



KfK 3462
Dezember 1982

Biologische Wirkungen von Radium

E. Drosselmeyer
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit

KfK 3462

Biologische Wirkungen von Radium

E. Drosselmeyer

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Im Mittelpunkt der vorliegenden Literaturstudie steht die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der Strahlenbelastung des menschlichen Körpers durch Radium einerseits und der Entstehung von Krankheiten, insbesondere bestimmten Krebserkrankungen, andererseits.

Nach einer historischen Betrachtung der ersten Erfahrungen mit Radium im Menschen werden die Kenntnisse über einige größere Personengruppen zusammengetragen, die einer besonderen Radium-Belastung ausgesetzt waren, dadurch zu Schaden kamen und systematisch untersucht wurden. Dazu gehören Bergleute in Edelmetall- und Uran-Minen, amerikanische Zifferblattmalerinnen und einige Patientengruppen z. B. in der Frauen- und Kinderheilkunde, die mit Radium-haltigen Medikamenten (gegen andere Krankheiten) behandelt wurden.

Hieran schließt sich eine Darstellung des medizinisch-technischen Umgangs mit Radium an. Weiter wird dann zusammengefaßt, wo und in welchen Mengen Radium in der natürlichen Umwelt vorkommt, wie es von dort in den menschlichen Körper gelangt und wie es sich in Bezug auf Retention und Exkretion verhält.

Um den Radium-Metabolismus und die Entstehung von radiumbedingten Erkrankungen besser zu verstehen, wurden zahlreiche Tierversuche unternommen, z. B. an Beagle-Hunden und Nagetieren. Faßt man die so gewonnenen Kenntnisse zusammen, kommt man zu Aussagen über die Dosis-Wirkungs-Beziehung bei der Krebsentstehung.

Es schließt sich eine Darstellung der Überlegungen zur Grenzwertsetzung für die Aufnahme von Radium an. Die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP bezeichnet in ihren Veröffentlichungen Radium-226 als das Radionuklid, über das besonders gute wissenschaftliche Kenntnisse vorliegen und das deswegen bei der Bestimmung abgeleiteter Grenzwerte für andere Radionuklide, wie z. B. Plutonium, zugrundegelegt werden kann.

Der gültige Grenzwert der Ganzkörperbelastung von 0,1 μCi ist im Wesentlichen anerkannt und gilt als hinreichend sicher; die Diskussion über den Qualitätsfaktor für α -Strahlung dauert an.

Schließlich werden in der vorliegenden Arbeit noch die Transferfaktoren für Radium zusammengefaßt, die in der erfaßten Literatur verwendet bzw. berechnet wurden.

Biological Effects of Radium

Abstract

It is evident from a survey of the current literature that a problem exists in finding the correlation between the exposure of the human body to radiation, with the subsequent development of diseases, particularly for certain types of cancer.

A brief history of the early experiences of radium incorporation into humans is given followed by data collected on some important population groups exposed to radium body burden. The groups surveyed include, amongst others, miners in rare metal and uranium mines, American dial painters and some groups of patients, e. g. in gynaecology and paediatry, who were treated with radium against a variety of diseases.

The medical and technical applications of radium are discussed. A summary is also given of the natural occurrence of radium and the amounts in which it is present in the environment. Incorporation, retention and excretion pathways are outlined.

In order to study the metabolism and the induction of diseases by radium several animal studies have been performed, especially with beagles and rodents. As a result, it is possible to comment on the dose-effect relationships involved in carcinogenesis. A resumé of the considerations for limiting radium uptake is given.

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) regards radium-226 as the best known and most studied radionuclide. It can thus serve as a guideline for setting limits for other radionuclides, e. g. plutonium.

The valid limiting value for radium-226 of 0.1 μCi for whole body exposure is generally accepted and regarded as sufficiently safe. Discussion of quality factors for α -radiation is continuing.

Finally, transfer factors have been collected as far as they were available in the literature.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite:</u>
1. Einleitung	1-1
2. Historisches	2-1 - 2-4
3. Erfahrungen mit Radium im Menschen	3-1
3.1 Bergleute	3-1
3.1.1 Schneeberger und Joachimstaler Silbergruben	3-1 - 3-2
3.1.2 Uranminen	3-2 - 3-5
3.2 Zifferblattmalerinnen	3-6
3.2.1 Übersicht	3-6
3.2.2 MIT-Gruppe	3-7 - 3-10
3.2.3 ANL-Gruppe	3-10
3.2.4 Zusammenfassende Studien	3-11 - 3-16
3.2.5 Einzelfälle	3-16 - 3-21
3.3 Radium in der Gynäkologie	3-22 - 3-27
3.4 Thorotrast- und Radium-224-Patienten	3-28 - 3-36
3.5 Medizinisch-technischer Umgang mit Radium	3-37 - 3-46
3.6 Strahlenbelastung durch natürlich vorkommendes Radium	3-47 - 3-63
3.7 Verteilung von Radium im Körper; Vergleich verschiedener Radium-Isotope	3-64
3.7.1 Radium-Aufnahme und Radium-Gehalt	3-64 - 3-71
3.7.2 Radium-Retention und Radium-Exkretion	3-71 - 3-76
4. Tierversuche mit Radium	4-1
4.1 Frühe Tierversuche	4-1
4.2 Neuere Untersuchungen	4-1 - 4-3
4.3 Beagle-Hunde	4-3 - 4-7
4.4 Verschiedene andere Versuchstiere, insbesondere Nagetiere	4-7 - 4-13
4.5 Zusammenfassende Studien	4-13 - 4-17
5. Dosis-Wirkungs-Beziehung bei der Krebsentstehung	5-1 - 5-15
6. Publikationen der ICRP und Grenzwerte für Radium	6-1
6.1 Frühe Grenzwerte	6-1 - 6-2
6.2 ICRP-Grenzwerte	6-2 - 6-19
7. Transferfaktoren	7-1 - 7-15

Danksagung

Glossar

Literaturverzeichnis (nach Kapiteln gegliedert)

1. Einleitung

Im Jahr 1978 wurde von der Hauptabteilung Sicherheit des Kernforschungszentrums Karlsruhe ein Forschungsvorhaben "Radium in der Umgebung eines Uranbergwerks" begonnen. Dabei geht es um die mögliche Strahlenexposition der Bevölkerung durch die Ableitung des Radiums aus dem Uranbergwerk mit dem Abwasser. Bei der Berechnung der Dosisbelastung, die als Folge der Emission radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen für die Bevölkerung in der Umgebung solcher Anlagen auftreten kann, orientiert man sich an der "Allgemeinen Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer" des Bundesministeriums des Innern /Berechnungsgrundlage, 1980/.

Es wurde vermutet, daß eine ungeprüfte Anwendung der "Berechnungsgrundlagen" zu einer so unrealistisch hohen berechneten Dosisbelastung führen könnte, daß die Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung /StrlSchV, 1976/ durch den Uranbergbau scheinbar überschritten würden. Es kam also darauf an, die "Berechnungsgrundlagen" durch Messung der tatsächlichen Konzentrationen von Radionukliden in Wasser, Boden, Pflanzen und Tieren, insbesondere in pflanzlichen und tierischen Nahrungsmitteln, und im Menschen in der Umgebung eines Uranbergwerks zu ergänzen. Dabei interessierte neben realistischen Werten der Transferfaktoren und Verzehrswerten die Frage, ob es eine "kritische Personengruppe" in der Nähe solcher Anlagen gibt. Inzwischen wurden auch die Berechnungsgrundlagen überarbeitet /Berechnungsgrundlage, 1980/.

Als Ergänzung zu einem Meßprogramm /Schüttelkopf, 1979/ wurden in einer Literaturstudie einschlägige Arbeiten aus dem Gebiet der Ökologie des Radiums ausgewertet.

Als Teil dieser Studie faßt die vorliegende Arbeit den Bereich der Wirkungen von Radium im menschlichen Körper zusammen.

2. Historisches

Radium, das schwerste natürliche vorkommende Erdalkalimetall, wurde im Jahr 1898 von Marie Curie entdeckt, und zwar das Isotop Ra-226. Von den heute bekannten 25 Isotopen (Ra-206 bis Ra-230) folgte zunächst Ra-224, das von Rutherford und Soddy 1902 entdeckt wurde, dann Ra-223 und Ra-228 (Entdeckung durch Otto Hahn) /Udovenko, 1973/. Die Halbwertszeiten der 25 Isotope liegen zwischen 10^{-3} Sekunden und 1 600 Jahren. Abb. 2.1 zeigt die natürlichen radioaktiven Familien, in denen diese Ra-Isotope vorkommen. Für die Strahlenexposition des Menschen sind vor allem das Ra-226 und das Ra-228 bzw. Ra-224 (ein Zerfallsprodukt des Ra-228) von Bedeutung, s. Tab. 2.1.

Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahr 1895 wurden schon im Jahr 1902 Versuche gemacht, eine "tolerierbare" Strahlendosis zu definieren. Im Jahr 1911 wurde bereits eine Statistik veröffentlicht, die die Daten für 94 Fälle von strahleninduziertem Krebs zusammenfaßt /Hesse, 1911/.

Das "International Committee on X-Ray and Radium" wurde im Jahr 1928 gegründet, im Jahr 1937 wurde es in "International Commission on Radiological Protection" (ICRP) umbenannt. Aus dieser Namensgebung erhellt, welche hervorragende Rolle das Radium in der Frühzeit der Entdeckung der Radioaktivität spielte.

In den ersten Jahren nach seiner Entdeckung hielt man das Radium für wohltuend für den menschlichen Organismus: "radium has absolutely no toxic effects, is being accepted as harmoniously by the human system as is sunlight by plants" /Field, 1916/.

Im Zuge der wachsenden Kenntnisse über die Wirkung von externer Bestrahlung und von Radium im menschlichen Körper wurde der Grenzwert der Strahlenbelastung für beruflich Strahlenexponierte in den 20er Jahren von 0,2 R/Tag, d. h. einem Hundertstel der Dosis, die in 30 Tagen zu einer Rötung der Haut führt, und etwas später dann 0,1 R/Tag auf 300 mrem/Woche für Organe 5 cm im Gewebe und 600 mrem/Woche für die Haut in den 50er Jahren auf den heute von der ICRP zugelassenen Wert von 5 rem/Jahr für kritische Organe und 15 rem/Jahr für andere Organe herabgesetzt. 15 rem/Jahr entspricht 300 mrem/Woche. Der ICRP-Wert für Radium ist heute 0,1 μ Ci. Die Strahlenschutzverordnung erlaubt die in Tab. 2.1 angegebenen Grenzwerte /StrlSchV, 1976/.

Da Radium nach seiner Entdeckung zunächst zur Therapie von Gicht, chronischer Arthritis, verschiedenen Krebsarten und Leukämie u. v. a. m. in Form von Bädern und Heilwässern verwendet wurde, lag es nahe, seine Einwirkung auf den menschlichen und tierischen Stoffwechsel zu untersuchen. Dabei wurden nach heutigen Maßstäben erstaunlich hohe Dosen verwendet, z. B. intravenöse Injektionen von 100 µg, lokale Applikationen von 16 und sogar 70 mg /Rosenbloom, 1923/. In den 20er Jahren gab es die ersten Untersuchungen über die Verteilung von Radium im menschlichen Körper an Patienten, die im Labor oder als Zifferblattmalerinnen Opfer ihres Umgangs mit dem neu entdeckten Element geworden waren. Die Messgenauigkeit betrug damals 10^{-12} g Ra; wenn das Radium im menschlichen Körper verteilt war, betrug sie allerdings nur 1 µg. Die Methode, den Radiumgehalt mittels des Radon in der ausgeatmeten Luft zu bestimmen, wurde mit verschiedenen anderen Methoden verglichen. Der höchste Meßwert lag bei 126 µg, der niedrigste bei 2,5 µg Ra im Körper /Schlundt, 1929/.

Isotop	Halbwertszeit	Zerfallsart	Energie	Freigrenze*		Luft* (Ingestion)		Wasser und Nahrung* (Ingestion)	
				(1/s)	(Ci)	(1/s)	(Ci)	(1/s)	(Ci)
Ra-223	11,43 d	α	5,72 u. 5,61 MeV	$3,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^2$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
Ra-224	3,66 d	α	5,69 MeV	$3,7 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Ra-226	1600 a	α	4,78 MeV	$3,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^1$	$4,3 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^1$	$5,8 \cdot 10^{-10}$
Ra-228	5,75 a	β	0,05 MeV	$3,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^1$	$5,7 \cdot 10^{-10}$	$4,9 \cdot 10^1$	$1,3 \cdot 10^{-9}$

Tab. 2.1: Wichtige Ra-Isotope

*Freigrenzen und Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr nach StrlSchV von 1976, s. auch Abschnitt 6

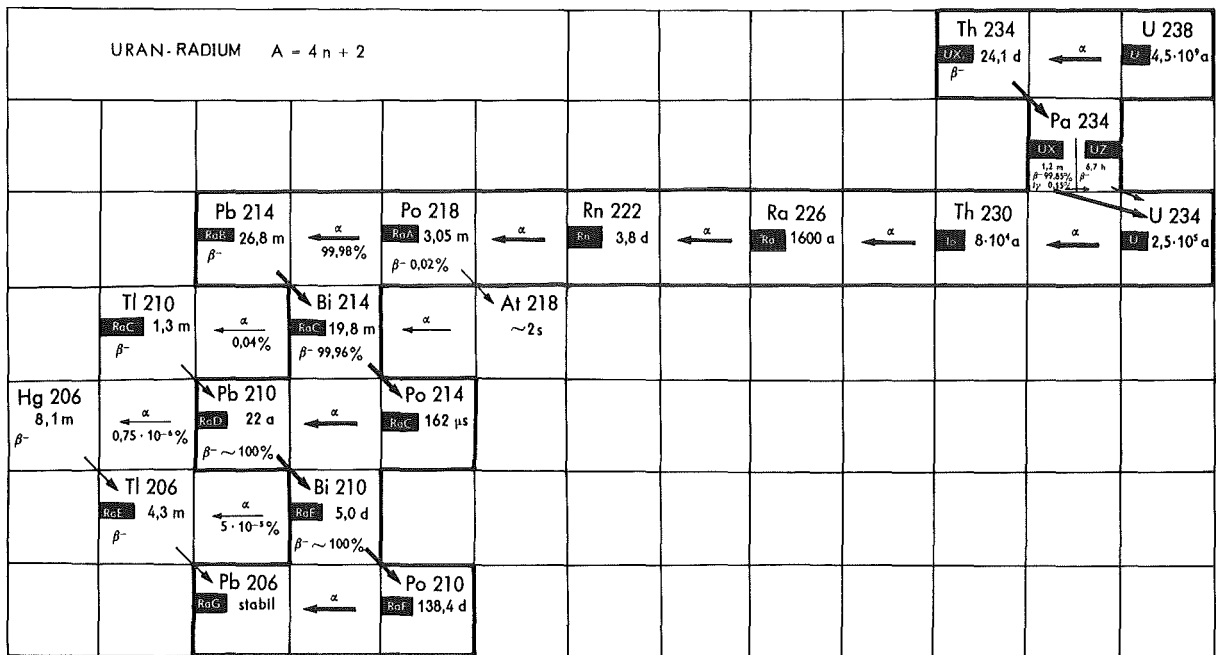
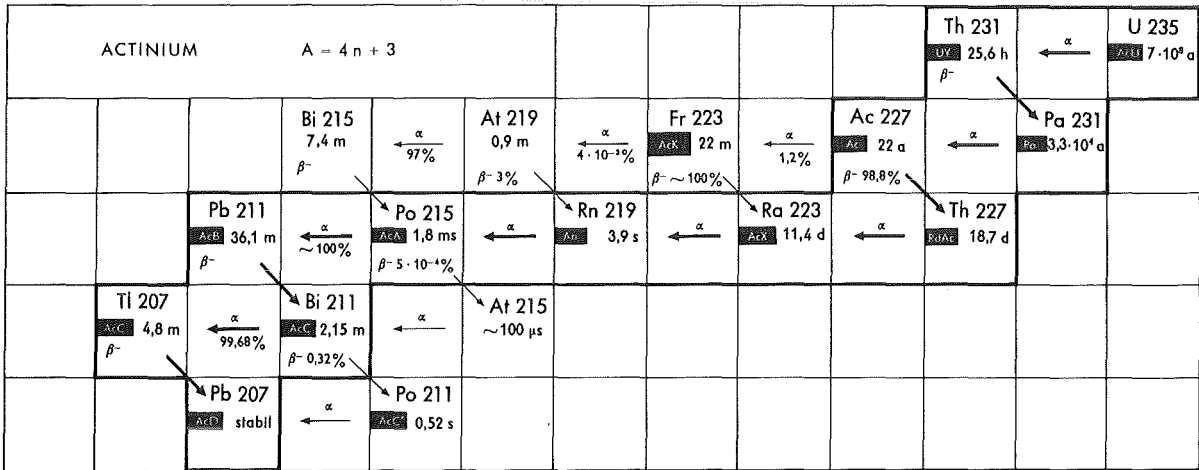
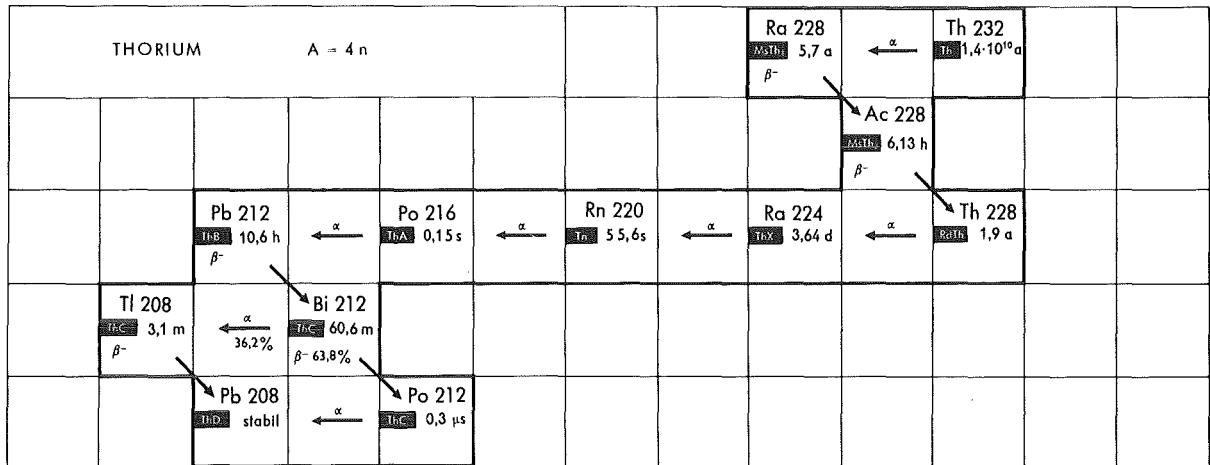


Abb. 2.1: Natürlich radioaktive Familien

3. Erfahrungen mit Radium im Menschen

Die wichtigsten Schäden durch inkorporierte knochensuchende Radionuklide sind Knochenentzündung, gestörtes Knochenwachstum, Myelofibrose und Knochentumoren.* Die Schäden hängen von der Lokalisation der bestrahlten Stellen, der Art der Strahlung und der Dosis ab.

Radiumschäden kennt man vor allem bei Zifferblattmalerinnen, Radiochemikern und Patienten, die früher oral (Aufnahme durch den Mund) oder parenteral (unter Umgehung des Magen-Darmtrakts) mit Radium behandelt wurden. Es gibt kaum eine toxische Substanz, die so sorgfältig wie Radium untersucht worden ist, zunächst an Menschen (!), später auch an Versuchstieren /Warren, 1975/.

Wegen des hohen Anteils von Alpha-Strahlung verursacht Radium im Knochenmark kaum Leukämie, Anämie, andere Mißbildungen oder Fehlfunktionen, sondern die Zellen werden eher getötet. Die ersten Anzeichen der Knochenschäden sind meist Schmerzen, später zeigt sich eine Verdünnung (Rarefizierung) des Knochens, oft verknüpft mit einer Verdichtung in anderen Bereichen. Es kommt zu unkontrollierter Knochenneubildung. Andererseits kommt es häufig zu spontanen Brüchen, vor allem in den langen Knochen der Gliedmaßen. Außerdem wird durch Verletzungen der Blutkreislauf gestört, woraus Infektionen folgen. Besonders empfindlich ist der Kiefer mit seinen Hohlräumen, in denen sich Radon ansammeln kann. Die entstehende hohe lokale Dosis führt zur Tumorentwicklung.

3.1 Bergleute

3.1.1 Schneeberger und Joachimstaler Silbergruben

Das Folgende ist aus historischen Gründen interessant:
Seit mehr als 400 Jahren weiß man von einer die Bergleute des sächsischen Silbergrubenreviers befallenden Krankheit, die man nach dessen Zentrum die "Schneeberger Bergkrankheit" nennt. Seit dieser Zeit sind die Erscheinungsformen, unter denen die Bergleute nach 6 bis 15 Jahren Aufenthalt im Berg erkrankten und bald starben, bekannt. Statistische Ermittlungen ergaben, daß 60 - 80 % der Bergleute von der Krankheit befallen wurden. Erkannt wurde die Krankheit vor ungefähr 100 Jahren, als Härting und Hesse erstmals ein malignes Wachstum von Lungenzellen feststellten /Härting, 1879/. In den 20er Jahren wurden erstmals durch Löwy u. a. systematische Sektionen an den verstorbenen Bergleuten des St. Joachimstaler Reviers auf der böhmischen Seite des Erzgebirges durchgeführt. Der histologisch-

*Weniger bekannte medizinische Fachausdrücke sind im Glossar im Anhang erläutert.

pathologische Befund ergab in der überwiegenden Zahl der Fälle Lungenkrebs als Todesursache; derselbe Befund ergab sich auch bei den Bergleuten der Schneeberger Gruben. Es handelte sich aber offenbar nicht um die von anderen Grubengebieten her bekannte Silikose. Als Ursache wurde schließlich das gehäufte Vorkommen verhältnismäßig hochaktiver Erze, z. B. in Form von Pechblendengängen, und damit die Radioaktivität des Grubenklimas festgestellt. Unklar war, ob der durch Radium verseuchte Staub, der durch Einatmen in die Lunge kommt, oder die durch Radon angereicherte Atmungsluft die entscheidende Komponente war /Löwy, 1929; Löwy, 1931; Rostocki, 1923; Rostocki, 1926/.

Umfangreiche Messungen und Untersuchungen an Bergleuten und Versuchstieren in den Jahren 1937 bis 1944 ergaben, daß für die Entstehung des Schneeberger Lungenkrebses dem durch Inhalation aufgenommenen Radon die größere Bedeutung zukommt. Der Wunsch, weiteren Erkrankungen vorzubeugen, führte zwangsläufig auf die Frage nach der Toleranzgrenze für die Rn-Konzentration in der Atemluft.

Aus Tierversuchen, Radiumvergiftungsfällen und Versuchen in vitro über die Beeinflussung des Gewebestoffwechsels wurde ein Wert von 3 bis 30 M.E.* festgelegt /Rajewsky, 1939/.

In den Gruben waren Werte zwischen 0 und 150 M.E. gemessen worden. Eine toxische Wirkung der Radium-Emanation wurde bis zu Werten von $1,35 \times 10^{-9}$ M.E. hinunter festgestellt. Die Untersuchungen im Joachimstaler Gebiet werden fortgesetzt und mit denen an amerikanischen Minenarbeitern verglichen, wobei recht gute Übereinstimmung der epidemiologischen Ergebnisse erzielt wurden /Lundin, 1971; Archer, 1973; Ševc, 1976; Kunz, 1978/.

3.1.2 Uranminen

Die mögliche Radiumbelastung der Umgebung durch die Arbeit in Uranminen war der Anlaß dieser Literaturstudie.

In einer Uranmine im Südschwarzwald wurden die Ra-226-Emissionen gemessen /Schüttelkopf, 1979/. Außerdem wurde in dieser Arbeit die mögliche Dosisbelastung der Bevölkerung berechnet, nachdem die Transferfaktoren für die wichtigsten Transportprozesse des Radiums aus der Uranmine in die Biosphäre ermittelt wurden.

*1 M.E. (Mache-Einheit) $\approx 3,64 \times 10^{-10}$ C (alte Curie)/l

Das Problem der Strahlenbelastung der Arbeiter in solchen Gruben hat so große Bedeutung, daß die internationale Strahlenschutzkommission ICRP eine eigene Publikation mit dem Titel "Strahlenschutz in Uran- und anderen Bergwerken" herausgegeben hat, siehe auch Kapitel 6 / ICRP 24/. Wie schon oben ausgeführt, handelt es sich hier im wesentlichen um Einwirkung des Radiumtochterproduktes Radon.

Eine indische Arbeit /Markose, 1978/ befaßt sich mit der Ausbreitung von Radium - und chemischen Giftstoffen - in der Umgebung einer Industrieanlage, in der Uran abgebaut und verarbeitet wird.

Eine Analyse der Abwässer ergab, daß nur etwa 0,5 - 1,5 % des Radiuminventars beim Spülen des Erzes gelöst wird. Die Konzentration im Wasser, das aus der Grube in ein Speicherbecken geleitet wird, beträgt im Mittel 160 pCi/l. Die Wässer, die aus der Anlage in die Umgebung kommen, enthalten ungefähr 26 pCi/l.

Tab. 3.1 zeigt die Radiumkonzentrationen in verschiedenen Gewässern im Bereich der Urananlage, Tab. 3.2 zeigt die Radiumkonzentrationen in den Sedimenten. Die Quellwässer in der Umgebung haben Radiumkonzentrationen zwischen 0,16 und 0,65 pCi/l.

O r t	Entfernung vom Abwasserbecken (km)	Radium (pCi/l)	
		Mittelwert	Fehlerbreite
Jurinala-Fluß	stromaufwärts	0,5	1,5
Abwasserbeckenabfluß: J1		45,0	2,7
Hauptabwasserstrom: J2		23,5	1,9
Minenabwasser: J3		25,5	1,9
Fluß 1: J1 gemischt mit Jurinala-Flußwasser	0,05	42,5	2,9
zusätzlich J2 + J3	1,5	22,5	3,9
Fluß 2: Zusammenfluß von Gara nala und Jurinala	2,5	9,2	2,5
Fluß 2	3,2	2,9	3,3
Fluß 2	4,0	1,1	2,1
Jurinala + Fluß 2: J5	6,0	0,6	1,7

Tab. 3.1: Bewegung und Verdünnung von Abwässern

O r t	Radium (pCi/g)	Konzentrationsfaktor für Radium pCi/g / pCi/ml
Sediment im Abwasserbecken	210,0	$2,9 \times 10^3$
Stichproben bis 1,5 km in Fluß 1 (s. Tab. 3.1)	268,5	$11,9 \times 10^3$
Fluß 1 bei 2,5 km	55,1	$6,7 \times 10^3$
Stichproben in Fluß 2 (s. Tab. 3.1) von 2,5-3,0 km	21,2	$7,3 \times 10^3$
Flußbett stromabwärts	3,2	$5,4 \times 10^3$

Tab. 3.2: Radium in Sedimenten

Art der Proben	Radium (pCi/g)	Konzentrationsfaktor
Algen, Vergleichsproben	0,03	$0,04 \times 10^3$
Algen im Abwasser	46	$1,8 \times 10^3$
Algen im Abwasserbecken	120	$2,8 \times 10^3$
Fisch im Abwasser		
Gräten	1,4	$0,05 \times 10^3$
Fleisch	0,08	$0,003 \times 10^3$
Fisch im Abwasser		
Gräten	0,98	$0,039 \times 10^3$
Fleisch	0,16	$0,006 \times 10^3$
Fisch im Abwasser		
Gräten	0,01	$0,04 \times 10^3$
Fleisch	0,20	$0,008 \times 10^3$
Reis von einem nicht kontaminierten Feld	0,002	
Reis von einem kontaminierten Feld	0,027	

Tab. 3.3: Anreicherung in verschiedenen Produkten

Besonders interessant ist natürlich der Transfer in menschliche Nahrung aus der Umgebung solcher Minen. Radium wird in Algen um einen Faktor 1000 - 2000 angereichert. Auch Fische reichern Radium an. Ebenso fand sich Radium in Reis, der mit radiumhaltigem Wasser bewässert worden war. Tab. 3.3 zeigt die Radiumkonzentrationen in Algen, Fischen und Reis und die entsprechenden Konzentrationsfaktoren.

Bei einem Radon-"Workshop" des Health and Safety Laboratory der US-ERDA (Energy Research and Development Administration) ging Nelson auf die Bedingungen für Einflüsse radioaktiver Isotope auf die menschliche Gesundheit ein /Nelson, 1977/. Diese Arbeit nimmt auch Bezug auf Untersuchungen über die Ursachen von Lungenkrebs bei Uranminenarbeitern /Wagoner, 1965/; die Kenntnisse über die Entstehung von Lungenkrebs beim Menschen basieren überwiegend auf solchen Untersuchungen und werden durch Tierexperimente ergänzt. Beide Arbeiten enthalten weitere Literaturhinweise. In den USA wurde 1972 das absolute Risiko für Uranminenarbeiter, bei einer kollektiven Dosis von 10^6 rem/a an Lungenkrebs zu erkranken, als ein zusätzlicher Fall abgeschätzt /Ellett, 1977/.

1976 wurde ein NAS-Bericht über den Einfluß α -emittierender Teilchen im Atemtrakt auf die Gesundheit veröffentlicht, der die Abschätzung von 1972 als um den Faktor 2 zu niedrig bezeichnet.

Andere Arbeiten bestätigen das höhere Risiko durch Inhalation von Rn-Tochterprodukten /Jacobi, 1975; Šecv, 1973/, wohingegen eine schwedische Studie an Eisenerzbergarbeitern zu abweichenden Ergebnissen kommt /Snihs, 1975/. Die Untersuchungen in all diesen Gruppen gehen weiter; eine abschließende Antwort auf die Frage nach dem Risiko ist noch nicht möglich.

Die auftretenden Unterschiede sind u. U. unter Zuhilfenahme eines Modells zu erklären, das die Dosis-Zeit-Verhältnisse bei der Entstehung von Krebserkrankungen berücksichtigt und zwischen hohen und niedrigen Jahresdosen differenziert /Blair, 1969/. In dieser Arbeit wird auch eine Methode zur nachträglichen Bestimmung der Strahlenbelastung durch Messung des im Knochen abgelagerten Pb-210 beschrieben.

Im Jahre 1967 hat der amerikanische "Federal Radiation Council"* einen revidierten Bericht zur Kontrolle der Strahlengefahren in Uranminen herausgebracht /FRC, 1967/. Diese Richtlinien sollen weiter vervollständigt und ständig neu überarbeitet werden.

*Bundesbehörde für Strahlenschutz

3.2 Zifferblattmalerinnen

3.2.1 Übersicht

Die Erfahrungen mit der Wirkung von Radium im menschlichen Körper konzentrieren sich im wesentlichen auf

- Knochensarkome
- Karzinome der Nebenhöhlen und des Mastoids (Warzenfortsatz im Ohr)
- seltene Fälle von Leukämie und fehlerhafter Blutzusammensetzung.

In den USA wurden zwei große Studien solcher Fälle am Massachusetts Institute of Technology (MIT) und am Argonne National Laboratory (ANL) zusammen mit dem Argonne Cancer Research Hospital*(ACRH) durchgeführt. Die Fälle, in denen Personen unabsichtlich einer Strahlung ausgesetzt waren, sind sehr sorgfältig untersucht worden. Natürlich haben diese Fälle gegenüber planmäßig vorbereiteten Experimenten, z. B. mit Versuchstieren, zahlreiche Nachteile, die es schwierig machen, z. B. eine genaue Dosis-Wirkungs-Beziehung aufzustellen. Unter den Gruppen von Menschen, die durch Radium zu Schaden gekommen sind, lassen sich 5 Hauptgruppen ausmachen:

1. die MIT-Gruppe
2. die ANL-Gruppe
3. die New Jersey - Zifferblattmalerinnen
4. die englischen Zifferblattmalerinnen
5. die Thorotrast-Patienten.

Die meisten Informationen stammen aus den Gruppen 1 und 2. Für die Gruppen 3 und 4 ist die Ableitung von Dosiswirkungsbeziehungen nicht möglich, weil die Zahl der Fälle mit hoher Dosis zu gering und die Zahl der Fälle mit niedriger Dosis (kleiner als 0,01 μCi Restaktivität an Ra-226) hoch ist. Außerdem finden sich in diesen beiden Gruppen weder Tumoren noch andere biologische Anzeichen der Strahlenbelastung. Die Thorotrast-Fälle werden in einem eigenen Abschnitt behandelt, da es sich hier vor allem um die Wirkung von Ra-224 handelt.

*Spezialkrankenhaus für die Erforschung von Krebserkrankungen

3.2.2 MIT-Gruppe

Die MIT-Gruppe von Patienten /Evans, 1969/; MIT, 1969/ umfaßt sorgfältig verfolgte Fälle von Zifferblattmalerinnen, Radiochemikern und Patienten mit Behandlungsschäden, die dem primären Kontakt mit Ra-226 und Ra-228 über einen Zeitraum von meist weniger als einem Jahr ausgesetzt waren.

Die Zifferblattmalerinnen leckten die radiumhaltige Leuchtfarbe von den feinen Pinselspitzen, mit denen sie Zifferblätter ausmalten. Das wurde 1926 verboten, nachdem ein New Yorker Zahnarzt, Theodor Blum, 1924 mehrere Fälle eines sogenannten "Radium-Jochbeins" festgestellt hatte. Es gab damals in den USA etwa 50 solcher Leuchtfarben-Zifferblatt-Werkstätten, und etwa 2 000 Angestellte waren betroffen, von denen im Jahre 1973 noch viele lebten. Der Radium-Krebs der Zifferblattmalerinnen wurde zuerst im Jahr 1925 von Martland et al. beschrieben /Martland, 1925/.

Die Radiochemiker arbeiteten in ca. 25 Raffinerien und Laboratorien. Sie inkorporierten das Radium durch Pipettieren, außerdem waren sie einer γ -Bestrahlung von außen und der Inhalation von Radon und seinen Tochterprodukten ausgesetzt. Es ist schwer, ihre Zahl abzuschätzen; sie dürfte zwischen 500 und einigen 1 000 gelegen haben.

Der Gebrauch medizinischer "Radium-Wässer" war zwischen 1914 und 1932 üblich, es gab z. B. in den USA 65 Ärzte und Kliniken, die solche Anwendungen aus den unterschiedlichsten Gründen vornahmen. Zu den behandelten Krankheiten zählten: Arthritis, Neuritis, Hochdruck, Poliomyelitis, Beschwerden der Menopause, Morbus Hodgkin, Bleichsucht junger Mädchen und Dementia praecox. Wahrscheinlich wurden mehrere tausend Patienten behandelt. Allein eine einzige Klinik verabfolgte um 1920 herum in einem Zeitraum von 5 Jahren 14 000 intravenöse Injektionen von Radium (normalerweise jede mit 10 μ Ci) und mehr als 22 000mal Radium zum Einnehmen.

In den Jahren 1913 - 1925 gab es eine Zeitschrift "RADIUM" in der über Radium-Wasser zum Trinken und Baden, Radium-Injektions-Ampullen und Radium-Kompressen berichtet und diese Methoden angepriesen wurden. Radiumhaltige Heilwässer waren zu dieser Zeit in USA sehr gebräuchlich. Ungefähr 0,5 g Radium, ausreichend für 500 000 Behandlungen, wurden verkauft.

Die Wirkung dieser Wässer beruhte wohl überwiegend auf dem entstehenden Radon - deswegen wurde später auch von Radon-Trinkkuren gesprochen.

Looney u. a. beschrieben kleinste radiographische Schäden als Zentren verminderter Dichte in Hüftknochen und als durchlöchernte Bereiche des Schädels /Looney, 1955/ als Nebenergebnisse dieser Behandlungen.

Eine Patientin solcher Trinkkuren wurde von 1937 bis 1973 beobachtet; sie beging ihren 90. Geburtstag noch bei guter Gesundheit.

Bei mehr als 500 Patienten mit kumulativen Dosen < 1 000 rd konnten in der MIT-Studie keine strahlenbedingten Schädigungen und keine Verkürzung der Lebensdauer festgestellt werden. Das gilt für Patienten, deren Belastung seit 45 bis 50 Jahren andauert. Bei den Patienten mit > 1 000 rd (kumulativ) nimmt die Latenzzeit für das Entstehen von strahlenbedingten Krankheiten mit abnehmender Dosis zu. Diese Beobachtung paßt in die Hypothese einer praktischen Schwelle /Failla, 1960; Taylor, 1962/.

Die kumulierte Dosis der am MIT untersuchten Fälle wurde berechnet, und die Fälle wurden klassifiziert, s. Tab. 3.4 /Chiacchierini, 1970/.

Kategorie	kumulierte Dosis im Bereich zwischen [rd]		Zifferblattmalerinnen und iatrogene Schäden	Chemiker und Einzelfälle	Gesamtzahl der Fälle
a	1	50	197	134	331
b	50	100	39	11	50
c	100	300	62	21	83
d	300	600	23	1	24
e	600	1 000	8	7	15
Summe			329	174	503
1	1 000	2 500	18	2	20
2	2 500	5 000	27	0	27
3	5 000	10 000	24	0	24
4	10 000	20 000	18	1	19
5	20 000	50 000	12	0	12
Summe			99	3	102
Gesamtsumme			428	177	605

Tab. 3.4: Radium im Menschen, vor Mai 1969 am MIT untersuchte Fälle

Tab. 3.5 zeigt, welche Tumoren in den Kategorien 1 - 5 oberhalb von 1 000 kumulierten rd beobachtet wurden. Unterhalb von 1 000 kumulierten rd fanden sich keine bösartigen Erkrankungen.

Karzinome der Nasennebenhöhlen und des Warzenfortsatzes sowie Knochensarkome wurden in Tab. 3.5 zur Berechnung der Tumorinzidenz zusammengefaßt.

Kategorie	kumulierte Dosis im Bereich zwischen [rd]		Zahl der Individuen z_i	Beobachtete Tumoren			Inzidenz p_i
				Knochen b_i	Kopf h_i	Summe x_i	
1	1 000	2 500	17 (20)	3 (4)	1 (1)	4 (5)	$0,24 \pm 0,11$
2	2 500	5 000	25 (27)	6 (8)	1 (1)	7 (9)	$0,28 \pm 0,09$
3	5 000	10 000	12 (24)	2 (9)	1 (4)	3 (13)	$0,25 \pm 0,13$
4	10 000	20 000	8 (19)	1 (10)	2 (2)	3 (12)	$0,38 \pm 0,13$
5	20 000	50 000	5 (12)	0 (2)	2 (2)	2 (4)	
Summe			$\frac{67}{(102)}$	$\frac{12}{(33)}$	$\frac{7}{(10)}$	$\frac{19}{(43)}$	$\bar{p} = 0,28 \pm 0,06$

Tab. 3.5: Tumorinzidenz in der MIT-Studie

Die Tabelle faßt die Individuen zusammen, die im Mai 1969 als statistisch korrekte Gruppen in dem Sinne betrachtet wurden, daß sie nicht wegen des Auftretens von Symptomen untersucht wurden. In Klammern werden die Zahlen angegeben, die sich bei Hinzunahme der wegen ihrer Symptome in die Gruppe aufgenommenen Fälle ergeben.

Tabelle 3.4 enthält nur die statistische korrekte Gruppe.

Die MIT-Daten sind in ihrer Gesamtheit nicht inkonsistent mit der Hypothese, daß die Tumorinzidenz oberhalb von 1 000 rd unabhängig von der Dosis ist. Ein Nachteil des MIT-Verfahrens ist die Klassifikation der Patientenkategorien nach nur einer Dosisgröße, die weder über die zeitliche noch über die räumliche Verteilung der Dosis im Körper etwas aussagt. Zusätzlich hängt die Berechnung dieser Größe von der gewählten Retentionsfunktion ab (s. Abschnitt 3.7). Evans und seine Mitarbeiter wählten die Funktion, mit der die höchste Dosis abgeschätzt wurde. Die angegebenen Werte der kumulierten Dosis sind unter diesen Bedingungen als Schätzwerte zu verstehen. Evans et al. haben festgestellt, daß unterhalb 1 100 rd keine Tumoren beobachtet wurden. Es wäre allerdings sinnvoll, für diesen Wert eine Fehlerbreite anzugeben. Obwohl unterhalb 1 100 rd keine Tumoren beobachtet wurden, reicht

die Evidenz nicht aus, um das Vorhandensein eines Schwellenwertes zu beweisen. Insbesondere im Bereich niedrigerer Dosen lassen sich aus der MIT-Studie keine quantitativen Schlüsse ziehen.

3.2.3 ANL-Gruppe

Die ANL-ACRH-Studie /Finkel, 1969a; Finkel, 1969b/ befaßt sich mit den gleichen drei Arten von Fällen wie die MIT-Studie. Auch hier handelt es sich überwiegend um Schäden durch Ra-226, und auch hier wurden verschiedene Tumorarten bei der Berechnung der Tumorzinzidenz zusammengefaßt. Zusätzliche Probleme gibt es bei der getroffenen Auswahl der Fälle, die möglicherweise nicht ohne "bias" war, weil nicht darauf geachtet wurde, daß nicht das Auftreten von Strahlenschäden zur Aufnahme in die zu untersuchende Gruppe führte.

Aus statistischen Gründen ist es wichtig, daß diejenigen Fälle gesondert betrachtet werden, die aufgrund des Auftretens einer strahlenbedingten Krankheit untersucht werden. Eine solche "Vorauswahl" nach Symptomen verschiebt nämlich das Ergebnis zur negativen Seite: hätte man nur solche Fälle, wäre die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tumoren 100 %. Im Idealfall sollte man von der statistisch korrekten Gruppe aller Belasteten ausgehen und dann untersuchen, in wievielen Fällen Symptome auftreten.

In Tab. 3.5 sind deswegen jeweils zunächst nur die Fälle ohne solche "Vorauswahl" angegeben, in Klammern dann die Summe beider Gruppen. In einigen Fällen waren die Daten der Radiuminkorporation unbekannt, so daß die Dosisberechnung schwierig war. In der ANL-ACRH-Studie wird anhand der niedrigsten kumulierten Dosis, bei der ein Tumor aufgetreten ist, festgestellt, daß der maximal zulässige Wert von 0,1 μCi für Radium konservativ ist, d. h. auf der sicheren Seite liegt. Bei den Patienten mit kumulativer Dosis von mehr als 1 000 rd ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tumoren $28 \pm 6 \%$; eine Abhängigkeit von der Dosis wurde nicht beobachtet.

Im Rahmen der ANL-Studie beschreibt eine Arbeit von von Seggen et al. /Von Seggen, 1973/ die charakteristischen Knochenschäden, die bei Radium-Patienten zu beobachten sind, und vergleicht einen Speichenknochen, der 15,4 μCi Ra-226 enthält, mit einem gesunden Knochen einer gleich alten Patientin. Gleichzeitig werden verschiedene Untersuchungsmethoden dargestellt.

3.2.4 Zusammenfassende Studien

Da die Radium-Studien an Menschen jede für sich nicht ausreichen, um zu abschließenden Ergebnissen zu kommen, wurde versucht, die Daten aus den Analysen 1., 2. und 3. (s. S. 3-6) zusammenzufassen /Rowland, 1970/. Allerdings hat auch die dadurch entstehende Gruppe den Nachteil, daß ihre Mitglieder überwiegend weiblich sind und alle die Radiumbelastung im Alter von etwa 20 Jahren aufnahmen. Eine Verknüpfung mit den Untersuchungen für Ra-224 scheint unerlässlich. Auch sollten andere als die bisher betrachteten Tumortypen, z. B. solche im zentralen Nervensystem, von denen vier in der ANL-Studie und zwei in der MIT-Studie beobachtet wurden, mit aufgenommen werden. Auch Knochenbrüche, Lebenszeitverkürzung, Leukämie, Tumoren der Brustdrüse, die von Bedeutung sein könnten, wurden bisher nicht betrachtet s. u.. Rowland betont in einer neueren Zusammenfassung /Rowland, 1974/, daß Radium das einzige Radioisotop ist, für das Erfahrungen mit der Einwirkung von Dosen über mehrere Größenordnungen auf den Menschen vorliegen. Nur so läßt sich die "lineare Hypothese" testen; es sieht so aus, als ob für Ra-224 eine lineare oder quadratische Abhängigkeit zwischen Dosis und Wirkung die Wirklichkeit wiedergibt, für Ra-226 und Ra-228 lassen sich die Ergebnisse mit Termen erster Ordnung allein nicht adäquat beschreiben.

Diese neue Arbeit befaßt sich, abgesehen von den Ra-224-Fällen, mit 1572 Patienten aus der ANL-Gruppe (41 % der bekannten 3803 Fälle). Dosen durch Ra-226 und Ra-228 zwischen 30 und 44 000 rd werden betrachtet.

Abb. 3.1 zeigt die Häufigkeit F von Knochentumoren; es ist eine quadratisch-exponentielle Verteilung angepaßt:

$$F = 3,7 \times 10^{-8} \cdot D^2 \cdot e^{-D/4970}$$

Tab. 3.6 zeigt, welche Zahl von Tumoren zu erwarten wäre, wenn man entweder von der linearen Hypothese oder von der hier abgeleiteten Funktion ausgeht.

