwerken

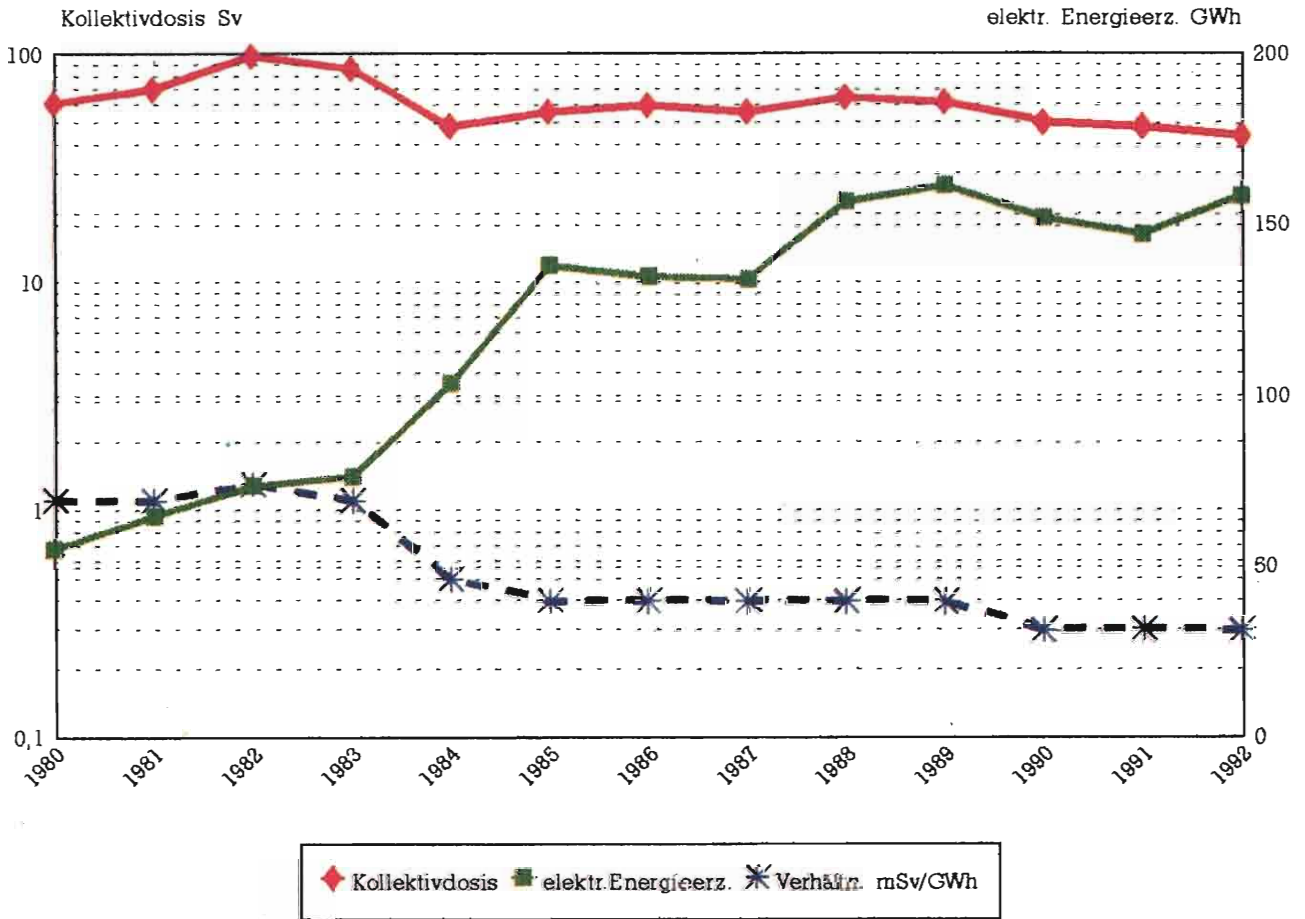


Tabelle 1

**Bandbreite der spezifischen Aktivität natürlicher Radionuklide in Baustoffen und Industrieprodukten**

Material	Ra-226 (Bq/kg) <sup>a)</sup>	Th-232 (Bq/kg) <sup>a)</sup>	K-40 (Bq/kg) <sup>a)</sup>
<b>Baustoffe natürlichen Ursprungs</b> .....			
saure Magmagesteine .....	30— 500	17— 310	380—4 000
basische Gesteine .....	<10— 36	<10— 37	100— 380
Naturgips, Anhydrit .....	2— 70	2— 100	7— 200
Kalkstein, Marmor .....	4— 41	2— 20	<40— 240
Kies, Sand .....	1— 39	1— 64	3—1 200
Lehm, Ton .....	<16— 90	18— 200	300—2 000
Bims, Tuff, Lava .....	<20— 200	25— 300	490—2 000
<b>Finalbaustoffe, Bindemittel</b> .....			
Ziegel, Klinker .....	10— 200	12— 200	100—2 000
Beton .....	7— 92	4— 80	50—1 600
Kalksandstein, Porenbeton .....	6— 80	1— 60	40— 800
Zement .....	10— 330	11— 200	<40— 700
Kalk, Kalkhydrat .....	13— 60	2— 93	<20— 600
<b>Sonstige Industrieprodukte, Rohstoffe</b> .....			
Düngemittel .....	<20—1 000	<20— 30	<40—8 000
Rohphosphate .....	100—2 000	<20— 100	40— 900
Steinkohle .....	<20— 30	<20— <50	<40— 200
Braunkohle .....	1— 51	1— 58	< 4— 220
Koks .....	20— 30	<20	40— 80
<b>Industrielle Abfallstoffe</b> .....			
Bergbauabraum .....	<30—5 900	27— 100	40—1 200
Braunkohlefilteraschen .....	4— 200	6— 150	12— 610
Schlacke .....	8—2 100	6— 340	10—1 000
Hüttenbims .....	110— 230	24— 62	180— 190
Bauxit, Rotschlamm .....	<20— 800	<50—1 000	1—1 000

a) bezogen auf Trockenmasse

Tabelle 2

**Kernteknische Anlagen im benachbarten Ausland**

(Stand 31. Dezember 1992)