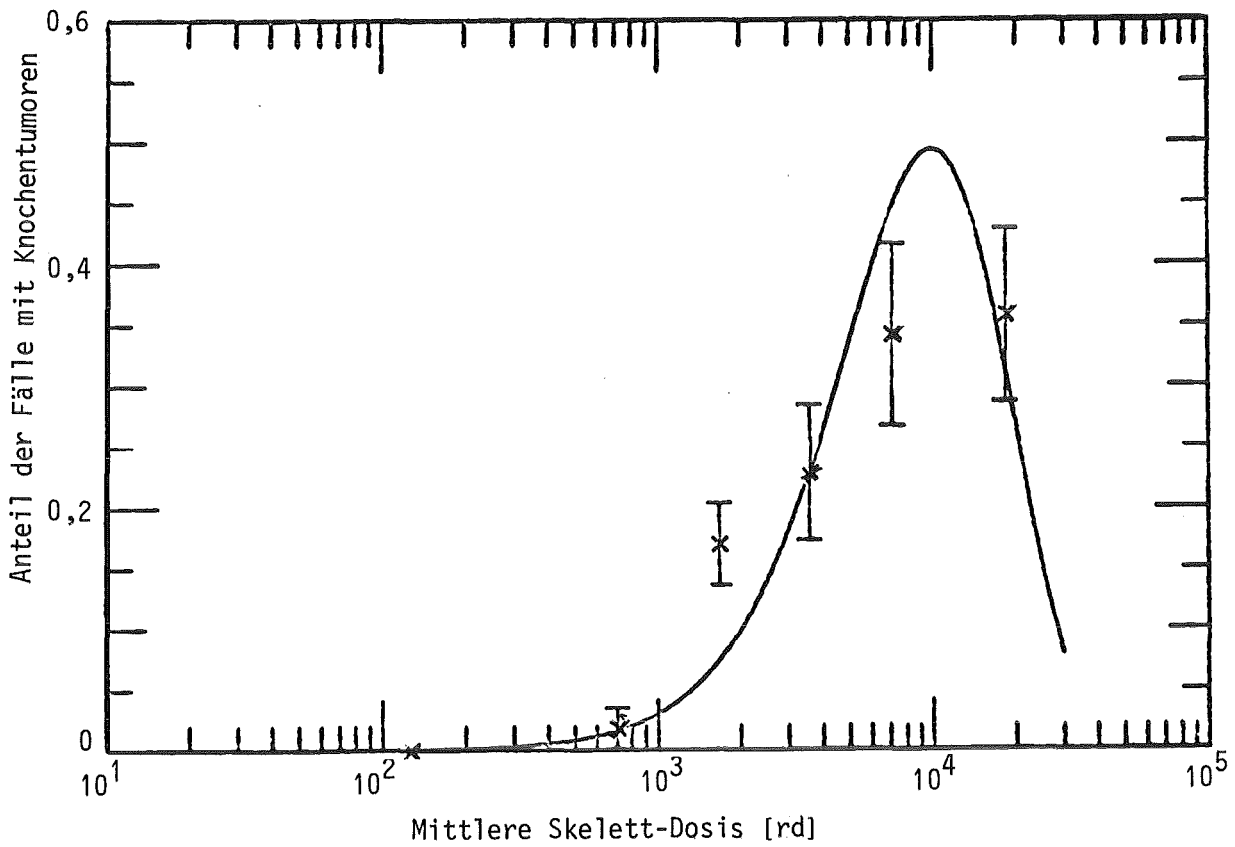


Abb. 3.1: Alle Ra-226- und Ra-228-Fälle

Dosis (rd)	Lineare Funktion Tumoren/1 000 Fälle	Quadratische Funktion Tumoren/ 1 000 Fälle
1 000	30	30
500	15	8,4
100	3	0,4

Tab. 3.6: Erwartete Zahl von Knochentumoren bei Bestrahlung durch Ra-226 und Ra-228

Nach /Taylor, 1976/ und /Evans, 1969/ war die niedrigste Dosis von Ra-226, bei der das Entstehen von Knochenbrüchen beobachtet wurde, 1 200 rd. Die Arbeit von Taylor stammt von einer Konferenz, bei der versucht wurde, die vorhandenen Kenntnisse über die Wirkungen von Radium und Plutonium zueinander in Beziehung zu setzen, um dadurch die Wirkung beider besser zu verstehen.

Spiess und Mays /Spiess, 1970a/ haben das Ergebnis von Ra-224- und Ra-226- + Ra-228-Studien kombiniert. Sie gingen davon aus, daß es sinnvoll ist, die Dosis zu vergleichen, die auf die ersten 10 μm des weichen, an den Knochen angrenzenden Gewebes einwirkt.

Es ergibt sich, daß die mittlere Skelettdosis von Ra-224 mit einem Faktor 14.2 multipliziert werden muß, um sie mit der mittleren Skelettdosis von Ra-226/228 vergleichbar zu machen. Das ergibt aber keine sinnvolle graphische Darstellung; möglicherweise sind die zeitlichen Bedingungen beider Gruppen zu unterschiedlich. Abb. 3.2 zeigt eine Kombination, bei der die Ra-224-Dosen mit einem Faktor 3.5 multipliziert worden sind. Eine theoretische Begründung steht noch aus /Rowland, 1974/.

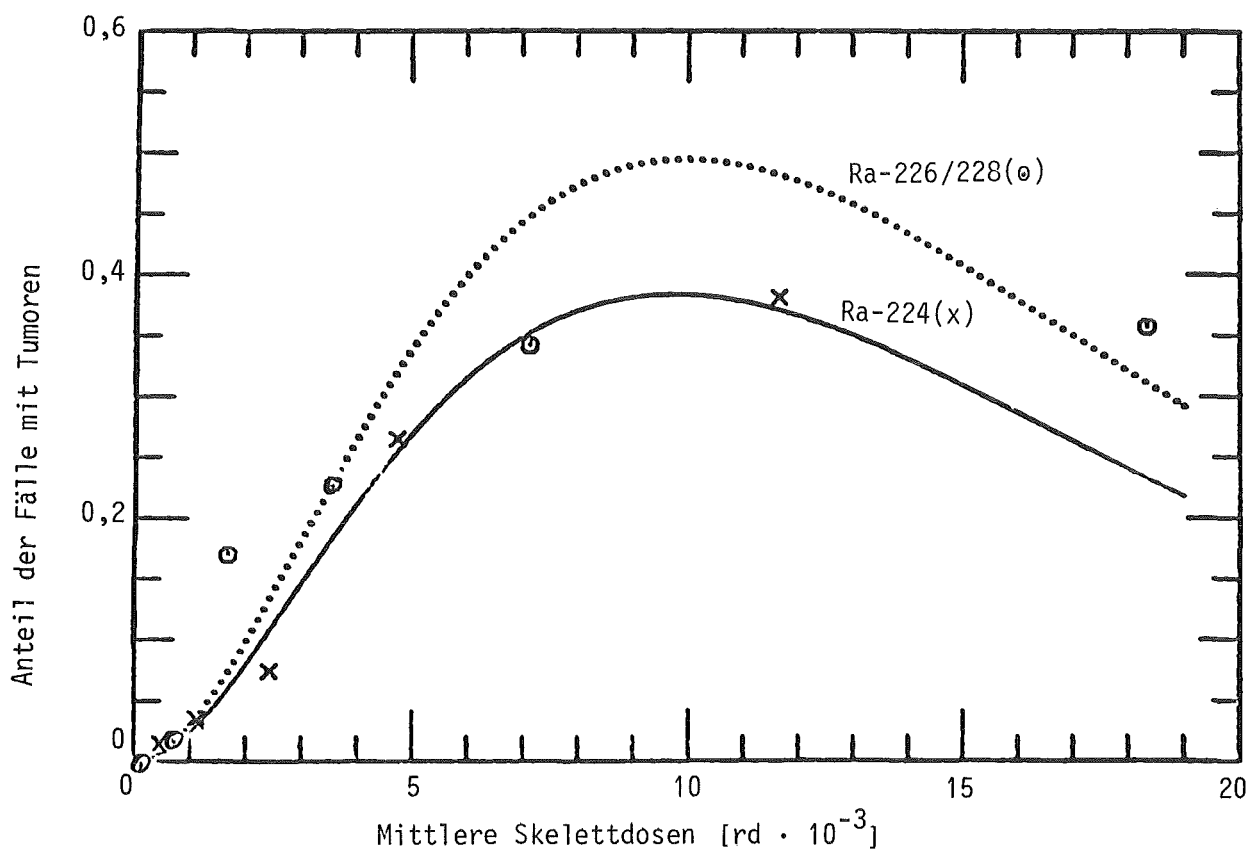


Abb. 3.2: Vergleich von Ra-224- mit Ra-226/228-Fällen

Als ein Beispiel aus den britischen Studien über Radiumpatienten (s.4., S. 3-6) sei eine Arbeit von Spiers /Spiers, 1974/ referiert. Diese Arbeit befaßt sich mit der Toxizität und Dosimetrie verschiedener Radionuklide im Hinblick auf die Radiobiologie und vor allem auf den Strahlenschutz. Es besteht Übereinkunft darüber, daß das rote Knochenmark das strahlenempfindlichste Gewebe im Knochen ist, worauf die erlaubte Dosis von nur 5 rem im Vergleich zu 15 rem für andere Organe zurückzuführen ist.

Das Knochenmark ist kritisches Gewebe in Bezug auf Leukämie oder andere Störungen der Blutbildung. Andererseits gibt es Gründe, die endostalen Gewebe nahe der inneren Knochenoberfläche als entscheidend für das Entstehen von strahleninduzierten Knochentumoren zu betrachten. Auch weil die Zellteilung im Inneren des Knochens schneller vor sich geht als in der Rinde, ist im trabekularen Endost eher eine bösartige Entwicklung zu befürchten.

Deshalb wurde versucht, die Dosis für spezifische Bereiche des Knochens von Menschen und Versuchstieren für α - und β -Strahlung zu berechnen. Tab. 3.7 gibt eine Übersicht über die anzuwendenden Dosisfaktoren: D_m bezeichnet den Faktor für das Knochenmark relativ zu D_o , der Dosis für einen kleinen Weg eines Teilchens, D_s den Faktor für endostales Gewebe; auch zwischen verschiedenen Teilen des Skeletts finden sich noch Unterschiede. Hier sieht man die Auswirkung der geringen Reichweite der α -Teilchen.

Spezies	Untersuchte Knochen	Bereich der Dosisfaktoren	
		D_m/D_o	D_s/D_o
Erwachsene 44 Jahre	Wirbel, Darmbeinkamm, Rippe, Oberschenkel- knochen, Scheitelbein	0,016 - 0,029	0,32 - 0,34
		0,068	0,38
Junge 20 Monate	Lendenwirbel, Rippe, Darmbeinkamm, Oberschenkelknochen, Scheitelbein	0,033 - 0,047	0,34 - 0,36
		0,102	0,41
Hund - 1,5 Jahre	Oberarmknochen, Speiche, Oberschenkelknochen, Schienbein, Lenden- wirbel	0,046 - 0,082	0,35 - 0,38

Tab. 3.7: Mittlere Dosisfaktoren D_m/D_o und D_s/D_o für α -Teilchen aus abgelagertem Ra-226

Man sollte jedenfalls bei der Berechnung von rem-Werten bedenken, daß für α -Strahlung weder das fragliche betrachtete Gewebe (target tissue) noch die relative biologische Wirksamkeit für α -Strahlen genau bekannt sind.

Evans, der z. B. 1973 zusammenfassend über Wirkungen des Radiums auf Menschen berichtete, hat schon 1933 das damals vorhandene Wissen zusammengefaßt /Evans, 1933; Evans, 1974/. Damals war bekannt, daß die "kleine Menge" von 2 μg im Knochen fixierten Radiums tödlich wirken konnte. Er gibt auch einen Hinweis auf Blum, der als erster die ursächliche Verknüpfung zwischen der Osteomyelitis von Unter- und Oberkiefer mit dem Radium, das von einer Zifferblattmalerin inkorporiert worden war, erkannte /Blum, 1924/. Es ist erstaunlich, wie gut damals die Kenntnis über die Wirkungen des Radiums bereits waren.

Bereits 1932 wurden Versuche beschrieben, die Elimination von Radium aus dem menschlichen Körper zu beschleunigen. Dabei konnte sogar auf eine Arbeit von 1915 zurückgegriffen werden /Seil, 1915; Schlundt, 1931/. Allerdings waren die meßtechnischen Schwierigkeiten zu dieser Zeit noch sehr groß.

Evans führte 1973 aus, daß chronische Einwirkung von α -Strahlen auf den Knochen zu

Osteoporose
Knochennekrose
spontanen Brüchen und
Karzinomen der Nasennebenhöhlen und des Warzenfortsatzes

führe.

Es sieht so aus, daß bei hohen Dosisraten und hoher kumulierter Dosis (1 000 - 50 000 rd) das Auftreten strahlenbedingter bösartiger Erkrankungen unabhängig von der Dosis ist; allerdings verschieben sich die Erkrankungen bei geringer Dosis zu späteren Anfangszeiten, s. o..

Es könnte sein, daß es einen Bereich niedriger Dosen gibt, in dem die Latenzzeit die verbleibende Lebenszeit übersteigt, also eine "praktische Schwelle" der Dosis, s. Abschnitt 5.

Bei kumulativen Dosen unter etwa 1 000 rd ist in der MIT-Studie über einen Zeitraum von 40 bis 50 Jahren kein biologischer Schaden an den über 500 "Patienten" beob-

achtet worden. Unter Umständen kommen in diesem Dosisbereich Erholungs- und Reparaturmechanismen zum Zuge.

Die Beziehungen zwischen Dosis und Wirkung für Knochensarkome und Kopfkrebs erscheinen kurvilinear und können nicht mit irgendeinem bekannten linearen Modell ohne Schwellwert beschrieben werden.

Lineare Extrapolationen in den Bereich, der bei beruflicher Strahlenbelastung in Frage kommt, können nur mit größter Vorsicht erfolgen. Besondere Sorgfalt erfordert die Abgrenzung epidemiologisch sauber ausgesuchter Fälle; in dieser Hinsicht werden Bedenken gegen manche Tabellen auch in den BEIR- und UNSCEAR-Berichten erhoben /BEIR, 1972; UNSCEAR, 1976/.

3.2.5 Einzelfälle

Neben den großen Berichten über Gruppen von Zifferblattmalerinnen und Radiochemikern aus den USA gibt es immer wieder auch Einzelberichte über Radium-Inkorporationen. Z. B. berichtet eine japanische Arbeit über einen Patienten, der zwischen 1934 und 1960 als Arbeiter Radium aufgenommen hatte und dessen Belastung durch $0,05 \mu\text{Ci Ra-226}$ zwischen 200 und 800 rem (!) abgeschätzt wurde. Im Alter von 75 Jahren befand er sich bei guter Gesundheit /Anzai, 1973/.

In einer Arbeit von Delpia und Schäffer /Delpia, 1968/ wird von einer Frau berichtet, die im Alter von 48 Jahren mit Ra-226 behandelt wurde. Ihre Skelettdosis von $10,5 \mu\text{Ci}$ gehört zu den höchsten bekannten, dennoch erreichte sie ein Alter von 84 Jahren, ohne an Krebs zu sterben. Aus der beim Tod gemessenen Dosis läßt sich ableiten, daß die Patientin einer Blutbelastung von $30 \mu\text{Ci}$ pro Woche für etwa 10 Monate und einer maximalen Skelettbelastung von $80 \mu\text{Ci}$ in Zonen hoher Radiumkonzentration ausgesetzt war, was einer Dosis von 2 000 rem pro Tag, bzw. in 36 Jahren von 5 000 000 rem, entspricht. In dieser Berechnung wird in Anlehnung an das Modell der ICRP angenommen, daß eine Dauerbelastung des Skeletts mit $0,1 \mu\text{Ci}$ Radium einer Äquivalenzdosis von 0,56 rem/Woche entspricht.

Es scheint von besonderem Interesse, auch solche Einzelarbeiten weiter zu verfolgen, um ein möglichst umfassendes Bild zu bekommen. Das Center for Human Radiobiology (CHR) fand bis 1970 keine Strahlenschäden bei Personen mit Restdosen von weniger

als 0,5 μCi . Dieses entspricht den am MIT schon 1950 festgestellten Bedingungen /Aub, 1952/. Das CHR erwartet, daß noch im Jahr 2000 etwa 100 Radiumpatienten leben; bis dahin sollen die Studien mit größter Aufmerksamkeit fortgesetzt werden.

Aus dem CHR stammen auch Schilderungen von Einzelfällen, die nach Inkorporation von Radium bei Zifferblattmalerinnen und Ra-Patienten entstanden sind /Brues, 1975/. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.8 tabellarisch zusammengefaßt.

Das CHR hat umfangreiche Zwischenberichte über seine Studien an Radiumpatienten veröffentlicht. So enthält z. B. eine Arbeit aus dem Jahr 1972 vor allen eine Tabelle mit Daten von 1032 Patienten: Geschlecht, Geburts- und Todesjahr, Jahr der ersten Exposition, letztes Jahr der Messung, die aufgenommene Aktivität pro kg Knochen, berechnet mit der Retentionsfunktion von Norris, und die akkumulierte Dosis.

Dabei wird angenommen, daß eine verbleibende Restaktivität von 0,2 μCi Radium 40 Jahre nach der Aufnahme einer ursprünglichen Aufnahme von ungefähr 10 $\mu\text{Ci}/\text{kg}$ und einer in diesen 40 Jahren akkumulierten Dosis für ein 5 kg schweres Skelett von ~ 600 rd entspricht /Rowland, 1972/.

Fast die gleiche Gruppe von Patienten wurde im Jahr 1971 darauf untersucht, ob sich eine bestimmte Form der Dosiswirkungsbeziehung in Bezug auf das Entstehen vom Tumoren oder eine Verkürzung der Lebenszeit finden ließe.

Unter 777 Fällen, die allerdings z. T. gerade wegen der Tumorentstehung in die untersuchte Gruppe aufgenommen worden waren ("bias", s. o.), fanden sich 77 Fälle bösartiger Neubildungen. Bei akkumulierten Dosen unter 1 000 rd fanden sich keine Tumoren, bei 10 000 rd eine Häufung von Fällen. Es wurde versucht, zwei Funktionen, nämlich

$$I = k_1 D e^{-D/D_1} \text{ und}$$

$$I = k_2 D^2 e^{-D/D_2}$$

mit I = relativer Anteil der Tumoren (fractional incidence) anzupassen, es ergab sich aber keine Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Charakteristika des Auftretens von Tumoren.

Fall - Geburtsjahr	Betätigung bzw. Behandlung mit Radium	Jahr und Höhe der gemessenen Ra-Belastung [µCi]	geschätzte tot. Dosis [rd]	Diagnose	Tod
1 Zifferblattmalerin 1907	1923 - 1935	1951: 0,72	2040	Karzinom des linken Mastoids	1972
2 Schizophrenie-Patientin 1908	1931	1931: 150 1951: 1,6	4450	Karzinom des rechten Ohrs; Lymphknotenmetastasen	1971
3 Zifferblattmalerin 1908	1923 - 1927	1957: 2,10	6360	Osteosarkom der rechten Mittelhand; Karzinom des linken Mastoids	
4 Zifferblattmalerin 1907	1922 - 1923	1957: 0,17	605	Mucoepidermoid-Karzinom	
5 Patient mit Harnröhrenentzündung und Gelenkentzündung 1914	1935 oder 1936	1958: 4,17 1973: 3,3	7050	drei pathologische Brüche Epidermoid-Karzinom	
6 Zifferblattmalerin 1899	1919 und 1922	1969: 0,218	1180 (24 % Ra-228)	Adenokarzinom des Mastoids	1973

Tab. 3.8: Einzelfälle von Erkrankungen nach Ra-Inkorporation

In Bezug auf eine Lebenszeitverkürzung wurde mit der "life-table-Methode" versucht, für drei Gruppen von Patienten mit Belastungen 1 rd, 1-100 rd und 100-1 000 rd einen möglichen Einfluß festzustellen. Bis zu 45 Jahren nach der letzten Exposition zeigten diese drei Gruppen keine signifikanten Unterschiede, nach 50 bzw. 55 Jahren ergaben sich Verkürzungen für die Gruppe der am höchsten belasteten Patienten /Stehney, 1971/. Beobachtet wurde eine signifikante Lebenszeitverkürzung auch bei Radiologen /Warren, 1956; Seltser, 1965/.

In Tierversuchen ergab sich eine Verkürzung der Lebensdauer um 1 % pro 100 R Ganzkörperdosis. Analog könnte man auf eine Lebenszeitverkürzung von 9,7 a pro 100 rd bei Menschen schließen. Diese Hypothese wurde an den Ra-Patienten getestet. Auch dazu wurde die "life-table-Methode" verwendet. Allerdings ist dieser Test problematisch, denn in den meisten Fällen lag die Exposition der Patientinnen vor dem Jahre 1928. Dosismessungen konnten aber erst nach 1950 vorgenommen werden, bzw. erst von dieser Zeit an gab es befriedigende Meßmethoden. Für die 55 Jahre seit der ersten Belastung ergab sich für Patienten in drei Gruppen mit weniger als 0,02 nCi Ra/g Knochen, 0,02 bis 1,0 nCi Ra/g und 1,0 bis 10,0 nCi Ra/g keine erhöhte Sterblichkeit. Allerdings fand sich dann eine Zunahme der Sterblichkeit bei mehr als 10,0 nCi Ra/g Knochen.

Dieses Ergebnis ist wiederum mit großer Vorsicht zu betrachten, denn in den ersten drei untersuchten Intervallen fand sich keineswegs eine Übereinstimmung mit den nach der oben dargestellten Hypothese erwarteten Werten, sondern eher eine erhöhte Lebenserwartung.

Der "bias" bei diesem Test liegt vermutlich darin, daß das Auswahlverfahren "Meßbarkeit von Ra im Körper" noch lebende Patienten begünstigt. Umgekehrt lassen sich hohe Dosen leichter messen. Die gefundenen Ergebnisse sind also allenfalls als ein Hinweis zu interpretieren, der Aussagen über die Zeitspanne zwischen Inkorporation und Messung ermöglicht /Stehney, 1971b/. Gerade solche Ergebnisse sind interessant für die Abschätzung der Folgen lang anhaltender Einwirkung geringer Strahlendosen.

Tab. 3.9 aus /Brues, 1976/ gibt eine Zusammenfassung der Radium-Fälle mit einer Standardmethode (Standardized Nomenclature of Pathology = SNOP), wie sie beim CHR für computerunterstützte Studien verwendet wurde. Die Gesamtzahl der bösartigen Tumoren bei einer mittleren Skelettdosis von > 1 000 rd war 68.

Gesamtzahl der Fälle	2 500	
nicht gemessene Fälle	910	36 %
gemessene Fälle	1 590	64 %
> 10 rads m.s.d.+)	795	= 1/2 der gemessenen Fälle
> 100 rads m.s.d.+)	399	= 1/4 der gemessenen Fälle
> 1 000 rads m.s.d.+)	205	= 1/8 der gemessenen Fälle

+) mittlere Skelettdosis

Tab. 3.9: Zusammenfassung der CHR-Fälle

Tabelle 3.10 gibt eine Übersicht über die relative Häufigkeit verschiedener Tumortypen in Dosis-Gruppen oberhalb von 99 rd mit jeweils gleich vielen Fällen von strahlenbedingten Tumoren.

	Gesamtzahl der Fälle	Knochensarkome		Kopfkarzinome	
		Osteosarkome	Fibrosarkome	Mastoid	Nebenhöhlen
0- 99 rd	1 181				
100- 144	42				
145- 213	40				
241- 284	41				
285- 479	41				
480- 979	40				
980-1 800	41	3	2	3	
1 801-3 050	41	7	9	1	1
3 051-5 200	41	8	3	4	4
5 201-9 999	41	9	9	4	1
10 000-	41	11	5	3	3

Tab. 3.10: Verteilung strahleninduzierter Tumoren

Bei Patientinnen, die seit Jahrzehnten einer hohen Radiumbelastung ausgesetzt waren, war es möglich, den Einfluß auf die Knochenentwicklung (Mineralisation) zu untersuchen. In einer Studie aus dem Argonne National Laboratory /Schlenker, 1973/ zeigen 40 von 281 Patientinnen Entkalkungserscheinungen. Dabei handelte es sich um eine Gruppe, deren Belastung oberhalb von 0,1 μCi lag. Allerdings ist die untersuchte Gruppe klein, besteht nur aus Frauen, es gibt zusätzlich einen Einfluß des Lebensalters, so daß weitere Studien nützlich wären.

Es ist bei all dem Wissen über Gefahren, die vom Umgang mit Leuchtfarbe herrühren, erstaunlich, daß erneut Probleme sozusagen am anderen Ende der Verwendungskette auftreten konnten. In New York wurde 1963 untersucht, ob es zu einer nennenswerten externen Dosisbelastung von Menschen durch das Tragen von Uhren mit Leuchtziffern kommt. Insbesondere Taschenuhren trugen nach dieser Studie nicht unerheblich zur genetischen Bevölkerungsbelastung bei. Genauere Messungen der von im Handel befindlichen Uhren ausgehenden Strahlung und ein Vergleich mit den von der NCRP (National Committee on Radiation Protection and Measurements)* zugelassenen Grenzwerten von 0,5 rem/a für Kopf, Rumpf, blutbildende Organe, Keimdrüsen und Augenlinsen bzw. 7,5 rem/a für Hände und Unterarme führte dazu, daß viele Modelle aus dem Handel gezogen wurden und eine entsprechende Verordnung erlassen wurde /Paul, 1963/.

Ähnliche Untersuchungen in der Schweiz /Eng, 1962/ und in der Bundesrepublik Deutschland /Seelentag, 1961/ zeigten eine Tendenz, geringere Mengen von Radium zu verwenden, so daß die Dosisbelastung im Bereich von Prozentbruchteilen der natürlichen Strahlenbelastung bleibt. Heute werden praktisch nur noch Tritium- und Promethium-Leuchtfarben für Uhren verwendet, s. Abschnitt 3.5.

In einer russischen Arbeit /Tsenterova, 1963/ wird darauf hingewiesen, daß bei Personen, die längere Zeit unter fragwürdigen Bedingungen mit Leuchtfarben gearbeitet haben, auch Erkrankungen des Herzkreislaufsystems auftreten können. Beschwerden wie Schmerzen in der Herzgegend, unregelmäßiger Puls, Reflexstörungen, Blutdruckanomalien hängen in ihrem Auftreten und in ihrer Schwere von der Art der Beschäftigungsbedingungen und der Dauer der Belastung ab. Leider werden in der zitierten Arbeit keine Angaben darüber gemacht, wie hoch die Dosisbelastung der untersuchten 176 Patienten war und welche Erkrankungen sonst an ihnen beobachtet wurden oder ob andere Bestandteile der Leuchtfarben, wie z. B. Verdünnungsmittel, zu den Beschwerden geführt haben.

*Nationale Behörde für Strahlenschutz und -Messung

3.3 Radium in der Gynäkologie

Bei der Durchsicht der Literatur über die Anwendung von Radium in der Medizin fällt auf, daß Radium vor allem in der Gynäkologie vielfach angewendet wurde und noch heute angewendet wird. Diese Verwendung von Radium ist insofern ein Sonderfall, als die strahlende Substanz nicht wirklich inkorporiert, sondern die externe Strahlung umschlossener Präparate genutzt wird. Die frühesten Arbeiten stammen von Anfang des Jahrhunderts, z. B. /Zowers, 1903/. Seit den 30er Jahren gab es eine "standardisierte" Radiumtherapie, die die eher tastenden Versuche der Jahre seit 1903 ablöste /Sadugor, 1949/. Es war nun auch üblich geworden, die Dosis statt in (mgh) in (R) zu messen, ein Hinweis darauf, daß sich die Kenntnisse über Dosis und Dosisverteilung (räumlich und zeitlich) verbesserten. So wurde als "Stockholmer" Methode diejenige mit Fraktionierung der Dosis, als "Pariser" Methode die ohne Fraktionierung bezeichnet.

Zur Umrechnung von mgh in R wurde folgende Tabelle angegeben:

6 000 mgh Radium entsprechen	18 000 am äußeren Muttermund
	11 580 in der Umgebung des Muttermundes
	1 500 im seitlichen Becken

Aus den Tabellen 3.11 und 3.12 kann man ersehen, wie sich die Heilungsraten immer mehr verbesserten /Corscaden, 1950/.

In diesen Tabellen wird für die Schwere der Erkrankungen die Klassifikation des Völkerbundes verwendet, diese aber z. T. noch weiterentwickelt.

Als Toleranzdosen werden angegeben:

Gebärmutterwand oder -mund	30 000 R
Scheidenschleimhaut	20 000 - 25 000 R
Damm	6 000 R

In den 40er Jahren gab es zahlreiche Arbeiten im Zusammenhang mit der Radium-Anwendung. 1949 erschien eine Arbeit von Charles C. Martin, der über Erfahrungen in der Anwendung von Radium berichtet /Martin, 1949/. Er beschreibt überwiegend die Anwendung von Radiumnadeln in Körperhöhlen, aber auch bei Krebserkrankungen der Haut (z. B. von Gesicht, Hals, Augenlidern) und der Lymphknoten. Die 5-Jahres-Heilungsraten lagen je nach Art der Erkrankung zwischen 20 und 80 %. Es werden

Zustand Klassifikation der UN	1917-1928		1929-1933		1934-1938		1939-1943	
	Zahl der Fälle	% geheilt	Zahl der Fälle	% geheilt	Zahl der Fälle	% geheilt	Zahl der Fälle	% geheilt
I	?	?	31	43	45	64	51	76
Behandelte	181	10	137	19	157	36	149	43
Nicht weiter Behandelte	93	50	31	23	8	6	7	4

Tab. 3.11: Karzinome des Gebärmutterhalses. Ergebnisse 5 Jahre nach einer kombinierten Radium-Röntgen-Behandlung

Klassifikation des Völker- bundes	1929-1933					1934-1938					1939-1943				
	Zahl der Fälle	Zahl der Geheilten	%	nicht weiter- behandelt		Zahl der Fälle	Zahl der Geheilten	%	nicht weiter- behandelt		Zahl der Fälle	Zahl der Geheilten	%	nicht weiter- behandelt	
				Zahl	%				Zahl	%				Zahl	%
Ia	1	1	100	-	-	2	2	100	-	-	6	6	100	-	-
Ib	5	4	80	-	-	13	10	77	-	-	8	7	88	-	-
Ic	25	8	32	5	20	30	17	57	-	-	37	26	70	2	5
I zusammen- gefaßt	31	13	43	5	16	45	29	64	-	-	51	39	76	2	4
II	31	5	16	5	16	47	18	38	5	10	41	17	40	3	7
III	61	6	10	16	26	48	5	10	-	-	28	1	4	-	-
IV	5	0	-	1	20	4	1	25	-	-	6	0	-	-	-
nach Amputation	2	1	50	-	-	6	3	50	2	33	20	7	35	2	10
nicht klassifiziert	7	1	14	4	57	7	1	14	1	14	-	-	-	-	-
Summe	137	26	19	31	23	157	57	36	8	6	149	64	43	7	4

Tab. 3.12: Ergebnisse 5 Jahre nach einer kombinierten Behandlung an 443 Patientinnen

Details der Therapie, vor allem Dosen und Dosisraten angegeben; die Dosen liegen meist zwischen 5 000 und 12 000 R.

Dabei wird in den meisten Arbeiten aus dieser Zeit betont, wie schwierig es ist, die Dosis im Zentrum des Tumors genau zu bestimmen. So heißt es z. B. in einer Arbeit aus dem Massachusetts General Hospital über die Behandlung von fast 2 000 Gebärmutterhals-Karzinomen, daß Strahlendosen von ~ 1 500 mgh vermutlich keine Heilung bewirken, Dosen von 10 000 mgh dagegen großen Schaden an normalem Gewebe und Komplikationen verursachen. Bevor nicht eine Unmenge von Forschungsarbeit geleistet sei, sei Strahlung eine "relatively blind procedure" /Morris, 1950/.

Auch auf die Strahlenbelastung des medizinischen Personals wird hingewiesen. Die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit verschiedener Körpergewebe und ihr Einfluß auf unerwünschte Nebenwirkungen wird diskutiert. Zur Verhütung und Eindämmung solcher Nebenwirkungen werden in /Mc Kelvey, 1949/ zahlreiche Hinweise für Bestrahlungspläne und Pflege der Patienten, z. B. durch geeignete Diät, gegeben. In /Younge, 1949/ werden einzelne Todesfälle nach mißlungener Radiumtherapie angegeben.

In all diesen Arbeiten wird auch untersucht, ob die Bestrahlung einer Operation vorzuziehen ist oder umgekehrt oder ob sich beides kombinieren läßt
- ein Streit verschiedener "Schulen" über Jahrzehnte.

Auffällig ist, daß jüngere Patientinnen offenbar eher zu entzündlichen Komplikationen neigen als ältere /Gauwerky, 1949; Meredith, 1949/.

Genau wie verschiedene Körpergewebe sind auch verschiedene Krebszellen offenbar verschieden strahlenempfindlich, worauf schon 1916 durch Adler hingewiesen wurde /Adler, 1916; Drescher, 1949/.

Die umfangreichen Erfahrungen mit der Anwendung von Radium in der Frauenheilkunde wurden auch zu Untersuchungen von Nebenwirkungen auf andere Organe genutzt. Gerade diese sind im Gesamtzusammenhang "Einwirkung niedriger Strahlendosen auf den Menschen" interessant. So zeigt z. B. /Bach, 1965/ einen Einfluß der Radiumbestrahlung auf das blutbildende System: ebenso wie nach Röntgenbestrahlung findet sich eine meßbare Änderung der Zerfallsneigung der Thrombozyten im Blut

der Patientinnen direkt nach der Bestrahlung und noch einmal nach ungefähr 7 Tagen. Es wird vermutet, daß dieser Effekt mit einer Reduktion der Resistenz einhergeht, s. u.

Ebenfalls in den Bereich der Nebenwirkungen gehören die häufigen urologischen Erkrankungen, die bei der Behandlung von Gebärmutterkarzinomen entstehen. Es wurden Dosen bis zu 8 000 R angewandt. Der gleiche Grenzwert für die Dosisbelastung von Blase und Mastdarm wurde auch bei der Behandlung von Scheidenkarzinomen durch kombinierte Radium-Röntgenbestrahlung festgestellt /Weghaupt, 1967/. In dieser Arbeit wird besonders auf das Problem einer neben der Erkrankung bestehenden Schwangerschaft eingegangen. Es wird über einen Fall berichtet, in dem nach einer Bestrahlung mit 536 R ein gesunder Knabe geboren wurde, der bei Abschluß der Untersuchung 14 Jahre alt und bei guter Gesundheit war.

Die Latenzzeit für auftretende Erkrankungen liegt im Bereich von ungefähr einem Jahr. Die Prognose ist in der Regel gut /Cushing, 1968/.

Schmid und Bauchinger /Schmid, 1969/ berichten über das Auftreten von Chromosomenaberrationen bei Patientinnen nach einer kombinierten Ra-Röntgentherapie von Genitalkarzinomen. Dabei wurde ein Zeitraum von wenigen Stunden bis 27 Jahren nach der letzten Strahlenexposition erfaßt. Bei annähernd gleicher Dosis war die Zahl der Zellen mit Aberrationen unmittelbar und im ersten Jahr nach der Bestrahlung mit im Mittel 22 % aller analysierten Zellen am größten. Dieser Anteil verringerte sich in den ersten 4 Jahren nach der Bestrahlung rasch, in den folgenden 2 Jahrzehnten nur noch geringfügig.

Zur Strahlenbehandlung von malignen Tumoren werden in der Gynäkologie auch heute noch überwiegend Radium-Applikatoren eingesetzt. Diese sind normalerweise nicht mit einer bestimmten Ra-Menge beladen, sondern enthalten Vorrichtungen zur Aufnahme von Ra-Kapseln in bestimmter geometrischer Anordnung. Zur Optimierung der jeweiligen Bestrahlungsbedingungen sind Informationen über die jeweilige räumliche Dosisverteilung erforderlich, die heute mit elektronischen Rechenanlagen vorgenommen werden /Steinsträßer, 1975/. Die Formeln dazu wurden bereits 1921 von Sievert aufgestellt /Sievert, 1921/.

Eine irische Arbeit /Burrows, 1968/ gibt einen Überblick über die Anwendung von Radium bei der Therapie des Gebärmutterhalskarzinoms seit 1903, über Heilungs-

quoten nach 5 Jahren, über verschiedene Techniken (zum Teil kombiniert mit Röntgenbestrahlung), und über auftretende Komplikationen. Die Ergebnisse werden mit denen anderer Kliniken, z. B. in USA verglichen. Eine kalifornische Arbeit /Overstreet, 1964/ berichtet, daß Radiumbestrahlungen in früherer Zeit auch zur klinischen Sterilisation angewandt wurden; heute zieht man operative Techniken vor.

Obwohl Radium seit der Jahrhundertwende im medizinischen Bereich benutzt wird, war 1962 Mississippi der erste Staat der USA, der für den Gebrauch von Radium eine Genehmigungspflicht einführte. Die anderen Staaten der USA folgten; zumindest wird eine Registrierung der Radium-Quellen und Benutzer vorgeschrieben.

Eine Studie über Einrichtungen zur medizinischen Radiumanwendung, die vor allem in der Frauenheilkunde vorkommen, gibt u. a. Informationen über die Belastungen des medizinischen Personals /Tapert, 1975/. Tab. 3.13 gibt z. B. eine Übersicht über die Anzahl der im Jahr 1966 vorgenommenen Radium- und Radon-Behandlungen.

Art der Behandlung	Zahl der Fälle
intrakavitär	42 432
interstitiell	19 517
dermatologisch	15 086
am Nasenrachenraum	7 676
am Auge	270
Summe	84 981

Tab. 3.13: Radium- und Radon-Behandlungen im Jahr 1966

Tab. 3.14 vergleicht die Strahlenbelastung in den USA durch Röntgendiagnostik und Nuklearmedizin mit der durch Radium - Radon - Therapie.

Art der Belastung	Zahl der Patienten	Man-rem	
		Summe	Einzelfall
Röntgenuntersuchung	366×10^3	60×10^3	0,165
Nuklearmedizin	$25-33 \times 10^3$	9×10^3	0,27-0,35
Ra-Rn-Therapie	$20-40 \times 10^3$	35×10^3	0,9 -1,8
Industrielle Radiographie (Umgang mit radioaktivem Material)	$5-7 \times 10^3$	7×10^3	1 -1,6

Tab. 3.14: Vergleich jährlicher Strahlendosen

Für das medizinische Personal läßt sich sagen, daß die Belastungen einzelner Ärzte (bis zu 1 360 mrem im Vierteljahr) bzw. einzelner Körperteile des Personals (bis zu 6 628 mrem am Zeigefinger bei einer Anwendung) sehr hoch sein können, es ist also in der Tat sinnvoll, den Gebrauch von Radium zu überwachen.

Angeregt wurde dies z. B. schon 1948 im "British Journal of Radiology" /Wilson, 1948/. Aus der Meß- und Prüfstelle für die Gewerbeaufsichtsverwaltung des Landes Hessen stammt eine detaillierte Darstellung von Richtlinien zum Schutz des Personals bei medizinischer Radiumanwendung /Körner, 1962/. Hier werden auch "Halbwertsdicken" verschiedener Abschirmmaterialien angegeben.

3.4 Thorotrast- und Radium-224-Patienten

Thorotrast ist eine Substanz, die zu 25 % aus Thorium-232-Dioxid-Sol besteht. Sie wurde etwa von 1930 bis 1945 medizinisch verwendet. Die biologische Halbwertszeit wird als etwa 400 Jahre abgeschätzt. Die Gruppe der Thorotrastpatienten ist eine wichtige Quelle für die Untersuchung chronischer interner Strahleneinwirkungen. Diese Patientengruppe in der Größenordnung einiger tausend Patienten ist möglicherweise die größte Gruppe mit inneren Strahlenquellen. Bekannt sind z. B. 1871 Fälle in Portugal und mindestens 4 300 Fälle in den USA. Darüber gibt es eine Reihe von epidemiologischen Untersuchungen /Horta, 1967; Telles, 1967; Faber, 1967; Blomberg, 1967; Faber, 1973/.

In Deutschland wurde Thorotrast 1928 als Kontrastmittel bei der Radiographie eingeführt. Ab 1930 war eine (stabilisierte) kolloidale Thoriumdioxidlösung im Handel verfügbar und blieb für ca. 20 Jahre im Gebrauch. Sie wurde vor allem bei der Gefäßdarstellung von Milz und Leber sowie des Gehirns und der Blutkreislauf-Arterien verwendet.

Nuklide	Zerfallsart	Halbwertszeit			
		Jahre	Tage	Stunden	Minuten
Th-232	α	10^{10}			
Ra-228	β	5,7			
Ac-228	β, γ			6,1	
Th-228	α	1,9			
Ra-224	α		3,6		
Rn-220	α				0,9
Po-216	α				$\ll 1$
Pb-212	β, γ			10,6	
Bi-212	β, α			1	
Po-212	α				$\ll 1$
Tl-208	β, γ				3

Tab. 3.15: Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe

Tab. 3.15 zeigt die 11 Nuklide der Thorium-Zerfallsreihe mit ihren Halbwertszeiten und Hauptzerfallsarten. Jedes der Elemente, also auch die Radium-Isotope Ra-228 und Ra-224, trägt auf seine spezifische Weise zur Radionuklidverteilung im Körper und zur Dosisbelastung bei. In einer Arbeit von Pavlovskaya wird ausgeführt, wie etwa Elektronenkonfiguration, Radius, Ladung, Hydrolyseeigenschaften, Komplexbildungseigenschaften, Absorption, Oxidation bzw. Reduktion, Ionenpotential den Transfer ins Blut sowie Akkumulation und Ausscheidung der verschiedenen Elemente bzw. Ionen beeinflussen. Hinzu kommt ein Einfluß durch verschiedene Inkorporationswege. So gelingt z. B. der Transfer ins Blut für vierwertiges Thorium weniger leicht als für zweiwertiges Radium oder gar zweiwertiges Blei, die Isotopen der Thorium-Zerfallsreihe erreichen nach der Injektion der kolloidalen Thorotrastlösung u. U. andere Zielorgane als bei anderen Arten der Inkorporation.

Die Gaben von Thorotrast lagen zwischen 10 und 100 ml, so daß entsprechend eine Dosis-Wirkungs-Beziehung nur für einen sehr kleinen Dosisbereich aufgestellt werden kann. Das einmal injizierte Thorium (Th-232, Th-228) verbleibt im Körper. Ablagerung und Verteilung des Thoriums selbst sowie seiner Tochterprodukte (Ra-228, Ra-224, Pb-212, Rn-220) sind nicht vollständig bekannt /Goldin, 1972, Pavlovskaya, 1973/.

Das gebildete Ra-228 und Ra-224 werden mit Urin und Stuhl ausgeschieden, und zwar ~ 66 % des Ra-228 und 20 % des Ra-224. Das im Körper gemessene Ra-224 steht im radioaktiven Gleichgewicht mit dem Th-228.

Zur Übersicht über die Verteilung der wichtigsten Isotope der Th-Zerfallsreihe im Körper soll Tabelle 3.16 dienen.

Bei der Thorotrastbehandlung wurden durchschnittlich 20 ml Thorotrast (das entspricht 4 g Thorium-232) inkorporiert. Damit ergeben sich 20 Jahre nach der Inkorporation 220 mrd pro Woche für das trabekuläre Knochenmark und 10 mrd pro Woche für die Osteozyten.

Interessant ist ein Vergleich mit der Ra-226-Knochenbelastung:

Von Spiers wird eine entsprechende Rechnung für Radium-226 aufgestellt. Damit ergibt sich eine Dosis von 5 mrd pro Woche für das trabekuläre Knochenmark und von 70 mrd pro Woche für die Osteozyten.

Gesamtaktivität	Th-232	Th-228	Ra-228 < 10^{-6} Ci	Ra-224	Rn-220	Pb-212
Niere			50 % $3 \cdot 10^{-9}$ Ci 3rd/w			
markfreies Skelett (7 000 g) fest eingebaut austauschbar /Grillmeier, 1965/			2 % 0,02 %	2,4 % 0,6 %		
RES (reticulo- endotheliales System) a) Leber b) Milz			75 % 25 %	75 % 25 %		
markhaltiges Skelett (nach 20 a)				16 %		
Knochenmark (300 g)				13 %		

Tab. 3.16: Verteilung im Körper bei Thorotrast

Die Dosisleistung in den Osteozyten durch 20 ml Thorotrast ist 7 mal kleiner als durch 0,1 μCi Radium-226, die Dosisleistung im trabekulären Knochenmark jedoch 45 mal größer.

Bis 1965 konnten keine Osteosarkome oder Knochennekrosen als Folge einer Inkorporation von kolloidalem ThO_2 beobachtet werden. Durch Dosen bis 120 rd entstanden keine Strahlenschädigungen des Skelettsystems.

Die Grenzdosisleistung für Thorotrast liegt bei 500 rem pro Woche, die maximal zulässige Dosisleistung durch Radium-226 bei 700 rem pro Woche.

Von Rajewsky wurden 1939 600 rem pro Woche angegeben /Rajewsky, 1939/.

Rajewsky hat schon 1936 Grenzwerte für Dosisbelastungen bei Radium-Vergiftung angegeben. Dabei wird als Minimaldosis für Osteosarkome 1 200 rem bezeichnet /Rajewsky, 1936/. Eine Aktivität von 0,1 μCi gilt als gerade noch zulässig, eine Aktivität von mehr als 0,75 μCi gilt als radiotoxisch.

1941 wurden 0,1 μCi als Toleranzmenge für im Körper abgelagertes Radium (Restradium) festgelegt. Die ICRP-Publikation Nr. 2 gibt folgende Grenzwerte an:

	Thorium-228 (löslich)	Ra-224	Ra-228
Knochen	2×10^{-8} Ci	$7 \cdot 10^{-7}$ Ci	$6 \cdot 10^{-8}$ Ci
Niere	9×10^{-8} Ci		
Gesamtkörper	9×10^{-8} Ci	$6 \cdot 10^{-8}$ Ci	
Leber	50×10^{-8} Ci		

In den Fällen, in denen Thorotrast verwendet wurde, waren die Werte für Thorium-228 1/20 bis 1/40 der maximal zulässigen Menge; trotzdem entstanden schwere Spätschäden /Muth, 1965/, die möglicherweise nicht allein auf das radioaktive Thorium, sondern auf andere Bestandteile der kolloidalen Lösung (z. B. Pt) zurückzuführen sind. Kaul und Heider haben detaillierte Untersuchungen über die Änderung der zeitlich-räumlichen Verteilung von Radium-228 und Radium-224 im Körper angestellt. Dazu dienten u. a. Versuche mit Kaninchen. Die Untersuchungen der Kinetik der Verteilung und Ausscheidung der Radioisotope wurden durch ein Kompartimentmodell dar-

gestellt. Es läßt sich feststellen, daß für die knochensuchenden Isotope Ra-228 und Ra-224 das markfreie Skelett das kritische Organ ist. Es ist aber strittig, ob sich die Daten vom Kaninchen auf den Menschen übertragen lassen; z. B. ist die biologische Halbwertszeit für das Kaninchen ungefähr 20 Stunden, für den Menschen aber 10 Tage /Kaul, 1969; Kaul, 1970/.

Auch von Grillmaier und Ko-Autoren wurde im Jahr 1967 ein Kompartimentmodell für Radium-224 in Thorotrast-Patienten aufgestellt. Für die Radium-Retention (R) gibt Grillmaier die Retentionsfunktionen von Morris und von Finkel an:

$$\text{Morris: } R = 0,54 \times t^{-0,52}$$

$$\text{Finkel: } R = 0,28 \times t^{-0,43}$$

Eine Arbeit von Snyder /Snyder, 1973/ gibt einen Hinweis auf eine mögliche Altersabhängigkeit des Metabolismus bei verschiedenen Radionukliden, die auch hier beachtet werden sollte.