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

Tabelle 3

**Besondere Vorkommnisse beim Umgang mit radioaktiven Stoffen, Betrieb von Beschleunigern  
und bei der Beförderung radioaktiver Stoffe 1992**

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
11. 6. 1991 (Nachtrag)	Verschlußstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung	Bruch der Quellenrückholfeder	Patientenüberexposition konnte in der nachfolgenden Bestrahlung ausgeglichen werden	Beseitigung der Fehlerquelle durch Herstellerfirma
20. 8. 1991 (Nachtrag)	Undichtheit einer Tritiumlichtquelle	Material- oder Fertigungsfehler	Geringfügige Inkorporation	
19. 12. 1991 (Nachtrag)	Verschlußstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung	Bruch der Quellenrückholfeder	Patientenüberexposition konnte in der nachfolgenden Bestrahlung ausgeglichen werden	Beseitigung der Fehlerquelle durch Herstellerfirma
13. 1. 1992	Freisetzung von I-131 in einer kern-technischen Einrichtung	Mangelhafte Kontrolle von Abfallbehältern (Austrocknung)	Keine, da die zusätzlich verursachte Strahlenbelastung vernachlässigbar gering war	Aufsichtliche Anordnung zur Vermeidung ähnlicher Vorkommnisse getroffen
23. 1. 1992	Unbekannter Verbleib eines Gaschromatographen mit Ni-63-Strahler (610 MBq)	Mangelhafte Nachweisführung	Nicht zu erwarten	Gegen den Strahlenschutzbeauftragten wurde ein Bußgeldverfahren eingeleitet
23. 1. 1992	Verlust einer Tritiumlichtquelle (118 GBq)	Vermutlich unbemerktes Lösen aus der Halterung	Nicht zu erwarten	Belehrung des Personals intensiviert; Untersuchung zur Verbesserung der Befestigung der Tritiumlichtquellen eingeleitet
30. 1. 1992	Aufenthalt einer Assistentin im Bestrahlungsraum eines medizinischen Beschleunigers beim Beginn der Patientenbestrahlung	Unzureichende Kontrolle vor Beginn der Bestrahlung	Keine, da die Assistentin nur kurzzeitig im Bestrahlungsraum war	Belehrung des Bedienungspersonals intensiviert
18. 2. 1992	Beförderung von 50 unbestrahlten Brennstäben in einem als leer deklarierten Behälter	Nichteinhaltung von Prüfvorschriften	Keine, die Brennstäbe befanden sich noch im Originalbehälter	
20. 2. 1992	Verschlußstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung	Bruch der Quellenrückholfeder	Patientenüberexposition konnte bei der nachfolgenden Bestrahlung ausgeglichen werden	Beseitigung der Fehlerquelle durch Herstellerfirma
28. 2. 1992	Verlust von 2 Cs-137-Prüfstrahlern mit einer Aktivität von 3 bzw. 3,7 MBq in einem Krankenhaus	Vermutlich sind die Strahler versehentlich in den radioaktiven Abfall gelangt	Nicht zu erwarten	Strahlenschutzbeauftragter wurde verwarnet



noch Tabelle 3

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
5. 3. 1992	Bestrahlung einer unbeteiligten Person bei Durchstrahlungsarbeiten auf einem Werksge- lände	Kontrollbereich nicht ordnungsge- mäß abgegrenzt	Keine, da die abge- schätzte Dosis sehr gering war	Strahlenschutzbe- auftragter wurde gebührenpflichtig verwarnt
16. 3. 1992	Fund von 3 Prüf- strahlern in einem Wald	Die Strahler befanden sich in einem PKW, der gestohlen wurde. Offensicht- lich wurden die Strahler weggewor- fen. Der Verbleib eines weiteren Strahlers konnte nicht geklärt wer- den	Im Hinblick auf die Aktivität nicht zu erwarten	Nachforschungen blieben erfolglos
18. 3. 1992	Bestrahlung von 4 unbeteiligten Perso- nen bei Durchstrah- lungsarbeiten auf einem Werksge- lände	Keine Abgrenzung des Kontrollbereichs	Keine, da abge- schätzte Dosen sehr gering waren	Gegen den Strah- lenschutzbeauftrag- ten wurde ein Ord- nungswidrigkeits- verfahren eingelei- tet
21. 3. 1992	Fund eines Cs-137- Strahlers in einer Müllverbrennungs- anlage	Strahler war in Ab- schirmbehälter in einem Labortisch eingebaut, der zur Müllentsorgung ge- geben wurde	Keine, da der Behäl- ter mit dem Strahler sichergestellt wurde	
23. 3. 1992	Fund von zwei Meßgeräten mit Kr-85-Referenz- strahlern in einer verfallenen Baracke eines ehemaligen Betriebsgeländes	Mangelhafte Aufbe- wahrung durch ehe- maligen Eigen- tümer. Fehlende Angabe des Geräte- herstellers über ein- gebaute Referenz- strahler	Keine, da Aktivität der Strahler unter der Freigrenze lag	Übergabe beider Geräte an den Eigentümer zur Verwahrung und Entsorgung
25. 3. 1992	Freisetzung von 18,5 GBq Kr-85	Undichte Strahlen- quelle	Keine Gefährdung wegen geringer Radiotoxizität	
31. 3. 1992	Verlust eines Gd-153-Strahlers (3 GBq) in einer Arztpraxis	Durch mangelhafte Aufbewahrung nach dem Quellenwech- sel ist der Strahler versehentlich in den Müll gelangt	Nicht zu erwarten	Ordnungswidrig- keitsverfahren ge- gen die Beteiligten eingeleitet

noch Tabelle 3

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
2. 4. 1992	Abschaltung der Lüftungsanlage in einer kerntechnischen Einrichtung	Spannungsinstabilität löste eine Störung an dem die Fortluft kontrollierenden Mikroprozessor aus, wodurch ein Fehlalarm hervorgerufen wurde, der zur Abschaltung der Lüftungsanlage führte	Keine	Nach Quittierung der Störungsmeldung an der Fortluftmeßstelle wurde die Lüftungsanlage wieder bestimmungsgemäß angefahren
10. 4. 1992	Feststellung der Undichtheit von zwei Pu-Be-Neutronen-Quellen bei der Dichtheitsprüfung		Keine	Quellen in dichter Umschließung gesichert
21. 4. 1992	Beim Ausbau von Brunnenbestrahlungsquellen fiel eine Strahlenquelle aus dem Arbeitscontainer	Fehlbedienung des Arbeitscontainers	Bei der Bergung der Strahlenquelle erhielten 3 Mitarbeiter eine Dosis von maximal 0,6 mSv	
23. 4. 1992	Feststellung von I-131 im Abwasser in einer Vorkläranlage	Vermutlich Ausscheidung eines Therapiepatienten	Keine, da I-131-Konzentration gering war	
24. 4. 1992	Austritt von geringfügig tritiiertem Wasser aus dem Kühlkreislauf eines medizinischen Beschleunigers (Neutronengenerator)	Infolge Durchschlagens der Isolierung des Hochspannungskabels Undichtigkeit im Kühlkreislauf	Keine	Hochspannungskabel wird im Rahmen der Wartung regelmäßig erneuert
25. 4. 1992	Beschädigung eines Typ A-Versandstückes beim Umladen in einer Lagerhalle	Mangelnde Sorgfalt bei der Verwendung eines Gabelstaplers	Keine, innere Umschließung wurde nicht beschädigt, Strahlenabschirmung blieb intakt	
28. 4. 1992	Fund von uranhaltigen Stoffen	Unzulässige Beseitigung	Keine, da geringe Radiotoxizität	
4. 5. 1992	Bei Durchstrahlungsarbeiten löste sich der Ausfahrtschlauch vom Kollimator, wobei sich der Strahlerhalter mit Ir-192-Strahler (590 GBq) vom Ausfahrkabel löste	Mangelnde Sorgfalt beim Ankoppeln des Kollimators an den Ausfahrtschlauch	Beim Versuch, die Störung zu beheben, erhielt ein Prüfer eine Dosis von 2,6 mSv, die erhaltene Teilkörperdosis (Hand) wurde auf ca. 9 mSv geschätzt	Mitarbeiter wurden auf Fehlermöglichkeiten beim Ankoppeln des Kollimators und auf ihre Sorgfaltspflicht besonders hingewiesen
5. 5. 1992	Verlust von 2 Tritium-Gaschromatographiedetektoren mit je 3 GBq	Mangelnde Aufsicht	Wegen geringer Radiotoxizität nicht zu erwarten	

noch Tabelle 3

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
6. 5. 1992	Verpuffung in der Beschickungsbox einer Verbrennungsanlage in einer kerntechnischen Einrichtung	Dem radioaktiven Abfall war ohne Deklaration Lösungsmittel beigemischt worden	Geringfügige Kontamination und Inkorporation bei dem betroffenen Mitarbeiter	Beschickungsbox wurde technisch verbessert
6. 5. 1992	Verschlußstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung	Bruch der Quellenrückholfeder	Geringfügige Expositionen der den Patienten bergenden Personen, Patientenüberexposition konnte in den nachfolgenden Bestrahlungen ausgeglichen werden	Beseitigung der Fehlerquelle durch Herstellerfirma an allen in Betrieb befindlichen Einrichtungen
11. 5. 1992	Störung des Antriebs der Schiebetür zum Bestrahlungsraum eines medizinischen Beschleunigers	Setzen der Türführung	Keine, da Patientenbestrahlung eingestellt	Als Zwischenlösung Einbau einer Flügeltür mit ausreichender Abschirmwirkung im Labyrinth. Im Zuge geplanter Umbaumaßnahmen Erneuerung der Schiebetür
14. 5. 1992	Wiederholte Verschlußstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung nach erfolgter Reparatur	Wiederholter Bruch der Quellenrückholfeder	Geringfügige Expositionen einer Mitarbeiterin bei der Patientenbergung, Patientenüberexposition konnte bei der nachfolgenden Bestrahlung ausgeglichen werden	Beseitigung der Fehlerquelle durch Herstellerfirma an allen in Betrieb befindlichen Einrichtungen
20. 5. 1992	Erhöhte Werte der Beta-Ortsdosisleistung in einem Lager für radioaktive Quellen	Freisetzung von 2 GBq Kr-85 aus einer undichten Quelle	Keine Gefährdung wegen geringer Radiotoxizität	
4. 6. 1992	Ausfall der Zuluftanlage in einer kerntechnischen Einrichtung	Unsachgemäß durchgeführte Wiederholungsprüfung an der elektrischen Anlage	Keine	Belehrung des Personals, Einführung von Prüfanweisungen
10. 6. 1992	Bei Durchstrahlungsarbeiten löste sich der Ausfahrerschlauch vom Kollimator, wobei der Strahlerhalter mit Ir-192-Strahler (1,48 TBq) ausklinkte und herunterfiel	Mangelnde Sorgfalt beim Ankoppeln des Kollimators an den Ausfahrerschlauch	Filmdosimetrisch ermittelte Dosen (Ganzkörper) betragen 17 mSv bzw. 4,2 mSv, außerdem wurde bei einem der beiden Mitarbeiter eine Teilkörperdosis (Hand) von max. 100 mSv abgeschätzt	Mitarbeiter wurden auf Fehlermöglichkeiten beim Ankoppeln des Kollimators und auf ihre Sorgfaltspflicht besonders hingewiesen