Spiess hat verschiedene klinische Ergebnisse nach der intravenösen Verabreichung von Peteosthor, einer Lösung, die Radium-224 enthält, aufgeschlüsselt; aber Einschränkungen in der Verfolgung der Fälle und bei der Dosimetrie und das Fehlen einer Dosiswirkungsanalyse mindern etwas den Wert dieser Studie /Spiess, 1969/.

Von Faber wurden 1962 /Faber, 1962/ 10 Fälle von Leukämie nach Thorotrastbehandlung untersucht. Die Latenzzeit lag zwischen 7 und 23 Jahren, im Mittel bei 15 Jahren. Die durchschnittlich verwendete Thorotrastmenge war ungefähr 50 ml. Die Belastung des Knochenmarks lag bei 450 rd, das entspricht 4 500 rem. Es entwickelten sich Endothelzellsarkome der Leber, die auch als "klassische Thorotrast-Tumoren" bezeichnet werden.

Von Rowland wurde festgestellt, daß 43 % der im Skelett abgelagerten radioaktiven Substanzen diffus verteilt sind /Rowland, 1959/; 50 % finden sich dagegen in "hot spots". Die Konzentrationen in diesen "hot spots" liegen bis zu 40 mal höher. Im Laufe der folgenden Jahre verlagert sich die Verteilung mehr zum Diffusen hin. Gerade dieser Vorgang macht die Angabe von Grenzwerten schwierig.

Die besonders interessierenden Konzentrationen von Ra-228 und Ra-224 können nach einer Autopsie der Thorotrast-Patienten aus den Ergebnissen einer Reihe von γ -Messungen für einzelne Organe berechnet werden /Goldin, 1972/. In den untersuchten Fällen stand der Tod der Patienten nicht erwiesenermaßen im Zusammenhang mit der Inkorporation von Thorium.

In Knochen und Blut fanden sich relativ geringe Radionuklid-Konzentrationen, besonders hohe in Leber und Milz. Radium wird aber auch in Knochen abgelagert. Vergleichsmessungen von Ra-228, Ra-224 und Th-228 in verschiedenen Leber- und Milzproben ergaben, daß die Standardabweichung ca. 10 - 20 % ist. Die Ablagerung von 50 % des Ra-228 in der Niere führte in einer Gruppe von Patienten bei 6 von 7 Fällen zu malignen Prozessen. Eine Abschätzung der Aktivität für die gesamte Niere ergibt ungefähr 3×10^{-9} Ci Ra-228, was zu einer Strahlenbelastung von 3 rd pro Woche führt.

Rowland gibt zwei Möglichkeiten an, das Risiko einer Ra-224-Injektion für den Menschen abzuschätzen. Er geht dabei von mehrfachen Injektionen in Perioden von Wochen oder einigen Jahren aus und berechnet das Risiko für den Zeitraum von 19 - 25 Jahre nach der ersten Injektion. Der Anteil F der Fälle mit einem Knochentumor als Funktion der mittleren Dosis D in mineralischen Knochen ergibt sich nach der linearen Hypothese als

$$F = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot D$$

und nach der quadratisch exponentiellen Hypothese als

$$F = 3,7 \cdot 10^{-7} \cdot D^2 \cdot e^{-D/1400}.$$

Für Ra-224 konnte ein Vergleich der Ergebnisse nach der Autopsie mit Ganzkörpermessungen zu Lebzeiten vorgenommen werden. Man fand bei einer 71jährigen Patientin, der 19 Jahre vor ihrem Tod 30 ml Thorotrast injiziert worden waren, bei der Ganzkörpermessung 0,136 μ Ci und bei der Organanalyse 0,165 μ Ci Ra-224, also einen etwa 20 % höheren Wert. Diese Übereinstimmung kann als zufriedenstellend betrachtet werden. Aufgrund der Messungen lassen sich Dosisbelastungen der einzelnen Organe angeben. Bei der schon erwähnten Patientin liegen die Werte zwischen 8 rd pro Jahr für den Knochen und 169 rd pro Jahr für die Milz; bei einem anderen Patienten mit ähnlicher Krankengeschichte fand man Werte zwischen 11,5 rd pro Jahr für den Knochen und 204 rd pro Jahr für die Lymphknoten im Bereich der Pfortader. Die Ergebnisse sind wegen der biologischen Besonderheiten einzelner Patienten mit großer Vorsicht zu betrachten. So fand sich bei einer Patientin ein Verhältnis der Leberdosisrate zu der im Knochenmark von 0,56, im Fall eines anderen Patienten von 3,00.

Weiteren Aufschluß über die Auswirkungen von Thorium und seinen Folgeprodukten im menschlichen Körper erhält man aus Untersuchungen solcher Patienten, bei denen ein Morbus Bechterew mit Thorium behandelt wurde /Laschner, 1973/. Die zitierte Arbeit bezieht sich auf Erfahrungen mit ungefähr 100 Patienten. Aktivitätsmessungen wurden hier nicht vorgenommen. Es wurden zwar unliebsame Nebenwirkungen (z. B. Iridozyklitis,

Magengeschwür, Anämie), bemerkt, die nur qualitativ beschrieben werden, die positive Wirkung (Verbesserung der Gelenkbeweglichkeit) spricht aber für die therapeutische Anwendung.

Wenn unreines Ra-224 verwendet wird, ist eine unzulässig hohe Bestrahlung der Patienten zu befürchten. Vom Max-Planck-Institut für Biophysik wurden lieferbare Präparate auf ihren Gehalt an langlebigen radioaktiven Produkten wie Th-228 (Radiothorium) überprüft. Die Reinheit der Präparate hat sich seit 1952 entscheidend verbessert /Haike, 1967/.

Eine Studie von Spiess und Mays /Spiess, 1970 a; Spiess, 1970 b/ beschreibt Erfahrungen mit 1.811 Patienten, denen Radium-224 (ThX) injiziert worden war. Die aufgenommenen Dosen liegen zwischen 6 und 5 750 rd. Hier wurden unter 891 weiterverfolgten Fällen 49 Knochensarkome gefunden, davon 34 bei Patienten im Wachstumsalter. Weichteilkarzinome fanden sich fast ausschließlich bei Erwachsenen, der Zusammenhang mit der Radiumbehandlung ist nicht gesichert. Der Befund stimmt mit der Tatsache überein, daß bei Kindern, in deren Skelett ein größerer Anteil des injizierten Radiums eingebaut wurde als bei Jugendlichen und Erwachsenen, 60 % der Radiumatome im Knochen zerfallen, bei Jugendlichen etwa 40 % und bei Erwachsenen nur 20 %. Die Latenzzeiten für Knochensarkome lagen zwischen 4 und 18 Jahren. Strahlendosis und Häufigkeit von Sarkomen scheinen in direkter Beziehung zu stehen. Es ist dabei keine deutliche Schwelle zu erkennen /Spiess, 1971/.

Dosis-Bereich (rd)	Mittlere Dosis (rd)	Zahl der Fälle	Zahl der Sarkome	Anteil der Sarkome
2000 - 5750	3332	21	8	0,381 \pm 0,135
1000 - 1999	1352	72	19	0,269 \pm 0,061
500 - 999	692	121	9	0,074 \pm 0,025
200 - 499	313	221	8	0,036 \pm 0,013
90 - 199	139	205	3	0,015 \pm 0,008
6 - 89	54	175	0	0,0 \pm 0,006
		815	47	

Tab. 3.17: Ra-224-Fälle

Lebertumoren kommen häufig vor, besonders Haemangioendotheliome; Risikoabschätzungen sind aber nur auf der Basis der linearen Hypothese möglich /Rowland, 1974/. Insgesamt sind Kinder ein- bis viermal empfindlicher als Erwachsene. Auffallend häufig finden sich Leber- und Nierenschäden, selten Leukämie als Todesursache. Zusätzlich gibt es Hinweise über Chromosomendefekte bei Ra-224-Patienten.

Über die Wirkungen von Ra-224 und Thorotrast fand 1974 ein internationales Symposium in Alta/Utah statt, bei dem die verschiedenen Aspekte der Inkorporation dieser Radionuklide bzw. ihrer Lösungen dargestellt wurden /Mays, 1978/.

So wurden für Ra-224 die Wirkungen auf Weichteilgewebe und Skelett des Menschen von Spiess, Mays und Gerspach besonders behandelt und in einem Beitrag von Marshall, Groer und Schlenker die Wirkungen von Ra-224 und Pu-239 mit denen von Ra-226 verglichen. Ebenso gibt dieser Konferenzbericht eine Übersicht der Kenntnisse über die Wirkungen von Thorotrast-Injektionen. Hinzu kommt eine Darstellung der Studien über Ra-226 und Ra-228 im CHR von Rowland et al. und schließlich eine Bewertung der radiobiologischen Signifikanz der Studien über Ra-224 und Thorotrast durch R. H. Mole. Das Ergebnis ist, daß die Thorotrast-Studien in Dänemark, Portugal und Deutschland eine Zunahme von Lebertumoren und Leukämien zeigen und daß andere Erkrankungen des Knochenmarks und des retikulären Lymphgewebes sich ebenfalls vermehrten. Eine erhöhte Zahl von Lungentumoren fand sich dagegen nur in Dänemark und Portugal.

Es zeigte sich, daß die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Dosis über ein Organ, wie z. B. die Leber, eine allzu grobe Vereinfachung ist und daß weitere Untersuchungen erforderlich sind, um genaueren Aufschluß über das Entstehen von Weichteilkarzinomen zu gewinnen.

So war es nur konsequent, daß im Jahr 1976 bei der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in Neuherberg ein weiteres Symposium über die biologischen Wirkungen von Ra-224 stattfand /Müller, 1978/. Dieses Symposium behandelte vor allem zwei Aspekte der Wirkung von Ra-224: die Langzeitwirkung ionisierender Strahlung mit hohem linearem Energietransfer, wie er für α -Strahlung typisch ist, und die Frage des Strahlenschutzes bzw. des Abwägens von Nutzen und Risiko bei der medizinischen Anwendung der Strahlung. Diese letztere Frage ist von besonderer Bedeutung, weil Ra-224 seit Anfang dieses Jahrhunderts angewandt wurde und noch immer klinisch angewandt wird.

Insbesondere zum Einfluß einer Protraktion der Dosis sind weitere Studien erforderlich. Sie werden durch Tierversuche ergänzt - auch hierzu gab es bei diesem Symposium verschiedene Beiträge.

In der Schlußdiskussion I dieses Symposiums wurden auch Studien mit verschiedenen Radionukliden, darunter alle hier interessierenden Ra-Isotope, zusammengestellt, die für verschiedene Formen der Dosis-Wirkungsbeziehung bei α -Strahlung sprechen - überwiegend wohl für eine lineare Beziehung. Es blieb offen, ob es eine Schwelle für die Wirkung von Ra-224 gibt.

3.5 Medizinisch-technischer Umgang mit Radium

Aus dem beruflichen Umgang mit Radium in der Medizin sind frühzeitig auch Unfälle und Todesfälle bekannt geworden. Dabei muß zwischen Schäden durch externe Bestrahlung aus Radium-Applikatoren, wie sie z. B. in der Frauenheilkunde verwendet werden, und Schäden durch Inkorporation von Radium unterschieden werden. Als Schädigungen im menschlichen Körper fanden sich vor allem Erkrankungen des Blutes und des blutbildenden Systems, nekrotisierende Prozesse im Bereich der lymphatischen Organe (besonders im Rachenring und in der Mundhöhle), Erkrankungen der Haut (besonders an den Händen), sowie Erkrankungen der Lunge.

Zur Geschichte von Schädigungen durch Strahlung muß man bedenken, daß Hautschäden seit 1896 vorkamen, der erste Fall eines strahleninduzierten Krebses aber erst im Jahr 1902 bei einem Röntgentechniker auftrat. Zunächst fehlten Beobachtungen über Art der Bestrahlung, Dosis, Zeitverlauf u. a. fast völlig. In der Literatur gab es bis 1953 nur ungefähr 200 veröffentlichte Fälle von Strahlenkrebs /Petersen, 1954/.

Die Kenntnisse über die Wirkungen des Radiums waren zunächst außerordentlich gering. So kam es z. B. bei Mitarbeitern ein und desselben Betriebs nacheinander zu drei Todesfällen in den Jahren 1931, 1936 und 1944. Bei allen drei Fällen war die Lunge erkrankt, im dritten Fall zusätzlich das Blut und die Hände. In diesem Fall ging die Schädigung von 3,5 µg Radium-Äquivalent, entsprechend einer ursprünglichen Belastung mit 150 bis 200 µg Radium, aus. Nach Rajewsky finden sich nämlich zwei Jahre nach Inkorporation maximal 2 % der ursprünglichen Menge noch im Körper. Die toxische Dosis wurde in den 40er Jahren als 1 µg Radium angegeben, die Latenzzeit für radiuminduzierte Erkrankungen auf 4 bis 20 Jahre abgeschätzt /Roth, 1951/.

Auf dem internationalen Radiologenkongreß von 1950 wurden 0,1 µg im Körper fixiertes Radium als Toleranzmenge angegeben. Dennoch wird für das Jahr 1957 ein Fall von gewerblicher Radiumvergiftung beschrieben, bei dem die Ablagerungsmenge an Radium in der zulässigen Größenordnung lag. Die gemessene α -Aktivität entsprach 4 µCi pro Ganzkörper. Der Betroffene hatte mit Radium- und Mesothorium (Ra-228)-Präparaten gearbeitet und Abscheidungen von Thorium 228 vorgenommen. Die hohe Gesamtaktivität wurde hier im wesentlichen durch das Endprodukt der Ra-Zerfallsreihe, Po-210, hervorgerufen. Der Patient starb mit schwerer Lungenfibrose /Muth, 1957/.

Während der normale Gehalt des menschlichen Körpers bei 10^{-5} bis 10^{-3} µCi Radium-226 liegt, fanden sich bei einer Patientin im Jahr 1963 nach einer ersten Abschätzung ungefähr 0,14 µCi Radium-226 im Skelett, d. h. ein Wert im Bereich des damaligen MPC-Wertes. Die Röntgenbilder wiesen auf eine höhere Radium-Belastung; eine sorgfältige Analyse ergab, daß die Patientin vor ca. 35 - 40 Jahren innerhalb eines relativ kurzen Intervalls intravenös Radium erhalten haben mußte, die damalige Radium-Ganzkörperbelastung wurde auf 2 µCi extrapoliert. Tatsächlich war die Patientin in

den frühen 20er Jahren wegen einer Schuppenflechte mit einer radiumhaltigen Lösung behandelt worden, und sie starb ungefähr 40 Jahre nach der Inkorporation an einem Osteosarkom mit Lungenmetastasen /Lucas, 1963/.

Dieselbe lange Latenzzeit fand sich auch beim Fall eines Mannes, der seit 1904 Umgang mit Radium und Radon gehabt hatte: nach Schäden der Haut im Jahre 1914 und der Amputation eines Fingers im Jahr 1920 bekam er 1936 eine Anämie; 1954 starb er 74jährig an Leukämie /Abbatt, 1957/.

Ein eher skurriler Einzelfall wurde 1973 beschrieben: Ein Patient entwickelte Hautschäden, die durch einen Ring hervorgerufen zu sein schienen, den er seit 30 Jahren trug. Es stellte sich heraus, daß der Ring Radium-226 enthielt, dessen Herkunft nicht geklärt werden konnte. Es hatte sich bereits ein Stachelzell-Karzinom entwickelt, das nach gelungener Diagnose mit Erfolg behandelt werden konnte. Wie in mehreren anderen berichteten Fällen wurde vermutet, daß das zum Ring verwendete Gold von Radiumträgern stammte /Holubar, 1973/.

In einer Arbeit von Hasterlik et al. /Hasterlik, 1964/ wird das Krebsrisiko behandelt, das bei industrieller Tätigkeit und bei Unfällen durch Strahlenexposition entsteht. Neben den bekannten Zifferblattmalerinnen, Radiochemikern und Radiumpatienten werden hier auch Arbeiter in Uranminen erwähnt. Nach Ansicht der Autoren beweist in all diesen Gruppen das gehäufte Vorkommen sonst seltener Tumoren die kausale Relation zwischen Strahleneinwirkung und Krebsentstehung.

Im Kaiser-Wilhelm-Institut für Biophysik in Frankfurt (heute: Boris-Rajewsky-Institut) sind seit 1939 zusammenfassende Untersuchungen von Radiumvergiftungen vorgenommen worden /Janitzky, 1938; Inouye, 1938; Dreblow, 1948/.

Als kritische Menge für auftretende Vergiftung werden bei oraler Aufnahme 100 µg Radium-Äquivalent betrachtet, die einer Restradiummenge von 1 µg Radium-Äquivalent entsprechen. Es wird ein Frankfurter Fall berichtet, bei dem drei Jahre nach der Inkorporation der Tod eintrat; zu diesem Zeitpunkt fanden sich noch 6 µg Radium im Gesamtorganismus. Ebenfalls in Frankfurt ereignete sich 1943 der Fall eines Chemikers, der 10 Jahre in einem Radiumbetrieb beschäftigt war. Seine Erkrankung an akuter Anämie deutete auf eine typische alte Radiumvergiftung hin. Eine Untersuchung ergab einen Gesamtgehalt des Körpers von 3 bis 4 µg Radium. Alle Kleidung, Briefftasche, Nagelfeile, Taschenmesser und Taschentücher waren ebenfalls mit radioaktiver Substanz verseucht. Der Tod trat 1944 ein. In der Arbeit von Dreblow und Krebs wird auch über Todesfälle nach Haustrinkkuren mit radiumhaltigen Wässern berichtet.

Zusammenfassend läßt sich aus diesen Unfällen folgendes feststellen: Die Toleranzmenge an Radium liegt bei 1 µg für die Inkorporation, d. h. 0,1 µg Restradium.

Erste Unfälle wurden 1931 beschrieben /Roth, 1951/. Erste Versuche über Ausscheidung nach intravenöser Injektion und Ingestion wurden schon 1915 vorgenommen /Rajewsky, 1952/; ungefähr 1930 war bekannt, daß etwa 98 % des Radiums ausgeschieden werden. In den Jahren 1930-1933 kam es auch zu "Menschenversuchen" mit Radium, da die Autoren von der Ungefährlichkeit dieser Substanz damals noch überzeugt waren.

Seit den 50er Jahren ist bekannt, daß von der Restmenge an Radium 95 bis 99 % im Skelett angelagert werden /Looney, 1956/. Zu dieser Zeit wurden auch Methoden zur Abschätzung des Metabolismus von Radium im Körper entwickelt; dazu wurde die Exkretion und das Radon in der Atemluft gemessen; letzteres war damals allerdings nur eine sehr ungenaue Methode.

Die Latenzzeit für radiumbedingte Krebserkrankungen reicht offenbar bis zu 50 Jahren nach der Inkorporation /Abbatt, 1957/, s. auch Abschn. 5.

Die Jahresberichte des Bundesministers des Innern über "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung" geben auch Hinweise auf Fälle, in denen Radium insbesondere bei beruflichem Umgang inkorporiert wurde. Es finden sich Fälle im Zusammenhang mit Ra-226, Ra-228 sowie mit Folgeprodukten der verschiedenen natürlichen Zerfallsreihen.

Eine Tabelle aus dem Jahresbericht 1977 /BMI, 1977/ erwähnt folgende Fälle:

Jahr	Nuklid	Bundesland	Bereich	Zahl der Personen mit Inkorporation (in % der nach ICRP 2 maximal zulässigen Mengen)		
				> 1 ≤ 30	> 30 ≤ 100	> 100
1968	Ra-228	NRW	Industrie u. Technik	1		
1976	Ra-226	BW	"	39	1	
1977	Ra-226	BW	"	41		
1977	Ra-226	NRW	Medizin u. Forschung	1		

Tab. 3.18: Inkorporation von Radium

Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei darauf hingewiesen, daß eine Statistik über solche Fälle nicht in allen Bundesländern verfügbar ist.

Die Jahresberichte 1975 und 1976 /BMI, 1975; BMI, 1976/ enthalten in einer Liste besonderer Vorkommnisse einige Fälle, in denen der Umgang mit Radium nicht vorschriftsmäßig erfolgte. So kam es im Juli 1975 zu einem vorübergehenden Verlust von 40 mg Ra, weil bei der Entfernung eines kombinierten Radiumträgers (gelegt zur Behandlung eines gynäkologischen Karzinoms) die Trägerplatte irrtümlich mit den Instrumenten zur Reinigung in die Zentralsterilisation gegeben wurde. Das Präparat wurde erst nach Stunden wieder aufgefunden, so daß es zur ungewollten Strahlenbelastung von 5 Beschäftigten in der Sterilisationsabteilung mit < 5 rem kam.

Ebenso aus Unachtsamkeit wurde im Juli 1976 im Applikationsraum eines Krankenhauses ein Präparat mit 10 mCi Ra-226 beschädigt; der Raum wurde erheblich kontaminiert, eine Inkorporation bei Personal oder Patienten konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Ebenfalls im Juli 1976 fanden sich im Tresor eines Universitätsinstituts unter anderem radioaktivem Material auch Radiumnadeln, die durch Wechsel der Lehrstuhlinhaber seit 1957 in Vergessenheit geraten waren. Hier ergaben sich keine radiologischen Folgen.

Im Oktober 1976 kam es zum vorübergehenden Verlust eines Radium-Applikators mit 60 mCi Radium innerhalb eines Krankenhauses; der Applikator, der durch Fehlverhalten einer Patientin ins Abwasser geraten war, konnte später unversehrt aus dem Abwasserkanal geborgen werden, so daß es auch hier nicht zu radiologischen Folgen kam.

Anläßlich eines IAEA-Symposiums über Strahlenunfälle wurde auch eine Übersicht über Unfälle mit Radium-Präparaten in den USA gegeben /Villforth, 1969/. Wichtig sind an dieser Stelle die Empfehlungen, die gegeben werden, um Unfälle zu verhüten bzw. Unfallfolgen zu begrenzen. Diese Empfehlungen richten sich vor allem auf den medizinischen Bereich. Es geht dabei um eine genaue Übersicht, wieviel Radium sich in einzelnen Präparaten befindet und ob die Präparate intakt sind.

Tab. 3.19 /BMI, 1978/ gibt eine Übersicht darüber, welche Industrieerzeugnisse radioaktive Stoffe enthalten und durch welche ein Kontakt mit Radium möglich ist.

Tab. 3.20 /BMI, 1977/ gibt eine Übersicht über Umfang und Ergebnisse der Prüfung umschlossener radioaktiver Stoffe.

Warengruppe	Einzelprodukt	Enthaltene Radionuklide	Nutzen
Gas- und Aerosol-Detektoren	Rauch- und Feuermelder	Ra 226, Am 241	Verhinderung von Brandkatastrophen
Antistatika	Diverse Vorrichtungen für Verhinderung von Aufladungen	Ra 226, Am 241	Beseitigung von Unfallgefahren
Vorrichtungen mit Tritiumgasleuchtröhren	Notbeleuchtungen	H 3	
Elektronische Bauteile und elektrotechnische Geräte	Überspannungsableiter	Pm 147	
	Elektronenröhren	Co 60, Cs 137, Kr 85, H 3	Verbesserung der Funktionssicherheit von Geräten, Energieersparnis
Technische Geräte	Prüfstrahler bzw. Eichstrahler	Ir 192, Co 60, Cs 137, Na 22, C 14, Sr 90, Ba 133, Pb 210, Ra 228	Eichen von Strahlungsmeßgeräten, Strahlenschutz
Wissenschaftliche Instrumente	Dicken- und Dichtemeßgeräte	Co 60, Kr 85, Sr 90, Cs 137, Pm 147, Ti 204, Am 241	Ermöglichen bestimmter Leistungen, Technische Hilfsmittel
	Füllstandsmeßgeräte	Co 60, Cs 137	
	Röntgenfluoreszenzanalysengeräte	H 3, Pm 147, Cd 109, Fe 55, Pu 238	Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Instrumenten
	Gaschromatographen	H 3, Ni 63	
	Geräte für Demonstrationzwecke, z. B. in Schulen	Ra 226	Didaktische Hilfsmittel
Geräte, die Leuchtfarben enthalten	Skalen und Zeiger bei Uhren, Kompassen, Luftfahrzeuginstrumenten	H 3, Pm 147	Optische Hilfsmittel zur Erhöhung der Verkehrssicherheit
Glaswaren für den Gerätebau	Optische Gläser, optische Linsen	Th nat	Radioindikatoren zur Überwachung der Herstellung bzw. der Qualität von Produkten
Metallegerungen	Stahl/Thorium-Wolfram/Thorium-Molybdän/Thorium-Magnesium/Thoriumlegierungen	Th nat	
Keramische Gegenstände, Glaswaren	Uranfarben für Kacheln und Porzellane	Natürliches oder abgereichertes Uran	Dekor

Tab. 3.19: Radioaktive Stoffe enthaltende Industrieerzeugnisse für Wissenschaft, Technik, Landwirtschaft und private Haushalte

Bundesland	Zahl der im Jahr durchgeführten Dichtheitsprüfungen			Von Spalte 2 entfallen auf						
	1	2		Co	Cs	Ra	Sr	Ti	Sonstige	
		3	4	5	6	7	8	9		
	1975	1976	1977	60	137	226	90	204	204	
				3	4	5	6	7	8	
Baden-Württemberg	2591	2510	2242	207	124	1559	451	86	164	
Bayern	1244	832	1459	106	56	835	114	20	113	
Berlin	399	524	451	50	13	135	188	—	13	
Bremen	361	218	221	18	10	193	128	2	10	
Hamburg	230	439	531	15	—	155	34	—	26	
Hessen	1006	963	1150	108	66	635	75	9	113	
Niedersachsen	1210	1241	1322	84	86	744	155	22	119	
Nordrhein-Westfalen	3548	4188	4262	179	338	2554	214	11	252	
Rheinland-Pfalz	583	610	785	47	28	331	109	5	63	
Saarland	26	63	200	—	9	16	—	—	1	
Schleswig-Holstein	328	330	291	15	22	238	17	10	26	
Summe	11526	11918	12914	829	752	7395	1485	165	900	

Bundesland	Zahl der bei der Prüfung als undicht ermittelten Präparate			Von Spalte 2 entfallen auf								
	1	2		Co	Cs	Ra	Sr	Ti	Sonstige			
		3	4	5	6	7	8	9	10			
	1975	1976	1977	60	137	226	90	204	204			
				3	4	5	6	7	8			
Baden-Württemberg	168	163	1472	478	52	177	127	137	1463	347	45	123
Bayern	137	106	442	72	23	52	69	57	1160	106	9	58
Berlin	46	24	257	178	—	19	90	12	250	80	—	19
Bremen	28	7	165	2	—	16	18	18	152	12	1	20
Hamburg	57	18	277	61	1	25	170	43	271	36	1	10
Hessen	105	84	585	71	7	111	106	86	685	101	14	158
Niedersachsen	219	104	599	195	21	103	194	89	625	204	25	185
Nordrhein-Westfalen	555	439	2494	399	92	209	725	526	2442	255	61	253
Rheinland-Pfalz	70	35	346	116	6	37	56	—	480	121	13	115
Saarland	—	14	36	3	—	10	34	18	127	14	—	7
Schleswig-Holstein	25	26	209	51	4	15	15	18	208	19	9	22
Summe	1410	1020	6882	1626	206	774	1604	1004	7863	1295	178	970

Bundesland	Zahl der bei der Prüfung als undicht ermittelten Präparate			Von Spalte 9 entfallen auf						
	1	2		Co	Cs	Ra	Sr	Ti	Sonst.	
		10	11	12	13	14	15	16		
	1975	1976	1977	60	137	226	90	204	204	
				10	11	12	13	14	15	
Baden-Württemberg	5	2	6	—	—	5	—	—	—	
Bayern	3	1	—	—	—	1	1	—	1	
Berlin	—	1	—	—	—	—	—	—	—	
Bremen	1	—	1	—	—	—	1	—	—	
Hamburg	—	1	3	—	—	—	—	—	—	
Hessen	13	14	2	—	—	8	1	—	4	
Niedersachsen	2	1	—	—	1	—	—	1	—	
Nordrhein-Westfalen	17	22	15	—	4	13	—	—	—	
Rheinland-Pfalz	—	—	4	—	—	—	—	—	—	
Saarland	—	—	6	—	—	—	—	—	—	
Schleswig-Holstein	—	3	—	—	—	—	—	—	—	
Summe	41	45	37	—	5	27	3	1	5	

Bundesland	Zahl der bei der Prüfung als undicht ermittelten Präparate			Von Spalte 9 entfallen auf							
	1	2		Co	Cs	Ra	Sr	Ti	Sonstige		
		10	11	12	13	14	15	16			
	1975	1976	1977	60	137	226	90	204	204		
				10	11	12	13	14	15		
Baden-Württemberg	—	—	1	—	1	—	—	3	2	—	1
Bayern	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
Berlin	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
Bremen	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1
Hamburg	—	—	—	—	—	1	—	3	—	—	—
Hessen	1	1	2	—	10	—	—	—	—	—	2
Niedersachsen	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
Nordrhein-Westfalen	—	—	20	1	1	—	—	15	—	—	—
Rheinland-Pfalz	—	—	—	—	—	—	—	4	—	—	—
Saarland	—	—	—	—	—	—	—	6	—	—	—
Schleswig-Holstein	—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	1	1	29	1	2	11	—	27	6	—	4

Tab. 3.20: Übersicht über den Umfang und die Ergebnisse der Prüfung umschlossener radioaktiver Stoffe in den Jahren 1975, 1976 und 1977

Tabn. 3.21 und 3.22 /BMI, 1978; BMI, 1979/ geben schließlich Informationen über Radium in der Flugasche und mittlere Jahresabgaben aus Kohlekraftwerken, also eine Immissionsbelastung der Atemluft.

Kraftwerk	Radionuklide	Aktivitätskonzentration		
a) nach Messungen der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH	Steinkohlekraftwerke	Kalium 40 Uran 238/Thorium 234 *) Radium 226/Blei 214/Wismut 214 *) Blei 210 Polonium 210 Actinium 228/Blei 212/Titan 208 *)	23 8,8 6,4 64 108 3,0	
	Braunkohlekraftwerke	Kalium 40 Uran 238/Thorium 234 *) Radium 226/Blei 214/Wismut 214 *) Blei 210 Polonium 210 Actinium 228/Blei 212/Titan 208 *)	7,6 2,8 1,4 2,4 4,8 1,0	
	b) nach Gammamessungen des Bundesgesundheitsamtes	Steinkohlekraftwerk	Kalium 40 Radium 226 Thorium 232	18 6,8 2,9
		Braunkohlekraftwerk	Kalium 40 Radium 226 Thorium 232	9,8 1,6 0,8

*) radioaktives Gleichgewicht in der Probe angenommen

Tab. 3.21: Natürlich radioaktive Stoffe in Flugasche (Mittelwerte) in nCi/kg

Radionuklid	Steinkohlekraftwerk	Braunkohlekraftwerk
Uran 238	10	3
Uran 234	10	3
Thorium 232	5	1
Thorium 230	10	2
Thorium 228	5	1
Radium 226	10	2
Polonium 210	150	5
Blei 210	100	3

Tab. 3.22: Mittlere Jahresabgaben radioaktiver Stoffe aus Steinkohlekraftwerken und Braunkohlekraftwerken (bezogen auf jeweils 1 000 MW) in Milli-curie/Jahr

In einer polnischen Arbeit aus dem Jahre 1970 wird der Ra-226-Gehalt von Schnee und Eis in verschiedenen Gebieten untersucht. Die Werte für Schnee in der Umgebung eines Kohlekraftwerks liegen zwischen 0,019 und 0,98 pCi/kg, entsprechend der Entfernung vom Kraftwerk, die Werte für Gletschereis in der Hohen Tatra sind von

0,004 pCi/kg für das Jahr 1880 auf
0,206 pCi/kg für das Jahr 1970 angestiegen.

Dieser Anstieg wird mit der Verbrennung fossiler Kraftstoffe korreliert, die in Warschau verwendete Kohle hatte Radiumanteile von 0,001 bis 1,3 pCi/g, der Mittelwert liegt bei 0,3 pCi/g. Die Ausbreitung von Radium auf diese Weise ist nicht regional begrenzt, sondern läßt sich weltweit beobachten /Jaworowski, 1970/.

Jaworowski et al. geben in einer Studie zum Einfluß der Industrieentwicklung auf die Radiumkonzentration in der Umgebung auch Vergleichswerte für natürliche Radiumkonzentrationen in verschiedenen Ländern für Schnee, Regenwasser und Gletschereis /Jaworowski, 1975/:

Land	(pCi/kg)
USA	1
Indien	0,2-1,5
Sowjetunion	0,3
Polen	0,2-1,7

Tab. 3.23: Radium-Konzentrationen in Schnee, Regenwasser und Gletschereis

Im globalen Bereich eignen sich zur Untersuchung der zeitlichen Entwicklung vor allem Gletscher. Tab. 3.24 zeigt eine Übersicht über die Radiumkonzentration in Gletschern Nepals (Himalaja), Norwegens und Polens. Besonders aufschlußreich sind die starken Konzentrationszunahmen seit 1200, 1600 und 1870.

Darüber hinaus wurde die Verteilung von Ra-226 in der Umgebung von fünf kohlebefeueten Kraftwerken untersucht. Das Radium findet sich in staubförmigen Emissionen und im Schnee.

Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Radiumkonzentrationen von der Entfernung vom Kraftwerk. Die Tabn. 3.25 bis 3.27 zeigen die Werte im Schnee in verschiedener Entfernung von drei verschiedenen Kraftwerken, Tabn. 3.28 und 3.29 zeigen Werte für staubförmige Emissionen verschiedener Industrieanlagen. Schließlich ist auch die Radiumkonzentration im Boden für industriell genutzte Regionen erhöht.

In industriellen Gebieten fand sich (außer in Baumringen) 1,0 bis 5,5 mal soviel Radium in Vegetationsproben (Gras, Flechten, Moos, Holz, Gemüse) wie in ländlichen Gebieten, auch Proben von menschlichen Knochen, Haar und Weichteilgewebe wurden untersucht, s. Tab. 3.30.

Hier zeigte sich in Polen keine Zunahme der Werte, verglichen mit denen früherer Jahrhunderte. Ungewöhnlich hohe Werte fanden sich nur in einer Studie aus Georgien (UdSSR) und in einer polnischen Probe; das läßt sich möglicherweise durch nachträglichen Kontakt von Gräbern mit radiumhaltigem Grundwasser erklären.

Radium-226, pCi/kg			
Nepal	Norwegen	Polen	Jahr
0,01	0,002		1972
0,16		0,21	1970
	0,004		1969
0,05			1968
0,15			1968
0,14	0,004		1967
0,09			1966
0,03	0,002		1965
0,04	0,002		1964
0,04	0,078		1963
0,08	0,002		1962
0,02	0,030		1961
	0,002		1960
0,13	0,002		1959
0,01	0,002		1958
0,04	0,002		1957
	0,002		1956
	0,002		1955
	0,002		1954
		0,032	1910
		0,019	1900
	0,005	0,004	1870
	0,003		1600
0,02	0,004		1200

Tab. 3.24: Konzentrationen von Ra-226 im Gletschereis

Abstand von der Quelle [km]	Ra-226 pCi/kg Schnee
0,6	0,98
1	0,63
2	0,45
4	0,076
30	0,073
45	0,019

Tab. 3.25: Konzentration von Ra-226 im Schnee in der Umgebung eines Kraftwerks bei Warschau, Februar 1970

Abstand von der Quelle [km]	Ra-226 pCi/kg Schnee
1,0	0,03
7,0	0,07
8,5	0,21
14,0	0,48
26,0	0,02

Tab. 3.26: Konzentration von Ra-226 im Schnee in der Umgebung eines Kraftwerks bei Siekierki, März 1971

Abstand von der Quelle [km]	Ra-226 pCi/m ²	Ra-226 pCi/kg Schnee
8,5	0,08	
12,0	0,05	0,08
17,5	0,25	0,04
20,7	0,06	1,70
21,3	0,05	0,51
21,5	0,03	
30,0	0,09	0,045
31,0	0,008	0,019

Tab. 3.27: Konzentration von Ra-226 im Schnee in der Umgebung eines Kraftwerks bei Konin, März 1971

Abstand von der Quelle [km]	Ra-226 [pCi m ⁻² d ⁻¹]
0,8	1,24
1,1	1,08
4,3	0,22
8,0*	0,11
8,0*	0,06
8,0*	0,02

Tab. 3.29: Konzentration von Ra-226 in den staubförmigen Emissionen einer Gruppe von Industrieanlagen bei Krakow, Juni 1972
(*Die Proben wurden entlang einer 2km-Linie durch die Abluftfahne entnommen.)

Abstand von der Quelle [km]	Ra-226 [pCi m ⁻² d ⁻¹]
0	0,31
0,5	0,23
1,0	0,24
1,2	0,17
1,4	0,20
1,6	0,22
3,6	0,24
5,8	0,39
7,5	0,66
11,8	0,25
14,1	0,35
16,2	0,12
16,5	0,24
19,0	0,04
21,0	0,06
25,7	0,09
26,0	0,06
28,9	0,05
36,8	0,03

Tab. 3.28: Konzentration von Ra-226 in den staubförmigen Emissionen aus dem Kraftwerk Turek, Juli 1973

Ort und Zeitintervall	Anzahl der Proben	Ra-226 pCi/g Calcium
<u>Polen</u>		
heute	45	0,03
13. - 19. Jh.	19	0,06
3. Jh.	15	0,15*
<u>Georgien, UdSSR</u>		
10. - 19. Jh.	21	0,19*
<u>Ägypten</u>		
2000 v. Chr.	6	0,06

*vermutlich durch Grundwasser kontaminiert

Tab. 3.30: Konzentration von Ra-226 im menschlichen Knochen

3.6 Strahlenbelastung durch natürlich vorkommendes Radium

Eine grobe Übersicht über die in der Natur vorkommende Konzentration von Ra-226 gibt Tabelle 3.31. Es kommt also nur in sehr geringen Konzentrationen vor, die Hauptquelle der Inkorporation ist die feste Nahrung; bei der Mehrzahl der Menschen liefert das Trinkwasser nur 10 % der Ra-226-Aufnahme.

	Mittelwert Ci/kg	Schwankungsbereich
Boden	1×10^{-9}	0,1-10
Seewasser	5×10^{-14}	-
Trinkwasser	1×10^{-13}	0,1-10
Mineralwasser	bis 100×10^{-12}	-
Luft	1×10^{-18}	-
gemischte Nahrung	1×10^{-12}	-

Tab. 3.31: Natürliche Ra-226-Konzentration

Ra-226 und Ra-228 gehören zu denjenigen Mitgliedern der natürlichen radioaktiven Zerfallsreihe, die in hinreichendem Maße in Pflanzen gelangen und so langlebig und wegen ihres Ca-ähnlichen metabolischen Verhaltens als Knochensucher so interessant sind, daß sie in der Nahrung vom Standpunkt der Strahleneinwirkung eine Rolle spielen.

Die Hauptquelle des Radiums in der natürlichen Atmosphäre ist die Resuspension von Bodenpartikeln; daraus ergibt sich rechnerisch eine Aktivitätsaufnahme von ca. 1 fCi/d durch Inhalation. Wichtiger ist die Aufnahme von Radium mit Nahrungsmitteln und Wasser. In Gebieten mit normaler natürlicher Strahlenbelastung liegt die Aktivitätsaufnahme von Radium durch Ingestion von Nahrung und Trinkwasser in der Größenordnung von 1 pCi/d (0,5 bis 5 pCi/d).

Das Bundesministerium des Innern gibt jährliche Berichte über "Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung" heraus, aus denen man ersehen kann, welcher Strahlenbelastung die Bevölkerung ausgesetzt ist /BMI, 1976; BMI, 1977; BMI, 1978; BMI, 1979/. Aus diesen Berichten sind im folgenden einige Tabellen wiedergegeben, die das Vorkommen von Radium in der natürlichen Umwelt betreffen. Radium findet sich einmal in Wasservorkommen, s. Tab. 3.32 /BMI, 1978/:

Wasservorkommen	Anzahl der Proben	Konzentration (pCi/l)		
		Minimum	Maximum	Median ¹⁾
Trinkwasser	363	<0,05	3,7	0,1
Mineralwässer) (im Handel)	21	0,10	15	2
Brunnen und Quellen	7	0,06	11	- ²⁾
Oberflächenwasser	28	<0,05	0,65	0,1
Grundwasser ³⁾		<0,1	10	
Meerwasser ³⁾		0,2	0,3	
Meeresoberfläche ³⁾				0,07 ⁴⁾
Sediment ³⁾				10 pCi/g ⁴⁾

¹⁾ Wegen der großen Streuung und der großen Häufigkeit niedriger Konzentrationen wird nicht das arithmetische Mittel, sondern der Median angegeben. 50 % der

²⁾ Meßwerte sind niedriger als der Median. ³⁾

Wegen geringer Probenzahl keine Angabe; ³⁾ Aus /BMI, 1977/; ⁴⁾ Geschätzter Mittelwert

Tab. 3.32: Radium-226 in verschiedenen Wasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland /BMI, 1979/

Dann findet sich Ra-226 auch in Gesteinen, Boden sowie Mineralien und Düngemitteln und schließlich in Baustoffen, s. Tabn. 3.33, 3.34 und 3.35

	Radium-226
Eruptivgestein:	
Basalt (Mittelwert)	0,2 - 0,3
Granit (Mittelwert)	1
Sedimentgestein:	
Schiefer	1
Sandsteine:	
reiner Quarz	< 0,3
verunreinigter Quarz	≈ 1
Kaolin	≈ 0,3 - 0,7
Strandsand	1
Kalkstein	0,7
Boden	0,6

Tab. 3.33: Natürliche radioaktive Stoffe (nCi/kg) in verschiedenen Gesteinen und im Boden

	Probenzahl	Radium (nCi/kg)
Düngemittel	20	<11,6 (<0,5 - 27,2)
Rohphosphate	25	33,5 (3,4 - 45,6)
Koks	2	0,7 (0,5 - 0,9)
Steinkohle	10	< 0,6 (<0,5 - 0,7)
Braunkohle	5	< 0,5
Abraum von Bergwerken	6	<63,4 (<0,8 - 130,4)
Feldspat	3	1,7 (1,2 - 2,7)
Kaolin	3	2,3 (0,9 - 4,9)
Monazitsand (Indien/Ceylon)	4	15,9 (0,7 - 28,8)

Tab. 3.34: Radium in Mineralien und Düngemitteln (verschiedene Ra-Isotope)

Die Tabn. 3.36 bis 3.38 geben näheren Aufschluß über den Gehalt von Wasser und Nahrungsmitteln an Ra-226 und Rn-222 /Schraub, 1974; BMI, 1977/.

Baustoffe	Probenzahl	Radium (nCi/kg)	
Natursteine:			
Granit	32	2,7 (0,8 – 13)	
andere Erstarrungsgesteine	21	< 1,0 (< 0,2 – 5,5)	
Tuff, Bims	20	3,0 (< 0,6 – 5,7)	
Schiefer	8	1,2 (0,8 – 1,8)	
Kalkstein, Marmor	20	< 0,5 (< 0,2 – < 0,7)	
Sandstein, Quarzit	18	< 0,9 (< 0,5 – 1,7)	
sonstige Natursteine	4	< 1,0 (< 0,5 – 1,4)	
Mauersteine usw.:			
Ziegel, herkömml. Art, ohne Zusätze	109	1,6 (0,5 – 3,1)	
Rotschlammsteine*	23	7,6 (< 0,5 – 44)	
Schamotte	9	1,6 (0,6 – 2,8)	
zementgebundene Steine oder	Bims-Zuschlag	31	2,0 (0,7 – 4,8)
	Ziegelsplitt-Zuschlag	3	1,2 (0,8 – 1,9)
Betonsteine	Blähton-Zuschlag	17	< 0,9 (< 0,5 – 2,1)
	Schlacke-Zuschlag	9	4,1 (0,6 – 20)
	Holz-Zuschlag	5	< 0,6 (< 0,2 – 1,1)
	natürlicher Zuschlag	4	< 0,6 (< 0,5 – 0,8)
Kalksandstein, Gasbeton	31	< 0,6 (< 0,2 – 2,0)	
Asbestzement	7	< 0,6 (< 0,5 – 1,1)	
Zuschläge und Zusätze:			
natürlicher Sand und Kies	50	< 0,4 (< 0,1 – 0,8)	
Blähton und Blähschiefer	11	< 1,1 (< 0,5 – 1,8)	
Hochofenschlacke	12	3,2 (1,2 – 5,9)	
Flugasche	28	5,7 (2,2 – 10,5)	
Bindemittel:			
Portlandzement	14	< 0,7 (0,3 – 1,3)	
Hüttenzement	3	1,6 (0,7 – 2,5)	
Tonerdeschmelzzement	2	4,0 (2,7 – 5,3)	
Kalk	8	< 0,8 (< 0,2 – 1,5)	
Naturgips	23	< 0,5 (< 0,1 – 2,0)	
Chemiegips (Apatit)		2	1,5 (1,0 – 2,0)
	(Phosphorit)	33	15 (8,1 – 29,7)
(unbek. Herkunft) (Zwischenprodukte d. Chemiegipsherst.)		7	< 0,5 (0,2 – 0,6)
		6	19,0 (8,1 – 44,9)
sonstige Bindemittel	1	< 0,5	
Fertigmörtel, Fertigputz:	9	< 0,8 (< 0,1 – 2,9)	
Bitumen, Teer:	4	< 0,5	
Rohstoffe:			
Bauxit, Rotschlamm	14	< 5,9 (< 0,5 – 20)	
Ton und Lehm	11	< 1,3 (0,3 – 2,3)	
Sonstiges	1	< 0,2	

* Keine Produktion, sondern Versuchsprogramm

Tab. 3.35: Radium in Baustoffen

Art des Wassers	Radium-226	Radon-222
Österreich, Bad Gastein	0,6	
Bundesrepublik Deutschland (7 Städte)	0,03-0,3	bis 220
Schweden (2 Städte)	0,2-1	
Großbritannien		
Grund- und Oberflächenwasser	bis 0,7	bis 200
Wasser aus Cornwall	bis 2,4	bis 3 000
Devon-Wasser		bis 13 000
USA		
Grund- und Oberflächenwasser (41 Städte)	bis 0,2 (MW: 0,04)	
Tiefe Sandsteinquelle	bis 37	
Oberflächenwasser	< 0,2	
UdSSR		
Süßwasser (Mittelwert)	1	

Tab. 3.36: Natürliche Radioaktivität (pCi/l) in der öffentlichen Wasserversorgung verschiedener Länder

Art des Wassers	Radium-226	Radon-222
Bundesrepublik Deutschland, Flußwasser	0,07-0,8	
Großbritannien, Flußwasser	0,01	0,2-0,3
USA		
Flußwasser	0,03	
Grundwasser	bis 22	
Österreich, Quellwasser		bis 10^5
Frankreich, Quellwasser	bis 139	bis 10^5
Bundesrepublik Deutschland, Quellwasser	0,07-0,8	bis 10^3
Japan, Quellwasser		bis $7 \cdot 10^5$
Libanon, Quellwasser		bis $6 \cdot 10^3$
Großbritannien, Quellwasser	bis 12	bis $7 \cdot 10^2$
USA, Quellwasser		bis $3 \cdot 10^5$

Tab. 3.37: Natürliche Radioaktivität (pCi/l) in Quell-, Fluß- und Bachwasser verschiedener Länder

Brot	2,6	Wurzelgemüse, z. B. Karotten	1,4 - 6,1
Weißbrot	1,7; 3,3	Fleisch	0,01- 1,5
Weizenmehl	2,7	Obst	0,4
Milch	0,3	Äpfel	0,9
Kartoffeln	0,6; 2,8	Eier	3,1 - 6,1
Gemüse	0,5 - 1,7	Fisch	2,8; 4,0; 4,0; 6,3
Kohl	1,0; 2,4	Leitungswasser	0,03; 0,34 (MW:0,19)
		Paranüsse	200 - 3600

Tab. 3.38: Radium-226-Gehalt verschiedener Nahrungsmittel (pCi/kg)

In üblichen Lebensmitteln liegt die Ra-Aktivität zwischen 0,1 und 5 pCi/kg. Es gibt aber Sonderfälle, z. B. Paranüsse und Lachs aus dem Pazifik, die einen wesentlich höheren Gehalt an Ra-226 haben. Die Aktivitätsaufnahme von Ra-228 liegt vermutlich in der gleichen Größenordnung wie die von Ra-226, obwohl erstere weniger gut dokumentiert ist /Petrov, 1965/.