noch Tabelle 3

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
10. 6. 1992	Verkehrsunfall bei der genehmigungsfreien Beförderung radioaktiver Stoffe	Fahrfehler	Keine; Verpackung blieb unbeschädigt	
24. 6. 1992	Beschädigung einer Meßsonde auf einer Baustelle	Anfahren durch Baufahrzeug	Keine, da die Strahlenquelle nicht beschädigt wurde	
1. 7. 1992	Kontamination durch Natururan-konzentrat in einem Zwischenlager eines Sanierungsbetriebes	Ungeeignete Verladetechnologie	Keine, da fachkundige Beseitigung der Kontamination erfolgte	Maßnahmen zur Verhinderung der Wiederholung des Vorfalles eingeleitet
6. 7. 1992	Beschädigung eines Ra-226-Stiftes (370 MBq) in einem Krankenhaus	Der Ra-226-Stift wurde beim Öffnen eines Applikators geknickt	Oberflächen- und Personenkontamination, Inkorporation bei 2 Mitarbeitern mit einer effektiven Dosis von maximal 12 mSv	Kontaminationen wurden beseitigt. Alle Radiumstrahler wurden zur Entsorgung gegeben
7. 7. 1992	Verlust von 2 Sr-90-Strahlenquellen	Diebstahl	Nicht zu erwarten	Nachforschungen blieben ergebnislos
16. 7. 1992	Fehlerhafte Blendeneinstellung an einem medizinischen Beschleuniger	Technischer Defekt	Möglicherweise aufgetretene Fehldosierung bei 3 Patienten beträgt auf die gesamte Bestrahlung bezogen 0,4 % und liegt im Rahmen unvermeidlicher Schwankungen	Technischer Defekt wurde beseitigt. Modifizierung und zusätzliche Überwachung der Blendeneinstellung
17. 7. 1992	Bei Durchstrahlungsarbeiten löste sich der Ausfahr-schlauch vom Kollimator und fiel zu Boden, wodurch sich der Strahlerhalter mit Ir-192-Strahler (525 GBq) verklemmte und nicht in das Gerät zurückgeführt werden konnte	Mangelnde Sorgfalt beim Ankoppeln des Kollimators an den Ausfahr-schlauch	Drei zur Bergung des Strahlers herangezogene Feuerwehrleute erhielten Dosen von maximal 0,4 mSv	Mitarbeiter wurden auf Fehlermöglichkeiten beim Ankoppeln des Kollimators und auf ihre Sorgfaltspflicht besonders hingewiesen
27. 7. 1992	Kontamination an einer angelieferten Cs-137-Strahlenquelle	Undichtheit	Keine Gefährdung von Personen oder der Umwelt	
6. 8. 1992	Verkehrsunfall bei der Beförderung radioaktiver Stoffe	Fahrfehler	Keine; Verpackungen nur äußerlich beschädigt	

noch Tabelle 3

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
17. 8. 1992	I-131-Kontamination in einem Krankenhaus	Unsachgemäßer Umgang mit I-131-Lösungen	Raumluft- und Personenkontamination, Inkorporation	
24. 8. 1992	Kontamination an Verpackungsmaterial von angelieferten Kr-85-Strahlenquellen	Undichte Kr-85-Strahlenquelle	Keine Gefährdung von Personen oder der Umwelt	
31. 8. 1992	Verlust einer Tritiumlichtquelle (13 GBq)	Vermutlich unbemerktes Lösen aus der Halterung	Nicht zu erwarten	Untersuchung zur Verbesserung der Befestigung der Tritiumlichtquellen eingeleitet
9. 9. 1992	Erhöhte Tritiumkonzentrationen im Sickerwasser von Mülldeponien	Vermutlich durch frühere Ablagerung von Abfällen aus der Leuchtfarben- und Uhrenindustrie	Keine, da die Konzentrationen gering sind	Untersuchung zur Ermittlung der Ursachen der Tritiumkontaminationen wurden eingeleitet
11. 9. 1992	Verlust von 3 Schulstrahlenquellen	Diebstahl der Kassette, in der sich die Quellen befanden	Im Hinblick auf die Aktivität nicht zu erwarten	
11. 9. 1992	Feststellung einer Ir-192-Strahlenquelle (20 GBq) in einem als leer deklarierten Transportbehälter auf einem Flughafen	Sendung aus dem Ausland	Geringfügige Exposition bei der Beförderung	Zuständige Behörde des Absenders wurde informiert
16. 9. 1992	Verkehrsunfall bei der Beförderung eines Gamma-radiographiegerätes	Fahrfehler	Keine; Gerät blieb unbeschädigt	
28. 9. 1992	Nach einer Bestrahlung mit einer medizinischen Gamma-bestrahlungseinrichtung blieb die elektrische Rückmeldung „Quelle in Ruheposition“ aus	Schaltkreisstörung	Keine, Quelle war in Ruheposition	
29. 9. 1992	Austritt von ca. 200 l Flüssigkeit aus einer I-131-Abwasserabklinganlage im Tiefkeller eines Krankenhauses	Schadhafter Stopfen an einer Umwälzpumpe	Keine, da fachkundige Beseitigung der Kontamination erfolgte	Austausch der Umwälzpumpen, regelmäßige Überprüfung des Zustandes der Umwälzpumpen festgelegt
5. 10. 1992	Zerstörung einer Ampulle mit Er-169-Lösung (377 MBq) im Transportcontainer	Transportschaden	Keine	Kontaminierter Container wurde ordnungsgemäß entsorgt

noch Tabelle 3

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
8. 10. 1992	Nach einer Bestrahlung mit einer medizinischen Gamma-bestrahlungseinrichtung blieb erneut die elektrische Rückmeldung „Quelle in Ruheposition“ aus	Schaltkreisstörung	Keine, Quelle war in Ruheposition	Beseitigung der Fehlerquelle durch Herstellerfirma
8. 10. 1992	Verlust von 3 Kr-85-Strahlenquellen mit je 740 MBq	Strahlenquellen sind bei Liquidation des Betriebes wahrscheinlich auf die Mülldeponie gelangt	Nicht zu erwarten	
9. 10. 1992	Fund von 4,4 kg Uranoxid in einem Lager für radioaktive Stoffe	Unzureichende Nachweisführung	Nicht zu erwarten	Ermittlungsverfahren wurde eingeleitet
15. 10. 1992	Bei Durchstrahlungsarbeiten löste sich der Kollimator und fiel auf das Ende des Ausfahr-schlauches. Der Strahlerhalter wurde verbogen und ließ sich nicht in den Arbeitsbehälter zurückführen	Vermutlich fehlende Haftkraft des Haltemagneten	Drei an der Bergung des Strahlers beteiligte Personen erhielten Dosen von 0,2 mSv, 0,65 mSv und 2,6 mSv	
15. 10. 1992	Ra-226-Kontamination in einem Krankenhaus	Undichte Ra-226-Strahlenquelle	Keine Gefährdung von Personen oder der Umwelt	
24. 10. 1992	Sicherstellung von Anzeigeinstrumenten mit Radium-Leuchtfarbe bei einem Händler auf einem Trödelmarkt	Unzulässige Einfuhr	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung ist erfolgt
2. 11. 1992	Verlust eines I-125-Strahlers (185 MBq) in einem Krankenhaus	Der Strahler ist vermutlich bei der Implantation im Katheder steckengeblieben und in den Abfall gelangt	Bestrahlung des Patienten wurde nicht wie geplant realisiert	Kontrolle der Implantationsabfälle mit Meßgerät angeordnet
11. 11. 1992	Ausfall des Feldhomogenitäts-Überwachungssystems an einem medizinischen Beschleuniger	Fehlender Kontakt einer Platine im Schaltkreis	Keine	Mechanische Sicherung der Platinen durch Herstellerfirma an allen im Einsatz befindlichen Beschleunigern

noch Tabelle 3

Datum	Vorkommnis	Ursache	radiologische Folgen	Beurteilung/ Bemerkungen
17. 11. 1992	Wiederholte Verschlüßstörung an einer medizinischen Gammabestrahlungseinrichtung nach erfolgter Reparatur	Ungenügende Justierung des Endschalters für Quellentransport	Keine	Betriebsgenehmigung bis 31. März 1993 befristet
17. 11. 1992	Fund von 3 Kr-85-Strahlenquellen mit je 7 MBq in einem Waldgelände	Unzulässige Entsorgung	Keine	Ordnungsgemäße Entsorgung ist erfolgt
19. 11. 1992	Mögliche Inkorporation von Np-237 über eine Wunde	Verletzung mit einer Spritze, die Np-237-Lösung in schwacher Konzentration enthielt	Gering, die Abschätzung der Dosis ergab einen Wert unter 1 mSv	
24. 11. 1992	Feststellung der Undichtheit eines Strahlers eines radiometrischen Meßgerätes in einem Kalibergwerk		Keine	Strahler ausgesondert
1. 12. 1992	Zerstörung eines Cs-137-Strahlers (Aktivität 2,02 GBq) und Kontamination von Kalisalz	Beim Füllen des entleerten Durchlaufbunkers wurden durch den Aufprall des Salzes das Schutzrohr beschädigt und mit Beginn der Förderung der Strahlerhalter mit dem Strahler abgerissen und zermahlen	Nicht zu erwarten, da die im Produktionsprozeß entstandene Verdünnung der spezifischen Aktivität des als Düngemittel verwendeten Salzes sehr hoch war	Maßnahmen zur Verhinderung ähnlicher Vorkommnisse veranlaßt
16. 12. 1992	Feststellung von 3 Ir-192-Strahlern in als leer deklarierten Transportbehältern	Falsch deklarierte Beförderungspapiere und Transportbehälter	Geringfügige Exposition des Beförderungspersonals	Zuständige Behörde des Absenders wurde informiert
22. 12. 1992	Brand an einer Papiermaschine mit Dichtemeßanlage, die 18,5 GBq Kr-85 enthielt		Keine, die Strahlenquelle ist nicht undicht geworden	

Tabelle 4

**Mittlere effektive Dosis durch inkorporiertes Caesium-134 und Caesium-137 in  $\mu$ Sv im Jahre 1992 als Folge des Reaktorunfalls in Tschernobyl**

	München	Karlsruhe	Köln
Männer .....	3,4	1,5 <sup>a)</sup>	1,4
Frauen .....	2,5	1,0 <sup>a)</sup>	0,8

<sup>a)</sup> Daten für einzelne Monate geschätzt und für das ganze Jahr hochgerechnet

## Anhang

## A. Strahlendosis und Strahlenwirkung

(Quelle: Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 14)

## 1. Strahlendosis und ihre Einheiten

Beim radioaktiven Zerfall von instabilen Nukliden werden energiereiche Teilchen emittiert. Bei Radionukliden, die aus kerntechnischen Anlagen freigesetzt werden, sind dies vor allem Alpha- und Beta-Teilchen sowie die Photonen der Gamma-Strahlung. Durch Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung erzeugen Photonen im bestrahlten Material energiereiche Elektronen und Positronen. Beim Durchgang der elektrisch geladenen Teilchen (Alpha- und Beta-Teilchen, Elektronen und Positronen) durch Materie wird die kinetische Energie der Teilchen diskontinuierlich in vielen Teilbeträgen auf die Materie übertragen. Es kommt dabei zur Ionisation und Anregung von Atomen und Molekülen und als deren Folge zur Radikalbildung. Die Dichte dieser Ionisations- und Anregungsereignisse längs der Teilchenbahn hängt von Strahlenart und Strahlenenergie ab. Man unterscheidet daher locker ionisierende Strahlungen (z. B. Beta- und Gamma-Strahlung) und dicht ionisierende Strahlung (z. B. Alpha-Teilchen). Die in Wasser als Referenzmaterial längs eines kurzen Teilstücks der Teilchenbahn durch Ionisation und Anregung auf die Materie übertragene Energie, dividiert durch die Länge dieses Wegstückes, wird als linearer Energietransfer (LET) bezeichnet.

Da Ionisations- und Anregungsprozesse zu molekularen Veränderungen führen, die den Ausgangspunkt für die Entwicklung biologischer Strahlenwirkungen bilden, bezieht sich der für ionisierende Strahlungen geltende Dosisbegriff auf die Energiedeposition in Materie durch Ionisation und Anregung. Die Energiedosis ist definiert als die in einem kleinen Volumenelement auf die Materie übertragene Energie, dividiert durch die Masse in diesem Volumenelement. Die verwendete Doseinheit ist das Gray (Gy), es entspricht einer Energieabsorption von einem Joule pro Kilogramm, z. B. einem Kilogramm Gewebe. Früher wurde für die Energiedosis das Rad (rd) als Doseinheit benutzt; 1 Gy ist gleich 100 rd. Zur quantitativen Dosisangabe bei strahlenbiologischen Dosiswirkungsbeziehungen dient die Energiedosis.