In einem Buch der National Academy of Science der USA über natürliche Giftstoffe in Nahrungsmitteln ist im Kapitel über natürliche Radionuklide auch das Radium aufgeführt. In Böden der USA variiert der Ra-226-Gehalt zwischen 0,09 und 0,8 pCi/g Boden. Tabelle 3.39 zeigt Radium-Konzentrationen in typischen amerikanischen Lebensmitteln aus verschiedenen Städten. Es wird berechnet, daß die Aufnahme von Ra-226 zu einer Gonadenbelastung von 0,5 mrem/a und einer Belastung des Knochenmarks von 0,6 mrem/a führt, diejenige von Ra-228 zu 0,8 mrem/a für die Gonaden und 1,0 mrem/a für das Knochenmark. In beiden Fällen sind die Zerfallsprodukte einbezogen /Comar, 1966/.

	New York City (pCi/yr)	Chicago (pCi/yr)	San Francisco (pCi/yr)
Milch	50,8	46,4	46,4
Getreideprodukte	206,0	276,9	186,6
Eier, Fleisch, Geflügel und Fisch	140,6	134,2	102,0
Gemüse	263,2	181,3	160,6
Obst	176,9	102,4	109,8
Wasser	5,5	10,0	4,0
Summe	843,0	751,2	609,4

Tab. 3.39: Ra-226 in amerikanischen Lebensmitteln

Tab. 3.40 ist angefügt, um zu zeigen, wie stark auch der Ra-Gehalt eines Lebensmittels von Ort zu Ort schwanken kann.

Nahrungsmittelart	New York City		Chicago		San Francisco	
	Gruppe 2 Juni 1960	Gruppe 3 Okt. 1960	Gruppe 1 Mai 1960	Gruppe 2 Sept. 1960	Gruppe 2 Aug. 1960	Gruppe 3 Jan. 1961
Vollkornbrot (Weizen)	3,2	1,2	3,5	2,9	2,8**	2,8
Weißbrot	3,2	1,5	3,3	2,0	2,9	2,5
Weißmehl	2,7	1,7	2,4	2,0	1,34	0,83
Trinkmilch	0,25	0,24	0,24	0,22	0,22	0,2
Kartoffeln	2,0	2,5	1,4	0,77	1,0*	2,0
Maccaroni	2,1	1,8	1,6	1,9	1,2	1,7
Trockenbohnen	6,1	3,2	7,0*	2,5	2,3	4,1
Büchsen Gemüse	2,2	0,54	1,8	1,1	0,91	1,0
Frisch Gemüse	2,4	1,2	2,2	0,57	0,66	0,84
Rüben Gemüse	3,4	2,3	2,0*	1,8	2,6*	2,4
Büchsen Obst	0,37	0,37	1,2	0,26	0,5	0,73
Obstsaft	1,6	0,49	0,68	0,86	0,71	0,62
Frisch Obst	1,5	2,8	1,4	0,57	0,91	0,65
Reis	1,5	1,0	0,7	0,37	0,63	0,8
Eier	4,1	7,9	2,7	2,7**	2,6	1,9
frischer Fisch	1,2	0,68	0,71	1,0	0,8	1,2
Muscheln	1,2	1,1	2,5	1,7	2,0	1,0
Fleisch	0,44	0,47	0,45	0,64	0,81	0,55
Geflügel	0,73	0,86	0,79	1,4	1,9	0,49

*Werte korrigiert bezüglich Barium und Strontium;

**Messung verunglückt; es wurde der Parallelwert eingesetzt.

Tab. 3.40: Radium-226-Gehalt (pCi/kg) verschiedener Nahrungsmittel in USA

Tab. 3.41 zeigt die mittlere tägliche Aufnahme von Ra-226 in verschiedenen Ländern. Auffällig ist der hohe Wert der UdSSR von 17 pCi/d.

Land	pCi/Tag	pCi/g Ca
Argentinien	0,8	1,1
Frankreich	1,1	1,1
Indien	0,65	1,3
Sowjetunion	17,0	17,0
Commonwealth	1,2	1,1
USA	1,3	1,3
Bundesrepublik Deutschland	3,0	3,6

Tab. 3.41: Mittlere tägliche Aufnahme von Ra-226 durch den Menschen

Die Aufnahme über das Trinkwasser ist im allgemeinen gering. Ausnahmen sind Quell- und Mineralwässer, bei denen sich ein Ra-226-Gehalt zwischen 1 und 10 pCi/l finden läßt. Auch hier ist die Kenntnis über den Ra-228-Gehalt wieder begrenzt, es scheint, daß der Gehalt an Ra-228 um eine Größenordnung unter dem von Ra-226 liegt /Aurand, 1974; Kahlos, 1973/.

Allegrini et al. untersuchten die natürliche Radioaktivität in italienischen Mineralwässern und die entsprechende Strahlenbelastung der Bevölkerung in verschiedenen Regionen /Allegrini, 1972/. Dabei wurde angenommen, daß täglich etwa 0,5 l Mineralwasser getrunken werden, was zu einem Anteil von 25 - 30 % an der täglichen Aufnahme von Ra-226 (und Pb-210) mit der Nahrung führt.

Die Tabn. 3.42 und 3.43 geben einen Überblick über die daraus abgeleitete Strahlenbelastung. Es wurde nach dem ICRP-Modell gerechnet, für das Radium wurde die lösliche Form angenommen.

	Ra-226
Jährliche Kollektivdosis für die Bevölkerung	317 980 man rem/Jahr
Betroffene Bevölkerung	3 285 600
Individuelle mittlere Jahresdosis	9,7 mrem/Jahr
Individuelle mittlere jährliche Aufnahme	235 pCi/Jahr
Individuelle mittlere tägliche Aufnahme	0,65 pCi/Tag

Tab. 3.42: Radium-226-Aufnahme aus Mineralwasser in Italien

Pfad	Jährliche Radium-226-Aufnahme [pCi]
Gesamte Ernährung	504
Wasser	27
Mineralwasser (0,5 l/d)	235

Tab. 3.43: Radium-226-Aufnahme aus Nahrungs-, Leitungs- und Mineralwasser

Folgt man weiter den Berechnungen der ICRP, so ergäben sich aufgrund der Radiumaufnahme 10^{-3} Tumorfälle für die betrachtete Bevölkerungsgruppe /ICRP 14, 1969/.

Im Hinblick auf die natürliche Strahlenbelastung sind zwei bewohnte Gebiete mit besonders hoher Belastung herauszuheben, s. Tab. 3.44. In der Gegend von Kerala/Indien entspricht die tägliche Aufnahme von Ra-226 und Ra-228 3 und 160 pCi /Chhabra, 1966; Mistry, 1970/. In Brasilien nimmt eine kleine Gruppe von etwa 200 Personen in der Araxa-Tapira-Region etwa 5 mal soviel α -strahlende Nuklide wie entsprechende Gruppen in Rio de Janeiro auf. Die Werte liegen zwischen 10 und 40 pCi/d für Ra-226 und zwischen 60 und 240 pCi/d für Ra-228 /UNSCEAR, 1972/.

In einer japanischen Arbeit /Maeda, 1973/ werden die Bewohner in der Nähe einer radiumhaltigen Quelle über drei Generationen untersucht. Es fanden sich keine auffälligen Häufungen von Krankheiten oder ungewöhnlichen Todesfällen. Leider wurde die Aktivität des Quellwassers nicht gemessen.

In einer Arbeit von Spencer /Spencer, 1973/ wird die Radiumausscheidung bei Aufnahme von natürlich vorkommendem Radium und verschiedenen Mengen von Calcium untersucht. Dadurch konnte die Radiumbilanz für gesunde Männer unter genau kontrollierten Diätbedingungen bestimmt werden. Die Radiumausscheidung im Urin von 0,016 pCi pro Tag wurde durch verschiedene Mengen von Calcium als Glukonat in der Nahrung nicht beeinflusst, dagegen erhöhte sie sich bei Ergänzung der Nahrung durch Milch. Im letzteren Fall stieg der Anteil der Radiumausscheidung im Urin von 3 % auf 12 % der Gesamtausscheidung. Der Hauptpfad des Radium ist aber der Darmtrakt.

Eine Spezialuntersuchung befaßt sich mit dem Einfluß des Radiums auf Säuglinge, das diese in Form von Flaschenmilch (aus Milchpulver und Mineralwasser) zu sich nehmen. Sie erhalten dadurch einen großen Teil ihrer "Lebensdosis", nämlich 36 % der Skelettdosis und 62 % der Dosis für das weiche Gewebe; genetische Effekte sind nicht auszuschließen /Frittelli, 1973/. Wegen der hohen Knochenbildungs- und Umbildungsrate im Säuglingsalter ist es schwierig, diese Untersuchung mit denen an Radiumarbeitern oder mit allgemeinen epidemiologischen Studien zu verbinden. Gleichwohl wurden die Annahmen der ICRP über den Radium-Metabolismus verwendet, um z. B. den Anteil (30 %) an Radium zu bestimmen, der nach Ingestion über den Magen-Darm-Trakt das Blut erreicht /ICRP 20, 1972/.

Gebiet	Aufnahme mit der Nahrung		Mittlere Aktivität in der trockenen Knochensubstanz ₁ (pCi kg ⁻¹)	Knochen/Nahrung*	
	(pCi d ⁻¹)	(pCi(gCa) ⁻¹)		pCi kg ⁻¹ pro pCi d ⁻¹	Beobachtetes Verhältnis
Gebiet mit normalen externen Strahlungsuntergrund					
Argentinien	0,8	1,1	6,6	8,2	0,030
Australien			5,4		
Kanada			3,2		
Chile			2,2		
Kongo			12		
Frankreich	1,1	1,1			
Bundesrepublik Deutschland			7,0		
Guatemala			2,7		
Indien					
Bombay	0,8	1,6	4,3	5,4	0,013
Tarapur	0,5	1,0			
Israel			19		
Italien	1,4	2,8			
Japan					
Sapporo	0,4	0,8	1,6	4,0	0,016
Kyoto	1,0	2,9	7,5	7,5	0,019
Polen					
Osten			7,7		
Norden			5,3		
Süden			6,5		
Westen			32,6		
Puerto Rico 1	0,7	1,3	3,4	4,8	0,013
Puerto Rico 2			2,7		
Südafrika			5,9		
Ukraine			21		
England	1,2	1,1	8,1	6,7	0,037
USA					
Boston			7,6		
Houston			12		
Illinois			20		
New England			8,6		
New York 1	1,7	1,7	7,2	4,2	0,021
New York 2			5,4		
San Francisco	0,8	0,8	6,2	7,7	0,039
Wisconsin			6,5		
Arithmetisches Mittel	0,9	1,5	8,5	6,1	0,024
Gebiet mit hohem Strahlungsuntergrund in Kerela, Indien	3,3	6,6	77	23	0,058

*In der linken Spalte steht der Quotient von Knochen und Nahrung, wobei die Aktivität in der trockenen Knochensubstanz als pCi/kg und in der Nahrung als pCi/d angegeben wird. In der rechten Spalte stehen die entsprechenden gemessenen Werte, wobei die Einheit für Knochen und Nahrung pCi/g Kalzium ist.

Tab. 3.44: Ra-226 in der menschlichen Nahrung und in der trockenen Knochensubstanz für verschiedene Gebiete

In einer Arbeit von Clajus /Clajus, 1975/ wird eine Übersicht über die Literatur zur Ökologie des Radium gegeben. Hierzu werden 125 Einzelarbeiten referiert. Für die Kompartments des Pfades Gestein bzw. Boden/Wasser-Pflanze-Tier werden Konzentrationen und Transferfaktoren in Tabellen aufgeführt. Bei diesen Werten gibt es erhebliche Schwankungen, so daß eine allgemein gültige Abschätzung der Strahlenbelastung der Bevölkerung daraus nicht möglich ist.

Es ist zu erwarten, daß die Belastung durch Ingestion im Bereich von 20 - 50 mrem/a liegt, wie dies für ausgewählte Bevölkerungsgruppen in bestimmten Gebieten berechnet wurde. Besonders hingewiesen wird auf Gebiete mit zivilisationsbedingten höheren Radiumkonzentrationen und damit höheren Strahlenbelastungen, wie sie sich z. B. auf den durch Erzbergbau entstandenen Halden im Süden der DDR finden. Hier und auch für radiumhaltige Wässer sind u. U. Nutzungsbeschränkungen notwendig.

In einer Arbeit über Umweltradioaktivität in Neuseeland /Hardy, 1976/ finden sich Angaben über den Ra-226-Gehalt in menschlichen Knochen. Es fällt auf, daß der Wert in Neuseeland eine Strahlenbelastung von 23 mrem/a aus Radium, in USA dagegen von 48 mrem/a ergibt. Diese Arbeit zeigt in ausführlichen Tabellen, wie differenziert die Daten sein müssen, um eine sinnvolle Analyse zu ermöglichen. Die Tabellen klassifizieren nach der Niederschlagsmenge im untersuchten Gebiet, nach dem Alter der untersuchten Personen und den untersuchten Knochen (Oberschenkel, Oberarm, Wirbel, Rippen, Schädel). Es wird angenommen, daß die Radiumkonzentrationen im Knochen im Gegensatz zu den Strontium-Werten nicht von der Niederschlagsmenge und auch nicht vom Alter der Untersuchten abhängen. Sie spiegeln vielmehr den Radiumgehalt in der ortsüblichen Nahrung wider, der mit dem Radiumgehalt von Boden und Wasser zusammenhängt, s. o..

In einer ungarischen Arbeit /Polgar, 1970/ werden Ansätze zu einer Ra-226-Umgebungsüberwachung in der Nähe von Kohlekraftwerken beschrieben. Untersuchungen des Bodens und der stehenden Gewässer erscheinen am sinnvollsten. Bei der Verbrennung von Kohle mit hohem Uran-Gehalt zeigt sich ein durchaus meßbarer Effekt auf die Umgebungsaktivität, eine Bewertung des möglichen Einflusses auf die Bevölkerung konnte in dieser mehr methodisch orientierten Arbeit nicht gegeben werden.

In einer polnischen Arbeit von 1973 /Jaworowski, 1974/ wird ebenfalls die Ausbreitung von Radium in der Umgebung fossil beheizter Kraftwerke untersucht, s. auch Abschnitt 3.5.

Dabei liegt der Schwerpunkt der Untersuchung auf der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Ausbreitung. Ein Vergleich mit Kernkraftwerken wird vorgenommen, indem für beide Kraftwerkstypen die erzeugte Bevölkerungsdosis abgeschätzt wird. Dabei ergeben sich 43 mrem/a für die Osteozyten als Wirkung von Radium aus einem polnischen Kohlekraftwerk, 7×10^{-5} mrem/a für die Schilddrüse als Wirkung von J-131 aus dem Siedewasserreaktor Dresden und 0,15 mrem/a Ganzkörperdosis als Wirkung des H-3 aus dem Yankee-Druckwasser-Reaktor in den USA. Die Emissionen fossiler Kraftwerke enthalten neben Radium noch andere Schadstoffe, die bei einer Gesamtbilanz berücksichtigt werden müssen. Es sind dies die radioaktiven Isotope Pb-210, Bi-210, Po-210, Thorium, Rn-222 und andere. Hinzu kommen toxisch wirkende Schwermetalle wie Blei, Cadmium, Vanadium sowie vor allem SO_2 , NO_x und andere. Dies macht einen Vergleich mit den Emissionen von Kernkraftwerken schwierig.

Eine weitere Arbeit aus der DDR befaßt sich mit der Verwendung von radioaktivem Abraum im Straßen- und Wohnungsbau. Hierbei ist die Gruppe der Bauarbeiter mit zu erwartenden Dosisbelastungen von 0,3 rem/a am stärksten gefährdet, für Einzelpersonen der Bevölkerung werden maximal 0,2 rem/a erwartet. Die möglicherweise entstehenden starken Belastungen der Lunge durch Ansteigen der Rn-Aktivität in Wohnungen (bis zu 15 rem/a) wird noch untersucht /Röhnsch, 1974/.

Schon früher hat man sich darum bemüht, Informationen über den tatsächlichen Radium-226-Gehalt des menschlichen Körpers zu erhalten. Nach anfänglichen starken Überschätzungen, die sich nachträglich durch Fremdkontamination und unzureichende Meßmethoden erklären ließen, haben 1951 Hursh und Gates zum ersten Male nachgewiesen, daß der Gesamtgehalt des menschlichen Körpers an Ra-226 in der Größenordnung von 10^{-10} Ci liegt. Spätere Untersuchungen in anderen Laboratorien konnten diese Ergebnisse bestätigen, aber auch die Tatsache, daß in geographischen Bereichen mit besonderen Verhältnissen bezüglich des Trinkwassers und der Nahrung Überschreitungen bis zu einer Größenordnung, aber auch Unterschreitungen möglich sind, s. Tab. 3.45.

Noch wichtiger als die Kenntnis der in den verschiedenen Kompartments abgelagerten Aktivität war die Abschätzung der dadurch zustandekommenden Strahleneinwirkungen, weil über viele Jahrzehnte die Schädigungen beim Menschen (Leuchtfarbenmalerinnen, Radiumarbeiter usw.) durch eingelagertes Ra-226 im Knochen praktisch unsere einzigen Informationen über die möglichen Wirkungen inkorporierter radioaktiver Substanzen

Ort der Probenerhebung	pCi ²²⁶ Ra pro g Asche	pCi ²²⁶ Ra pro g Ca	pCi ²²⁶ Ra i. ges. Skelett ^{a)}
Gebiete mit normaler Radioaktivität			
Zentralamerika			
USA, Puerto Rico	0,006	0,017	17
Europa			
BRD	0,013	0,04	36
Großbritannien	0,008-0,02		
Nordamerika (USA)			
Illinois	0,012 ^{b)}		32
New England	0,014		39
New York, N.Y.	0,012	0,032	32
Rochester, N.Y.	0,010; 0,017		28; 48
San Francisco, Cal.	0,0096	0,026	27
Gebiete mit erhöhter Radioaktivität			
Asien			
Indien, Kerala (Monazitgebiet)	0,096 (0,03-0,14)		~270
Nordamerika (USA)			
Illinois	0,037 ^{c)}		~100
Illinois	0,028 ^{c)}		78

Tab. 3.45: Radium-226 im menschlichen Knochen. Spalte 2: pro g Knochenasche, Spalte 3: pro g des Leit isotops Calcium. Spalte 4: pCi Radium-226 im gesamten Skelett, a) berechnet unter der Annahme von 7 kg Knochen-Frischgewicht bzw. 2 800 g Knochenasche, für Illinois beachte man die Unterschiede für Gebiete mit normaler (b), bzw. erhöhter Radioaktivität (c). (Die Werte beziehen sich auf Erhebungen seit 1962)

darstellten. Die erste grobe Abschätzung für den Knochen (ungefähr 10^{-14} Ci Ra-226 pro Gramm als Strahlenbelastung ausschließlich durch Alphastrahlung, RBW = 10) ergab etwa 50 mrem/a. Dieser 1956 angegebene Wert hat in der Zwischenzeit erhebliche Modifikationen erfahren durch differenzierten Studien vor allem autoradiographischer Art. Ein Mittelwert für die gesamte Menge an Ra-226 von etwa 4×10^{-11} Ci im Körper schien adäquater. Die Ablagerung der Radionuklide erfolgt in der Knochenmatrix, so daß, unter Berücksichtigung der mikrotopologischen Verhältnisse, die im wesentlichen von den Alphateilchen herrührende Strahleneinwirkung auf Havers'sche Kanäle, Osteozyten und Knochenmark von Bedeutung ist. Andererseits bestätigen sich die von verschiedenen Seiten erfolgten Angaben über die nicht zu unterschätzende Aufnahme von Ra-228 aus der Thoriumreihe. Die Ablagerung im Knochen ist mit etwa 10^{-11} Ci geringer als die des Ra-226, der Beitrag zur Strahleneinwirkung aber etwa vergleichbar.

Tab. 3.46 gibt eine Übersicht über den Ra-Gehalt von Knochenasche, wie er in verschiedenen Ländern gemessen wurde. Hier zeigt sich für die UdSSR kein außergewöhnlicher Wert, im Gegensatz zu Tab. 3.41.

	Anzahl der Proben	Mittlere Ra-226-Konzentration in Knochenasche $\times 10^{-15}$ Ci/g
Argentinien: 1	18	11
2	360	12
Australien	22	10
Kanada	12	6
Chile	24	4
Kongo	14	22
Deutschland	22	13
Guatemala	29	5
Indien (Bombay): 1	12	8
2	1	8
Israel	13	36
Japan	36	4
Südafrika	13	11
United Kingdom	21	15
USA:		
Boston	77	14
Houston	33	23
Illinois	128	37
New England: 1	18	16
2	218	16
New York: 1	143	10
2		13
Puerto Rico: 1	42	5
2		6
San Francisco		11
Wisconsin	75	12
Sowjetunion		39
Einzelperson: Schienbein		25
Schädel 1*		51
Schädel 2*		100
Gelenk		25
Jochbein		28

*Hier handelt es sich um zwei Proben aus dem gleichen Schädel; die Meßwerte können sich also erheblich unterscheiden /Lucas, 1961/

Tab. 3.46: Natürliche Ra-226-Konzentration in Knochenasche

Gewebe	Ra-226
Weichgewebe allgemein	0,1
Leber	0,2
Niere	0,1
Gonaden	-
Milz	0,1
Lunge	-
Skelettmuskel	0,06

Tab. 3.47: Ra-226 im menschlichen Weichgewebe (pCi/kg)

Über die Ra-226-Konzentration im Weichteilgewebe (Tab. 3.47) gibt es nur wenige Untersuchungen. Es wurde etwa die gleiche Konzentration pro Gramm Gewebeasche gefunden wie in der Knochenasche. Daraus folgt wegen der unterschiedlichen Einengungsfaktoren, daß die Strahlendosis im Weichteilgewebe nur einen Bruchteil der Knochendosis beträgt. Nach der Methode von Spiers /Spiers, 1957/, welche mikroskopische Inhomogenitäten in der Verteilung des Ra-226 berücksichtigt, erhält man für einen mittleren Ganzkörpergehalt von 10^{-10} Ci Ra-226 eine Weichteilgewebedosis von 0,08 mrd/a und eine Knochendosis von etwa 1,7 mrd/a. Die Knochendosis läßt sich noch differenzieren /Glöbel, 1974/, s. Tab. 3.48.

Osteozyten:	2,6 mrad/a	d. h. 26 mrem/a
Haverssche Kanäle:	1,6 "	16 "
Oberfläche der Bälkchen:	1,1 "	11 "
Mark	0,2 "	2 "

Tab. 3.48: Ra-226 im Knochensystem (Qualitätsfaktor für α -Strahlung hier = 10)

In einer italienischen Arbeit wurde die Ra-Konzentration im Boden, Wasser und in einer Anzahl von Lebensmitteln gemessen und daraus die Anreicherungsfaktoren (auch im Verhältnis zu den entsprechenden Ca-Konzentrationen) und die mittlere Strahlenbelastung berechnet. Tab. 3.49 zeigt die Werte für terrestrische Nahrungsmittelketten, Tab. 3.50 diejenigen für Wasser und Fische, Tab. 3.51 die Anreicherungsverhältnisse und Tab. 3.52 eine Übersicht über die Aufnahme von Ra-226 mit der Nahrung. Die mittlere Ra-226-Aufnahme liegt bei 1,4 pCi/d. Dieser Wert stimmt gut mit denen aus anderen Ländern überein, nämlich 1,2 für England, 0,8 und 1,7 für San Francisco und New York und 0,69 für Puerto Rico. Hinzu kommt jeweils ein geringfügiger Anteil durch Trinkwasser. Besonders bemerkenswert ist der hohe Beitrag von Mehl (in Brot und Teigwaren), nämlich 57,8 % - die entsprechende Aktivität wird mit 296 pCi/a angegeben /Bortoli, 1972/.

Material	Mittlere Ra-226-Konzentration (pCi/kg Frischgewicht oder pCi/l)			Ra-226-Konzentrationswerte aus der Literatur (pCi/kg Frischgewicht oder pCi/l)		
			pCi/g Ca	Fisenne, 1970/	Muth, 1960/	Smith, 1963/
Boden	716	± 113	(1) 130	A B		
Weide	5,6	(4,4-7,3)	(1) 2,6			
Gemüse	0,96	(0,72-1,2)	(2) 1,6	0,66-1,1	1,0-6,1	0,1-2,1
Kartoffeln	0,50	(0,38-0,68)	(3) 2,3	0,24-2,3		
weißes Mehl	3,7	(3,6-3,8)	16,8	1,4 -2,1	2,7	0,5
Obst	0,37	(0,37-0,37)	(4) 1,5	0,26-0,32	0,9	
Rotwein	0,59	(0,24-1,0)	10,6			
Milch	0,19	(0,18-0,19)	0,16	0,09-0,25	0,3	0,1
Eier	6,4	(5,8-6,9)	(3) 6,3	1,8 -10	3,1	0,5-2,0
Kalbsknochen	72	(64-80)	(5) 0,19			

(1) Werte für pCi/kg Trockengewicht, der mittlere Quotient Frischgewicht/Trockengewicht für Grünfutter ist $5,75 \pm 1,05$.

(2) Eßbare Teile von Tomaten, Bohnen, Kopfsalat und Kürbissen zu gleichen Teilen.

(3) Nur eßbare Teile.

(4) Eßbare Teile von Pfirsichen, Birnen, Äpfeln, Pflaumen und Trauben zu gleichen Teilen.

(5) Aschengewicht.

A San Francisco

B New York

Tab. 3.49: Radium-226 in terrestrischen Nahrungsketten

Material	Mittlere Ra-226-Konzentration und Konzentrationsbereich		Konzentrationsfaktor (pCi/kg Fisch)/ (pCi/l Wasser)
	pCi/l, oder pCi/kg Frischgewicht	pCi/g Ca	
Lago Maggiore			
Wasser	0,014 (0,005-0,020)	0,73	228
Fisch	3,2 (2,9-3,5)	0,23	
Lago Varese			
Wasser	0,020 (0,019-0,021)	0,61	70
Fisch	1,4 (1,3-1,4)	0,10	
Lago Comabbio			
Wasser	0,015 (0,014-0,015)	0,59	140
Fisch	2,1 (1,7-2,4)	0,14	
Lago Monate			
Wasser	0,014 (0,012-0,024)	1,4	129
Fisch	1,8 (0,98-2,2)	0,12	

Tab. 3.50: Radium-226 in Seen und Fisch

Transfer von ... zu	Meßwert	Literaturwerte
Boden - Pflanze	0,020	0,01-0,06
Boden - Kartoffeln	0,018	
Boden - Gemüse	0,012 (1)	0,02-0,03
Boden - Obst	0,012 (1)	
Boden - Mehl	0,13	
Boden - Wein	0,082	
Weide - Milch	0,062	
Wasser - Fisch	0,20 (2)	

(1) Als Mittelwerte haben diese Werte geringe biologische Bedeutung.

(2) Mittelwert für die verschiedenen Seen.

Tab. 3.51: Beobachtetes Verhältnis (pCi Ra-226/g Ca-Probe)/(pCi Ra-226/g Ca-Ausgangsmaterial)

Nahrungsmittel oder Getränk	Jährlicher Verbrauch pro Kopf (kg oder l/a)	Jährliche Ra-226-Aufnahme (pCi/a)	Beitrag (%)
Mehl in Brot und Teigwaren	80	296	57,8
Eier	2,5	16	3,1
Gemüse	68	65	12,7
Kartoffeln	20	10	2,0
Obst	70	26	5,1
Milch	63	12	2,3
Wein	104	61	11,9
Wasser	365 (2)	26	5,1
Summe	772,5 (3)	512	100,0

(1) Unter der Annahme, daß nur am Ort erzeugte Nahrungsmittel verzehrt werden.

(2) Bei der Berechnung wurde die tägliche Flüssigkeitsaufnahme mit Nahrungsmitteln durch einen entsprechenden Wert für Wasser auf 2,1 l ergänzt.

(3) Dieser Wert entspricht 80 % der Nahrungsmittelaufnahme in der amtlichen Statistik für dieses Gebiet zuzüglich des Trinkwassers.

Tab. 3.52: Radium-226-Aufnahme der Bevölkerung im Gebiet um Varese (1)

Allerdings werden einige Einschränkungen gemacht: So wurden zwar die Lebensmittel, die am meisten zur Radiumbelastung beitragen, erfaßt, aber nicht alle üblichen Lebensmittel, z. B. nicht Fleisch, Zucker und Reis, und die Proben waren nicht alle repräsentativ, d. h. es wurde angenommen, daß nur lokal erzeugte Lebensmittel verzehrt werden, was eine sehr konservative Annahme ist. Dennoch gibt diese Arbeit interessante Hinweise auch für andere europäische Länder.

3.7 Verteilung von Radium im Körper, Vergleich verschiedener Radium-Isotope

3.7.1 Radium-Aufnahme und Radium-Gehalt

Ra-226 ist das einzige Radionuklid, über dessen Wirkung als interner Strahler relativ umfangreiches Beobachtungsmaterial am Menschen selbst vorliegt. Daher weiß man, daß bei lange bestehenden Ablagerungen oberhalb von 1 μCi mit der Entstehung von Osteosarkomen gerechnet werden muß. Daher erscheint die mit 0,1 μCi festgelegte Grenze zunächst sinnvoll.

Daß es nicht nur auf die Menge, sondern auch auf deren räumliche Verteilung, z. B. im Knochen ankommt, zeigten ausgedehnte Tierversuche in Utah mit dem Ergebnis, daß bei gleicher Strahlendosis Th-228 14mal und Pu-239 5mal wirksamer in Bezug auf die Erzeugung von Knochensarkomen ist als Ra-226.

Hinzu kommen Effekte der zeitlichen Verteilung der Dosis (Ra-224-Patienten, neueste Ergebnisse über die Wirkung dicht ionisierender Strahlung /Kellerer, 1980/).

Wenn Radium im Körper aufgenommen wird, verhält es sich chemisch wie Kalzium; ein erheblicher Anteil lagert sich an Knochenoberflächen und Regionen aktiver Knochenneubildung an. Im kortikalen Knochen wandert das Radium von der Oberfläche und verteilt sich diffus im mineralisierten Knochen.

Nach Aufnahme großer Radium-Mengen findet sich die Hälfte des Radiums in sogenannten "hot spots" /Rowland, 1960/. Autoradiographische Untersuchungen zeigen in einzelnen Knochenabschnitten diese ausgeprägten Ablagerungen von Radium längs der Havers'schen Kanäle, die sich bei der Radiuminkorporation gebildet haben; in den "hot spots" kann die Dosisbelastung durch die α -Strahlung des Radiums und seiner Tochterprodukte bis zu 50mal so hoch sein wie in den Bereichen diffus verteilten Radiums. Die Retention des anfänglich aufgenommenen Radiums nimmt ungefähr umgekehrt proportional mit der Wurzel aus der Zeit ab und liegt 40 Jahre nach der Inkorporation bei 0,7 %. Die tägliche Ausscheidung nimmt umgekehrt proportional mit der Zeit ab und liegt normalerweise bei 0,005 % pro Tag; damit ergibt sich eine biologische Halbwertszeit für die Ausscheidung des im Skelett gebundenen Radiums von ungefähr 45 Jahren /Finkel, 1966/. Die Reichweite der α -Teilchen im Knochen oder Gewebe liegt zwischen 25 und 50 μm , d.h.

die Wirkungen dieser Strahlung sind auf einen engen Bereich begrenzt, im Skelett vor allem auf die Knochenhaut und auf die Schleimhäute von Nasennebenhöhlen und Mastoid.

Bei hoher Strahlenbelastung findet man Osteoporose und Knochennekrosen durch Röntgenuntersuchungen und kann sie mit der Dosis korrelieren. Sind die Skelettschäden weiter fortgeschritten, kann es zu Brüchen kommen, die überall, vorwiegend aber in durch Gewicht belasteten Bereichen wie etwa dem Oberschenkelhals vorkommen.

Bei entsprechenden Dosen entwickeln sich auch Knochensarkome. Sie können ebenfalls überall im Skelett auftauchen, oft viele Jahre nach der Radium-Inkorporation.

Im Knochen finden sich 70 - 90 % des im Körper enthaltenen Radiums; nach anderen Autoren bis zu 98 %, der Rest ist annähernd gleichmäßig im Weichteilgewebe verteilt. Bei normalem Strahlenuntergrund liegt die Ra-226-Konzentration im Knochen zwischen 2 und 20 pCi/kg, in der Bundesrepublik Deutschland wurde ein Wert von 7 pCi/kg für die trockene Knochensubstanz bestimmt /Stahlhofen, 1964/. Diese Radium-Konzentration scheint unabhängig vom Alter zu sein, sie liegt nahe beim arithmetischen Mittelwert der im UNSCEAR-Bericht erfaßten Werte, nämlich 8 pCi/kg. Im Knochen sind also die Osteozyten, sowohl aufbauende wie abbauende, und auch Zellen des Knochenmarks der α -Strahlung ausgesetzt /Stover, 1970/.

Der Ra-226-Gehalt im Weichteilgewebe liegt bei 0,13 pCi/kg. Der Transfer-Faktor von der Radiumaufnahme mit der Nahrung zum Radiumgehalt des Knochens (bone-to-diet-quotient) liegt zwischen 4,0 und $(8,2 \text{ pCi/kg}) / (\text{pCi/d})$, wenn man von den Radiumkonzentrationen ausgeht, die in verschiedenen Ländern in Nahrungsmitteln und menschlichen Knochen gemessen wurden /UNSCEAR, 1977/. Nach dem ICRP-Modell für den Metabolismus von Erdalkalimetallen /ICRP 20, 1973/ berechnet man einen Transferfaktor von Nahrungsmitteln zum Knochen von $(4,2 \text{ pCi/kg}) / (\text{pCi/d})$.

Für Ra-228 erwartet man niedrigere Aktivitätswerte im menschlichen Knochen, weil seine physikalische Halbwertszeit viel kürzer ist. Man geht davon aus, daß die biologische Halbwertszeit von Radium im menschlichen Körper ungefähr 10 Jahre ist /ICRP 23, 1975; Wenger, 1975/. Die Ra-228-Aktivität liegt bei etwa 30 % der Ra-226-Aktivität; das ICRP-Modell ergibt 27 % /ICRP 20, 1973/. Damit ergibt sich eine Aktivität von Ra-228 für den Knochen von 2,4 pCi/kg und für Weichteilgewebe von 0,1 pCi/kg in Gebieten mit normaler Umgebungsstrahlenbelastung. Zur Übersicht diene Tab. 3.53:

	Ra-226	Ra-228
Knochen, allgemein	2-20 pCi/kg	
Mittel	8 pCi/kg	2,4 pCi/kg
Bundesrepublik Deutschland	7 pCi/kg	
weiches Gewebe	0,13 pCi/kg	0,1 pCi/kg
Transfer-Faktor		
Nahrung → Knochen	4 ÷ 8,2 pCi/kg/pCi/d	
ICRP	4,2	

Tab. 3.53: Radium-226 und Radium-228 im menschlichen Körper

Aus den Berichten des Bundesministeriums des Innern /BMI, 1977; BMI, 1978/ ergeben sich für die Bundesrepublik Deutschland folgende Werte für die Aufnahme von Radium in Trinkwasser und Nahrung und seinen Verbleib im Körper: Die tägliche Aufnahme von Ra-226 mit der Nahrung liegt bei 2 pCi/d, im Trinkwasser ist die geschätzte mittlere Ra-226-Konzentration 0,04 pCi/l.

Aus der Inkorporation natürlicher Radioaktivität mit der Nahrung folgt eine Strahlenexposition durch Ra-226 (einschließlich 1/3 kurzlebige Folgeprodukte) und Ra-228 (einschließlich Folgeprodukte), wie sie in Tabelle 3.54 zusammen mit der durch andere wesentliche Radionuklide angegeben ist /BMI, 1979/.

	Gonaden	Knochen		Lunge
		Endost/Periost	rotes Knochenmark	
Tritium	0,001	0,001	0,001	0,001
Kohlenstoff 14	0,5	2,0	2,2	0,6
Kalium 40	12	15	27	17
Polonium 210 Nichtraucher	12	60	14	6
Polonium 210 Raucher	16	80	18	18
Radium 226	0,6	14	1,8	0,6
(einschl. 1/3 kurzlebige Folgeprodukte)				
Radium 228 (einschl. Folgeprodukte)	1,2	22	3,6	1,2
Gesamt	26 - 30	113 - 133	48 - 53	25 - 37

Tab. 3.54: Strahlenexposition des Menschen durch inkorporierte natürliche radioaktive Stoffe in mrem/Jahr (nach /UNSCEAR, 1977/)

Besonders interessant sind die wenigen Daten über Radium im Skelett der Bewohner der Gebiete mit hoher natürlicher Strahlenbelastung in Brasilien und Indien. In Brasilien ist die mittlere Ra-226-Konzentration in Zähnen von Bewohnern der Araxa-Tapira-Region ungefähr 85 fCi/g Asche, s. u. Diesem Wert würde eine Aktivität im Skelett von 230 pCi entsprechen, wenn man annimmt, daß die Konzentrationen in Knochen und Zähnen gleich sind. Für Indien (Kerala) ergab die Analyse eines Oberschenkelknochens 143 fCi/g, dem entspricht eine Aktivität von 400 pCi für das Skelett /Chhabra, 1966/.

Von Hunt et al. /Hunt, 1963/ wurde untersucht, ob es möglich ist, aus dem Radiumgehalt menschlicher Zähne auf den Radiumgehalt des Knochensystems zu schließen. Die Studie wurde für Personengruppen, die einer normal niedrigen Radiumbelastung ausgesetzt waren, angestellt. Das Ergebnis ist, daß es eine signifikante Korrelation zwischen beiden Konzentrationen gibt. Allerdings muß beachtet werden, daß ebenso wie im Knochen auch im Zahn das Radium nicht gleichmäßig verteilt ist; es findet sich weniger Radium im Zahnschmelz. Hinzu kommen Schwankungen zwischen verschiedenen Zähnen bzw. Knochen des gleichen Individuums bis zu einem Faktor 2. Eine Altersabhängigkeit des Radiumgehalts wurde bei den Untersuchten mit Alter zwischen 5 und 75 Jahren nicht gefunden. Die gemessenen Mittelwerte waren für Ra-226

0,016 pCi/g Asche für Zähne und

0,114 pCi/g Asche für Knochen, s. Abb. 3.3.

Bei den Ra-226-Messungen war allerdings die Korrelation beider Werte wegen relativ großer Meßfehler von kleinen absoluten Werten nicht so gut wie bei dem ebenfalls untersuchten Pb-210, ähnliche Schwierigkeiten ergaben sich auch für Th-228. Jedenfalls scheinen die Zähne als Indikator für den Radiumgehalt des Körpers geeignet zu sein.

In Utah wurde eine genaue Analyse des Ra-226-Gehalts des Skeletts und von vier Zähnen einer Patientin vorgenommen, die 52 Jahre nach einer zweijährigen Tätigkeit als Radium-Zifferblattmalerin starb. Der Gehalt des Gesamtkörpers an Ra-226 war z. Z. des Todes 200 nCi, die mittlere Aktivität im Knochen 146 ± 11 pCi/g Asche. Die Verteilung zwischen rechter und linker Körperseite war symmetrisch, jedoch war die Radiumkonzentration an den Enden der langen Knochen bis zu 50mal höher.

Zwischen Armen und Beinen gibt es charakteristische Unterschiede. In den Zähnen ist die Verteilung ungleichförmig /Holtzman, 1976/. Es wurde keine räumliche Korrelation zwischen der Radiumkonzentration und dem Auftreten von Tumoren gefunden.

In Tabelle 3.55 sind Werte der Ra-Konzentrationen in den Knochen von 11 Radium-Patienten angegeben /Lucas, 1974/. Zum Vergleich werden Ra-Konzentrationen von 4 ± 1 fCi/g Asche für Ra-228 und $14 \pm$ fCi/g Asche für Ra-226 als Normalwerte angegeben.

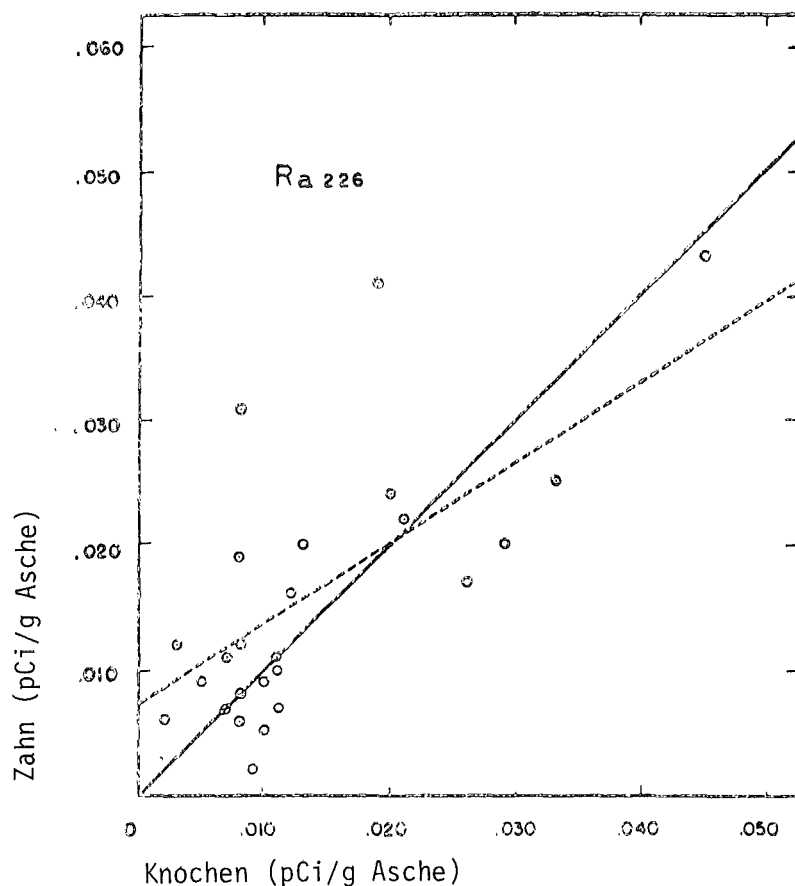


Abb. 3.3 Korrelation zwischen dem Ra-226-Gehalt in Knochen und Zähnen von 25 Personen

In einer weiteren Arbeit wird die Belastung des Blutes durch inkorporiertes Ra-226 abgeschätzt /Marshall, 1974/. Bei einer Ganzkörperbelastung mit $1 \mu\text{Ci}$ Ra-226 ergibt sich eine α -Dosis von $0,09 \pm 0,03$ rd/Jahr für das Blut. Ein Drittel dieser Dosis kommt aus dem spongiösen Knochen, zwei Drittel aus dem kompakten Knochen. Die β -Strahlung trägt weniger als 3 % bei.

Auch an der University of Utah entstand eine ganze Serie von Publikationen über die Wirkungen von Plutonium und Radium auf die Gesundheit. Hashimoto und Jee

Fall-Nr.	Untersuchungs- tage	Asche- gewicht g	Zeit der Untersuchung		Zeit der Bestrahlung			
			Tag	Ra-228 pCi/g Asche \pm E*	Tag	Ra-228 pCi/g Asche \pm E*	Ra-228 pCi/g Asche \pm E*	Verhältnis Ra-228 / Ra-226 \pm E*
01.004	22.03.71	0,290	06.02.53	0,50 \pm 0,13	01.07.18	32,0 \pm 8	1684,0 \pm 23	0,019 \pm 0,005
01.057	15.03.71	5,157	20.10.31	4884,0 \pm 153	17.01.24	12464,0 \pm 391	2116,0 \pm 28	5,89 \pm 0,20
01.439	15.03.71	3,565	01.11.53	0,053 \pm 0,018	01.07.22	2,3 \pm 0,8	149,0 \pm 4	0,016 \pm 0,005
03.117	23.03.71	4,443	20.04.57	0,006 \pm 0,003	27.01.31	0,15 \pm 0,07	288,0 \pm 5	0,0005 \pm 0,0002
03.140	23.03.71	4,889	26.04.37	0,54 \pm 0,07	10.04.33	0,88 \pm 0,11	164,0 \pm 2	0,005 \pm 0,001
03.216	16.03.71	4,573	01.10.59	0,033 \pm 0,005	01.07.22	2,94 \pm 0,51	219,0 \pm 4	0,013 \pm 0,002
03.402	22.03.71	0,052	08.01.54	1,89 \pm 0,60	01.07.24	75,0 \pm 24	798,0 \pm 11	0,094 \pm 0,030
03.407	29.03.71	4,165	01.02.61	0,067 \pm 0,007	01.07.23	3,8 \pm 0,4	252,0 \pm 5	0,015 \pm 0,002
03.455	16.03.71	0,568	01.07.34	38,4 \pm 2,4	01.07.22	164,0 \pm 10	476,0 \pm 10	0,34 \pm 0,02
03.547	17.03.71	2,452	04.01.62	0,040 \pm 0,005	01.07.23	4,3 \pm 0,6	15,4 \pm 0,2	0,28 \pm 0,04
03.619	17.03.71	2,244	02.03.62	0,33 \pm 0,02	01.09.22	38,3 \pm 1,9	233,0 \pm 2	0,17 \pm 0,01

*E = Standardabweichung des Mittelwertes

Tab. 3.55: Radium-228 und Radium-226 im Knochen von Radium-Patienten

/Hashimoto, 1976/ geben eine Übersicht über die Prozesse bei der Entstehung von Knochentumoren durch die Einwirkung von Radium, die eine Vielzahl von Arbeiten zu diesem Thema zusammenfaßt. Tab. 3.56 zeigt, welche Zellen dem Risiko einer Entartung ausgesetzt sind.