Schon relativ frühzeitig wurde allerdings erkannt, daß das Ausmaß einer biologischen Strahlenwirkung nicht alleine von der Energiedosis abhängt. Beim Vergleich verschiedener Strahlenarten miteinander zeigte sich, daß ionisierende Strahlen mit hohem LET (dicht ionisierende Strahlen, z. B. Alpha-Teilchen) wesentlich wirksamer sein können als ionisierende Strahlen mit niedrigem LET (locker ionisierende Strahlen, z. B. Beta- und Gamma-Strahlung) bei gleicher Energiedosis. Dies gilt für die einzelnen biologischen Effekte in unterschiedlichem Maße. Für die Abschätzung von

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

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

$$H = Q \cdot D.$$

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

Zur Festlegung der Bewertungsfaktoren für die einzelnen Strahlenqualitäten sind experimentelle biologische Daten und klinische Erfahrungen zusammengefaßt worden. Um einen exakten Vergleich der biologischen Wirkungen bei verschiedenen Strahlenqualitäten vorzunehmen, wird zunächst die relative biologische Wirksamkeit (RBW) bestimmt. Die RBW ist definiert als der Quotient aus der Energiedosis einer Referenzstrahlung ( $D_{\text{Ref}}$ ) und der Energiedosis der zu untersuchenden Strahlenqualität ( $D_{\text{Test}}$ ), 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 Ermittlung der Äquivalentdosis festgelegt. Sie beziehen sich



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

der Strahlung und die physikalischen Halbwertszeiten der Radionuklide ein.

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

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

Die Konzentration der Ionisations- und Anregungsprozesse ionisierender Teilchen auf den Nahbereich der Teilchenbahnen (s. Kennzeichnung der Strahlenqualität durch den linearen Energietransfer) hat bei mikroskopischer Betrachtungsweise auch die Bedeutung einer von Zelle zu Zelle statistisch variierenden Anzahl der Teilchendurchgänge; die Energiedosis gibt nur den räumlichen Mittelwert der massebezogenen Energiedeposition an. Bei einer Energiedosis von  $10 \text{ mGy}$  erfährt z. B. nur einer unter ca. 40 Zellkernen des Querschnitts  $60 \mu\text{m}^2$  den Durchgang eines Alpha-Teilchens der Anfangsenergie  $5 \text{ MeV}$ . Erst bei wesentlich höheren Dosen — für Alpha-Teilchen bei etwa  $50 \text{ mGy}$  — kommt es ebensooft vor, daß ein Zellkern von einem bzw. von zwei oder mehr Alpha-Teilchen getroffen wird, aber auch bei dieser Dosis ereignet sich in etwa 30% aller Zellkerne kein Teilchendurchgang. Bei locker ionisierender Strahlung erfahren in diesem Dosisbereich bereits alle Zellkerne eine annähernd gleiche Anzahl von Teilchendurchgängen.

Mit abnehmender Dosis kommt man also in einen Bereich, in dem nicht mehr alle, sondern nur noch einzelne Zellen und Zellkerne (Durchmesser des Kernes einer menschlichen Zelle: etwa  $8 \mu\text{m}$ ) von einem Teilchendurchgang betroffen werden. Die Zahl der dann noch getroffenen Zellkerne nimmt bei weiterer Erniedrigung der Strahlendosis proportional zu dieser ab. Der Dosisbereich, in dem diese inhomogene Ver-

teilung der Teilchendurchgänge aufzutreten beginnt, ist von der Strahlenqualität abhängig. Bei Strahlung mit niedrigem LET liegt er tiefer als bei Strahlung mit hohem LET. So tritt dieses Phänomen bei Röntgen- und Gamma-Strahlung im Dosisbereich unterhalb etwa 3 mGy und bei 14 MeV Neutronen unterhalb etwa 50 mGy auf. Bei Alpha-Strahlung (z. B. nach Zerfall von Pu 239) erstreckt sich der Bereich der vereinzelt Teilchendurchgänge zu noch höheren Dosen. Bei inkorporierten Radionukliden, die an Partikel (Aerosole) gebunden sind oder in Zellen durch Phagozytose akkumuliert sind, kann in der unmittelbaren Nachbarschaft eine zusätzliche Inhomogenität der mikroskopischen Dosisverteilung auftreten. Diese Bedingungen sind bei Radionukliden, die bei ihrem Zerfall Alpha-Teilchen emittieren, von besonderer Relevanz (hot particles).

### 3. Stochastische und deterministische Strahlenwirkung

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

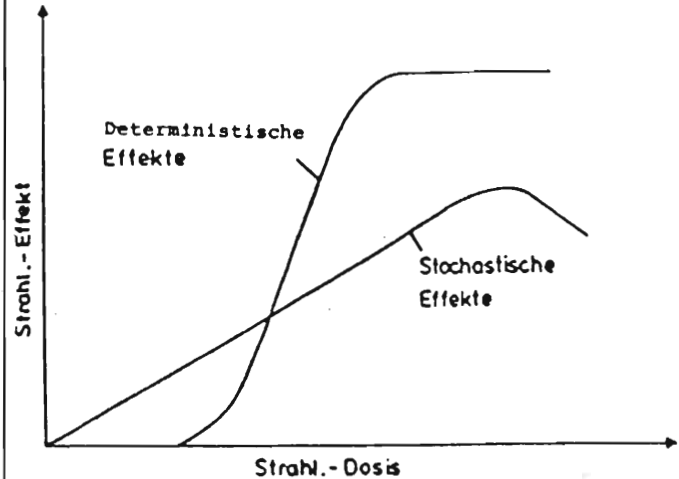
Bei einem zweiten Typ von Strahlenwirkungen, den stochastischen Effekten, wird davon ausgegangen, daß keine Schwellendosis besteht und daß die Wahrscheinlichkeit des Eintretens mit steigender Strahlendosis zunimmt. Auch bei kleinen Strahlendosen können also noch Wirkungen auftreten, wenn auch mit geringerer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

Zu dieser Kategorie von Strahlenwirkungen zählen die Induktion von vererbaren Defekten und von malignen Erkrankungen (Leukämie und Krebs). Man geht davon aus, daß es sich hier um unizelluläre Prozesse handelt. Bei den vererbaren Defekten muß nur eine Keimzelle geschädigt werden, damit es nach deren Beteiligung an einer erfolgreichen Befruchtung

zu einer Mutation in der Folgegeneration kommt. Bei der Induktion von Leukämie und Krebs wird angenommen, daß die maligne Transformation einer Zelle ausreichend ist, um eine derartige Erkrankung zu verursachen. Man geht also davon aus, daß Leukämie oder Krebs mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch eine einzige maligne transformierte Zelle hervorgerufen werden kann (monoklonales Wachstum).

Abbildung 1

#### Schematische Darstellung der Dosiswirkungsbeziehungen für stochastische und deterministische Effekte



### 4. Genetisch vererbare Defekte

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

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

Die Versuchsergebnisse an Mäusen sind in überwiegender Maße nach Strahlendosen im Bereich von 1 Gy und höher gewonnen worden, im allgemeinen hat eine Bestrahlung mit hoher Dosisleistung stattgefunden. Um diese Versuchsergebnisse für die Abschätzung des Strahlenrisikos beim Menschen verwenden zu können, sind zwei Annahmen notwendig:

1. Bei locker ionisierenden Strahlen und relativ kleinen Dosen und Dosisleistungen besteht zwischen Dosis und Zahl der induzierten Mutationen eine lineare Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellenwert. Diese Form der Dosiswirkungsbeziehung ist bereits bei den stochastischen Strahlenwirkungen besprochen worden.
2. Die Mutationshäufigkeit in Keimzellen des Menschen und der Maus ist nach identischen Bestrahlungsbedingungen und Strahlendosen etwa gleich groß.

Aufgrund der vorhandenen Erkenntnisse über den Wirkungsmechanismus ionisierender Strahlung und der Entstehung der Mutationen in Keimzellen, die zu vererbaren Defekten führen, steht es in der wissenschaftlichen Diskussion heute weitgehend außer Zweifel, daß eine Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwellendosis existiert und damit auch bei niedrigen Dosen und niedriger Dosisleistung mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit Mutationen auftreten können. Es ist gezeigt worden, daß bei einer chronischen Bestrahlung über 300 Tage mit Gamma-Strahlen und einer Dosisleistung von 0,01 Gy pro Tag, ebenso wie nach einer fraktionierten Bestrahlung von 0,1 Gy pro Tag über 60 Tage, Mutationen bei Mäusen induziert werden können.

## 5. Induktion von Leukämie und Krebs

Während für die Abschätzung des genetischen Strahlenrisikos keine ausreichenden Erfahrungen beim Menschen vorliegen, kann man für die Abschätzung des Leukämie- und Krebsrisikos auf eine Vielzahl von Daten aus epidemiologischen Untersuchungen beim Menschen zurückgreifen. In Betracht kommen hierfür vor allem Untersuchungen an

- Überlebenden nach den Atombombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki,
- Personen nach beruflichen Strahlenexpositionen,
- Patienten mit medizinischen Strahlenexpositionen.

Da eine strahlenbedingte maligne Erkrankung sich nicht von einer „spontanen“ malignen Erkrankung unterscheidet, können Leukämie oder Krebs im Einzelfall nicht allein aufgrund ihrer Erscheinungsform oder ihres klinischen Verlaufes als strahlenbedingte Erkrankung erkannt werden. Nur epidemiologisch-statistische Untersuchungen können dazu beitragen, quantitative Daten für die Risikoabschätzung beim Menschen zu erhalten. Strahlenexponierte Personengruppen müssen dabei nicht-exponierten Personengruppen gegenübergestellt werden. Dann kann

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

Erschwert werden diese Untersuchungen dadurch, daß die Erkrankungen mit einer erheblichen Latenzzeit (5—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

eingatmeten 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.

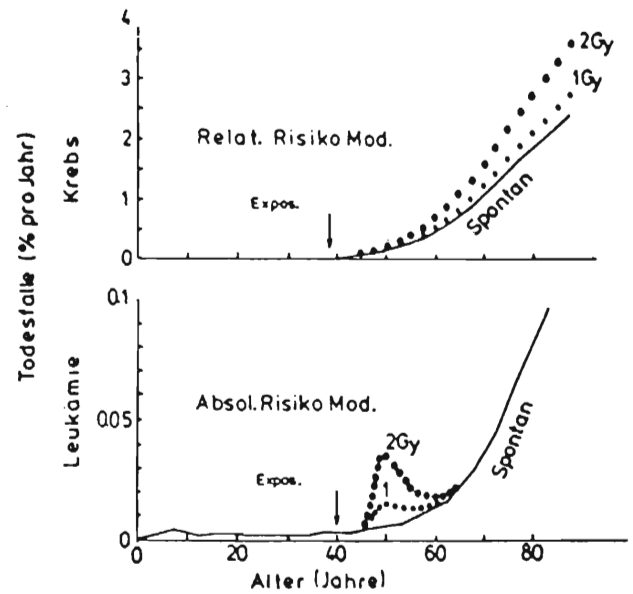
## 6. Risikoabschätzung

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 (Abb. A-2). Offensichtlich haben sich dann alle strahlenbedingten Erkrankungen manifestiert. Beim relativen Risikomodell liegt die Rate an malignen Erkrankungen in der bestrahlten Personengruppe ebenfalls nach einer Latenzzeit über der „spontanen“ Rate, aber diese Erhöhung bleibt bis zum Lebensende erhalten. Das „relative Risiko“, d. h. die relative Zunahme der strahlenbedingten Rate im Vergleich zur „spontanen“ Rate, wird dabei als über die Lebenszeit konstant angenommen (Abb. A-2). Das bedeutet, daß auch die strahlenbedingten Tumoren vorwiegend erst in einem Alter beobachtet werden, in dem die „spontanen“ Tumoren ohne Bestrahlung manifest werden. Die Abschätzung des strahlenbedingten Krebsrisikos auf der Basis des relativen Risikomodells stellt eine 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  $\mu$ Sv/a) von Bedeutung sind, müssen daher die Strahlenrisiken durch rechnerische Extrapolation, ausgehend von diesen höheren Strahlendosen, ermittelt werden. Ferner sind die statistisch signifikanten epidemiologischen Daten der Leukämie- und Krebserhöhung nicht nur nach Exposition mit hohen Strahlendosen, sondern häufig auch nach Bestrahlung mit hoher Dosisleistung erhalten worden. Da die Exposition am Arbeitsplatz und in noch stärkerem Maße in der Umwelt bei niedriger Dosisleistung stattfindet, ergeben sich hier zusätzliche Schwierigkeiten bei der Extrapolation zur Ermittlung der Risikoeffizienten.