Zell-Typ	im Bereich der α -Strahlung	Knochenbildungs-vermögen	Zellvermehrung	Ähnlichkeit mit Tumor-Zellen
Knochen-Stammzellen	+++	+++	+++	++
Osteoblasten	+++	+++	+	+
Retikuläre Zellen	++	+++	+	+
Wandernde Zellen	+	-	+	-
Osteoclasten	+++	+	--	--
potentielle Knochen-Stammzellen	-	+++	-	-
andere	+	-	-	-

+++ sehr wahrscheinlich

++ häufig vermutet, keine eindeutige Evidenz

+ mindestens einmal vorgeschlagen, wenig belegt

- nicht vermerkt oder unbekannt

-- im Gegensatz zu bekannten Ergebnissen

Tab. 3.56: Risiko einzelner Zellen

In derselben Serie wird auch die Arbeit von Marshall und Groer /Marshall, 1975/, wieder aufgenommen. Besondere Betonung liegt in dieser Arbeit auf Unterschieden der Wirkung von Ra-224 einerseits und Ra-226 und Ra-228 andererseits. Die auch von Spiess und Mays beobachtete Latenzzeit und der Protraktionseffekt bei Ra-224 wird darauf zurückgeführt, daß bei Dosen $\gg 1$ rd/d die Zelltötung so rasch voranschreitet, daß sich nicht mehr genügend neue Stammzellen bilden. Ebenfalls untersucht wurden die Entstehung und zeitliche Entwicklung von Osteosarkomen als Funktion der aufgenommenen Aktivität von Ra-228 plus Ra-226 /Marshall, 1976/.

Ebenfalls in Utah wurde bei ungefähr 40 Patienten mit mehr als 20 nCi RaC (Bi-214) eine Untersuchung auf Ra-226 von je 7 Regionen des Körpers - über dessen Länge verteilt - vorgenommen. Drei Ergebnisse stellen sich heraus:

- Die Verteilung von Ra-226 im Körper ist extrem unterschiedlich; eine Abhängigkeit von der Art der Radiumaufnahme zeigt sich aber nicht.
- Es gibt keine Korrelation zwischen Stellen hoher Radium-Ablagerung und dem Auftreten von bösartigen Entartungen.
- Das allgemeine Muster der Verteilung bleibt über Jahre hinaus stabil /Rundo, 1976a/.

Normalerweise wird die Ganzkörperaktivität des Ra-226 mit Hilfe der Ra (A + B) - γ -Aktivität gemessen und dieser Wert durch Messung des Radon in der Atemluft korrigiert. Diese Methode verlangt sehr viel Sorgfalt, denn der Anteil der Emanation und sein Einfluß variieren bei verschiedenen "Patienten", verschiedener Dauer der Radiumbelastung, verschiedener physikalischer und chemischer Form der Radiuminkorporation usw. Das Verhältnis der Radon-Aktivität zur Ganzkörperaktivität an Ra-226 liegt im Mittel bei 0,68 /Lenger, 1972; Marinelli, 1962/.

3.7.2 Radium-Retention und Radium-Exkretion

Eine Arbeit aus dem belgischen Kernforschungszentrum in Mol beschreibt einen Unfall mit einer RaSO_4 -Ampulle, bei dem Ra-226-haltiger Staub von einer 50jährigen dort Beschäftigten inkorporiert wurde. Diese wurde mit Alginaten behandelt. Es wurde versucht, den Ra-Gehalt des Körpers und die Exkretion zu analysieren. Die Ganzkörperbelastung lag am 12. Tag nach der Inkorporation bei $1,3 \times 10^4$ pCi Ra-226;

die fäkale Exkretionsrate lag zwischen 2 und 8×10^2 pCi Ra-226 pro Tag. Die Exkretionsrate wurde mit den von Marinelli et al. bei einem anderen Unfall gemessenen Werten verglichen /Marinelli, 1958/. Die Unterschiede lassen sich möglicherweise durch die verschiedene Lokalisation des Hauptanteils des inkorporierten Radiums und die Alginatbehandlung erklären.

Das Verständnis und die modellmäßige Darstellung der Radium-Retention spielt für alle Untersuchungen der Dosis, Dosisverteilung und entstehender Wirkungen eine bestimmende Rolle.

Um zu vergleichen, welche Unterschiede sich im Metabolismus der verschiedenen Erdalkalimetalle finden, wurden schon früh systematische Studien an verschiedenen Versuchstieren unternommen. So untersuchten z. B. Norris und Kisielleski verschiedene Parameter des Metabolismus von Ra, Sr und Ca in Ratten und verglichen sie mit den Ergebnissen anderer Autoren, z. T. auch an Mäusen und Kaninchen.

Bei grundsätzlich gleichartigem Verhalten der drei Elemente fand sich doch eine Abhängigkeit von Ionenradius in dem Sinne, daß die Retention von Ca größer als von Sr und diese wiederum größer als die von Ra ist /Norris, 1948/. In der zitierten Arbeit sind genaue Angaben über die relative Retention der drei Elemente und die Ausscheidung in Urin und Stuhl sowie des Gehalts in Blut, Haaren, Muskeln und Knochen als Funktion der Zeit angegeben.

Daraus ergeben sich dann Ausscheidungsfunktionen, die u. a. zeigen, daß die Ausscheidung von Radium eine Funktion der injizierten Menge Radium ist:

$$\log R = 0,177 \log I + 1,757$$

mit $R =$ Retention

$I =$ Injektionsmenge

Generell gilt nach /Norris, 1948/ für die Exkretion in Urin und Stuhl

$$E_u = 2,10 \times t^{-1,45}$$

$$E_f = 6,66 \times t^{-1,60}$$

und insgesamt $E = 8,80 \times t^{-1,56}$.

Von Norris et al. wurden zwei Modelle diskutiert, einmal eines für eine einmalige Inkorporation (durch Injektion) und zum anderen eines für dauernde Inkorporation (Injektion oder Ingestion) /Norris, 1955/.

Bei einmaliger Injektion läßt sich die Retention R als Funktion der Zeit t durch eine Potenzfunktion beschreiben:

$$(1) \quad R(t) = at^b, \quad t \geq 1.$$

Dabei wird die Zeit in Tagen gemessen, a ist eine Konstante, die den Anteil beschreibt, der nach einem Tag zurückgehalten wird, b bezeichnet die weitere Ausscheidung.

Bei kontinuierlicher Inkorporation benutzt das Modell eine modifizierte Potenzfunktion, wie sie ähnlich auch in /Finkel, 1969a; 1969b/ angegeben wird:

$$(2) \quad R(t, F) = \frac{a}{b+1} \left[(t+F)^{b+1} - t^{b+1} \right], \quad t \geq 0.$$

Hierbei ist t die Zeit (in Tagen) nach Ende der Inkorporation, F ist der Zeitraum (in Tagen), über den die Inkorporation andauerte; a und b sind genau definiert wie oben. Sie werden aus einer einmaligen Injektion bestimmt und dann in beiden Modellen verwendet.

Norris bestimmte sie als

$$a = 0,54 \text{ und } b = -0,52,$$

Miller und Finkel als

$$a = 0,30 \text{ und } b = -0,44$$

/Miller, 1968/.

Diese beiden Varianten lassen sich statistisch nicht unterscheiden.

Chiacchierini et al. geben eine Übersicht darüber, wie sich nach verschiedenen

Modellvorstellungen die Dosisbelastung eines Menschen errechnet, bei dem sich nach 40 Jahren eine Restaktivität von 1 μCi Ra-226 findet. Dabei wird ein Gewicht des Skeletts von 7 kg und eine Ingestionsperiode von 365 Tagen angenommen und für beide Varianten der Konstanten a und b mit beiden Gleichungen (1) und (2) gerechnet. Die berechneten maximalen Aktivitätsbelastungen unterscheiden sich je nach Modell erheblich, bei der kumulierten Dosis (in rd) sind die Unterschiede nicht so gravierend, s. Tab. 3.57.

Bei allen Dosisberechnungen muß man im Auge behalten, daß sie von der Wahl der Retentionsfunktion abhängen und daß die Verteilung des Radium im Knochen inhomogen ist. So handelt es sich also immer um Abschätzungen /Chiacchierini, 1970/.

Gleichung ^a	Parameter (a und b)	Geschätzte Maximal- belastung (μCi)	Kumulierte Dosis (rd)
1	/Norris, 1955/ (a = 0,54, b = -0,52)	271	2307
1	/Miller, 1968/ (a = 0,30, b = -0,44)	227	1957
2	/Norris, 1955/ (a = 0,54, b = -0,52)	14	2199
2	/Miller, 1968/ (a = 0,30, b = -0,44)	9	1892

^a Gleichung 1. $R(t) = a t^b$, $t \geq 1$.

Gleichung 2. $R(t) = \frac{a}{b+1} ((t+365)^{b+1} - t^{b+1})$, $t \geq 0$.

Tab. 3.57: Maximalbelastung und kumulierte Dosis in verschiedenen Retentionsmodellen

In einer neueren Arbeit von Marshall und Lloyd wird eine neue Retentionsfunktion für Radium vorgestellt. Diese Funktion setzt sich aus Potenz- und Exponentialfunktionen zusammen und verknüpft die Retention mit den Mechanismen der Knochenbildung, der Resorption, der Diffusion und dem Austausch zwischen kompaktem und spongiösem Knochen. Dieses Modell steht in gutem Einklang mit mikroskopischen und makroskopischen Befunden über die Retention verschiedener Radium-Isotope und hilft bei der Berechnung der Dosis für endostales- bzw. Knochenmarksgewebe nach

verschiedenen Formen der Inkorporation /Marshall, 1972/. Die Funktion und die verwendeten 6 Parameter sind im folgenden aufgeführt; β und r sind abgeleitete Parameter.

$$R = (1-pe)^{-mt} + p \epsilon^b (t + \epsilon)^{-b} [\beta e^{-r\lambda t} + (1 - \beta)e^{-\sigma r\lambda t}],$$

Dabei ist

R = der Anteil an Aktivität, der nach einer einmaligen Injektion im Körper verbleibt (ohne radioaktiven Zerfall)

ϵ = ein kurzer Zeitintervall (0,3 - 3 Tage) im Zusammenhang mit der Verteilung der inkorporierten Aktivität

b = Exponent der Potenzfunktion, zwischen 0,1 und 0,5, im Zusammenhang mit der Diffusion der Aktivität aus dem Knochen ins Blut und der Ausscheidung eines Teils der Aktivität aus dem Körper

λ = Anteil der Anlagerung und Resorption im kompakten Knochen (2,5 %/Jahr)

σ = Verhältnis der Umbildungsraten von spongiösen und kompakten Knochen

β = Anteil der Aktivität in neugebildeten Knochen an Stellen der Resorption lange nach der Injektion (0,83 - 0,99)

m = Konstante eines kleinen exponentiellen Anteils an R für einen frühen Beitrag (0,1 - 0,8/Tag)

p = zu dem frühen Beitrag an R korrespondierender Anteil (0,6 - 0,8)

t = Zeit (von 0 bei der Injektion bis zu beliebigen späteren Zeitpunkten)

Für den Menschen wurde bei Untersuchungen von Bechterew-Patienten, die mit Ra-224 behandelt worden waren, festgestellt, daß nur etwa 1 - 10 % der gesamten ausgeschiedenen Radiummenge durch den Urin ausgeschieden wurde /Grillmaier, 1968/.

Der Mittelwert liegt bei 2 %. Für den Ra-224-Metabolismus bei diesen Patienten wurde von den Autoren ein Kompartimentmodell entwickelt, in dem die oben angegebenen Retentionsfunktionen von Norris und Finkel verwendet werden. Die Autoren benutzen dabei Ergebnisse früherer Untersuchungen /Oberhausen, 1966; Schales, 1964; 1965; 1966a; 1966b/.

Wichtige Überlegungen zur Strahlendosis durch im Knochen eingelagertes Radium stammen vor allem von Spiers /Spiers, 1953/; 1966/.

Ergänzend zu den Tierversuchen wurden auch im Labor Studien über den Einbau der verschiedenen Erdalkalien in knochen-ähnlichen Substanzen vorgenommen /Stark, 1968/, um Diskriminierungsfaktoren beim Einbau auch der Elemente zu bestimmen, die verglichen mit Kalzium im normalen Mineralhaushalt des Knochens eine geringe Rolle spielen. Auch in dieser Arbeit zeigt sich mit zunehmender Ionengröße eine zunehmende Diskriminierung gegen Kalzium.

In einer Arbeit von Rundo und Holtzmann /Rundo, 1976b/ wird die Ausscheidung von Ra-226 (12 Fälle) und Pu-239 (2 Fälle) ungefähr 1 000 und 10 000 Tage nach der Aufnahme dargestellt und verglichen. Es gibt mehr Unterschiede als Gemeinsamkeiten, nur die Ausscheidung nach ca. 1 000 Tagen läßt sich in beiden Fällen als gleicher Prozentsatz der Anfangsdosis beschreiben. Die Ausscheidungskoeffizienten werden nach ca. 10 000 Tagen ähnlich. Zwischen verschiedenen Individuen gibt es sehr große Unterschiede in der Ra-Ausscheidung. Die biologische Halbwertszeit wird für beide Substanzen mit ungefähr 46 Jahren angegeben.

4. Tierversuche mit Radium

4.1 Frühe Tierversuche

Die ersten Tierversuche mit Radium wurden zu Anfang des Jahrhunderts angestellt. Bei diesen Versuchen wurde das Radium oft perkutan injiziert oder implantiert, die Dosis war nicht bekannt, oder es wurde eine Mischung von Ra-226 und Ra-228 (Ms Th) verwendet /Chiacchierini, 1970/, s. Tab. 4.1.

Zu den frühesten Untersuchungen am Säugetierorganismus gehören die Arbeiten von Meyer und Mitarbeitern aus den Jahren 1906 und 1907 /Meyer, 1906; Salant, 1907/. An Hunden, Katzen, Kaninchen und anderen Tieren wurden erste Versuche zum Metabolismus von Radium (im Vergleich zu Barium) nach verschiedenen Formen der Inkorporation angestellt. Die Untersuchungszeiten waren mit weniger als 20 Tage relativ kurz. Besonders untersucht wurden mögliche Wirkungen auf Blutdruck und Atmung, Verteilung im Körper und Ausscheidung. Einzelne Organe wie Leber, Niere, Gallenblase, Magen, Darm wurden untersucht; auf Unterschiede zwischen Pflanzen- und Tierfressern wird hingewiesen. Es wurden sehr hohe Dosen an Radium gegeben: pro Hund z. B. zwischen 1,8 und 45 mg Radiumbromidlösung. Bedenkt man, daß zu dieser Zeit, wie in der Arbeit von 1906 explizit vermerkt, nicht einmal klar war, daß Radium zu den Erdalkalien gehört, so kann man ermessen, wie groß die Fortschritte der Wissenschaft gewesen sind, die uns heute erlauben, Radium als dasjenige radioaktive Element zu betrachten, dessen Wirkungen auf Lebewesen am besten bekannt sind.

Schon im Jahre 1911 wurden erste Versuche über den Metabolismus des Radiums und seiner Zerfallsprodukte angestellt /Smith, 1911/. Es ist erstaunlich, wie sorgfältig schon damals dieses Experiment geplant wurde. So wurde Mäusen das Radium mit dem Futter verabreicht oder injiziert und dann die Ausscheidung über den Magen/Darm-Trakt, die Nieren und die Haut untersucht. Auch der zeitliche Verlauf dieser Ausscheidung und die Abhängigkeit von der chemischen Form des verabreichten Radiums wurde untersucht. Besonderes Augenmerk fand schon damals die Radon-Radioaktivität in der Lunge.

4.2 Neuere Untersuchungen

Im Zentrum der Tierversuche steht die Erzeugung von Sarkomen durch die Strahlen-

Autor	Zeit	Substanz	Ra-Menge (mg) Ra	Spezies	Anzahl der Tiere		Tumor- Induktionszeit (Monate)	Art des Tumors
					untersucht	Tumoren		
Lazarus-Barlow	1918	Ra	10^{-4} - 10^{-8}	Maus	193	5	6	Hautkarzinome
		Ra	10^{-3} - 10^{-7}	Ratte	53	?	?	"
Daels und Baeten	1925-1926	Ra	10^{-6} - 6×10^{-3}	Maus	78	3	7-12	Spindelzeilsarkome
				Ratte	43	2		
Daels und Biltris	1931	Ra	unbestimmbar	Ratte	82	4	8-22	Sarkome von Schädel, Niere, Milz
	1931-1933	Ra	.....	Meerschwein- chen	100	18	8-22	
	1937	Ra	.....	Kücken	152	2	58-59	
Schurch und Uehlinger	1931	Ra	10^{-4} - 5×10^{-3}	Kaninchen	1	1	18	Sarkome von Knochen, Leber, Milz
Uehlinger und Schurch	1935-1938	Ra, Ms - Th 1	.....	Kaninchen	56	18	18-50	
Sabin et al....	1932	Ra, Ms - Th 1	5,1 mg Ra	Kaninchen	7	2	11-19	Osteosarkome
			7,7 mg Ms - Th 1		12	2	34-39	
			4×10^{-4} - $1,8 \times 10^{-3}$	Meerschwein- chen				Karzinom der Gallenwege
Ross	1936	Ra	0,1	Kaninchen	13	6	24-32	Hautkarzinome, Bindegewebs- und Osteo- sarkome
Jentzer	1937	Ra	0,5	Kaninchen	6	1	9	Osteosarkome
Hellner	1938	Ra	.....	Kaninchen	...	..	24	verschiedene Sarkome
Dunlap et al.	1944	Ra	2×10^{-6}	Ratte	13	9	12	Osteosarkome

4.2

Nach Lacassagne, Antoine (1945) (herausgegeben von Hollaender, A.) Radiation Biology, VOL I, Part II, McGraw-Hill Book Company, Inc., N.Y. (1954) p. 1155.

Tab. 4.1 Experimente zur Erzeugung von Geschwulsten durch Radium

belastung. Die bedeutendsten modernen Studien sind

- 1) die Untersuchungen an Beagle-Hunden an der Universität von Utah /Utah, 1969; Dougherty, 1969/
- 2) die Untersuchungen an Beagle-Hunden an der Universität von Kalifornien in Davis /Davis, 1969/ und
- 3) die Untersuchungen an Mäusen im Argonne National Laboratory /Finkel, 1969/.

Sorgfältige Tierexperimente mit Dosisbelastungen in vernünftigen Bereichen, ausreichender Zahl von Versuchstieren und genügend langer Beobachtungsdauer sind als Ergänzung zu den Erfahrungen mit Radium im Menschen unerlässlich, auch wenn die Schwierigkeit, aus Tierversuchen zu extrapolieren, bestehen bleibt.

4.3 Beagle-Hunde

Die oben zitierten großen Studien mit Säugetieren befaßten sich vor allem mit den langfristigen biologischen Wirkungen interner Strahlenquellen. Der Beagle-Hund als Versuchstier wurde wegen seiner langen Lebensdauer und deswegen gewählt, weil sein Knochenmetabolismus, seine Physiologie und Pathologie der menschlichen näher stehen, als dies bei Nagetieren der Fall ist. Das Utah-Experiment begann in den 50er Jahren mit dem Ziel, die Wirkungen von Ra-226 und Pu-239 zu vergleichen. Zusätzlich wurden Wirkungen von Ra-228 und Th-228 verglichen. Erwachsenen Tieren (18 Monate alt) wurde eine einmalige Injektion mit einem Vielfachen der für Menschen zulässigen Dosis verabreicht, die Tiere wurden dann bis zu ihrem Tode beobachtet, s. Tab. 4.2.

In den drei Gruppen mit der höchsten Dosis (R5, R4 und R3) in Tabelle 4.2 (zur Nomenklatur der Dosisgruppen s. Tab. 4.5) starben alle Tiere bis auf je eines an Osteosarkomen, in der Gruppe R2 fünf von 13 und in der Gruppe R1.7 eines von 9 Tieren. Für die Gruppe R1 nehmen die Autoren der Studie /Utah, 1969/ an, daß keines der Tiere an Strahlenschäden gestorben ist. Bei den 40 Tieren der Kontrollgruppe (R0) starben im Untersuchungszeitraum 12 Tiere, es entstanden aber keine Tumoren der Art, wie sie bei den Tieren unter Strahleneinfluß zu beobachten waren. In Tabelle 4.3 sind entsprechende Daten für sog. Test-Tiere aufgeführt. Von diesen

Behandlungs-Code ^{a)}	Dosierung $\mu\text{Ci}/\text{kg}$	Anzahl der Hunde	Todesfälle	Todesfälle mit Osteosarkomen	Osteosarkome	
					Zahl der Jahre zwischen Injektion und Tod	Mittlere Dosis 1 Jahr vor dem Tod
R5	10,4	10	10 ^{b)}	9	3,04	10 900
R4	3,21	13	13 ^{c)}	12	4,36	4 530
R3	1,07	12	12 ^{d)}	11	6,28	1 940
R2	0,339	13	13	5	10,28	837
R1.7	0,166	12	9	1	11,25	458
R1	0,0621	23	12	0		
R0	0,0000	40	12	0		

- a) Zur Bedeutung der Codes s. Tab. 4.5; in den zusätzlichen Gruppen R0.5 mit 0,0220 $\mu\text{Ci}/\text{kg}$ und R0.2 mit 0,0074 $\mu\text{Ci}/\text{kg}$ fanden sich keine Todesfälle.
- b) 1 Tod durch Staupe nach 481 Tagen
- c) 1 Tod durch Staupe nach 490 Tagen
- d) 1 Tod durch Gebärmutterentzündung nach 1 610 Tagen

Tab. 4.2: Tierversuche mit Ra-226 an der University of Utah

Behandlungs-Code (s.Tab.4.5)	Anzahl der Hunde	Todesfälle mit Osteosarkomen	Osteosarkome		Andere Todesursachen
			Zahl der Jahre zwischen Injektion und Tod	Mittlere Dosis 1 Jahr vor dem Tod	
R5	12	6	3,36	10 832	3 Nierenentzündungen 1 Melanom 1 Knochenbruch 1 Wurminfektion
R4	9	9	4,23	4 262	
R3	5	4	5,15	1 605	1 noch am Leben

a) Ohne die Tiere, die wegen Untersuchungen zu Metabolismus, Retention und anderen Spezialstudien getötet wurden.

Tab. 4.3: Nichtgetötete Ra-226-Test-Tiere an der University of Utah^{a)}

Behandlungs-Code (s.Tab.4.5)	Zahl der Hunde	$\mu\text{Ci}/\text{kg}/\text{Injektion}^{\text{a)}$	Osteosarkome	Dauer bis zum Tode (Jahre)
R50	38	1,25	9	4,4
R40	41	0,42	6	4,9
R30	39	0,14	0	-
R20	41	0,047	0	-
R10	38	0,008	0	-
R05	46	0,003	0	-
R00	81	0,000	0	-

a) 8 intravenöse Injektionen im Abstand von einem halben Monat, beginnend am 435. Lebenstag

Tab. 4.4: Ra-226-Injektionen an der University of California (Davis)

erhielten manche das Radium statt in einer einzigen in sechs Injektionen im Abstand von 56 Tagen; manche Tiere wurden auch zu Untersuchungen über den Radium-Metabolismus getötet, bevor sie Tumoren entwickelten. In der Gruppe von Test-Tieren gab es Osteosarkome in den drei Gruppen mit der höchsten Dosis (R3, R4, R5), vergleichbar mit den Fällen in Tab. 4.2.

Die Studie an der Universität von Kalifornien in Davis /Davis, 1969/ wurde ebenfalls in den 50er Jahren begonnen, hier mit dem Ziel, die relative Toxizität von Sr-90 und Ra-226 zu bestimmen. Die Dosierung war ähnlich wie in Utah, die Injektionen wurden aber in je acht vierzehntägigen Intervallen gegeben. Diese Methode wurde gewählt, um die mittlere Expositionsdauer von drei Jahren bei den Menschen, die einer Radiumbelastung ausgesetzt waren, zu simulieren. Tabelle 4.4 zeigt die Ergebnisse dieser Studie

4.4 Verschiedene andere Versuchstiere, insbesondere Nagetiere

Im Argonne National Laboratory wurden mehr als 3200 Mäuse nach der intravenösen Injektion von Ra-226 beobachtet. Die Dosierung lag zwischen 0,05 und 120 $\mu\text{Ci}/\text{kg}$, damit lag die Strahlenbelastung durch das im Skelett verbleibende Radium zwischen dem fünffachen und dem 12 000fachen der für Menschen zulässigen Belastung von 0,1 μCi Ra-226. Auch hier war der sicherste Indikator für Radiumschäden das Entstehen von Osteosarkomen.

Tabelle 4.5 zeigt, in welchem Bereich bei den drei Experimenten gearbeitet wurde, und erklärt die verwendete Nomenklatur. Abb. 4.1 zeigt die Dosis-Wirkungs-Beziehung. Man beobachtet einen linearen Verlauf der zu erwartenden Tumorzahlfunktion als Funktion der Dosis bis zu 2,5 $\mu\text{Ci}/\text{kg}$, hier und dann noch einmal bei 20 $\mu\text{Ci}/\text{kg}$ zeigt sich eine abrupte Änderung der Steigung der Kurve, die die Autoren mit letalen Schäden am oberen Knick und verschiedenen möglichen Mechanismen der Krebsentstehung am unteren Knick interpretieren /Finkel, 1969/. Diese Ergebnisse sprechen für eine Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellenwert.

Aus den Daten wurde extrapoliert, daß bei einer Belastung der Tiere mit 0,0014 $\mu\text{Ci}/\text{kg}$, die der von 0,1 μCi für einen "Standardmenschen" von 70 kg entspricht, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Tumoren 1,3 mal so hoch wäre wie im Normalfall. Bei einer Restaktivität (14 % nach 200 d) in dieser Höhe wäre die Tumorerwartung dagegen 3,85 mal höher als die von Kontrolltieren.

Aufgenommene Dosis (MPBB) ^{a)}	Davis (Hunde)	Utah (Hunde)	Argonne (Mäuse)
12 000	-	-	A
8 000	-	-	B
4 000	-	-	C
2 000	-	-	D
1 620	R50	R5.0	-
1 000	-	-	E
540	R40	R4.0	-
500	-	-	F
250	-	-	G
180	R30	R3.0	-
125	-	-	H
100	-	-	I
75	-	-	J
60	R20	R2.0	-
50	-	-	K & M
30	-	R1.7	-
25	-	-	N
10	R10	R1.0	O
5	-	-	P
3,3	R05	R0.5	-
1,1	-	R0.2	-
0	R00	R0.0	Q & R

^{a)} In Vielfachen der Maximum Permissible Body Burden (MPBB), die als 0,1 µCi Ra-226 pro 70 kg Standardmensch für Radium-Arbeiter definiert ist.

Tab. 4.5: Vergleich der Dosisbereiche bei den verschiedenen Studien über die toxische Wirkung von Radium

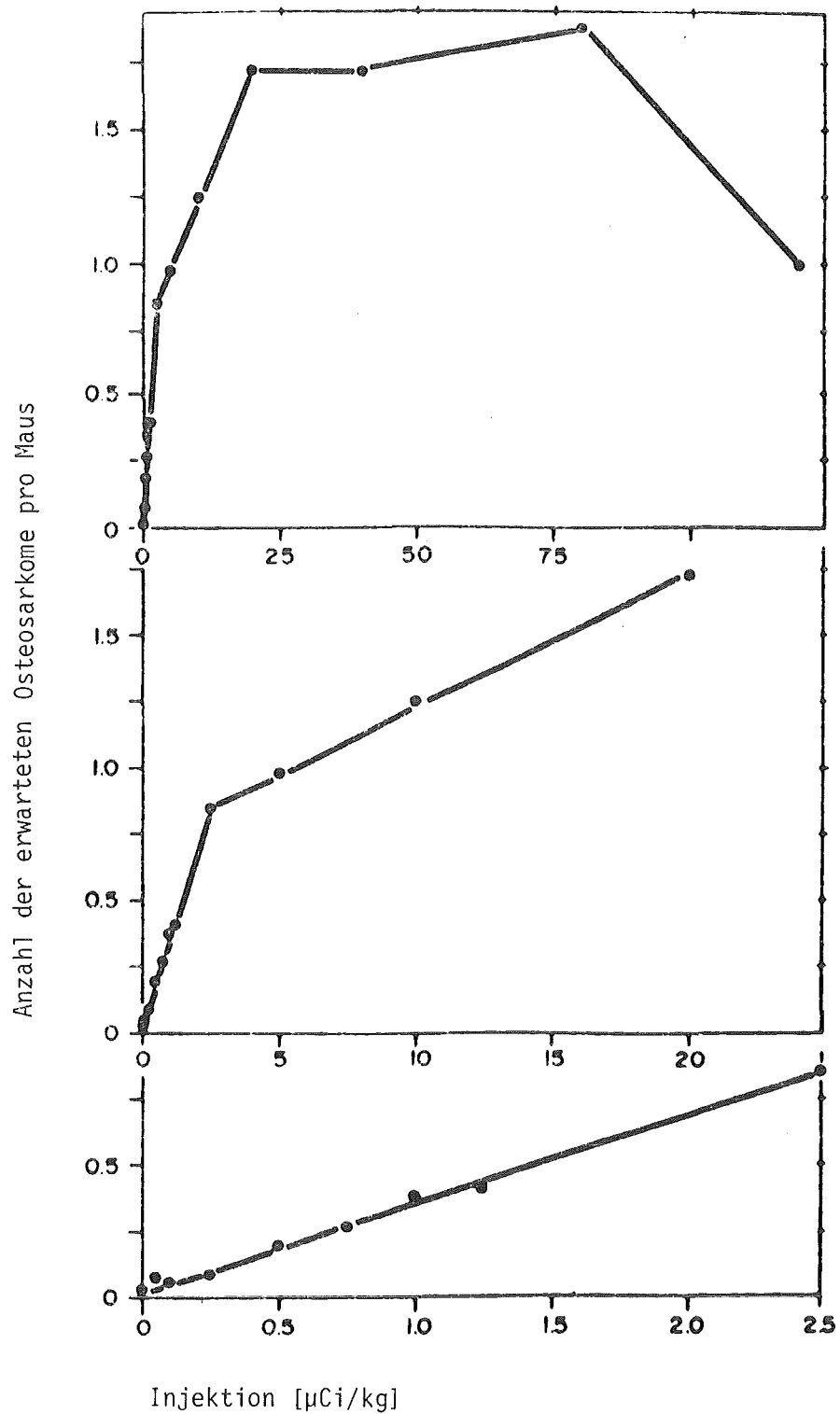


Abb. 4.1: Durchschnittliche Tumor-Erwartung als Funktion der injizierten Ra-Aktivität

Im Gegensatz zu den Experimenten am Argonne National Laboratory /Finkel, 1969/ wurden in einer tschechischen Arbeit männliche Mäuse auf die Auswirkungen von Ra-226 untersucht /Klener, 1973/. Klener et al. beobachteten eine signifikante Lebenszeitverkürzung oberhalb einer relativ hohen Schwellendosis, das Entstehen von Osteosarkomen und eine Verringerung der Leukämierate im Vergleich zu einer Kontrollgruppe unbehandelter Tiere, die nicht allein durch die Lebenszeitverkürzung erklärt werden konnte. Das Radium wurde in diesem Experiment intraperitoneal verabreicht. Abbildung 4.2 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse mit denen von Finkel et al.. Die Unterschiede rühren sicher zum Teil von Eigenarten der verwendeten Mäusestämme her. Die Zahl der Versuchstiere war in beiden Experimenten vergleichbar, die Dosierung lag in Prag zwischen 8.2 und 75 μCi Ra-226/kg.

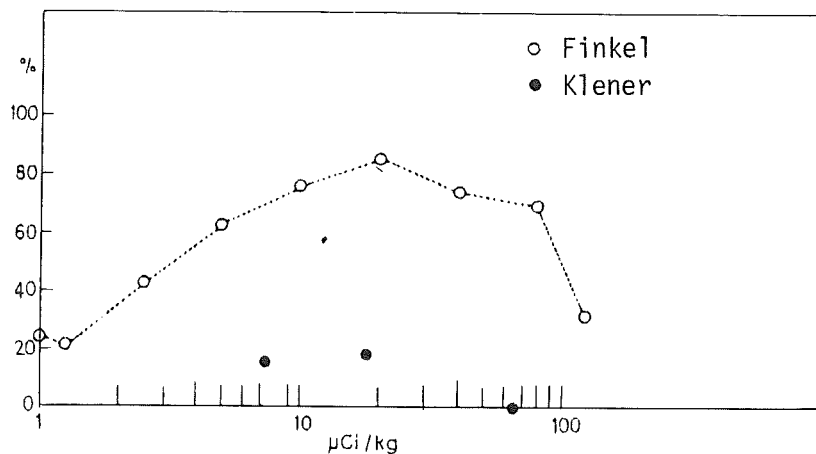


Abb. 4.2: Auftreten von Osteosarkomen als Funktion der verabreichten Ra-226-Aktivität

In einer russischen Arbeit von 1974 wird die Verteilung von Radium in Ratten nach Th-Injektionen untersucht /Moskalev, 1974/. Nach intravenöser Verabreichung verteilt sich das Radium ungleichmäßig, die Konzentration ist am höchsten in Knochen, Nieren, Speicheldrüsen, Schilddrüse und Magen- und Darmschleimhaut. Die Verteilung ist zudem vom Alter der Tiere abhängig. Bei jüngeren Tieren reichert sich mehr Radium in Knochen an, bei älteren findet sich relativ mehr in den Weichteilgeweben. Zudem ist bei den älteren Tieren die Exkretion im Urin stärker.

Auch die Absorption aus dem Muskelgewebe ist altersabhängig. Die Absorption beträgt 60 % in der ersten Stunde nach der Injektion, 95 % nach 24 Stunden; bei ausgewachsenen Tieren ist der Vorgang langsamer als bei den jüngeren.

Schon 1948 wurden die Wirkungen von parenteral verabreichtem Radiumchlorid auf die zelligen Bestandteile des peripheren Bluts von Ratten, Mäusen und Kaninchen untersucht /Jacobson, 1948/. Intraperitoneal und intravenös wurde Ra-226 in Dosierungen von 0,005 bis 0,94 $\mu\text{Ci/g}$ an Ratten, 0,00066 bis 0,85 $\mu\text{Ci/g}$ intraperitoneal an Mäuse und 0,0016 bis 0,1 $\mu\text{Ci/g}$ intraperitoneal oder intracardial an Kaninchen gegeben. Es zeigten sich keine signifikanten Spezies-Unterschiede, nur Kaninchen schienen etwas resistenter zu sein. Auch damals schon war es unsicher, ob bei den Mäusen Geschlechts- und/oder Stammesunterschiede für Resistenzunterschiede relevant waren. Bei Dosen von weniger als 0,01 $\mu\text{Ci/g}$ zeigten sich keine Wirkungen, bei Dosen $> 0,02 \mu\text{Ci/g}$ zeigten sich Anämie und anhaltende Reduktion der Leukozyten an Ratten. Bei Dosen oberhalb von 0,03 $\mu\text{Ci/g}$ zeigten sich schwere Schäden, wiederholt Anämie in männlichen Mäusen (ABC-Stamm), aber nicht in weiblichen Mäusen (CF1-Stamm), dazu vergleichbare Veränderungen in den Antikörperanteilen in beiden Stämmen und eine beginnende mäßige Reduktion der Lymphozyten in männlichen ABC-Mäusen.

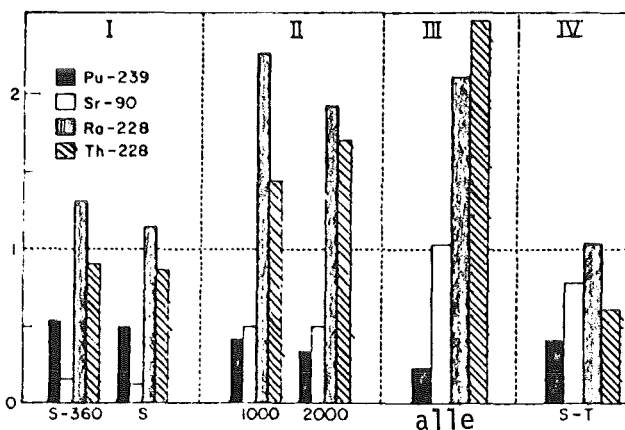
Selbst Dosen von 0,1 $\mu\text{Ci/g}$ erzeugten in Kaninchen noch keine Anämie, sondern nur eine leichte Verminderung der Leukozyten. Bei Ratten führte eine Dosis von 0,94 $\mu\text{Ci/g}$ zu einer beginnenden Reduktion der Retikulozyten (Vorstufen roter Zellen) mit nachfolgender Überproduktion und einer deutlichen Reduktion der Blutplättchen (Thrombozyten) mit nur geringer Besserung. Außerdem wurden morphologische Veränderungen in den kernhaltigen Zellen des peripheren Bluts beobachtet, wie sie aus Studien mit externer Bestrahlung oder nach Verabreichung von Plutonium bekannt waren. Makrozytose, sichtbar durch vergrößerten Erythrozytendurchmesser und vermehrten Hämoglobingehalt des Einzelerythrozyten wurden bei Ratten, Mäusen und Kaninchen bei parenteralen Dosen von 0,1 bis 0,2 $\mu\text{Ci/g}$ beobachtet.

In einer kanadischen Arbeit aus dem Jahre 1971 /Gridgeman, 1971/ werden vier verschiedene Methoden zur Beschreibung der in den Utah-Experimenten beobachteten Dosis-Wirkungs-Beziehungen dargestellt. Für die Effekte von Radium ist diese Arbeit vor allem deswegen interessant, weil sie auch die Unterschiede der Wirkung von Ra-226 und Ra-228 betont. Die vier Methoden beruhen auf einer Untersuchung der Anzahl der Todesfälle durch Osteosarkome, auf zwei ver-

schiedenen Betrachtungen der jeweiligen Überlebenszeiten und schließlich auf einer Untersuchung darüber, wie lange es dauert, bis ein bösartiger Tumor entsteht. Diese letzte Methode, die von Blair vorgeschlagen wurde, wird besonders positiv bewertet. Ein Ergebnis dieser Studie ist, daß die relative Toxizität von Ra-228 gegenüber Ra-226 bis zu 2.5 mal höher sein könnte, s. Abb. 4.3. Der Unterschied rührt vor allem daher, daß sich Ra-226 relativ gleichmäßig in Knochen verteilt, bei Ra-228 aber vor allem wegen der Tochterprodukte eine unterschiedliche Wirkung in den verschiedenen Geweben

- a) Weichteile, Blut und andere extrazelluläre Flüssigkeiten,
- b) endostale Oberflächen,
- c) mineralische Knochen

zustande kommt.



Zeiten, die bei der Dosisberechnung berücksichtigt wurden (Tage);
 S = durchschnittliche Überlebenszeit, T = Zeit zwischen Entstehen des Tumors und Tod

Abb. 4.3: Relative Toxizität verschiedener Radionuklide aus verschiedenen Studien

Bisher haben sich solche Studien auf die Entstehung von Osteosarkomen beschränkt. In Utah wurden darüber hinaus Melanome im Auge beobachtet, die bei sehr niedrigen Dosen auftreten. Auch dieses Ergebnis spricht für eine Fortsetzung sorgfältiger Tierexperimente.

Zur Ergänzung der Untersuchungen an Thorotrast-Patienten (s. 3.4) wurden auch Tierexperimente zum Metabolismus von Ra-228 und Ra-224 unternommen. So wurde an Kaninchen die Änderung der zeitlich-räumlichen Verteilung dieser Isotope im RES (retikuloendothelialen System) und markfreien Skelett untersucht /Kaul, 1969/. Im Vordergrund des Interesses standen bei dieser Arbeit Fragen der zeitlichen Änderungen der ThO_2 -Teilchengröße durch Agglomeration in den Organen des RES sowie die Translokation der Radium-Isotope aus diesen Organen in das Skelett. Auch diesen Tieren wurde die Thorotrastsuspension intravenös injiziert, die Dauer der Speicherung lag zwischen 0,125 Tagen und 220 Tagen nach der Injektion. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit Beobachtungen am Menschen und an Hunden /van Dilla, 1958/, nach denen die Retention einer einmalig applizierten Radiumaktivität durch eine Potenzfunktion dargestellt werden kann.

4.5 Zusammenfassende Studien

Weitere Einzelheiten der Verteilung und Ausscheidung von Ra-224 und Ra-228 wurden von Kaul und Heyder im Jahre 1970 beschrieben /Kaul, 1970/. Aus dem Vergleich der dem Kompartimentmodell entsprechenden Ausscheidungskurve mit dem gemessenen Verlauf der Gesamtausscheidung wurden der Wert für die Retention von Radium im Skelett (0.375) und die Konstante für die Ausscheidung in Ionenform $0,83 \text{ d}^{-1}$, entsprechend einer Halbwertszeit von 20 h, ermittelt. Auch hier wurden die Untersuchungen an männlichen Kaninchen durchgeführt.

Im Jahr 1970 wurde in Utah ein Vergleich der Wirkungen von Radium und Plutonium angestellt /Stover, 1980/. In dieser Arbeit wird angeregt, neben den Untersuchungen an Beagle-Hunden solche an reinerbigen Tierstämmen mit denjenigen an den bekannten Gruppen von Exponierten (Radiumfälle, Atombombenüberlebende, Uranminenarbeiter, Bewohner der Marshall-Inseln) zu verbinden.

Im Jahre 1976 kam an der Universität von Utah eine Sammlung von Konferenz-Berichten zum Thema "The Health Effects of Plutonium and Radium" heraus. Auch in dieser Serie spielten die Untersuchungen an Beagle-Hunden eine besondere Rolle. In einer Arbeit von Taylor, Jee und Mays /Taylor, 1976/ wird z. B. eine vergleichende Übersicht derjenigen Krebserkrankungen ergeben, die bei Hunden und Menschen als Ergebnis der Strahlung auftreten:

Symptom	Hund	Mensch	Niedrigste Ra-Dosis [rd]	
			Hund	Mensch
Joch-Syndrom	+	+	500	1200
Pathologische Brüche	++	+		
Minimale radiographische Veränderungen	+	+		
Strahlenneoplasie	++*	+ *		
Tumoren der blutbildenden Gewebe	-	-		
Lebererkrankungen	+ **	+ ***		

*Hier müssen besonders die Verschiedenheiten der Anatomie beachtet werden.

**Bei Pu-Inkorporation finden sich 30 % in der Leber, 50 % im Skelett.

***Bei Pu-Inhalation finden sich mehr als 30 % in der Leber, mehr als im Skelett.

Tab. 4.6: Strahlenbedingte Krebserkrankungen

1974 wurden in USA Einwirkungen von Radium auf Rinder-Schilddrüsen untersucht. In Proben dieses Organs vor allem aus Nigeria (80 %) und Colorado (60 %), aber auch aus anderen Teilen der Welt wurde zwar Radium gefunden, jedoch ist ungeklärt, wie sich dieses Element in den Schilddrüsen-Follikeln anreichert. Trotz einer relativ intensiven α -Strahlung auf die angrenzenden Follikelzellen konnten keine biologischen Wirkungen solcher Strahlung festgestellt werden /van Middlesworth, 1975/. Es wurde angeregt, auch die Schilddrüsen anderer Tiere zu untersuchen.

In einer Arbeit von Goldman und Rosenblatt /Goldman, 1975/ wird die Entstehung von Schäden des Knochenmarks und von Osteosarkomen als Funktion der injizierten Dosis von Sr-90, Ra-226 und Pu-239 an Beagle-Hunden untersucht.

Eine Darstellung von Probit-Kurven neutrophiler Leukozyten als Funktion des Logarithmus der Dosis ergibt parallele Geraden in der Reihenfolge Pu > Ra > Sr, bezogen auf $\mu\text{Ci/kg}$ -Injektionen, s. Abbildung 4.4. Diese Beobachtungen geben einen Hinweis auf möglicherweise gemeinsame "Mikroereignisse", die zur Karzinogenese führen.

Auch in England wurde 1974 eine Studie zur Wirkung von Ra-226 und Sr-90 in Knochen von Menschen und Tieren veröffentlicht /Spiers, 1974/. Hier geht es vor allem um Einzelheiten der Dosisberechnung für (rotes) Knochenmark und endostales Gewebe. Für die Dosis kommt es stark auf die Knochenstruktur an, was insbesondere bei der Übertragung von Ergebnissen aus Tierexperimenten auf den Menschen berücksichtigt werden muß. In Tabelle 4.7 werden einige relevante Parameter für Knochen eines erwachsenen Mannes, eines Kindes und eines Beagle-Hundes und die Dosisfaktoren für Radium zusammengefaßt. Dabei ist \bar{D}_M/\bar{D}_0 ein mittlerer Dosisfaktor für das Knochenmark, D_0 ist die Dosis für eine sehr kleine Distanz im Knochengewebe, D_S/D_0 der entsprechende Faktor für eine 10 μm -Schicht endostalen Gewebes, die an die trabekuläre Oberfläche angrenzt.

In einer Arbeit des Argonne National Laboratory zur Verteilung von Pu-239 im menschlichen Knochen /Schlenker, 1974/ wurde unter Zuhilfenahme eines Modells von Marshall und Lloyd aus den Daten abgeleitet, daß das Verhältnis der relativen biologischen Wirksamkeit von Pu-239 zu der des Ra-226 im Menschen viermal so groß ist wie das entsprechende Verhältnis bei Beagle-Hunden. Auch diese Arbeit bezieht sich auf die experimentellen Untersuchungen an der Universität von Utah /Marshall, 1973/. Die für die Wirksamkeit der Radionuklide ausschlaggebende Umbau-rate der Knochen ist bei jungen Hunden ca. zehnmal größer als bei erwachsenen Menschen. Da sich Radium im Gegensatz zu Plutonium nicht an der Knochenoberfläche sondern im Knocheninneren ablagert, wurde von Marshall und Lloyd das Verhältnis der relativen biologischen Wirksamkeit von Plutonium zu Radium für Hunde mit 6, für Menschen mit 17 ± 6 angegeben, so daß das Verhältnis beider ~ 3 ist, was mit dem oben angegebenen Wert in Einklang steht.

Marshall und Lloyd hatten im Jahr 1972 zunächst die Frage untersucht, ob die (relative) Wirksamkeit von Radium und Plutonium in Tier und Mensch gleich sei bzw. ob die relative Wirksamkeit von Plutonium und Radium für Mensch und Tier gleich sei, ob also für die Wirksamkeit W gilt:

$$\frac{W(\text{Ra} \rightarrow \text{Hund})}{W(\text{Ra} \rightarrow \text{Mensch})} = \frac{W(\text{Pu} \rightarrow \text{Hund})}{W(\text{Pu} \rightarrow \text{Mensch})}$$

bzw.

$$\frac{W(\text{Pu} \rightarrow \text{Hund})}{W(\text{Ra} \rightarrow \text{Hund})} = \frac{W(\text{Pu} \rightarrow \text{Mensch})}{W(\text{Ra} \rightarrow \text{Mensch})}$$

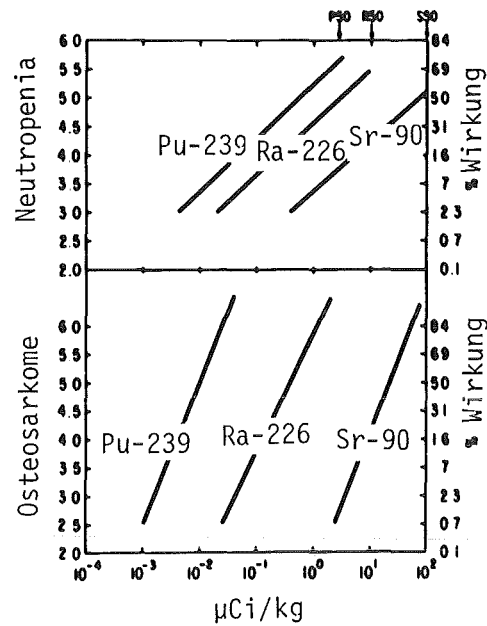


Abb. 4.4: Neutropenia und Osteosarkominzidenz in Beagle-Hunden als Funktion der injizierten Aktivität von Pu-239, Ra-226 und Sr-90

Art	gemessene Knochen	Mittlere Weglänge in μm		Bereich der Dosisfaktoren	
		Bälkchen	Mark	\bar{D}_M/\bar{D}_O	D_S/D_O
Erwachsener, 44 Jahre	Wirbelknochen, Hüfte, Rippen, Oberschenkel, Scheitelbein	220-320	905-1 705	0,016-0,029	0,32-0,34
		515	390	0,068	0,38
Junge, 20 Monate	Lendenwirbel, Wirbelknochen, Rippen, Hüfte, Oberschenkel, Scheitelbein	155-190	560-750	0,033-0,047	0,34-0,36
		560	250	0,102	0,41
Beagle, > 1,5 Jahre	Vorderbein, Speiche, Hinterbein, Schienbein, Lendenwirbel	180-285	320-740	0,046-0,082	0,35-0,38

Tab. 4.7: Mittlere Ausbreitung im Knochen und mittlere Dosisfaktoren für α -Teilchen aus Ra-226

Schon damals hatten sie betont, daß die Unterschiede im Verhältnis von Knochenoberfläche zu Knochenvolumen, die Knochenumbildungsrate, die Lebenserwartung, die relative Rate der Zellproliferation und die unterschiedliche Radiosensitivität der Zellen von Bedeutung sein könnten /Marshall, 1972/.

5. Dosis-Wirkungs-Beziehung bei der Krebsentstehung

Eine der allerersten Arbeiten über die biologischen Wirkungen von Radium erschien im Jahre 1911 /Pusey, 1911/. Sie vergleicht die Wirkungen des Radiums mit denen von Röntgenstrahlung. Besonders untersucht wurden die Wirkungen auf die menschliche Haut, die mit einer Latenzzeit von ungefähr 2 Wochen auftraten, z. B. Pigmentstimulierungen, Rötungen, sonnenbrandähnliche Entzündungen. Neben solchen vorübergehenden Effekten wurden "typische Strahlenreaktionen" beobachtet, z. B. Blutandrang, Violettfröbung, Haarausfall, Blasen, schwerheilende, schmerzhafte Geschwüre, die zu Krebs führten, der dem Alters- oder Lichtkrebs ähnelte. Wirkungen auf schon geschädigte Haut wurden eigens untersucht, ein Hinweis darauf, wie damals nach Heilwirkungen des Radiums geforscht wurde.

Wie schon in Abschnitt 3.2 dargestellt, stammt ein großer Teil des Wissens über die Langzeitwirkungen von Radium im menschlichen Körper aus den Studien über die Zifferblattmalerinnen in USA. Der Abschlußbericht über die Fälle in New Jersey aus dem Jahre 1968 enthält auch Aussagen zur Entstehung von Krebserkrankungen nach Radium-Inkorporation /NYO, 1968/. In Teil II des NYO-Berichts werden die Abnormalitäten der Knochen, in denen sich Radium abgelagert hatte, beschrieben. Dabei wird besonderer Wert darauf gelegt, frühzeitig Schäden zu erkennen bzw. die Veränderungen zu identifizieren, die bei geringer Strahlenbelastung auftreten, denn gerade diese Effekte sind im Hinblick auf den Strahlenschutz wichtig für die Grenzwertsetzung bei länger andauernder niedriger Strahlenbelastung und im Rahmen der Krebsvorsorge von Interesse. In diesem Zusammenhang wird auch darauf hingewiesen, wie aufschlußreich der Vergleich mehrerer Röntgenaufnahmen, die in bestimmtem zeitlichen Abstand entstanden sind, sein kann. Allerdings gelang es nicht, Schwellenwerte für das Auftreten solcher Effekte zu bestimmen, da die Dosisbestimmung wegen der lange zurückliegenden Bestrahlung mit großen Unsicherheiten behaftet war. Es erscheint zudem unsicher, ob es einen solchen Schwellenwert überhaupt gibt.

Als Gesamtergebnis der Studie wird aber angegeben, daß sich nach sehr langer Zeit der Belastung mit der gegenwärtig zulässigen Menge an Radium ein Risiko für den Exponierten entwickeln könnte. Die Latenzzeit für das Auftreten einer Krebserkrankung nach einer Belastung mit 1 μCi Ra-226 läßt sich auf ~ 50 Jahre abschätzen; eine Zifferblattmalerin, die im Alter von 20 Jahren ihre maximale

Belastung aufgenommen hat, wird also wahrscheinlich bis zum Alter von ~ 70 Jahren frei von Osteosarkomen sein. Personen mit einer Belastung von $0,5 \mu\text{Ci}$ bleiben vermutlich während ihres ganzen Lebens ohne Risiko. Um einen Sicherheitsfaktor von 10 zu haben, wäre es deswegen angezeigt, die Grenze von $0,1 \mu\text{Ci Ra-226}$ für Radium-Arbeiter auf $0,05$ herabzusetzen. Tabelle 5.1 enthält die Krebsfälle in der New Jersey-Gruppe geordnet nach der Art der Krebserkrankung.

Der größte Teil der Arbeiten zu Krebserkrankungen durch Radium-Inkorporation kommt aus dem Argonne National Laboratory /Marshall, 1976; Marshall, 1975; Rowland, 1973; Failla, 1972; Stehney, 1972; Stehney, 1971/. Die beiden erstzitierten Arbeiten behandeln die Theorie der Entstehung von Osteosarkomen durch α -Strahlung; die Arbeit von 1975 enthält unter anderem auch die Daten, auf denen die Modelle beruhen. Es wurde ein Modell entwickelt, das den Einfluß von α - und β -Strahlung bei der Bildung von Osteosarkomen beschreibt.

In einer dreidimensionalen Analyse werden Tumorhäufigkeit, Dosisrate und Zeit zueinander in Beziehung gesetzt und das Modell an experimentelle Ergebnisse angepaßt. Wesentliche Charakteristika sind: eine Latenzperiode von 10 - 20 Jahren für Radium-224 und von ungefähr 30 Jahren Radium-226 und Radium-228, der Hinweis auf den Einfluß der Knochenumbildungsrate, des Alters und verwandter Krankheiten, wie z. B. der Paget-Krankheit. Eine detaillierte Untersuchung von Knochenveränderungen bei eingelagertem Radium findet sich ebenfalls in einer Arbeit des Argonne National Laboratory /von Seggen, 1974/.

Die Zeit für das Wachstum eines Tumors wird auf 3 bis 5 Jahre abgeschätzt. Das Modell berücksichtigt auch, daß Ra-224, ähnlich dem Pu-239, überwiegend auf die Knochenoberfläche wirkt, Ra-226 und Ra-228 dagegen im Knochenvolumen.

Die Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen die Entstehung und zeitliche Entwicklung von Osteosarkomen als Funktion der aufgenommenen Aktivität von Ra-228 plus Ra-226 /Marshall, 1976/.

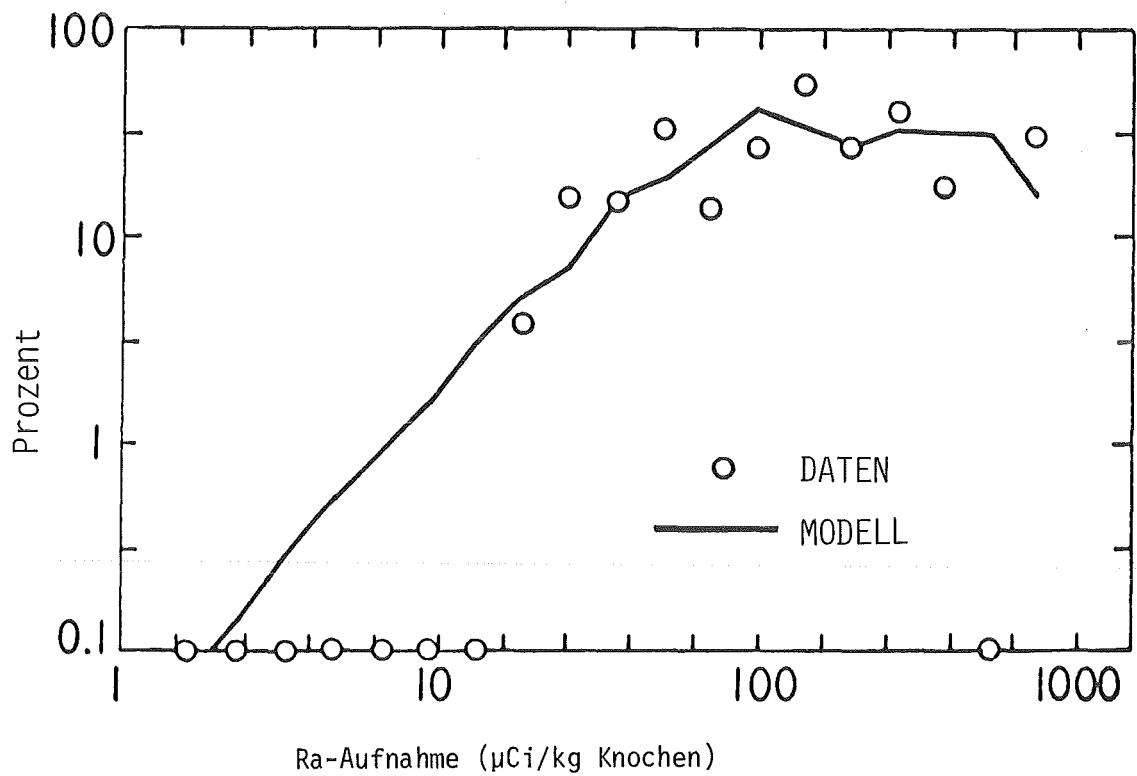


Abb. 5.1: Kumulierte Rate von Osteosarkomen als Funktion der Aufnahmen von Ra-226 und Ra-228

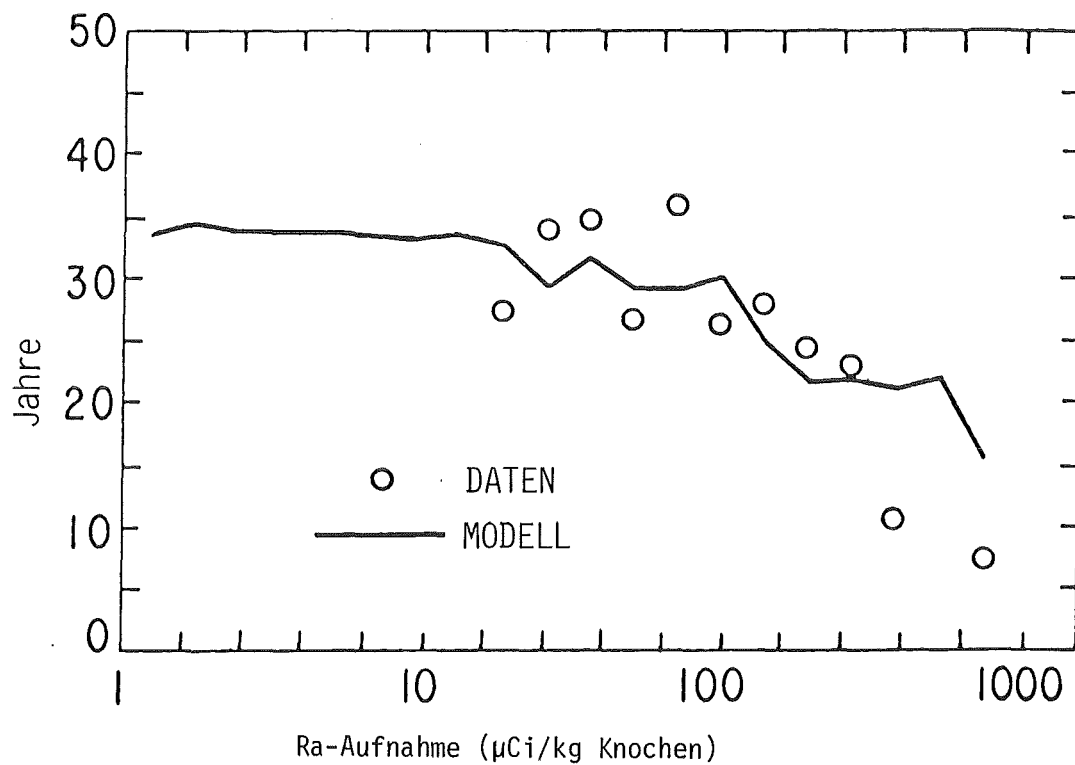


Abb. 5.2: Mittlere Latenzzeiten für die Entstehung von Osteosarkomen im Menschen nach Aufnahme von Ra-226 und Ra-228

Das dargestellte Modell ist geeignet, sowohl die Daten des "Center for Human Radiobiology"* als auch die Daten aus Tierversuchen zu beschreiben. Um die beobachtete quadratische Dosis-Wirkungs-Beziehung (s. Abb. 5.3) zu erklären, erscheint die Annahme von zwei Einzelvorgängen zu Beginn der Krebsentstehung (two initiations) angemessen. Reparaturmechanismen und Effekte der Immunabwehr (immune surveillance) werden dabei außer acht gelassen. Für Ra-226 hängt die Tumorrates P nur von der Dosis D , bei niedrigen Dosen von D^2 ab. Bei hohen Dosen ($>$ einige hundert rd) erreicht P ein Plateau, ist also auch von der Dosis unabhängig. Bei hohen Endostaldosen von Ra-224 ist die Tumorrates von Dosis und Dosisrate abhängig. Das Zeitverhalten ist wie erwartet: Mit zunehmender Dosis sinkt die Latenzzeit, bei niedrigen Dosen ist sie unabhängig von der Dosis, siehe 3.7. Unterhalb einer Skelettdosis von 900 rad durch Ra-226 und Ra-228 wurden beim Menschen keine Osteosarkome beobachtet /Evans, 1974/. Überhaupt zeigten sich in den Gruppen mit Belastungen < 1 rd, $1 - 100$ rd und $100 - 1000$ rd keine signifikanten Unterschiede in den 45 Jahren nach der Exposition /Stehney, 1971/. Erst danach treten bei lang anhaltender niedriger Strahlenbelastung interessante Effekte auf.

Haut	9	(4 Fälle hatten 2 oder mehr Hautschäden; 2 hatten andere Erkrankungen)
Brust	5	
Gebärmutterhals	4	
Blase	3	
Knochenarkome	2	(1 um die Knochenhaut herum)
Prostata	2	(1 Fall hatte zusätzlich ein Blasenkarzinom)
Gebärmutterschleimhaut	2	(außer Gebärmutterhals)
Leber	2	
Lunge, Bronchien	2	(1 Fall hatte zusätzlich Mundkarzinome)
Ohrspeicheldrüse	1	
Bauchspeicheldrüse	1	
Mundschleimhaut	1	
Rachen	1	
Mastdarm	1	
Magen	1	
Multiple Myelome	1	
chronische myeloische Leukämie	1	

Tab. 5.1: Krebserkrankungen

*Zentrum für Radiobiologie des Menschen

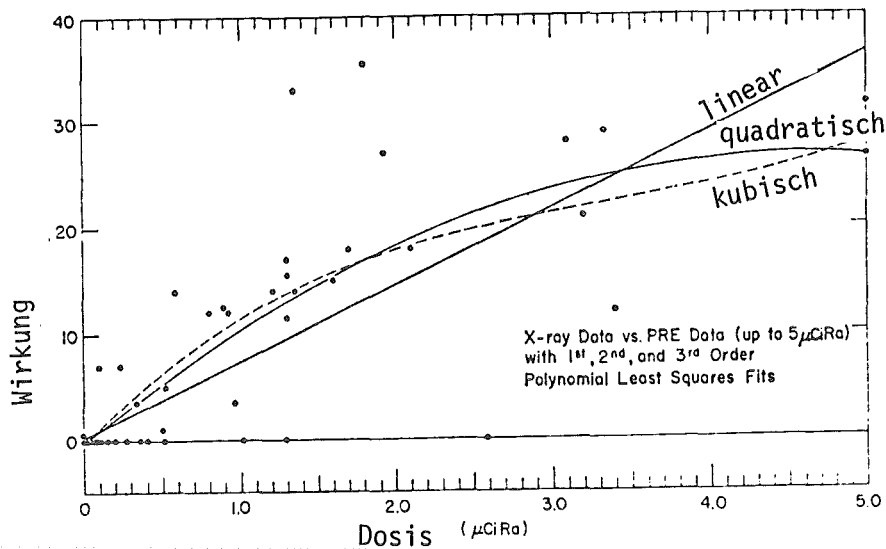


Abb. 5.3: Verschiedene-Dosis-Wirkungs-Beziehungen als Versuch einer Anpassung an Ergebnisse aus Radium-Studien /Evans, 1967/

Es scheint nach Rowland /Rowland, 1973/ keine signifikanten Unterschiede der Dosis-Wirkungs-Beziehung für Ra-226 und Ra-228 zu geben, allerdings scheint die Sarkom-Rate für Ra-228-Fälle höher zu sein. Dies steht im Gegensatz zu den Experimenten mit Beagle-Hunden, ein weiterer Hinweis, daß bei Extrapolationen aus Tierversuchen Vorsicht geboten ist. Nach Rowland war die niedrigste mittlere Skelett-Dosis, die zu einem Knochentumor führte, 888 rd für eine Mischung von Ra-226 und Ra-228. Die kürzeste Zeit zwischen der ersten Exposition und der Diagnose eines Tumors war 7 Jahre.

Neuere Studien über die Wirkung von Ra-224 im Menschen zeigten, daß eine mittlere Skelett-Dosis von nur 90 rd zu Knochentumoren führen kann; die kürzeste Zeit zwischen Expositionsbeginn und Tumor-Diagnose war 4 Jahre /Spiess, 1970a/. Neben Knochensarkomen fanden Spiess und Mays nach Ra-224-Injektion auch strahleninduzierten Minderwuchs bei Kindern, Weichteilkarzinome bei Erwachsenen, häufig Leber- und Nierenschäden, seltener Leukämie, eventuell auch Zahnschäden und Katarakte, deren Ursache nicht feststeht. Die Latenzzeiten lagen zwischen 4 und 18 Jahren, Kinder waren bis zu viermal empfindlicher als Erwachsene /Spiess, 1970b/, s. auch Abschnitt 3.4.

Rechnet man diese niedrigste mittlere Skelett-Dosis um auf eine 10 μ dicke Zellschicht an der Knochenoberfläche, kommt man zur sog. Endostal-Dosis, s. Tab. 5.2 /Rowland, 1975; Marshall, 1978/.

	Ra-224*	Ra-226**	Pu-239***
$\frac{\text{Oberflächendosisrate}}{\text{mittlere Skelettdosisrate}}$	8,9	0,45	12,8

*Ra-224 und 100 % der drei α -strahlenden Tochterprodukte, 26,46 MeV pro Zerfall

**Ra-226 und 30 % der drei α -strahlenden Tochterprodukte, 10,53 MeV pro Zerfall

***Pu-239, 5,149 MeV pro Zerfall

Tab. 5.2: Verhältnis zwischen der mittleren Skelett-Dosis und der Dosis an den Knochenoberflächen für verschiedene Isotope

Mit dem ICRP-Knochengewicht von 5 kg für Männer und 3,4 kg für Frauen /ICRP 23, 1974/ ergibt sich eine Umrechnung für die oben angegebenen "Grenz-Dosen": Aus 880 rd werden 1310 rd, die entsprechende Endostal-Dosis ist 590 rd. Die etwas kompliziertere Umrechnung für Ra-224 ergibt 72 rd Skelett-Dosis und 640 rd Endostal-Dosis /ICRP 20, 1973/. Im Gegensatz zu früheren Annahmen zerfallen nur 11,5 % und nicht 20 % des injizierten Radiums im Skelett /Rowland, 1975/. Aus den Ra-226-Fällen kann man schließen, daß etwa 30 % der Patienten mit Endostal-Dosen von mehr als 600 rd eine Knochenmißbildung entwickeln. Dabei sind Latenzzeiten bis zu 50 Jahren bekannt. Abbildung 5.4 aus /Failla, 1972/ zeigt die Häufigkeit der festgestellten Krankheitsbilder für die 225 verstorbenen Ra-Patienten. Von diesen Patienten waren 68 % weiblich. Wie erwartet, litten mehr als 25 % der Patienten an radiogenen Sarkomen und/oder Karzinomen, zusätzlich zeigten 10 % andere radiogene Knochenschäden. Abbildung 5.5 zeigt die Krankheiten, die bei den noch lebenden Patienten vorkamen. Diese beiden Abbildungen geben eine Ergänzung zu Tab. 5.1.

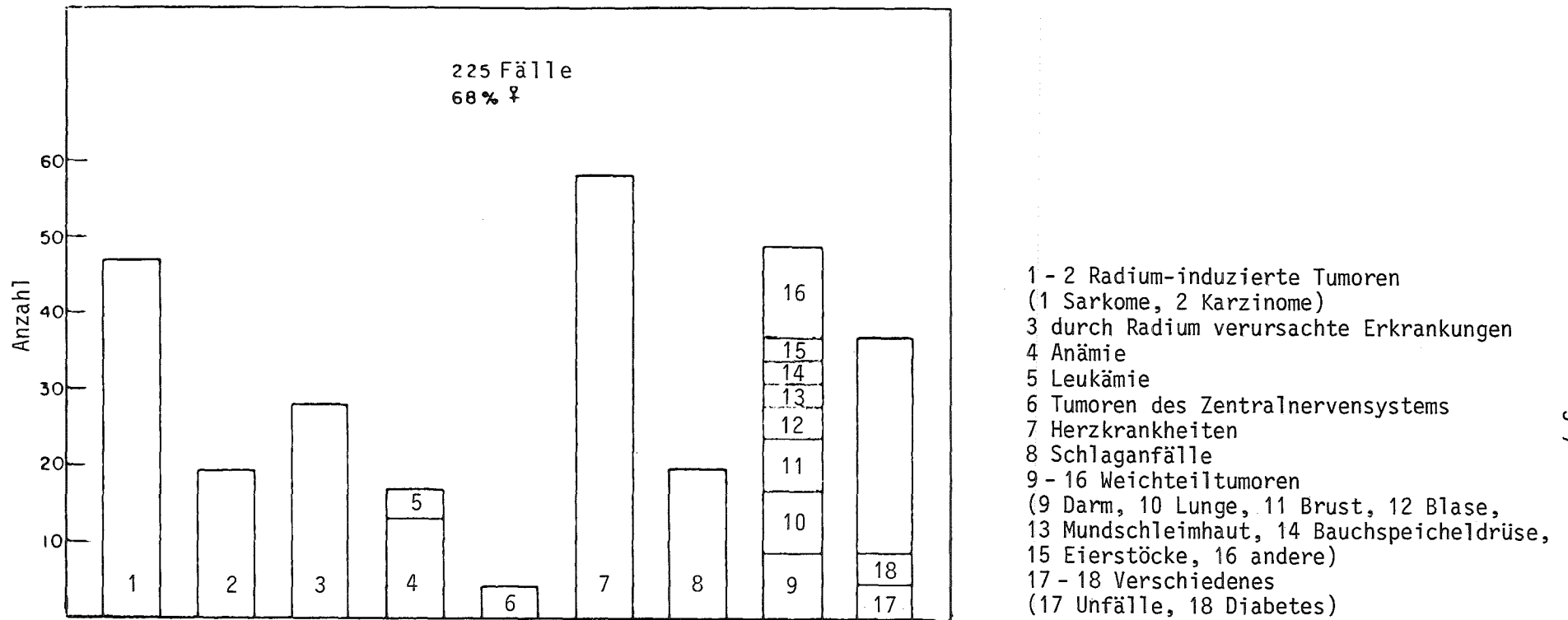


Abb. 5.4: Anteil der häufigsten Erkrankungen bei 225 verstorbenen Patienten

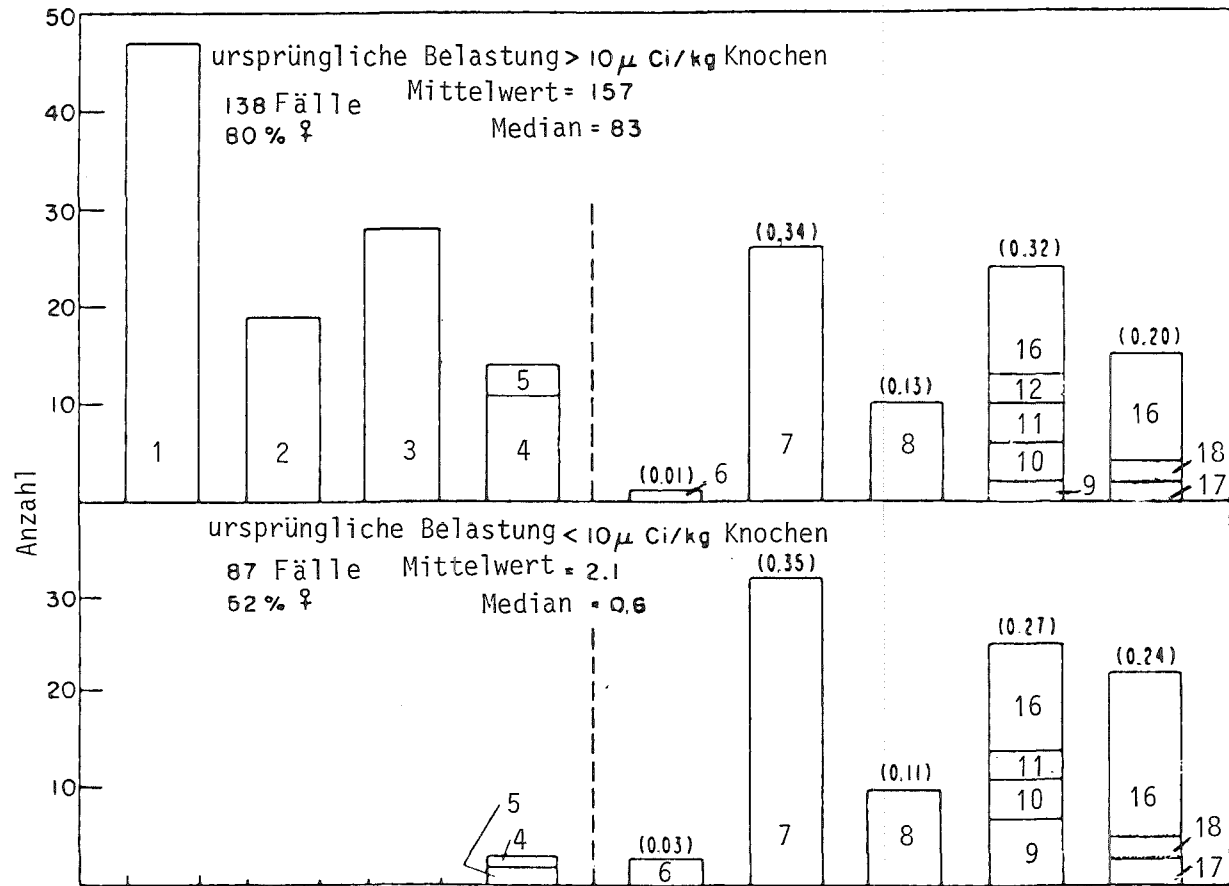


Abb. 5.5: Anteil der häufigsten Erkrankungen bei noch lebenden Patienten. Der Anteil auf der rechten Seite wird als unabhängig von der Radium-Belastung betrachtet; in Klammern werden die entsprechenden Bruchteile angegeben.

Zur Erklärung der Ziffern s. Abbildung 5.4

Die Abbn. 5.6 und 5.7 schlüsseln die untersuchten Gruppen nach dem Todesalter auf. Mit dieser Problematik befaßte sich auch die Arbeit von Stehney et al. /Stehney, 1972/. An den Radium-Patienten wurde getestet, ob entsprechend den Ergebnissen aus Tierversuchen - pro 100 R Ganzkörperdosis wird die Lebenszeit um 1 % verkürzt - bei Menschen pro 100 rd die Lebenserwartung um 0,7 Jahre sinkt. Diese Lebenszeitverkürzung tritt aber eben nicht durch Krebserkrankungen auf, sie ist deswegen ausführlicher in Abschnitt 3.2 behandelt.

In einer Arbeit von 1976 geben Spiers und Whitwell eine Formel für das Knochenkrebsrisiko nach Inkorporation von Ra-226 an /Spiers, 1976/. Wenn nach einer Beobachtungszeit von T_0 Jahren R Krebsfälle in einer Bevölkerungsgruppe von N Mitgliedern beobachtet werden, gilt:

$$R = 1,41 N r A t_0^{0,48}$$

$$= 0,676 N r \bar{D}$$

Dabei ist r das Risiko, ausgedrückt in Anzahl der Fälle pro Tausend, nachdem das relevante Gewebe einer Dosis von 1 rd ausgesetzt war, die Dosisrate zur Zeit t $A t^{-0,52}$ rd/a und \bar{D} die mittlere Dosis.

Die nach dieser Formel von den Autoren abgeleiteten Risiken sind in den Tabellen 5.3, 5.4 und 5.5 zusammengestellt /ICRP 3, 1959; Marshall, 1975; UNSCEAR, 1972/. Diese Autoren sind der Meinung, daß es keiner Revision der Grenzwerte (MPBB = maximum permissible body burden) für Radium bedarf.

Gewebe	Wirkung	Risiko-Koeffizient Zahl der Fälle ($10^3/y$ pro 1 rd/y)
Knochenmark	Leukämie	$r_M = 0,101$
Oberflächen der) Knochenbälkchen)	Osteosarkome	$r_{OS} = 0,079$
Oberflächen der) Knochenrinde)	Osteosarkome	$r'_{OS} = 0,016$
Oberfläche der) Nebenhöhlen)	Karzinome	$r_{AS} = 0,003$

Tab. 5.3: Risiko aus der α -Strahlung für verschiedene Knochengewebe, abgeleitet aus den Daten der Radium-Patienten

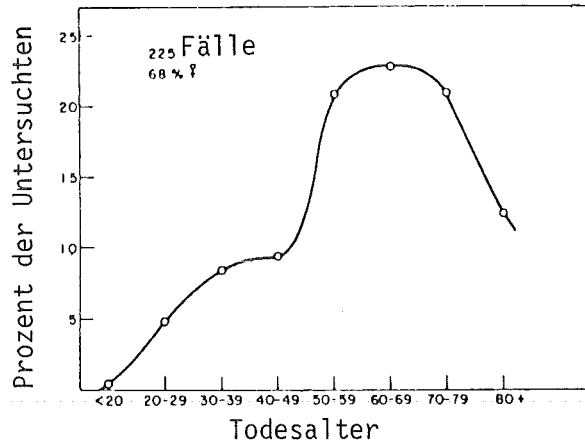


Abb. 5.6: Häufigkeit von Todesfällen für verschiedene Altersgruppen bei den Untersuchten

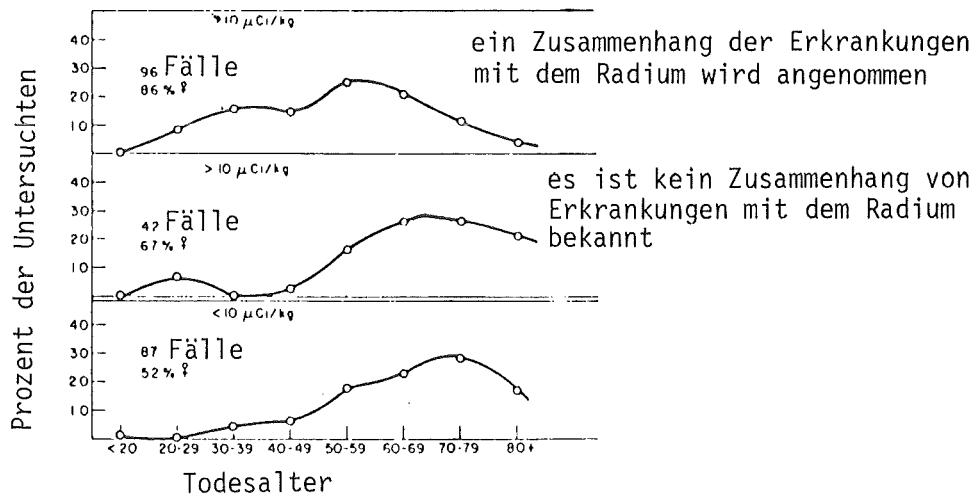


Abb. 5.7: Häufigkeit von Todesfällen in drei Untergruppen der Untersuchten die sich durch die Höhe der anfänglichen Strahlenbelastungen und die Art der Erkrankungen unterscheiden

Radionuklide	rd/y für 1 μ Ci Ganzkörperbelastung*			
	Trabekuläres Knochenmark	Oberflächen des Endost		Oberfläche der Nebenhöhlen
		Trabekulär	Spongiös	
Ra-226 α	1,6	19	35	275**
β	0,4	0,6	1,2	6,8
Pu-239 α	10,8	62	92	92

*nach /ICRP 3, 1959/zum Vergleich mit Tab. 5.6

**ungefähre Abschätzung

Tab. 5.4: Dosisraten für verschiedene Knochengewebe

Radionuklide	Risiko=Zahl der Fälle/1000/y						MPBB (ICRP) (μ Ci)
	Leukämie	Knochensarkome		Karzinome	Summe	q^* (μ Ci)	
		Trabekulär	Spongiös				
Ra-226	0,18	1,51	0,56	0,83	3,08	0,16	0,10
Pu-239	1,09	4,90	1,47	0,28	7,74	0,065 (0,03)	0,04
Verhältnis Pu-239/Ra-226	6	3,2	2,6	0,3	2,5		

*Gesamtkörperbelastung entsprechend der Summe unter der Annahme, daß das Risiko bei 5 rd/y \approx 0,5 Fälle/1000/y ist /UNSCEAR, 1972/.

Tab. 5.5: Gesamtrisiko für das Knochengewebe für 1 μ Ci Ganzkörperbelastung aufgrund der Daten der Radium-Patienten

Mays hat 1973 in einem Übersichtsartikel dargestellt, welche Krebskrankheiten nach der Inkorporation radioaktiver Isotope entstehen und was man über die Wirkungen dieser Isotope weiß, s. Tab. 5.6.

Radionuklid	Exponierte	Auftreten der Krankheit
Rn-222	Uranminenarbeiter	Lungenkarzinome
Ra-226	Zifferblattmaler	Knochen- und Jochbeinsarkome
Th-232	Thorotrastfälle	Leberkrebserkrankungen
Ra-224	"Deutsche Patienten"	Knochensarkome
P-32	Patienten mit Polycythaemie	Leukämie
I-131	Bewohner der Marshall-Inseln	Schilddrüsentumoren

Tab. 5.6: Krebserzeugung durch verschiedene Radionuklide

Für Ra-226 und Ra-224 ist ebenso wie für die anderen Isotope zusammengefaßt, woher die Kenntnisse jeweils stammen. Da die betreffenden Arbeiten hier im einzelnen ausgewertet wurden, soll vor allem darauf hingewiesen sein, daß Mays mit seiner Zusammenfassung eine gute Übersicht gegeben hat. Er betont unter anderem, daß es neben der großen Zahl von Osteosarkomen bei den Zifferblattmalerinnen auch einige Fälle von Gehirntumoren und von Leukämie gegeben hat /Mays, 1973; Finkel, 1969/. Nach Thorostrast-Anwendungen kam es neben Osteosarkomen zu Fällen von Leberkrebs, Leukämie und Lungenkrebs, die allerdings möglicherweise auch durch die chemischen Eigenschaften der Thorostrastlösungen ausgelöst sein könnten, s. Abschnitt 3.4. Die Jahres-Dosen der untersuchten Fälle für die Belastung der Leber durch α -Strahlen liegen zwischen 31 und 41 rd pro Jahr /Kaul, 1973/.

Der Mittelwert der Leber-Dosis in 10 Fällen von Leberkrebs war 509 rd, für 10 Fälle von Hämangioendotheliomen war die mittlere Dosis 609 rd. Für Patienten mit weniger als 0,4 μg Radium konnte kein Krebs nachgewiesen werden. Bei Dosen zwischen 0,5 und 10 μg Radium ergaben sich in 14 % der Fälle Knochentumore /Schubert, 1958/. Interessant ist im Bericht von Mays, wie er und Evans 1964 zufällig die Bedeutung einer Untersuchung an deutschen Ra-224-Patienten erkannten. Diese Daten erlauben es, die Wirkungen auf Männer, Frauen und Kinder zu vergleichen. Kinder scheinen etwas strahlenempfindlicher zu sein, Männer und Frauen gleich empfindlich. Bei den Thorostrastpatienten wurde kein Einfluß schon vorhandener Knochenerkrankungen auf das Entstehen von Osteosarkomen durch die Wirkung des Radiums festgestellt. Besonders interessant ist die Zunahme der Knochensarkome bei Protraktion der Dosis, die auch im Tierexperiment bestätigt werden konnte /Luz, 1972/.

Zur Erklärung werden folgende Effekte herangezogen:

1. eine erhöhte Anzahl bestrahlter Zellen,
2. weniger "killing" von "pre-malignen" Zellen,
3. verlängerte Stimulation zu vermehrtem Zellwachstum,
4. geringe Reparaturrate für Schäden durch α -Teilchen.

Diese Ergebnisse stehen im deutlichen Kontrast zu denen aus Untersuchungen mit Röntgenstrahlen, β - oder γ -Strahlung. Unterhalb einer mittleren Skelettdosis von 90 rd aus Ra-224 (vgl. für Ra-226 die oben zitierten Überlegungen) wurden keine Knochensarkome beobachtet, was aber wegen zu geringer Statistik kein Beweis für die Existenz einer Schwellendosis ist. Auf die große wissenschaftliche Bedeutung der Fälle, in denen Patienten wegen Bechterew- und anderer Knochenerkrankungen mit Ra-224 behandelt wurden, ist hinzuweisen; deren Dosisbelastung ist sehr niedrig und damit nahe dem für den Strahlenschutz besonders wichtigen Bereich kleiner Dosen.

Ungeklärt ist, warum Ra-224 wie Pu-239 vorwiegend auf der Knochenoberfläche, Ra-226 und Ra-228 dagegen im Knochenvolumen wirken. Für Ra-226 ergibt sich folgende Beziehung

$$P(t) + g) \approx \frac{\sigma^2 \lambda_s}{k^2} (1 - e^{-kD} - kD e^{-kD})$$

mit P = Wahrscheinlichkeit

t = Zeit (Jahre)

g = Zeit für das Tumorwachstum (Bevor ein Tumor entdeckt werden kann, muß er etwa 1 bis 100 cm² groß sein, also zwischen 10⁹ und 10¹¹ Zellen enthalten. Dazu muß sich die Ursprungszelle 30-37mal teilen. Entsprechende Zeiten bei Radiumpatienten betragen 3-5 Jahre)

$\bar{\sigma}$ = Initiation, Wahrscheinlichkeit pro Zelle (10⁻⁸/rd)
(Die Autoren definieren als Initiation die erste Einwirkung eines Alphateilchens auf die Zelle, die die Teilungsfähigkeit zerstört. Als Maß dient ein effektiver Querschnitt)

λ_s = Promotionsrate (10⁻²/Jahr)
("local rate of bone remodeling";
wie in der Theorie der chemischen Karzinogenese definieren die Autoren als "Promotion" die Anregung eines bösartigen Zellwachstums nach einer Latenzzeit)

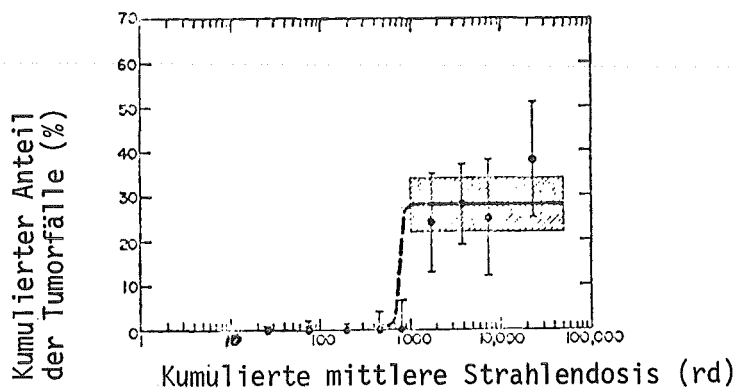
k = Wahrscheinlichkeit der Zelltötung ("killing")

D = Dosis

Die Gleichung ergibt sehr gute Übereinstimmung mit gemessenen Werten, wenn man für $\lambda \approx 1\%$ annimmt.

Bemerkenswert ist:

- 1) in dieser Gleichung kommt die Dosisrate nicht vor,
- 2) bei niedrigen Dosen ergibt sich eine Abhängigkeit von D^2 (Reihenentwicklung mit $kD \ll 1$),
- 3) man findet bei Werten von $D >$ einige hundert rd ein Plateau für P , d. h. die Tumorzinzidenz ist von Dosis und Dosisrate unabhängig.



Das schraffierte Gebiet zeigt die mittlere Rate von $28 \pm 6\%$ zwischen 1000 und 50 000 rd

Abb. 5.8: Tumorrates als Funktion der Strahlendosis

Evans et al. haben in einer Übersichtsstudie /Evans, 1969/ festgestellt, daß es eine "praktische Schwelle" für das Entstehen von Knochensarkomen bei weniger als 1000 rd gibt. Daraus würde folgen, daß eine Aktivität von 0,1 μCi Ra-226 im Körper zulässig wäre.

In seinem Artikel von 1974 /Evans, 1974/ hat Evans noch einmal betont, daß "das richtige Objekt für Studien über den Menschen der Mensch sei". Er leitet ab, wie man die seines Erachtens sinnvollste Angabe der Radiumdosis in kumulierten rd aus der Aktivität des Radiums bestimmt:

$$1 \mu\text{Ci Rest-Ra-226} \cong 3220 \text{ kumulierten rd.}$$

Daraus ergibt sich für ein weibliches Skelett von 5 kg eine mittlere Dosis von 56 rd/a. Evans, den man als außerordentlich erfahren in Studien über Radium betrachten muß - er hatte schon 1932 damit begonnen - äußert sich sehr kritisch über einschlägige Arbeiten von Gofman und Tamplin, aber auch über die großen UNSCEAR- und BEIR-Berichte. Die Ergebnisse seines Übersichtsartikels in Bezug auf die Krebserzeugung sind in Abbildung 5.8 zusammengefaßt. Es scheint zwei Bereiche der Strahleneinwirkung zu geben: Einen Bereich niedriger Dosen, in denen die radiobiologischen Folgen vernachlässigbar sind oder durch Reparaturmechanismen ausgewogen werden, und einen Bereich hoher Dosen (> 1000 mittlere kumulierte rd).

In einer russischen Arbeit von 1964 wird ausgeführt, daß die Strahlenonkologie, die eine Vielzahl von unverbundenen, oft sogar widersprüchlichen Daten und klinischen Beobachtungen angesammelt hat, sich nun im Übergang von einer eher beschreibenden Phase zu einer Phase der Analyse und Auswertung befindet /Strel'tsova, 1964/. Die zitierte Arbeit bringt dann für die verschiedenen Krebsarten eine gründliche Zusammenstellung verfügbarer Kenntnisse und Literaturangaben. Auch diese Arbeit kann als Übersicht insbesondere über frühere Arbeiten zu Strahlenschäden aus inkorporiertem Radium an Mensch und Versuchstier nur empfohlen werden. Ein besonders wichtiges unter den zahlreichen beschriebenen Details der Krebsentwicklung in dieser Arbeit ist die Aussage, daß bei geringer Radiumdosis die Ausbreitung von Metastasen zunimmt, insbesondere im Bereich von 0,5 bis 0,005 $\mu\text{Ci/g}$. Dieser Effekt ist allerdings auch mit der gegenüber höherbelasteten Versuchstieren verlängerten Lebensdauer verknüpft, eine entsprechende Untersuchung am Menschen steht noch aus.

In einer englischen Arbeit aus dem Jahre 1970 /Loutit, 1970/ wird anhand einer Auswertung amerikanischer Daten und einzelner englischer Fälle hervorgehoben, daß neben Knochensarkomen und Erkrankungen des Epithels der Nasennebenhöhlen bösartige Transformationen im lymphomyeloiden Komplex als limitierend bei Radiumretentionen angesehen werden müssen. In allen vom Autor angeführten Fällen traten Leukämieähnliche Erkrankungen auf.