Abbildung 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 Risikoeffizienten 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 Risikoeffizienten, die im Bereich von 200 bis 1 000 Todesfällen durch Leukämie und Krebs nach Ganzkörperexposition einer Million Menschen mit 10 mSv (1 rem) liegen (Risikoeffizient:  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  bis  $1 \cdot 10^{-1}$  pro Sv). Bei Berücksichtigung dieses Bereiches des Risikoeffizienten ergibt eine Strahlendosis von 10 mSv eine Erhöhung der Leukämie- und Krebstodesrate, die im Bereich von einem bis einigen Promille der „spontanen“ Leukämie- und Krebstodesrate unserer Bevölkerung liegt. Die Exposition der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen der Bundesre-

publik Deutschland liegt beim bestimmungsgemäßen Betrieb einschließlich von Auslegungsfällen im Bereich von einigen 10  $\mu\text{Sv}$ . Es müssen also Extrapolationen über mehrere Größenordnungen der Dosis (etwa um den Faktor 10<sup>4</sup>) 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 Studien<sup>1)</sup> zum Thema „Kindliche Leukämie in der Umgebung Kerntechnischer Anlagen“ durchgeführt. Die Breite des Schätzintervalls für den Risikoeffizienten spiegelt die in den Abschätzungen liegende Ungenauigkeit nur bedingt wider. Sie ergibt sich u. a. daraus, daß die neueren Untersuchungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe in Japan zu höheren Risikofaktoren führen. Die höheren Risikofaktoren bei der japanischen Population ergeben sich aus drei Gründen:

1. Neue Rechnungen zur Dosimetrie nach den Atombombenexplosionen haben zu neuen Dosisabschätzungen geführt.
2. In den letzten Jahren sind neue Daten zu den Leukämie- und Krebsraten erhoben worden. Es sind vor allem neue Erkrankungen bzw. Todesfälle bei den im jungen Alter exponierten Personen beobachtet worden.
3. Diese Befunde haben zu dem Konzept des relativen Risikos geführt. Damit wird das Strahlenrisiko für die noch lebenden exponierten Personen in die Zukunft projiziert. Die noch zu erwartenden Krebstodesfälle werden mit Hilfe der Altersabhängigkeit des Krebsrisikos nicht exponierter Personen unter Annahme eines zeitlich konstanten strahlenbedingten relativen Risiko 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.

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

## 7. Effektive Dosis<sup>2)</sup>

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.

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

**B. Erläuterung der benutzten Fachausdrücke**

Aerosol	Gase mit festen oder flüssigen Schwebeteilchen
Aktivität	Anzahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne eines radioaktiven Stoffes
Alphastrahler	Radionuklide, die Alphateilchen (Heliumatomkerne) aussenden
Äquivalentdosis	Produkt aus Energiedosis und einem u. a. von der Strahlenart abhängigen Bewertungsfaktor. Die Äquivalentdosis ist das Maß für die Wirkung einer ionisierenden Strahlung auf den Menschen
Becquerel	SI-Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel (Bq) liegt vor, wenn 1 Atomkern je Sekunde zerfällt. 1 Becquerel (Bq) = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Curie
Betastrahlung	Teilchenstrahlung, die aus beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Elektronen besteht
Betasubmersion	Strahlenexposition durch Betastrahlung von radioaktiven Stoffen in der Atmosphäre
Curie	Alte Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Curie (Ci) liegt vor, wenn 37 Mrd. Atomkerne je Sekunde zerfallen. 1 Curie (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Becquerel
Dekontamination	Beseitigung oder Verminderung von radioaktiven Verunreinigungen
Deterministisch	nicht-stochastisch; deterministische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Schwere des Schadens mit der Dosis variiert und ein Schwellenwert bestehen kann, z. B. Hautrötung, Augenlinsentrübung (siehe auch stochastisch)
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 Gray (Gy) = 100 Rad
Ingestion	Allgemein: Nahrungsaufnahme Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Nahrung
Inhalation	Allgemein: Einatmung von Gasen Speziell: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Atemluft
Inkorporation	Allgemein: Aufnahme in den Körper Speziell: Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper
Ionisierende Strahlen	Elektromagnetische- oder Teilchenstrahlen, welche die Bildung von Ionen bewirken können (z. B. Alphastrahlen, Betastrahlen, Gammastrahlen, Röntgenstrahlen)

Isotop	Abart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl
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 $\mu\text{C}/\text{kg}$
SI-Einheiten	Einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI). Die Anwendung der Einheiten im Strahlenschutzmeßwesen ist durch die Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 13. Dezember 1985 (BGBl. I S. 2272) geregelt
Sievert	SI-Einheit der Äquivalentdosis. 1 Sievert (Sv) = 100 Rem, 1 Sievert = 1 000 Millisievert = 1 000 000 Mikrosievert
Somatisches Strahlenrisiko	Risiko der körperlichen Schädigung der von der Bestrahlung betroffenen Person, zur Unterscheidung vom genetischen Risiko, das für die Schädigung der Folgegenerationen besteht
Stochastisch	zufallsbedingt; stochastische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens mit der Dosis variiert, nicht jedoch deren Schwere (siehe auch deterministisch)
Strahlenbelastung	Siehe Strahlenexposition
Strahlenexposition	Einwirkung ionisierender Strahlen auf den menschlichen Körper oder seine Teile
Terrestrische Strahlung	Strahlung der natürlich radioaktiven Stoffe, die überall auf der Erde vorhanden sind
Tritium	Radioaktives Isotop des Wasserstoffs, das Betastrahlung sehr niedriger Energie aussendet
Zentralwert	Mittelwert, unterhalb dessen ebensoviel kleinere Werte wie oberhalb größere Werte liegen