6. Publikationen der ICRP und Grenzwerte für Radium

Da sich an der Grenzwertsetzung für Radium diejenige für viele andere Radionuklide orientiert hat, ist es von besonderem Interesse, sie zu untersuchen.

6.1 Frühe Grenzwerte

Rajewsky hat schon 1936 Grenzwerte für Dosisbelastungen bei Radium-Vergiftungen angegeben. Dabei wird als Minimaldosis für Osteosarkome 1200 rem bezeichnet /Rajewsky, 1936/. Eine Aktivität, die kleiner als 0,1 μCi ist, gilt als gerade noch zulässig, eine Aktivität, die größer als 0,75 μCi ist, gilt als toxisch.

Evans gab 1966 als Grenzwerte 0,5 μCi PRE (s.u.) an /Evans, 1966/. 1941 wurden 0,1 μg als "maximum permissible skeletal burden" festgelegt, diese Festlegung beruhte auf 30 Fällen von Krebserkrankungen nach Radium-Inkorporation. Von daher rühren auch die anderen Werte in der ICRP-Publikation Nr. 2 /ICRP 2/:

Thorium-228 (löslich)

Knochen	$2 \cdot 10^{-8}$ Ci
Niere	$9 \cdot 10^{-8}$ Ci
Gesamtkörper	$9 \cdot 10^{-8}$ Ci
Leber	$50 \cdot 10^{-8}$ Ci

für

Radium-228

Knochen	$6 \cdot 10^{-8}$ Ci
---------	----------------------

für

Radium-224

Ganzkörper	$6 \cdot 10^{-8}$ Ci
Knochen	$7 \cdot 10^{-8}$ Ci

1967 waren ca. 700 Fälle (420 am MIT und 275 am ANL) bekannt, es fanden sich bis dahin keine klinisch signifikanten Krankheitssymptome bei inkorporierten Mengen von weniger als 0,5 μg Ra. Es ist nach /Evans, 1967/ üblich, auch MsTh-Dosen in Ra-Äquivalente umzurechnen und also auch für eine Mischung von Ra-226

und Ra-228 (wie z. B. in 100 der 420 Fälle, die am MIT untersucht wurden), durch ihr "Rein-Radium-Äquivalent" (pure radium equivalent, PRE) zu kennzeichnen.

Da die "Fälle" die am MIT und ANL untersucht wurden, ursprünglich, nämlich vor 30 - 50 Jahren, viel höhere Dosisbelastungen hatten, hält Evans 0,1 µg PRE für ausreichend sicher und konservativ.

Von Evans wird auch die Angabe der PRE-Werte für gleichwertig mit der Angabe einer Dosis in akkumulierten rd oder einer Angabe der akkumulierten rd-Jahre gehalten. Die PRE-Werte haben den Vorzug, daß diese Größe tatsächlich gemessen wird.

6.2 ICRP-Grenzwerte

Die internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection: ICRP) hat sich in einigen ihrer Publikationen mit dem Radium befaßt. Die Publikationen 10, 10a, 11, 20, 24 und 30 sollen hier besonders referiert werden.

In der Publikation 10 geht es um die Ermittlung der Körperdosis beruflich Strahlenexponierter nach Inkorporation radioaktiver Stoffe /ICRP 10/. Zur Berechnung des zeitlichen Ablaufs der Strahlenbelastung eines oder mehrerer kritischer Organe benutzte das Komitee die ICRP-Publikation 2, die Informationen zu Metabolismus und Eigenschaften eines sogenannten "Standardmenschens" enthält /ICRP 2/. Im Gegensatz zu den ICRP-Publikationen 2 und 6 /ICRP 6/, die sich mit der täglichen Aufnahme geringer Mengen strahlender Substanz befassen, beschreibt ICRP 10 die einmalige Aufnahme; das Modell kann auch bei mehrfacher Einzelexposition verwendet werden. Einige relevante Parameter für den Metabolismus wichtiger Radionuklide - unter ihnen auch Ra-226 - sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. In der hier verwendeten Klassifikation der Radioisotope wird zusätzlich zu der sonst üblichen Unterscheidung zwischen löslichen und unlöslichen chemischen Verbindungen der Begriff "transportable" eingeführt, um den Transfer im Körper zu kennzeichnen. Damit wird den Eigenarten der Wechselwirkung mit den Körperzellen und Flüssigkeiten und den biologischen Prozessen, auf die es ankommt, Rechnung getragen. Dieser Ausdruck korrespondiert zum Begriff "clearable" im ICRP-Lungen-Modell.

Tabelle	1	5	12	12	12	12	12	12	12	12	1	1	1
Radionuklid	Organ	ϵ	T_R	T_b	T_{eff}	f_1	f_2	f_2'	f_w	f_a	q	MZKW	MZKL
H 3 (Oxid)	Körpergewebe	0,010	$4,5 \cdot 10^3$	12	12	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	$1 \cdot 10^3$	0,1	$5 \cdot 10^{-6}$
* C 14 (CO ₂)	Fett	0,27	$2,0 \cdot 10^6$	40 (10)	40	1,0	0,1	0,025	0,025	0,02	400	0,04	$6 \cdot 10^{-6}$
Na 22	Gesamtkörper	1,6	950	11	11	1,0	1,0	1,0	1,0	0,75	10	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$
P 32	Knochen	3,5	14,3	1155 (257)	14,1	0,75	0,5	0,5	0,375	0,32	6	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-8}$
* S 35	Hoden	0,056	87,1	90	44,3	1,0	1,0	1,0	1,0	0,75	400	$7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Cl 36	Gesamtkörper	0,26	$1,2 \cdot 10^8$	29	29	1,0	1,0	1,0	1,0	0,75	80	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Ca 45	Knochen	0,43	164	$1,8 \cdot 10^4$ ($1,64 \cdot 10^4$)	162	0,6	0,9	0,9	0,54	0,5	30	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-8}$
Fe 59	Milz	0,34	45,1	600 (800)	41,9	0,1	0,02	0,02	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	20	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Co 60	Gesamtkörper	1,5	$1,9 \cdot 10^3$	9,5	9,5	0,3	1,0	1,0	0,3	0,4	10	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Zn 65	Gesamtkörper	0,32	245	933	194	0,1	1,0	1,0	0,1	0,3	60	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Rb 86	Gesamtkörper	0,70	18,6	45	13,2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,75	30	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Sr 85	Gesamtkörper	0,33	65	$1,3 \cdot 10^4$	64,7	0,3	1,0	1,0	0,3	0,4	60	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Sr 89	Knochen	2,8	50,5	$1,8 \cdot 10^4$ ($1,3 \cdot 10^4$)	50,4	0,3	0,99	0,7	0,21	0,28	4	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-8}$
Sr 90	Knochen	5,5	$1,0 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$ ($1,3 \cdot 10^4$)	$6,4 \cdot 10^3$	0,3	0,99	0,3	0,09	0,12	2	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-9}$
* Te 132	Nieren	0,96	3,2	30 (15)	2,9	0,25	0,07	0,07	0,02	0,03	3	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-7}$
J 131	Schilddrüse	0,23	8	138	7,6	1,0	0,2	0,3	0,3	0,23	0,7	$6 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-9}$
J 132	Schilddrüse	0,65	0,097	138	0,097	1,0	0,2	0,3	0,3	0,23	0,3	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Cs 137	Gesamtkörper	0,59	$1,1 \cdot 10^4$	70	70	1,0	1,0	1,0	1,0	0,75	30	$4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-8}$
Ba 140	Knochen	4,2	12,8	65	10,7	0,05	0,7	0,7	0,035	0,19	4	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Ce 144	Knochen	6,3	290	1500 (563)	243	$< 10^{-4}$	0,38	0,3	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,075	5	0,2	$1 \cdot 10^{-8}$
* Au 198	Nieren	0,41	2,7	280 (120)	2,7	0,1	0,03	0,03	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	20	0,07	$3 \cdot 10^{-6}$
* Po 210	Milz	55	138,4	60 (30)	42	0,06	0,07	0,04	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,03	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Ra 226	Knochen	110	$5,9 \cdot 10^5$	$1,64 \cdot 10^4$ (900)	$1,6 \cdot 10^4$	0,3	0,99	0,1	0,03	0,04	0,1	$4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-11}$
Th nat	Knochen	270	?	$7,3 \cdot 10^4$ ($5,7 \cdot 10^4$)	$7,3 \cdot 10^4$	$< 10^{-4}$	0,9	0,7	$7,0 \cdot 10^{-5}$	0,18	0,01	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-12}$
U nat & U 238	Nieren	43	?	15 (100)	15	$< 10^{-2}$	0,065	0,11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,028	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-11}$
U 233	Knochen	250	$5,9 \cdot 10^7$	300 (100)	300	$< 10^{-2}$	0,85	0,11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,028	0,05	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-10}$
U 234	Knochen	240	$9,1 \cdot 10^{11}$	300 (100)	300	$< 10^{-2}$	0,85	0,11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,028	0,05	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-10}$
U 235	Nieren	46	$2,6 \cdot 10^{11}$	15 (100)	15	$< 10^{-2}$	0,065	0,11	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,028	0,03	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Np 239	Knochen	0,98	2,33	$7,3 \cdot 10^4$ ($3,9 \cdot 10^4$)	2,33	$< 10^{-4}$	0,45	0,45	$4,5 \cdot 10^{-5}$	0,11	30	100	$4 \cdot 10^{-6}$
Pu 239	Knochen	270	$8,9 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^4$ ($6,5 \cdot 10^4$)	$7,2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,9	0,8	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,2	0,04	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-12}$
Pu 241	Knochen	14	$4,8 \cdot 10^3$	$7,3 \cdot 10^4$ ($6,5 \cdot 10^4$)	$4,5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,81	0,8	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,2	0,9	$7 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-11}$

Tab. 6.1: Zusammenstellung von Stoffwechselfdaten aus den ICRP-Veröffentlichungen 2 und 6

In Tabelle 6.1 (S. 6-3) haben die Überschriften in den einzelnen Spalten folgende Bedeutungen:

Organ:	Das Organ, das zum kleinsten in Tabelle 6.1 angegebenen q-Wert führt
ϵ	$\Sigma EF(RBE)n_i$ (E in MeV) für das betreffende Organ
T_r	radioaktive Halbwertszeit (in Tagen)
T_b	biologische Halbwertszeit (in Tagen) für das kritische Organ sowie in Klammern für den Ganzkörper, wenn die Werte von denen des kritischen Organs abweichen
T_{eff}	effektive Halbwertszeit (in Tagen)
f_1	Bruchteil, der vom Magen-Darm-Trakt ins Blut gelangt
f_2	Bruchteil des im Ganzkörper vorhandenen Radionuklids, der sich im Bezugsorgan befindet
f_2'	Bruchteil, der vom Blut ins Bezugsorgan gelangt
f_w	Bruchteil, der durch Ingestion ins kritische Organ gelangt*
f_a	Bruchteil, der durch Inhalation ins kritische Organ gelangt*
q	höchstzulassene Gesamtkörperaktivität (in μCi)
MZK_w	höchstzulassene Konzentration im Trinkwasser für beruflich strahlenexponierte Personen während einer 40-Stunden-Arbeitswoche (in $\mu\text{Ci/ml}$)
MZK_L	höchstzulassene Konzentration in eingeatmeter Luft für beruflich strahlenexponierte Personen während einer 40-Stunden-Arbeitswoche (in $\mu\text{Ci/cm}^3$)

* Die in Tabelle 6.1 angegebenen kritischen Organe für C 14, S 35, Te 132, Au 198 und Po 210 sind nicht identisch mit den in Anhang C genannten kritischen Organen. Die Gründe hierfür sind in jedem einzelnen Fall im entsprechenden Absatz im Anhang C erläutert.

Die Aufnahme von Radionukliden durch Inhalation, Ingestion und Absorption durch die Haut werden einzeln untersucht, sodann die Ausscheidung. Für Radium wird darauf hingewiesen, daß die Exhalation von Radon und Thoron, das aus abgelagertem Radium entsteht, einen wesentlichen Anteil der Elimination von Radium darstellt.

Im Zusammenhang mit Untersuchungsmethoden für die Betroffenen wird die Kontrolle der Luftbelastung für Uranarbeiter explizit erwähnt. Weiterhin wird eine Methode zur Berechnung der Dosis in rem aus der aufgenommenen Aktivität angegeben und gezeigt, wie man das Zeitintegral der Belastung eines "kritischen Organs" oder Gewebes ermittelt, s. Tab. 6.1 und die Formeln dazu.

Es werden Richtlinien für den Strahlenschutz ("investigation levels") festgelegt; das Kriterium ist die Einhaltung der Grenzwerte aus ICRP 9 bzw. festgelegter Bruchteile hiervon /ICRP 9/. Dabei kommt es auf die Halbwertszeit der Nuklide und die "Transportabilität" der Verbindungen sowie auf die Art der Inkorporation (einmalige oder wiederholte Aufnahme) an. Für Ra-226 und andere "Knochensucher" mit einer effektiven Halbwertszeit von mehr als 10 Jahren und einer sehr geringen täglichen Ausscheidung, die noch dazu individuell stark variieren kann, scheint es nicht angezeigt, solche abgeleiteten Untersuchungsgrenzen anzugeben. So wird nur angeraten, bei einem Anstieg der Radiumausscheidung im Urin den betroffenen Arbeiter und seine Arbeitsumstände genau zu untersuchen. Einzelheiten des Metabolismus von Ra-226 (und Ra-224) werden im Anhang C dieser ICRP-Publikation 10 angegeben.

Die ICRP-Publikation 10a befaßt sich mit den Folgen wiederholter oder andauernder Aufnahme von Radionukliden /ICRP 10a/. Die Abbildungen 6.1 - 6.4 zeigen verschiedene mögliche Formen der Aktivitätsaufnahme und den daraus resultierenden Gehalt des Körpers an dem aufgenommenen Radionuklid.

Tabelle 6.2 zeigt z. B. den Gehalt an Ra-226 (und anderen Nukliden) nach der Aufnahme von 1 μCi über verschiedene Anzahlen von Tagen. Abbildung 6.5 zeigt Retention und Exkretion auch in graphischer Form für verschiedene Modelle. Einzelheiten der Berechnung werden in den Anhängen dieser Publikation angeführt.

Die ICRP-Publikation 11 befaßt sich mit der gerade für die knochensuchenden Radionuklide äußerst wichtigen Strahlensensibilität der verschiedenen Knochengewebe /ICRP 11/.

Tab. 6.3 gibt eine Übersicht über Langzeiteffekte von Radiumablagerungen in menschlichen Knochen, aufgeschlüsselt nach der Belastung in Gruppen von 0,001 bis 5,5 μCi . Es ergibt sich, daß unterhalb von 0,1 μCi keine radiographisch bedeutsamen Veränderungen gefunden werden. Oberhalb von 0,32 μCi findet sich dann allerdings ein steiler Anstieg der Dosiswirkungskurve.

Das Risiko der Karzinogenese ist mit dem Proliferationspotential der bestrahlten Zellen korreliert. Gefährdete Knochenzellen finden sich

- a) unter den knochenbildenden Zellen der Knochenoberfläche
- b) im blutbildenden Knochenmark
- c) in bestimmten Epithel-Zellen in der Nähe der Knochenoberfläche.

Verteilung über T (Tage)	Radionuklid Ra-226
2	0,78
5	0,49
12	0,31
30	0,19
90	0,11
180	0,08
360	0,05
1000	0,03
18000	0,007

Tab. 6.2: Verbleibender Aktivitätsgehalt an Ra-226 im Körper nach einer Aufnahme von 1 μCi verteilt über T Tage

Abb. 6.6a zeigt zur Übersicht über die verwendeten Begriffe ein Beispiel eines menschlichen Röhrenknochens, Abb. 6.6b ein Schema des Knochenbaus, Abb. 6.7a einen (nicht maßstabgerechten) Querschnitt der Knochenwand und Abb. 6.7b einen Longitudinalschnitt durch den trabekulären Knochen.

Teil 2 des vorliegenden ICRP-Berichts befaßt sich mit der spezifischen Verteilung knochensuchender Radionuklide und der Diskussion, ob die sogenannten "hot spots" oder das diffus im Knochen verteilte Radium die größere Wirkung zeigen. Eine Entscheidung war damals nicht möglich; heute werden die diffus verteilten Radionuklide als wirksamer betrachtet.

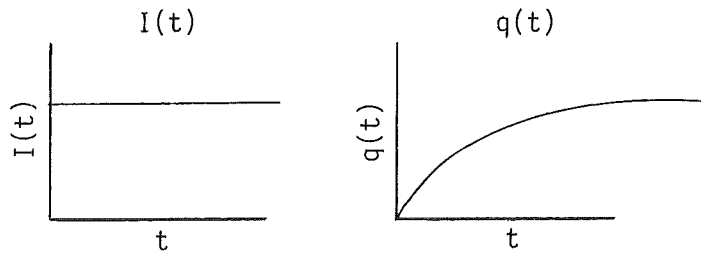


Abb. 6.1: Chronische Aufnahme (Modell in ICRP 2)

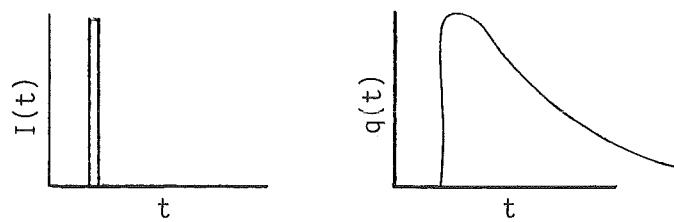


Abb. 6.2: Einmalige Aufnahme (Modell in ICRP 10)

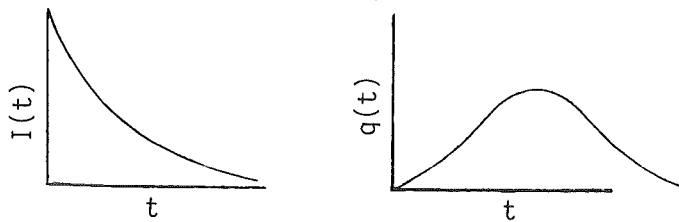


Abb. 6.3: Abnehmende Aufnahme nach einer anfänglichen Kontamination der Lungen oder einer Wunde

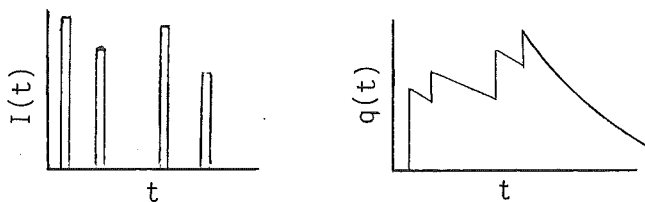


Abb. 6.4: Wiederholte Aufnahme in einem begrenzten Zeitraum

* In allen diesen Abbildungen ist t die Zeit, für die der Gehalt berechnet wird, $I(t)$ ist die Aktivitätsaufnahme und $q(t)$ ist der resultierende Gehalt zum Zeitpunkt t .

Aktivität (μCi)	Anzahl der Messungen	Radiographische Veränderungen in Skelett, die auf der Radium-Ablagerung beruhen					
		keine	minimal	gering	mäßig	fortgeschritten	bösartig
0,001	30	16	2	0	0	0	
0,001 -0,0031	9	6	1	0	0	0	
0,0032-0,0099	33	23	1	0	0	0	
0,01 -0,031	70	54	5	0	0	0	
0,032 -0,099	35	25	4	0	1	0	
0,10 -0,316	32	22	5	1	2	2	1
0,32 -0,99	33	4	8	8	5	7	5
1,0 -3,16	34	2	2	5	4	21	11
3,2 -5,5	11	0	0	0	1	10	6
Summe	287						

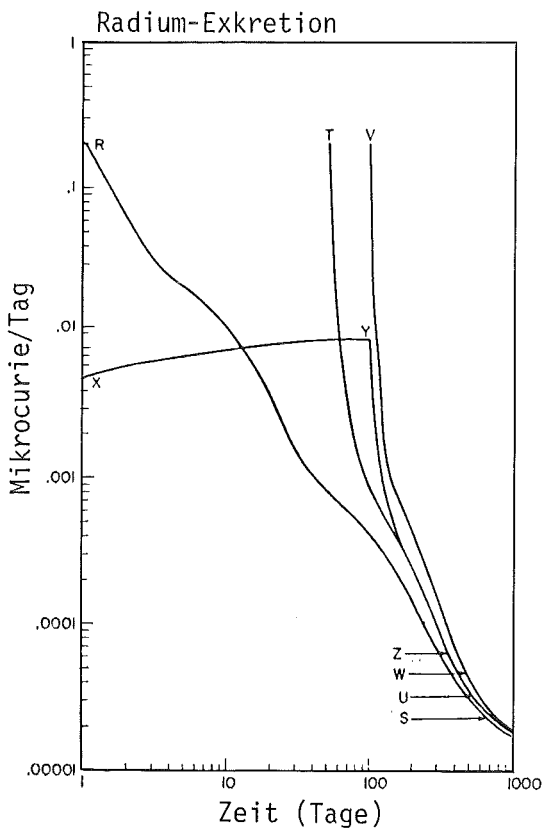
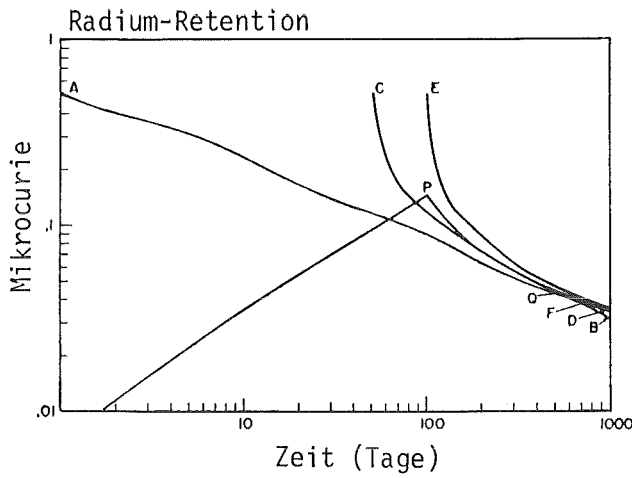
6.3: Zusammenfassung der Langzeit-Effekte bei Radium-Ablagerung im menschlichen Körper:
Verknüpfung klinischer und radiologischer Anzeichen mit vorhandener Aktivität

In Teil 4 über Tumorbildung und degenerative Erkrankungen wird dargestellt, daß bei Radiumpatienten überwiegend Osteosarkome und Karzinome gegenüber Leukämie vorherrschen und daß andere Knochensucher wie Plutonium, die sich an der Knochenoberfläche konzentrieren, noch gefährlicher als Radium sind. Tabelle 6.4 gibt eine Übersicht über die Erzeugung von Knochentumoren durch Radium in Ra-224 bei Kindern.

Teil 5 befaßt sich mit einem Vergleich externer und interner Bestrahlung von Knochen, die Tabellen 6.5a und 6.5b fassen die vorhandene Beobachtungen zusammen. Hinzu kommen Tierexperimente, die die relative Schädlichkeit von Ra-226, Pu-239 und Sr-90 vergleichen, s. o.

Schließlich befaßt sich Teil 6 mit der Frage, welche Faktoren die Dosisgrenzwerte für knochensuchende Radionuklide bestimmen. Dabei gilt eine Belastung durch 0,1 μCi Ra-226 als Bezugswert.

Tabelle 6.6 faßt die Daten für die wichtigsten Nuklide und ihre α - und β -Strahlung zusammen, hier allerdings auf 1 μCi Ra-226 bezogen.



(i) Gleichungen für die Retention

$$\text{Kurve AB: } R_{s1}(t) = 0.54e^{-1.74t} + 0.29e^{-0.14t} + 0.11e^{-0.012t} + 0.04e^{-0.001t} + 0.02e^{-0.00014t}$$

$$\text{Kurve CD: } R_{s2}(t) = R_{s1}(t - T/2)$$

$$\text{Kurve EF: } R_{s3}(t) = R_{s1}[t - (T - 1)]$$

$$\begin{aligned} \text{Kurve OP: } R_c(t) = & \frac{0.54}{1.74T} (1 - e^{-1.74t}) \\ & + \frac{0.29}{0.14T} (1 - e^{-0.14t}) \\ & + \frac{0.11}{0.012T} (1 - e^{-0.012t}) \\ & + \frac{0.04}{0.001T} (1 - e^{-0.001t}) \\ & + \frac{0.02}{0.00014T} (1 - e^{-0.00014t}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PQ: = & \frac{0.54}{1.74T} (e^{-1.74(t-T)} - e^{-1.74t}) \\ & + \frac{0.29}{0.14T} (e^{-0.14(t-T)} - e^{-0.14t}) \\ & + \frac{0.11}{0.012T} (e^{-0.012(t-T)} - e^{-0.012t}) \\ & + \frac{0.04}{0.001T} (e^{-0.001(t-T)} - e^{-0.001t}) \\ & + \frac{0.02}{0.00014T} (e^{-0.00014(t-T)} - e^{-0.00014t}) \end{aligned}$$

$$T = 100 \text{ Tage}$$

(ii) Gleichungen für Exkretion

$$\text{Kurve RS: } Y_{s1}(t) = 0.54 \times 1.74e^{-1.74t} + 0.29 \times 0.14e^{-0.14t} + 0.11 \times 0.012e^{-0.012t} + 0.04 \times 0.001e^{-0.001t} + 0.02 \times 0.00014e^{-0.00014t}$$

$$\text{Kurve TU: } Y_{s2}(t) = Y_{s1}(t - T/2)$$

$$\text{Kurve VW: } Y_{s3}(t) = Y_{s1}[t - (T - 1)]$$

$$\begin{aligned} \text{Kurve XY: } Y_c(t) = & \frac{0.54}{T} (1 - e^{-1.74t}) + \frac{0.29}{T} (1 - e^{-0.14t}) \\ & + \frac{0.11}{T} (1 - e^{-0.012t}) \\ & + \frac{0.04}{T} (1 - e^{-0.001t}) \\ & + \frac{0.02}{T} (1 - e^{-0.00014t}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} YZ: = & \frac{0.54}{T} (e^{-1.74(t-T)} - e^{-1.74t}) \\ & + \frac{0.29}{T} (e^{-0.14(t-T)} - e^{-0.14t}) \\ & + \frac{0.11}{T} (e^{-0.012(t-T)} - e^{-0.012t}) \\ & + \frac{0.04}{T} (e^{-0.001(t-T)} - e^{-0.001t}) \\ & + \frac{0.02}{T} (e^{-0.00014(t-T)} - e^{-0.00014t}) \end{aligned}$$

$$T = 100 \text{ Tage}$$

Abb. 6.5: Ra-226-Retention und Exkretion nach einer Aufnahme von 1 µCi

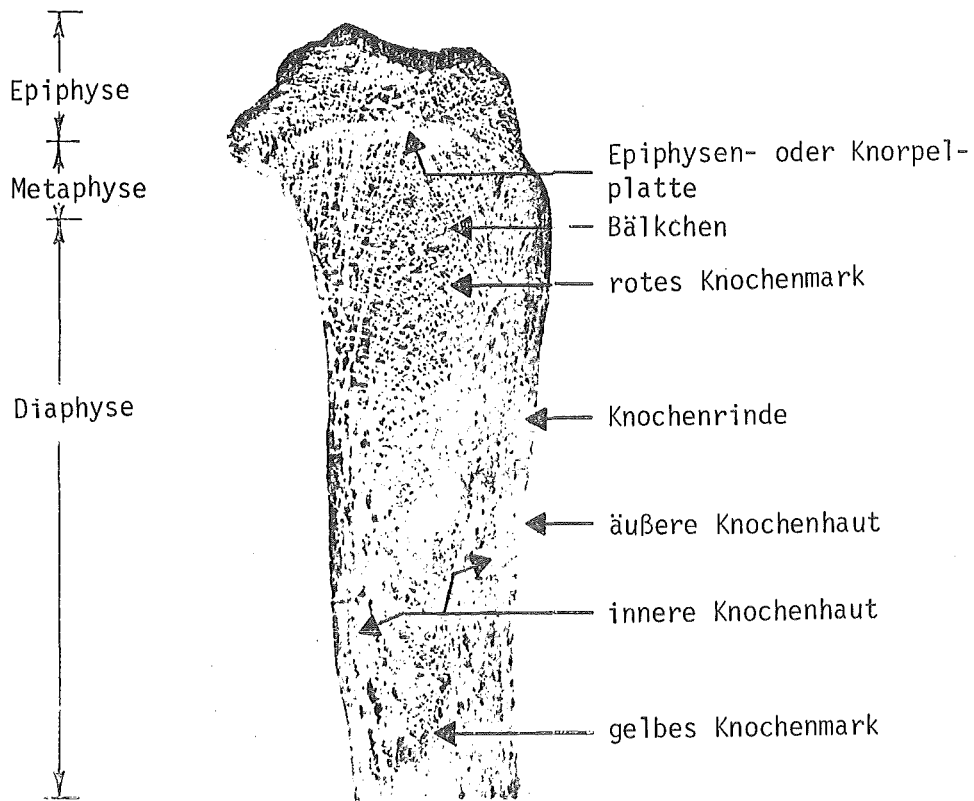


Abb. 6.6a: Oberer Teil eines menschlichen Schienbeines als Beispiel eines Röhrenknochens

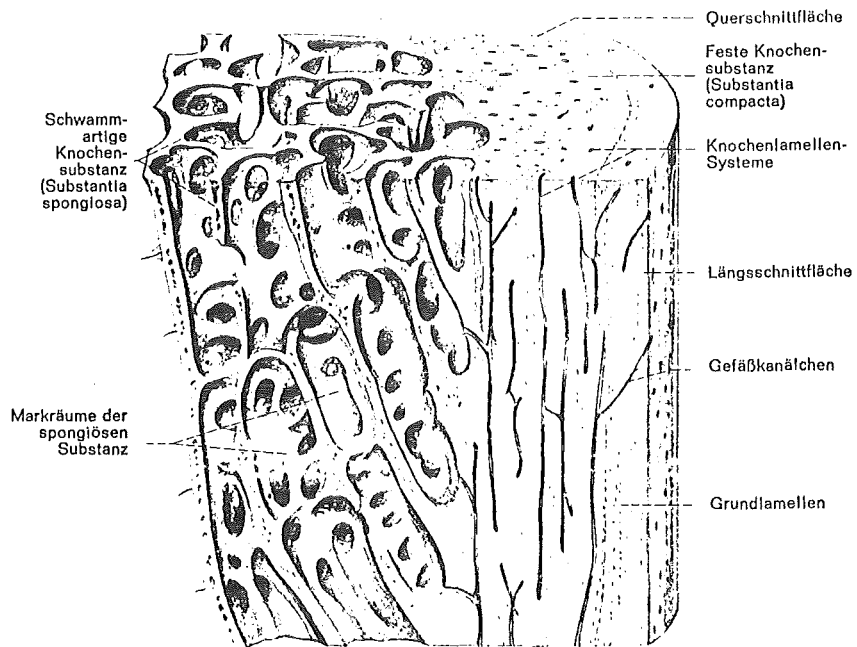


Abb. 6.6b: Schema des Knochenbaues

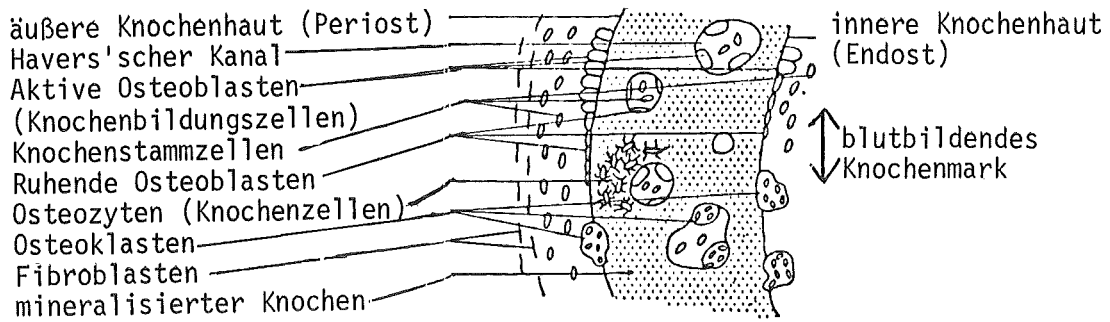


Abb. 6.7a: Darstellung von knochenbildenden Zellen und Knochenoberfläche (nicht maßstabsgerecht), Querschnitt durch den Knochen

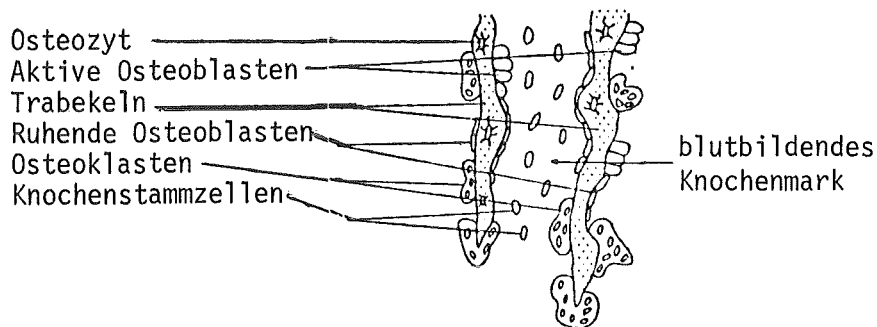


Abb. 6.7b: Längsschnitt durch trabekulären Knochen

Ra-224-Patienten	Verabreichte Aktivität (mCi) ^(b)		
	0,2-0,7	0,7-1,2	1,2-1,7
Anzahl der Fälle ^(a)	33	16	11
Anzahl der Knochentumoren	2	4	5 ^(c)
Prozentsatz der Knochentumoren ^(d)	6	25	45

- (a) In zwei von den zweiundsechzig untersuchten Fällen wurde die Aktivitätszufuhr nicht festgehalten.
- (b) Die Injektionen erfolgten in Zeiträumen zwischen einigen Monaten und mehreren Jahren. Genaue Angaben lagen nur für die Zeit bis zum 1.10.1949 vor, sie wurden durch entsprechende Abschätzungen der verabreichten Aktivität anhand der verfügbaren Information über die Zahl der weiteren Injektionen ergänzt /Mole, 1966/.
- (c) In einem Fall wurde zweimal behandelt.
- (d) Ein Fünftel der Fälle konnte nicht weiterverfolgt werden; da Details nicht bekannt sind, wurde die Tumorfrequenz so berechnet, als ob in diesen Fällen keine Erkrankungen aufgetreten wäre /Mole, 1966/.

Tab. 6.4: Dosis und Erzeugung von Knochentumoren durch Ra-224 bei tuberkulösen Kindern

	Art der Belastung	Dauer der Exposition	Quelle	ungefähre Anzahl	Jahre der Weiterverfolgung
Atombomben-überlebende	Unfall	Minuten	außerhalb des Körpers	100 000	15 ^(a)
Amerikanische Radiologen	Beruflich	Jahre	"	3 500	4-40
Britische Radiologen	"	"	"	1 300	5-60
	Therapeutisch	Monate	"	14 000	9-25
Zifferblattmalerinnen	} Beruflich	} Jahre	} innerhalb des Körpers	} 700	} 5-50
Radiochemiker					
Ra-226 in der Therapie	} Therapeutisch				

- (a) Diese Tabelle wurde unverändert aus dem Bericht der ICRP von 1967 übernommen; die Gruppe der Atombombenüberlebenden ist weiter verfolgt worden.

Tab. 6.5a: Fünf Gruppen von Personen, deren verschiedenartige Strahlenexposition untersucht wurden

Krankheit	Atombomben- überlebende	Amerikanische Radiologen	Britische Radiologen	Fälle von Wirbelsäu- lenver- steifung	Zifferblatt- malerinnen u.s.w.
Leukämie	10:1	2:1	2:1	9:1	1:1
Aplastische Anämie	2:1	NR	NR	30:1	1:1
Osteosarkome	NR	NR	NR	2:1	50:1
Nebenhöhlen- Karzinome	NR	NR	NR	NR	100:1

Tab. 6.5b: Zahl der beobachteten Erkrankungen im Verhältnis zur Zahl der erwarteten Erkrankungen in einer nicht bestrahlten Vergleichsgruppe (NR = nil reported, d. h. unbekannt)

Nuklide	Art der Strahlung	Mittlere Energie (MeV)	D_0	Endostale Dosis-Rate		Mittlere Verhältnis Knochen- marks- Dosis- rate \bar{D}_M	
				Im Bereich 5-10 μ m D_S	Gesamter Bereich der α - Strah- lung	D_S/\bar{D}_M	
Ra-226- Zerfalls- reihe	α	11	36	10,5	5	1,5	~ 7
	β	0,3	0,7	-	-	$\sim 0,1$	-
Ra-228- Zerfalls- reihe	α	19	62	18	9	2,5	~ 7
	β	1,1	2,7	-	-	$\sim 0,5$	-
Sr-90 + Y-90	β	1,1	2,7	1,13	-	0,55	2
Ca-45	β	0,086	0,21	0,12	-	0,034	3,5
C-14	β	0,054	0,13	0,07	-	0,010	7
	Röntgen- strahlen, 200-250 kV						1,5
	γ -Strahlen ~ 1 MeV						1,0

Tab. 6.6: Ungefähre Dosisraten in rad/Jahr für eine gleichverteilte Belastung des Skeletts mit 1 μ Ci/7000 g ungetrockneter Knochen

Als Endergebnis wird Evans' Schlußfolgerung wiedergegeben, daß der gültige "Grenzwert von 0,1 µg Ra maximaler Radiumablagerung im Knochen ausreichend sicher und konservativ" sei. Es wird aber auch darauf hingewiesen, daß weitere sorgfältige Studien der Radiumpatienten erforderlich sind, um bei den metabolischen Unterschieden von Individuum zu Individuum die Wirkung von Ra-226 auf das menschliche Skelett besser zu verstehen. Auch die Probleme im Zusammenhang mit Dosisrate und Dosisverteilung sind noch nicht abschließend geklärt.

Die ICRP-Publikation 20 /ICRP, 20/ befaßt sich mit dem Erdalkalimetabolismus im erwachsenen Menschen. Hierin ist die Retentionsfunktion für den Ganzkörper für einen Zeitraum von 15 Minuten bis zu 50 Jahren nach der Inkorporation für Kalzium, Strontium, Barium und Radium entwickelt. Das neue Modell ist gegenüber der Norris-Funktion verbessert. Die Modellergebnisse werden mit den existierenden Daten verglichen und auch in integrierter Form in Tabellen dargestellt.

Sie eignen sich als Grundlage zu weiteren Forschungen, aber auch zur Dosisberechnung für exponierte Personengruppen. Für alle Einzelheiten kann wiederum nur auf das Studium dieser detaillierten Arbeit selbst verwiesen werden.

Abb. 6.8 faßt zum Beispiel die verwendeten Untersuchungen über die Radium-Retention zusammen, Abb. 6.9 die Radium-Daten bezogen auf Kalzium. Tab. 6.7a zeigt für das Knochenvolumen die Werte des neuen Modells. Tab. 6.8 enthält die Integrale der Retentionsfunktionen für die verschiedenen Radium-Isotope, Tab. 6.9 diese Werte für Ra-226 und Ra-228 nach dem modifizierten Modell. Außerdem enthält diese Publikation eine sehr hilfreiche Sammlung von Ausdrücken, die im Zusammenhang mit dem Metabolismus von knochensuchenden Erdalkalien immer wieder verwendet werden. Hinzu kommt ein sehr ausführliches Literaturverzeichnis.

Die ICRP-Publikation 24 /ICRP, 24/ befaßt sich mit dem Strahlenschutz für Uranminen- und andere Bergarbeiter, die beruflich auch mit Radium in Berührung kommen.

In der ICRP-Publikation 30 /ICRP, 30/ werden die Grenzwerte aus den ICRP-Publikationen 2 und 6 zum Teil modifiziert. Der Vergleich ist nicht ganz einfach, weil die neuen Werte als Grenzen für die jährliche Aufnahme - ALI (Annual Limits on Intake) - und daraus abgeleitete Luftkonzentrationen - DAC (Derived Air Concentration) - angegeben werden, während die alten als maximal zugelassene Körperbelastung - MPBB (Maximum Permissible Body Burden) - und maximal zulässige Konzentrationen - MPC (Maximum Permissible Concentration) - in Luft und Wasser definiert waren. Hinzu kommt die neue Einheit Becquerel ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$) statt Mikrocurie.

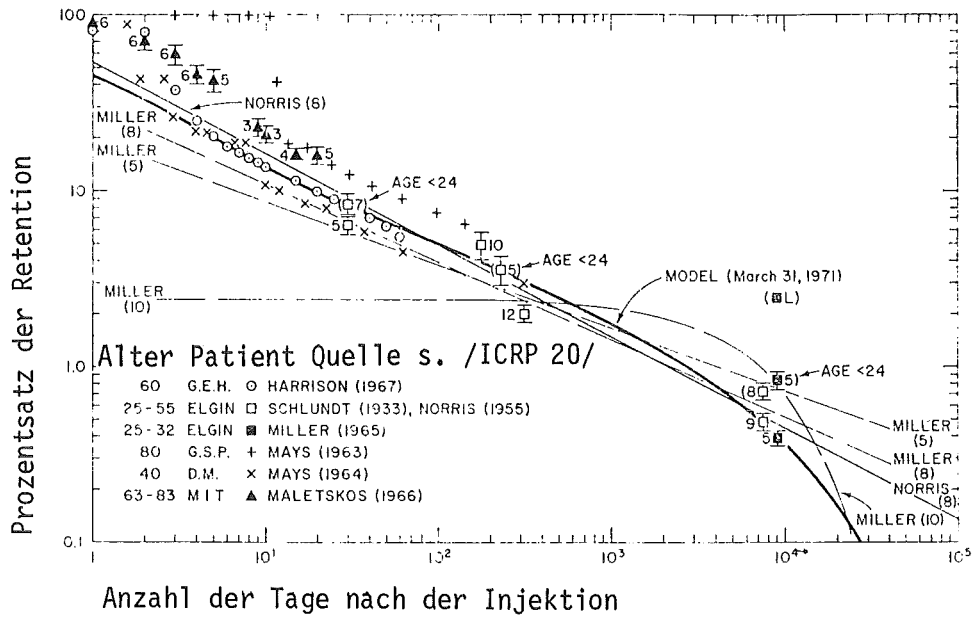


Abb. 6.8: Radium im Menschen - Retention im Ganzkörper

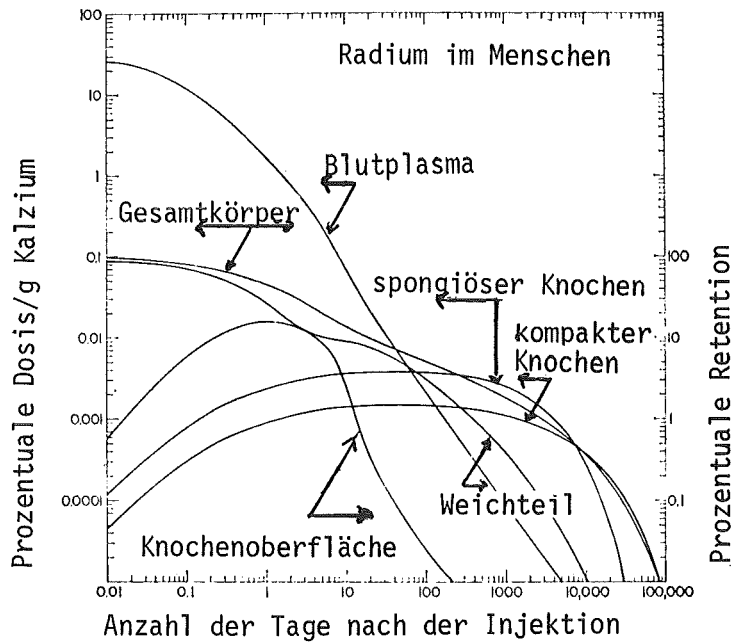


Abb. 6.9: Radium-Retention (die Pfeile zeigen an, auf welcher Seite die Funktionswerte abzulesen sind)

Zeit (Tage)	Blut	Knochen oberfläche	Weichteil- gewebe	Knochen Volumen				kompakter Knochen	spngiöser Knochen	Ganzkörper
				neuer kom- pakter Knochen	alter kom- pakter Knochen	neuer spon- giöser Knochen	alter spon- giöser Knochen			
0,01	7,80	0,072	89,3	0,0119	0,0237	0,0119	0,0111	0,0716	0,0590	97,2
0,0316	6,30	1,94	83,8	0,0337	0,0670	0,0337	0,0316	1,07	1,04	92,2
0,1	3,81	5,94	70,9	0,0820	0,163	0,0820	0,0770	3,22	3,13	81,0
0,316	1,56	11,6	49,9	0,156	0,312	0,156	0,146	6,27	6,10	63,8
1,0	0,504	15,5	27,3	0,239	0,478	0,239	0,224	8,47	8,21	44,5
3,16	0,139	12,3	11,8	0,320	0,638	0,320	0,299	7,11	6,77	25,8
10,0	0,0198	2,48	9,01	0,374	0,742	0,373	0,346	2,36	1,96	13,3
31,6	0,00318	0,134	6,02	0,398	0,773	0,395	0,359	1,24	0,821	8,08
100	0,000633	0,0253	3,04	0,415	0,757	0,403	0,344	1,18	0,760	4,99
316	0,000127	0,00509	1,27	0,428	0,658	0,393	0,282	1,09	0,677	3,04
1000	0,0000266	0,00106	0,393	0,431	0,447	0,338	0,163	0,880	0,503	1,77
3160	0,0000058	0,000231	0,0830	0,381	0,203	0,205	0,0502	0,582	0,255	0,921
10 000	0,0000011	0,000044	0,0112	0,233	0,0575	0,0493	0,00539	0,291	0,0547	0,356
31 600	0,0000001	0,000005	0,00079	0,0670	0,00870	0,000940	0,0000511	0,0757	0,00099	0,0780

Tab. 6.7: Verbleibender Prozentsatz der injizierten Dosis nach einer einmaligen Injektion
(neues Modell: modifizierte Werte)

Isotop (Halbwertszeit)	Zeit (Jahre)	Blut	Knochenoberfläche	Weichteilgewebe	Knochen-Volumen				kompakter Knochen	spongiöser Knochen	Ganzkörper
					neuer kompakter Knochen	alter kompakter Knochen	neuer spongiöser Knochen	alter spongiöser Knochen			
Ra-226 (1602 Jahre)	1	0,0288	1,16	10,8	1,46	2,92	1,43	1,34	4,96	3,35	18,8
	50	0,0296	1,19	21,2	24,2	48,5	12,8	12,0	73,3	25,4	119,0
	∞	0,0297	1,19	21,5	33,3	66,5	13,1	12,2	100,4	25,9	147,7
Ra-228 (5,75 Jahre)	1	0,0288	1,15	10,4	1,37	2,74	1,34	1,26	4,69	3,18	18,0
	50	0,0292	1,17	16,2	7,16	14,3	5,72	5,36	22,0	11,7	49,8
	∞	0,0292	1,17	16,2	7,16	14,3	5,72	5,36	22,0	11,7	49,8
Ra-225 (14,8 Tage)	1	0,0250	0,868	2,14	0,0768	0,154	0,0766	0,0718	0,665	0,582	3,36
Ra-223 (11,4 Tage)	1	0,0244	0,815	1,83	0,0580	0,116	0,0578	0,0542	0,582	0,520	2,91
Ra-224 (3,64 Tage)	1	0,0209	0,516	0,933	0,0160	0,0320	0,0160	0,0150	0,306	0,289	1,53
Ra-227 (41,2 Minuten)	1	0,00234	0,00111	0,0312	0,0000154	0,0000307	0,0000154	0,0000144	0,000601	0,000585	0,0348

Tab. 6.8: Zeitintegrale der Retentionsfunktion in Tagen für Zeitpunkte 1,50 und ∞ Jahre nach der Injektion (unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls)

Isotop (Halbwertszeit)	Zeit (Jahre)	Blut	Knochenoberfläche	Weichteilgewebe	Knochen-Volumen				spongiöser Knochen	kompakter Knochen	Ganzkörper
					neuer kompakter Knochen	alter kompakter Knochen	neuer spongiöser Knochen	alter spongiöser Knochen			
Ra-226 (1602 Jahre)	1	wie in Tab. 6.8			1,63	2,76	1,54	1,22	wie in Tab. 6.8		
	50				49,8	22,9	18,9	5,91			
	∞				73,8	26,0	19,3	5,94			
Ra-228 (5,75 Jahre)	1				1,52	2,59	1,44	1,15			
	50				11,5	9,95	7,58	3,51			
	∞				11,5	9,95	7,58	3,51			

Für die anderen Radium-Isotope liegen die Werte im Bereich derer in Tab. 6.8 \pm 1,5 %

Tab. 6.9: Zeitintegral der Retentionsfunktion in Tagen für Zeitpunkte 1,50 und ∞ Jahre nach der Injektion (modifiziert)
(unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls)

Außerdem verwendet die ICRP 30 das neue Lungenmodell, dagegen entspricht die Vorstellung einer gleichmäßigen Belastung des Knochens ohne Berücksichtigung der Verschiedenheit in dessen Struktur nicht dem neusten Stand. Tabelle 6.1 dieser Publikation gibt eine vergleichende Übersicht der alten und neuen Grenzwerte für 21 Nuklide, die als repräsentativ für alle 187 Nuklide aus der ICRP-Publikation 30 gelten können, zusammen mit kurzen Erklärungen für die Änderung der Werte. In dieser Kurztabelle ist auch Ra-226 enthalten. Die alten Werte für Ingestion und Inhalation aus der ICRP-Publikation 2 sind 0,08 und 0,07 μCi , die neuen 2,0 und 0,5. Bei den DAC-Werten wurde aus $3 \cdot 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ jetzt $30 \cdot 10^{-11} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$. Für den Qualitätsfaktor Q sollte (nach dem "Marshall-Modell" in der ICRP-Publikation 20) eher der Wert 20 als 10 verwendet werden.

In der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV, 1976) sind Ra-223, Ra-224, Ra-226 und Ra-228 in der Tabelle für Freigrenzen und abgeleitete Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr für Inhalation und Ingestion aufgeführt. Die Freigrenzen und die Grenzwerte für die Ingestion über Luft und Wasser bzw. Nahrung sind im folgenden Tabellenausschnitt wiedergegeben, s. Tab. 6.10.

Ordnungszahl Z	Element	Radionuklid	Freigrenze		Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr über			
			(1/s)	(Ci)	Luft		Wasser und Nahrung	
					(Ingestion) (1/s)	(Ci)	(Ingestion) (1/s)	(Ci)
88	Radium	Ra-223	$3,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^2$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
		Ra-224	$3,7 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
		Ra-226	$3,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^1$	$4,3 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^1$	$5,8 \cdot 10^{-10}$
		Ra-228	$3,7 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^1$	$5,7 \cdot 10^{-10}$	$4,9 \cdot 10^1$	$1,3 \cdot 10^{-9}$

Tab. 6.10: Freigrenzen und abgeleitete Grenzwerte der Jahres-Aktivitätszufuhr für Inhalation und Ingestion einzelner Radionuklide entsprechend $3/500$ des Dosiswertes von 5 rem für das kritische Organ (Knochenmark)

7. Transferfaktoren

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind im folgenden Abschnitt die Transferfaktoren des Radiums zusammengestellt, die bei der vorliegenden Literaturübersicht erfaßt wurden. Bei Diskussionen über eine realistische Abschätzung der Strahlenbelastung des Menschen und der daraus möglicherweise herrührenden Gefährdung erweist sich, daß eine sorgfältige Auswahl der Transferfaktoren und die Berücksichtigung von deren Bandbreiten eine herausragende Rolle spielen.

In einer Übersicht der US-ERDA (Energy Research and Development Administration) aus dem Jahre 1977 /Heit, 1977/ werden Daten zur Verbreitung von Spurenmetallen infolge der Kohleverbrennung angegeben. In den Tabellen der Konzentrationen in See- und in Frischwasser sind die Werte für Radium mit $6 \cdot 10^{-8}$ und $3,9 \cdot 10^{-7}$ $\mu\text{g/l}$ als mittlere Konzentrationen angegeben. Von besonderem Interesse ist die Konzentration in Pflanzen, nämlich 9 - 10 $\mu\text{g Ra/g}$ trockene Pflanzenmasse.

Die Anreicherungsfaktoren des Radiums für Fisch und wirbellose Tiere sind in Frischwasser in beiden Fällen 50, in Meerwasser 250 bzw. 100.

Ähnlich vergleicht eine australische Arbeit /Davy, 1975/ die Ausbreitung von Schwermetallen in der Umgebung einer Uranmine. Radium gelangte hier auf zwei Wegen in die Umwelt: Als Bestandteil des Raffinats und in natürlichen Gewässern, die das Abfallmaterial der Mine auswaschen. Die Meßwerte für ersteres liegen bei einer der untersuchten Anlagen zwischen 320 und 26 000 pCi/l, ein Mittelwert von 20 000 pCi/l wird als repräsentativ angenommen. Mit diesem Wert errechnet sich die Summe der aus der Mine in die Umgebung gelangten Aktivität für die Jahre 1954 bis 1961 bzw. 1961 bis 1967 als 40 bzw. 50 Ci. Die Gewässerkonzentrationen liegen zwischen 330 und $6 \cdot 10^5$ pCi/kg. Eine genaue Untersuchung über zeitlichen und örtlichen Transfer fehlt.

Komplex ist die Verteilung von Radium im Boden. Die Tabellen dieser Arbeit /Davy, 1975/ geben Radiumkonzentrationen in Böden, Gräsern und Myrtenheidenblättern und in verschiedenen Bodenschichten für verschiedene Meßpunkte in der Umgebung der Mine an. Abb. 7.1 zeigt die Radiumkonzentration in Gräsern als Funktion der Radiumkonzentration im Boden. Die Werte in den Böden liegen zwischen 0,005 und 3,04 pCi/g Trockensubstanz (Mittelwert 0,27), die in Gräsern zwischen 0,1 und 6,0. (Mittelwert 0,9), die in Blättern zwischen 0,004 und 0,3 (Mittelwert 0,109).

Bei den Messungen verschiedener Bodenschichten fanden sich an der Oberfläche (2 - 5 cm) Werte zwischen 0,03 und 0,87 pCi Ra-226/g Trockensubstanz (Mittelwert 0,34), in tieferen Schichten liegen die Werte zwischen 0,35 und 0,84 (Mittelwert 0,58).

In derselben Arbeit werden die radioökologischen Aspekte der Verbreitung radioaktiver Substanzen dargestellt und die abgeschätzten Dosisbelastungen mit dem ICRP-Grenzwert von 10 pCi Ra-226/l für Trinkwasser verglichen. Abgesehen von etwas exotisch anmutenden Angaben z. B. für Krokodilfleisch enthält diese Arbeit auch die relevanten Daten für eine Berechnung der Dosisbelastung auf dem Wege über Wasser, Fisch, Pflanzen und Fleisch, s. Tabn. 7.1 und 7.2.

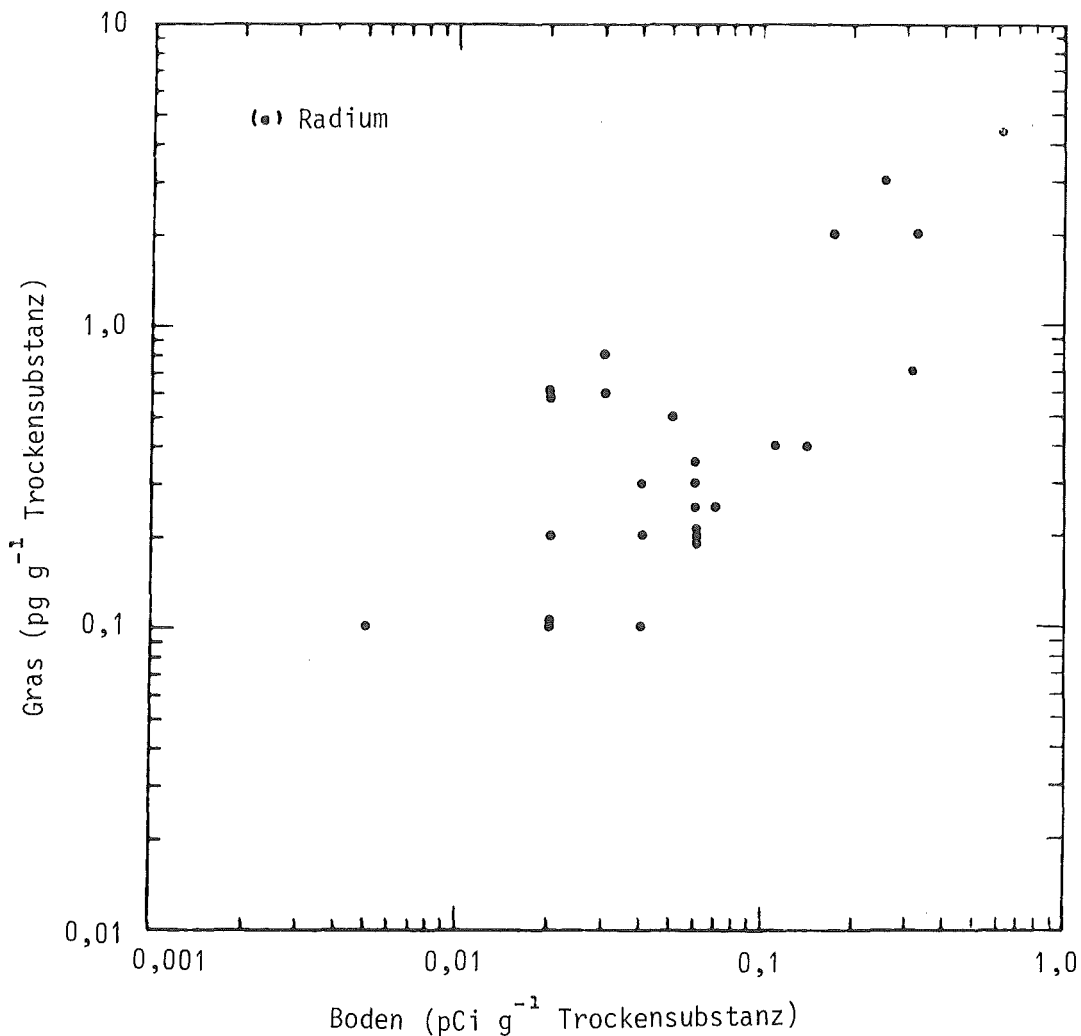


Abb. 7.1: Radiumkonzentration in Gräsern als Funktion der Radiumkonzentration im Boden

Früchte	Quelle	Bestandteile								
		Cu	Mn	Zn	Pb	Mg	Ca	Ra-226	Pb-210	U
		$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	pCi g^{-1}	pCi g^{-1}	pCi g^{-1}
Tomaten	Jabiru	0,66		5,1	<0,33			0,005		0,001
	Adelaide R.	0,33	3,7	1,6	0,04	68	28	0,002	<0,01	0,0007
	Rum Jungle	0,03	0,9	1,4	<0,02	76	42	0,002	<0,01	<0,0007
Baumtomaten	Adelaide R.	0,53	1,0	2,0	0,06	96	42	0,002	<0,01	<0,0006
Gurken	Jabiru	0,25		2,4	0,2			0,007		0,0014
	Adelaide R.	0,34	0,7	2,7	0,05	130	90	0,01	<0,01	<0,0002
	Rum Jungle	0,4	2,3	2,2	0,1	190	200	0,004	<0,01	0,002
Gurken Essiggurken	Adelaide R.	0,6	1,2	3,6	0,1	170	160	0,01	<0,01	<0,0003
	Rum Jungle	0,3	1,6	1,8	0,08	130	140	0,004	<0,01	<0,0003
Süßkartoffeln	Rum Jungle	2,1	4,1	2,7	0,2	210	170	0,03	<0,01	0,003
Eierkürbisse	Rum Jungle	0,5	1,1	1,5	0,02	120	64	0,003	<0,01	0,017
Auberginen	Adelaide R.	0,7	5,4	1,9	0,03	170	90	0,008	<0,01	0,0004
Zucchini	Adelaide R.	0,6	7,5	5,7	0,02	190	80	0,003	<0,01	<0,0004
span. Pfeffer	Adelaide R.	0,4	7,2	2,2	0,03	100	65	0,001	<0,01	<0,0004
Rotkohl	Jabiru	0,19		7,2	0,76			0,059		0,009
Chinakohl	Jabiru	0,14		29,0	3,4			0,06		0,012
Radieschen	Jabiru	0,2		5,7	<0,3			0,05		0,003
Zuckermais	Jabiru	2,1		36,0	<0,5			0,001		0,007
Bohnen	Jabiru	0,9		6,5	0,3			0,07		0,01
Rote Bete	Jabiru	0,6		12,6	<0,3			0,05		0,03

Tab. 7.1: Radiumgehalt von Früchten (bezogen auf das Frischgewicht)

Pfad	Verzehrrate (kg Jahr ⁻¹)	Ra-Konzentration pCi g ⁻¹ (Frischgewicht)	Jährliche Aufnahme (μCi)
Wasser	730	0,000 63	0,46
Fleisch	200	0,015	3,0
Fisch	40	0,086	3,4
Gemüse	70	0,0086	0,6
Obst	20	0,007	0,14
Krokodil	15	0,04	0,6
Gans	5	0,0043	0,02
Muscheln	2	0,13	0,26

Tab. 7.2: Die Aufnahme von Radium durch eine hypothetische Gruppe

Bemerkenswert ist, daß die Anreicherungsfaktoren des Radiums in Fischen (und die anderer untersuchter Radionuklide entsprechend) mit zunehmender Radium-Konzentration im Wasser abnehmen. Die gemessene Radium-Ingestionsbelastung einer kritischen Bevölkerungsgruppe ist für Radium aus natürlichen und künstlichen Quellen (Vergleichsuntersuchung) gleichermaßen etwas höher als der durch die ICRP empfohlene Wert.

Das staatliche Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR hat im Jahre 1975 eine Übersicht über Arbeiten zur Ökologie des Radiums herausgegeben /Clajus, 1975/. Insbesondere für die "Bioskette" Gestein-Boden/Wasser-Pflanze werden Radium-Konzentrationen und Transferfaktoren aufgeführt. Sowohl die Konzentrationen als auch die Transferfaktoren unterliegen so großen Schwankungen, daß eine Abschätzung der Ingestionsbelastung der Bevölkerung aus diesen Angaben nicht möglich ist. Zwei Tabellen dieser Arbeit fassen die Radiumgehalte verschiedener Gesteinsarten zusammen. Die Messungen von Gestein und aufliegendem Boden ergaben Radiumkonzentrationen zwischen 10^{-7} und 10^{-2} nCi/g. Es wird auf die hohe Ionenbeweglichkeit des Radiums im Boden hingewiesen. Durch die Wasserbewegung im Boden wird die Situation zusätzlich kompliziert. Besonders große Abweichungen von einem Bodentyp zum anderen, aber auch innerhalb eines Bodentyps findet man in der Nähe von Uranerzlagern.

Tabelle 7.3 gibt eine Übersicht über besonders radiumreiche Böden.

Gebiet	Ra in 10^{-12} Ci/g
Indien, Monazit-Sand-Region, Kerala	0,24 - 41
Frankreich, Berge von Ambazao, Haute Vienne	25,7 - 239,5
Brasilien, Morro do Ferro	59 - 1113 (Ra-224)
Araxa	19 - 1147 (Gesamt- α -Aktivität)
Tapira	22 - 779 (Gesamt- α -Aktivität)

Tab. 7.3: Besonders radiumreiche Böden
(Definitionsgemäß entspricht 1 g Ra-226 annähernd 1 Ci Ra-226)

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß

- 1) der Radiumgehalt der Böden sich von dem der Gesteine nur geringfügig unterscheidet,
- 2) die Radiumkonzentration innerhalb einer Bodenart erheblich schwankt, ebenso von Bodenhorizont zu Bodenhorizont,
- 3) der Horizont mit dem höchsten Tongehalt meist der mit dem höchsten Radiumgehalt ist,
- 4) salzige und Salzböden in der obersten Schicht das meiste Radium enthalten,
- 5) in kalkhaltigen Horizonten wenig Radium vorkommt,
- 6) Wiesenböden infolge ihres guten Wasserstauvermögens und Ionenaustauschvermögens relativ radiumreich sind, wobei zwischen den Horizonten nur geringe Unterschiede beobachtet werden.

Weiter faßt die zitierte Arbeit die Radium-Konzentrationen in Meerwasser und von Flüssen und Seen in verschiedenen Ländern und in einigen Grund-, Quell- und Trinkwässern zusammen. Die Werte liegen zwischen $0,01 \cdot 10^{-12}$ (z. B. Meerwasser im Skagerrak) und $160 \cdot 10^{-12}$ g/l (z. B. Mineralwasser in den USA).

Die Aufnahme von Radium durch Pflanzen ist von einer Vielzahl von Parametern des jeweiligen Bodens sowie der betreffenden Pflanzen abhängig. In Tabelle 7.4 und 7.5 ist eine Zusammenstellung der Anreicherungsfaktoren im System Boden-Pflanze für ausgewählte Pflanzen und Böden in verschiedenen Ländern gegeben. Die Werte lassen sich nicht ohne weiteres vergleichen, weil in Tab. 7.4 auf das Frischgewicht der Pflanzen, in Tab. 7.5 aber fast immer auf das Trockengewicht Bezug genommen wird. Tab. 7.6 gibt den Radiumgehalt einiger Pflanzen an.

Die Radiumgehalte der Pflanzen liegen jeweils um mindestens eine Größenordnung unter denen der Böden. Die größte innere, durch pflanzliche Lebensmittel verursachte Strahlenbelastung des Menschen wird durch Getreideprodukte verursacht, aber auch andere Lebensmittel, wie z. B. Kartoffeln, tragen erheblich zur Belastung bei, s. Tab. 7.7.

Von Tieren wird Radium hauptsächlich mit der pflanzlichen Nahrung und dem Trinkwasser aufgenommen; es wird vorwiegend in den Stützgeweben (Knochen bei Wirbeltieren, Schalen bei Krustentieren) eingebaut. Außerdem findet es sich in der kalziumreichen Milch. Tab. 7.8 faßt Radiumgehalte von tierischen Geweben und Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs zusammen.

Die Belastung des Menschen durch Radium kann in besonders radiumreichen Gebieten bis zu 50 mrem/a betragen; in der DDR werden Nutzungsbeschränkungen erwogen.

In einer anderen Arbeit aus dem gleichen Institut /Ettenhuber, 1975/ werden Transferfaktoren Fisch/Wasser für einige Radionuklide angegeben. Der Radium-Transferfaktor ist umgekehrt proportional zur Kalzium-Konzentration. Für Spiegelskarpfen wurde der Radium-Transferfaktor in einem Forellenteich als 8,3, in einem Grundteich als 14,1 bestimmt. In einzelnen Gebieten der DDR kann aus der Radiumkonzentration von Gewässern über den Fischverzehr eine Strahlenbelastung des menschlichen Knochens von bis zu 30 mrem/a folgen. Wegen der großen Schwankungen und der Abhängigkeit der Transferfaktoren vom Kalziumgehalt müssen diese jeweils experimentell bestimmt werden.

Eine russische Arbeit /Verkhovskaya, 1972/ enthält zur Ergänzung Angaben über Radium in Böden der Tundra und Taiga und in dort vorkommenden Pflanzen- und Tierarten. Der Radiumgehalt alter Pflanzen kann bis zu 100mal größer sein als der junger Pflanzen der gleichen Art.

Pflanze	A = $\frac{\text{Gesamt-}\alpha\text{-Aktivität / g frische Pflanze}}{\text{Gesamt-}\alpha\text{-Aktivität / g Boden}}$
Banane:	
Frucht	0,4
Blatt	4,0
Kokosnuß:	
Frucht	0,9
Blatt	12,1
Kaffee:	
Frucht	4,7
Blatt	6,1
Rinde	20,3
Kakao:	
Frucht	0,9
Blatt	10,7
Zweige	8,8
Rinde	14,3
Baumwolle:	
Frucht	3,6
Blatt	24,5
Zweige	13,9

Tab. 7.4: Anreicherungs-faktoren im System Boden-Pflanze, ermittelt aus den Gesamt- α -Aktivitäten

Interessant ist eine amerikanische Arbeit /Spencer, 1973/ über Aufnahme und Ausscheidung von natürlich vorkommendem Radium-226. Auch hier bestätigt sich die starke Abhängigkeit des Radium-Metabolismus von dem des Kalziums.

Auch eine italienische Arbeit gibt eine Übersicht über die Vorkommen von Radium-226, die für Nahrungsketten von Belang sein können /Bortoli, 1972/. Insbesondere enthält diese Arbeit auch Hinweise auf die Verhältnisse in einigen Ländern mit extrem hoher natürlicher Radioaktivität in Asien, Amerika und Europa, siehe auch /Russel, 1966/. In der Region um das Kernforschungszentrum Ispra wurden

Pflanze	Angaben zu den Versuchsbedingungen	Anreicherungs-faktor	Art der Ermittlung
verschiedene Algen	Aufnahme aus kontaminiertem Wasser (differenziert nach Ausgangsaktivität von 10 - 1000 nCi/l und Einwirkungsdauer: 1, 3, 7, 14 d)	23-11800	F/L
Gerste			
junge Triebe	in Hydrokultur (pH 4, Einwirkungsdauer 7 d)	0,91	T/L
Wurzeln		1050	
junge Triebe	in Hydrokultur (pH 6, Einwirkungsdauer 7 d)	0,74	T/L
Wurzeln		810	
Erbse			
junge Triebe	in Hydrokultur (pH 4, Einwirkungsdauer 7 d)	1,68	T/L
Wurzeln		10480	
junge Triebe	in Hydrokultur (pH 6, Einwirkungsdauer 7 d)	1,15	T/L
Wurzeln		590	
Mais			
junge Triebe	in Hydrokultur (pH 4, Einwirkungsdauer 30 d)	1,37	T/L
Wurzeln		970	
Tomate			
junge Triebe	in Hydrokultur (pH 4, Einwirkungsdauer 42 d)	1,79	T/L
Wurzeln		190	
Hafer			
Korn	Boden mit Ra kontaminiert	0,44	
Stroh	($0,907 \cdot 10^{-8}$ g Ra-226 im Boden)	0,72	T/B
Wurzeln		9,55	
Buchweizen			
Korn	Boden mit Ra kontaminiert	0,73	
Stroh	($0,54 \cdot 10^{-8}$ g Ra-226 im Boden)	3,6	T/B
Wurzeln		1,3	
Buchweizen			
Korn	Boden mit Ra kontaminiert	0,14	
Stroh	($2,7 \cdot 10^{-8}$ g Ra im Boden)	0,62	T/B
Wurzeln		0,90	
Wiesenklee	Rasenpodsolboden	0,2	A/B
	Wiesenboden	0,7	
Klee		0,1	-
Tabakblätter	Boden sandig lehmig	0,46	T/B
Gerste	Boden mit Ra kontaminiert		
Wurzeln		0,32	
Stroh		0,83	T/B
Ähre		0,07	
Kohl	Boden mit Ra kontaminiert		
Wurzeln		0,39	
Stengel		0,31	T/B
Blatt		0,75	

Tab. 7.5: Radiumanreicherungs-faktoren im System Boden - Pflanze

Fortsetzung Tabelle 7.5:

Pflanze	Angaben zu den Versuchsbedingungen	Anreicherungs-faktor	Art der Er-mittlung
Möhre	Boden mit Ra kontaminiert		
Wurzel		0,29	
Blatt		1,02	T/B
Kartoffel	Boden mit Ra kontaminiert		
Wurzel		0,57	
Blatt		1,07	T/B
Knolle		0,024	
Erbse	Boden mit Ra kontaminiert		
Wurzel		1,8	
Blatt		0,60	T/B
Hülse		3,1	
Bohne	Boden mit Ra kontaminiert		
Wurzel		0,36	
Hülse		0,1	T/B

In Tabelle 10 bedeuten

- A: Aschegewicht
- T: Trockengewicht
- F: Frischgewicht
- L: Lösung
- B: Boden

(Diese Abkürzungen gelten sinngemäß auch für die Tabellen 7.6 und 7.10)

Nahrungsmittel wie Pflanzen, Milch und Fisch sowie Wasser aus den dortigen Seen und Tierknochen auf ihren Radiumgehalt untersucht. Der Transfer von Radium auf verschiedenen ökologischen Pfaden wurde mit dem von Kalzium verglichen. Es wird ausgeführt, daß in der untersuchten Region um Varese 57,8 % der gesamten Radiumaufnahme mit dem Mehl in Brot und Teigwaren (s. Abschnitt 3.6) erfolgt, die Aktivität wird als 296 pCi/a angegeben.

Pflanze		Ra-Gehalt in 10^{-12} g/g
Steinpilz		0,002 F
Wachholder		0,008 F
verschiedene Moose		0,008 - 0,054 F
Sonnenblume:	Blätter	2,7 - 18,0 T
	Stengel	9,9 T
	Wurzeln	17,2 T
Kürbis:	Blätter	7,3 - 25 T
	Stengel	8,3 T
	Blüten	4,1 T
	Wurzeln	45,0 T
Spinat:	Stengel mit Blättern	2,4 T
	Blüten	1,0 T
	Wurzeln	1,3 T
Kohl:	Blätter	0,2 - 2,7 T
	Stengel	0,8 T
	Wurzel	29,0 T
Bohnen:	Blätter	2,3 - 5,9 T
	Stengel	0,69 T
	Blüten	0,81 T
	Wurzeln	39,0 T
Gerste:	Blätter	4,6 T
	Stengel	0,8 T
	Grannen	0,8 T
	Wurzeln	18,6 T
Radieschen		4,4 T
Schafgarbe		6 - 138 T
Wiesenklee	Boden 1 - 2 pCi/g	6 - 259 T
Ackerklee		0,1
Plankton		0,1 - 38,5 T
Kokospalme (Indien) Ra-224		bis 255 A
Orangen (Araxa-Brasilien)	Ra-226	14,6 A
	Ra-228	16,0 A

Tab. 7.6: Radiumgehalt einiger Pflanzen

Lebensmittel	Gesamt- α -Aktivität in pCi/g	^{226}Ra in pCi/g	^{228}Ra in pCi/g
Getreideprodukte		0,07	0,06
Mehl	0,15		
Brot	0,03		
Biskuit	0,022		
Zwieback	0,020		
Graupen	0,004		
Sago	0,003		
Reis	0,001		
Makkaroni	0,001		
Maismehl	0,001		
Tee		bis 0,05	bis 0,05
Kaffee	0,011		
Erdnüsse		0,02	0,01
Erdnußbutter		0,01	0,02
Walnuß		0,003	0,003
Kokosnuß	0,011		
Paranuß		2,73	1,20
Paranußbutter		0,52	0,17
Paranußschokolade		0,24	0,07
Paranußmarzipan		0,14	0,10
Schokolade	0,08		
Margarine	0,013		
Birnen	0,07		
Äpfel	0,001		
Bananen	0,001		
Fruchtsaft	0,011		
Erdbeergelee		0,002	0,002
Zucker	0,001		
Kartoffeln	0,002		
Karotten	0,001		
Kohl	0,001		
Tomaten	0,001		
Champignons	0,001		

Tab. 7.7: Radiumgehalt bzw. Gesamt- α -Aktivität einiger Lebensmittel, Ra-226 und Ra-228

Tier bzw. Nahrungsmittel	Gesamt- α -Aktivität in pCi/kg	^{226}Ra in pCi/kg	^{228}Ra in pCi/kg
<u>Fisch</u>			
Kabeljau		0,46 F	
Ülsardinen		6,0 T	2,4 T
Lachs	18,0 T		
Scholle	13,0 T	1,5 T	
Dorsch	4,0 T		
Hering		2,8 T	
Hering, einschl. Gräten		4,0 T	
Kabeljau, ohne Gräten		4,0 T	
Kabeljau, Lebertran		4,9 T	
Schellfisch ohne Gräten		6,3 T	
Herzmuschel	3,1 T		
Miesmuschel	1,0 T		
Steingarnelen	0,44 T		
<u>Schwein</u>			
		0,8 - 1,5 T	
Leber		0,8 T	
Schädel		45 A	
Kiefer		49 A	
Schulterblatt		46 A	
Fuß		52 A	
Wirbelsäule		46 A	
Becken		46 A	
Schwanz		54 A	
Skelett		46 A	
Milch		11,0 A	
Blut		7,0 A	
Muskel		3,9 A	
Fett und Haut		17,0 A	
Lunge		26,0 A	
Leber		1,7 A	
Herz		2,4 A	
Niere		5,4 A	

Tab. 7.8: Radiumgehalte von tierischen Geweben und Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs, Ra-226 und Ra-228

Fortsetzung Tabelle 7.8

Tier bzw. Nahrungsmittel	Gesamt- α -Aktivität in pCi/kg	^{226}Ra in pCi/kg	^{228}Ra in pCi/kg
<u>Rind</u>		0,8 T	
Blut		0,2 T	
Fleisch	5,0 T		
Zähne		0,24 - 2,48 A	
Knochen		0,27 - 1,35 A	
<u>Kalb</u>			
Leber		1,0 T	
Niere	7,0 T		
Fleisch	7,0 T		
Salami		2,0 T	2,0 T
Wurst		2,0 T	1,7 T
Kuhmilch	0,3 T	0,3 - 1,7 T	
evaporierte Milch		12,0 T	
Trockenmilch		1,7 T	
Butter	6,0 T	0,3 T	
Käse		1,5 T	1,5 T
Hühnereier	7,0 T	2,0 T	
<u>Karibu</u>			
Knochen		500,0 A	
Muskel		1,47 F	
<u>Rentier</u>			
Knochen		810,0 A	
Muskel		0,3 F	
<u>Elch</u>			
Knochen		195,0 A	
Muskel		0,4 F	
<u>Robbe</u>			
Knochen		54,0 A	

Eine kurze Mitteilung in der Zeitschrift "Radiation Botany" stellt die Aufnahme von Th-230, Ra-226, Pb-210, Po-210 und Sr-89 durch Pflanzen aus einer Nährlösung vergleichend dar. Tabelle 7.9 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse. Ra-226 wird ungefähr 50 - 200mal schneller als die anderen Radionuklide aus den Wurzeln in die höher gelegenen Teile der Pflanze transportiert. Ähnlich bevorzugt erfolgt anscheinend der Radiumtransport in Trieben. Bei Aufnahme von Radionukliden überwiegend aus dem Boden macht also Radium den größten Anteil der Kontamination der oberirdischen Pflanze aus. Bei starkem atmosphärischen "wash-out" von Ra-222-

Töchtern dürften Pb-210 und Po-210-Kontamination überwiegen. Die hier beschriebenen Versuchsergebnisse stehen im Einklang mit denen anderer Autoren, nach denen die α -Aktivität des Radium im Stamm (Stiel), Blättern und Früchten von Pflanzen in Uran- und Thorium-reichen Regionen die von Thorium-Isotopen bei weitem überwiegt. Allerdings wurden die komplizierten Verhältnisse bei der Aufnahme von Radionukliden aus verschiedenartigen Böden nicht untersucht /Souza, 1969/.

Radionuklid	Aufnahme % der Zugabe		Anreicherungsfaktor*		
	Triebe	Wurzeln	Triebe	Wurzeln	Transport- Index ⁺
Th-230	0,09	76,35	0,91	4185	0,12
Ra-226	9,61	36,98	84,60	1787	20,62
Pb-210	0,29	90,64	2,69	4246	0,32
Po-210	0,06	68,01	0,58	3324	0,09
Sr-89	8,77	2,80	83,14	142	75,82

$$*\text{Anreicherungsfaktor} = \frac{\text{Radionuklid-Gehalt/g Pflanzengewebe}}{\text{Radionuklid-Gehalt/ml Nährlösung}}$$

$$+\text{Transport-Index} = \frac{\text{Gehalt in Trieben}}{\text{Gesamtgehalt in der Pflanze}} \times 100.$$

Tab. 7.9: Aufnahme verschiedener Radionuklide in Pflanzen

Ein Beispiel für die notwendige detaillierte Untersuchung der Ausbreitung und Verteilung von Radium und anderen Radionukliden in der natürlichen Umwelt ist eine Dissertation aus der Universität von Utah aus dem Jahr 1970. Hier wird neben Cs-137 und K-40 das Ra-228 in Boden, Vegetation, Gewässern und Kleintieren eines begrenzten Gebietes in der freien Natur genau untersucht. Der Einfluß einiger Parameter wie Erosion, Bewässerung, Ernte, Überschwemmung, Weidebetrieb und einzelner chemischer Bodeneigenschaften auf die Ausbreitung der Nuklide wird beschrieben. Aus "fall-out"-Studien weiß man, daß die biologischen Unbestimmtheiten bzw. Schwankungsbreiten sehr viel größer sind als die meteorologischen. Interessant ist z. B. die Beobachtung, daß sich Kalzium und Radium im Boden im Gegensatz zu organischen Verunreinigungen nach oben ausbreiten. Zwischen Wasserläufen und Boden gab es kaum Austausch dieser Nuklide /Stewart, 1970/.

Der Bundesminister des Innern hat im Jahre 1980 einen Statusbericht über den Transfer von Radi nukliden herausgegeben /BMI, 1980/. In diesem findet sich ein Beitrag über die Boden/Pflanzen-Transfer-Faktoren von Ra-226, Po-210 und Pb-210, in dem u. a. auf die für den Strahlenschutz wesentliche "Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer" /Berechnungsgrundlage, 1980/ hingewiesen wird. Diese enthält die in der Bundesrepublik Deutschland verwendeten Transferfaktoren auch für Radium. Tabelle 7.10 enthält die in der Studie von Schüttelkopf und Kiefer in der Umgebung von Menzenschwand/Südschwarzwald ermittelten Transferfaktoren im Vergleich zu denen der Berechnungsgrundlage /Schüttelkopf, 1979/.

Transfer	Transferfaktoren in [d/l] oder [d/kg]	
	gemessen	empfohlen
Milch/Pflanze Fleisch/Pflanze	$3,0 \cdot 10^{-3}$ $(0,1-8) \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$ $3,4 \cdot 10^{-2}$
Pflanze/Boden		
Gras	$27 \cdot 10^{-3}$	
Getreide	$(20-200) \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Blattgemüse	$(3-70) \cdot 10^{-3}$	
Kartoffeln	$(10-20) \cdot 10^{-3}$	
Fisch/Wasser	22	100 (für Ba)

Tab. 7.10: Vergleich der in Menzenschwand und Umgebung gemessenen Transferfaktoren mit den in den "Berechnungsgrundlagen" empfohlenen. Die angegebenen Transferfaktoren beziehen sich auf das Frischgewicht des Nahrungsmittels und das Trockengewicht des Bodens

Aus dem Vergleich mit den sehr viel detaillierteren Angaben in Tab. 7.5 ergibt sich, daß z. B. für den Transfer vom Boden in Getreide der gemessene Faktor von $20-200 \cdot 10^{-3}$ in der Größenordnung liegt, die auch in Tab. 7.5 für Korn-Ähren angegeben ist - da wird allerdings auf die trockene Substanz bezogen - daß aber die Anreicherung in anderen Pflanzenteilen (Stroh, Wurzeln), die nicht von Menschen verzehrt werden, wohl aber von Tieren, viel höher sein kann und auch von der Radium-Konzentration im Boden abhängt (s. Abb. 7.1). Der Wert aus der Berechnungsgrundlage erscheint hier als relativ niedrig angesetzt.

Herrn Professor Dr. Kiefer danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit, den Herren Dr. Hübschmann - HS/M und Dr. Spannagel - IDT und meiner Schwester, Frau Dr. med. Ulrike Hinsch, für viele sachliche Anregungen, Kritik und Ermutigung bei der Verfassung dieser Arbeit, sowie den Herren Professor Dr. Volf und Diplomphysiker Michael für kritische Durchsicht des Manuskripts und Verbesserungsvorschläge.

Die Fertigstellung dieser Arbeit wäre unmöglich gewesen ohne die ausdauernde und sorgfältige Schreibearbeit von Frau E. Gruber - HS/M und Frau I. Schmitz - Bonn, denen ich darum ganz besonders danke.

G l o s s a r

Medizinische Fachausdrücke

A

Adenokarzinom:	Drüsenkrebs
Autoradiographie:	(fotografische) Aufzeichnung der Verteilung eines radioaktiven Stoffes durch die von ihr emittierte Strahlung

B

Bechterew-Krankheit:	Wirbelsäulensteifigkeit, benannt nach dem russ. Arzt W. v. Bechterew (1857-1927), chronische entzündliche Erkrankung
----------------------	--

C

Cervix:	Gebärmutterhals
Chromosomendefekt:	Schaden am faden- bzw. schleifenförmigen Bestandteil des Zellkerns, auf dem die Gene (Erbanlagen) angeordnet sind

D

Dementia praecox:	Jugendirresein
Dermatologie:	Lehre von den Hautkrankheiten

E

Endost:	Die Knocheninnenräume auskleidende Gewebstapete aus faserigem Bindegewebe
endostal:	den Endost betreffend
Endothel:	zellige Auskleidung der Gefäße und Kapillaren sowie seröser Höhlen
Epidemiologie:	Seuchenlehre

Epidermoid:	der Oberhaut ähnliche Zysten
Erythrozyten:	rote Blutkörperchen
Exkretion:	Ausscheidung von Kot oder Harn
Exposition:	Gesamtheit der äußeren möglicherweise eine Krankheit verursachenden Bedingungen, denen ein Organismus ausgesetzt ist, speziell auch bei Strahlung

F

Fäkalien:	Kot
Fibrosarkom:	Hartes, bindegewebsreiches Sarkom

G

-

H

Haemangioendotheliom:	weiche, dunkelrote, langsam aber stetig wachsende bösartige Geschwulst, die aus den Endothelzellen der Blutgefäße entsteht
hot spot:	wörtlich: heißer Fleck, Bezeichnung für lokal konzentrierte Radionuklide, die in ihrer Wirkung von diffus verteilten abweichen

I

Ingestion:	Nahrungsaufnahme
Injektion:	Einspritzung
Inkorporation:	Einverleibung
interstitiell:	im Zwischengewebe liegend

intra:	innerhalb von
intrakavitär:	in einen Hohlraum
intraperitoneal:	innerhalb des Bauchfells
intravenös:	in eine(r) Vene
Iridozyklitis:	Entzündung der Iris und des Ziliarkörpers (Verbindungsstück zwischen Aderhaut und Regenbogenhaut des Auges)

J

-

K

Karzinogenese:	Entstehung von Tumoren (s. u.); der Ausdruck wird nicht immer korrekt angewendet, streng genommen werden Sarkome und frühkindliche Tumoren nicht miterfaßt
Karzinom:	maligner (bösartiger) Tumor von epithelialen Organen und Geweben einschließlich der Drüsenanhänge

kortikal: in der (Knochen-) Rinde liegend

Kompartiment: Teilbereich

L

Leukämie: Weißblütigkeit, Tumorbildung der blutbildenden Organe

Leukozyten: weiße Blutzellen

M

Makrozytose:	Verschleppung von Zellen einer Primärgeschwulst, Auftreten von großen roten Blutkörperchen im Blutbild
Mastoid:	Warzenfortsatz am Ohr
Melanom:	meist bösartige Geschwulst, durch dunkle Pigmente (Melanin) gefärbt
Metabolismus:	Stoffwechsel
Metastase:	Tochtergeschwulst
Morbus Hodgkin:	Lymphogranulom, bösartiger Pseudotumor
Mucoepidermoid:	Zysten der Schleimhaut
Myelofibrose:	Krankheitsbild mit Vermehrung des Bindegewebes im Knochenmark
Myelom:	vom Knochenmark ausgehende Geschwulst

N

Nekrose:	örtlicher Gewebetod, Absterben von Organen, Organ- teilen oder Geweben
Neoplasie:	Neubildung von Gewebe
Neutropenie (auch Agranulozytose):	) Krankheitsbild mit Verminderung oder Fehlen von) Granulozyten (gekörnte Zellen im peripheren Blut)
neutrophil:	empfindlich für neutralen Farbstoff

O

Onkologie:	Lehre von den Geschwülsten
oral	durch den Mund
Osteoblasten:	knochenbildende Zellen

Osteoklasten:	knochenresorbierende Zellen
Osteomyelitis:	Knochenmarksentzündung
Osteoporose:	Mangel an Knochengewebe
Osteosarkom:	von einem Knochen ausgehendes Sarkom
Osteozyten:	Knochenzellen

P

Paget-Krankheit:	krankhafte Knochenveränderung
parenteral:	unter Umgehung des Magen-Darm-Trakts
Periost:	Knochenhaut
Poliomyelitis:	spinale Kinderlähmung
Polycythaemie:	übermäßige Vermehrung der roten Blutkörperchen
pre-maligne:	Vorstadium einer bösartigen Veränderung

Q

-

R

Radiosensitivität:	Strahlenempfindlichkeit
RES = retikuloendotheliales System:	Einheit der biologisch sehr aktiven Mesenchymzellen (embryonale Bindegewebszellen), die gewissermaßen die resorbierende Innenfläche des Körpers bilden. Hierzu gehören u. a. Zellen der Milz, Lymphknoten und Knochenmark, funktionelle Einheit der körpereigenen Abwehr
Retention:	Zurückhaltung im Körper
retikular:	netzförmig
Retikulozyten:	Vorstufe roter Zellen

S

Sarkom: maligner Tumor von Stütz-, Binde- und Füllgewebe
spongiös: schwammig (bei Knochen, im Gegensatz zu kompaktem Knochen)

T

target tissue: Gewebe, auf das die Belastung zielt, sich konzentriert
Thrombozyten: Blutplättchen, Gerinnselzellen
trabekulär: zum Bälkchen gehörend

U

-

V

-

W

-

X

-

Y

-

Z

-

Literatur

(Die Literaturangaben sind für die einzelnen Abschnitte alphabetisch geordnet.)

Literatur zu Abschnitt 1:

Einleitung

/Berechnungsgrundlage, 1980/

Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer.

Bundesministerium des Innern, Bonn,

Gemeinsames Ministerialbl., A. v. 31(30) p. 576-577 (1980)

/Gmelin, 1976/

Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, Band 31: Radium,
Springer-Verlag, Berlin (1976)

/Schüttelkopf, 1979/

Schüttelkopf, H., Kiefer, H.:

Die Dosisbelastung der Umgebungsbevölkerung durch natürliches und aus einer Uranuntersuchungsgrube emittiertes Ra-226,
KfK 2866 (1979)

Literatur zu Abschnitt 2:

Historisches

/Field, 1916/

Field, C. E.:

Radium, p. 23 (1916)

/Hesse, 1911/

Hesse, O.:

Symptomatologie, Pathogenese und Therapie des Röntgen Karzinoma,
Verlag J. A. Barth, Leipzig (1911)

/Rosenbloom, 1923/

Rosenbloom, J.:

A study of the effects of radium on metabolism,
J. Metabolic Research 4, pp. 75-88 (1923)

/Schlundt, 1929/

Schlundt, H., Barker, H. H. and Flinn, F. B.:

The detection and estimation of mesothorium in living persons,
Am. J. Roentgenol. + Radium Therapy 21, pp. 345-54 (1929)

/StrlSchV, 1976/

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen,
Bundesgesetzblatt Nr. 125 (1976)

/Velvenko, 1973/

Velvenko, V. M. and Dubasov, Y. V.:

Analytical Chemistry of Radium, Leningrad (1973),
Translated by Israel Program for Scientific Translations,
John Wiley a. Sons (1975)

Literatur zu Abschnitt 3:

Erfahrungen mit Radium im Menschen

/Warren, 1975/

Warren. S.:

Skeletal and tissue lesions resulting from exposure to radium and fission products,

Annals of Clinical and Laboratory Science 5, No. 2, pp. 75-81 (1975)

Literatur zu Abschnitt 3.1: Bergleute

3.1.1: Schneeberger und Joachimstaler Silbergruben

3.1.2: Uranminen

/Archer, 1973/

Archer, V. E., Wagoner, J. K. and Lundin F. E.:
Health Phys. 25, 351 (1973)

/Blair, 1969/

Blair, H. A.:
Dose-time relations for induction of lung cancer in uranium miners,
Vienna, International Atomic Energy Agency,
Symposium on Radiation-Induced Cancer,
Athens, Greece (1969)

/Ellett, 1977/

Ellett, W. H.:
Recent advances in understanding the risk due to the inhalation of radon
daughters.
Paper at the Radon Workshop, February 1977, Energy Research and
Development Administration, New York, HASL-325, pp. 102-104 (1977)

/FRC, 1967/

Guidance for the control of radiation hazards in uranium mining,
Radiation exposure of uranium mines.
Summary analysis of hearings, May 9, 10, 23, June 6, 7, 8, 9, July 26, 27 and
August 8 and 10, 1967 before the subcommittees on research, development, and
radiation of the Joint Committee on Atomic Energy, Congress of the United
States, Ninetieth Congress, First Session, December 1967, Washington D. C.;
Joint Committee on Atomic Energy, Staff Report of the Federal Radiation Council,
Report No. 8 revised, September 1967

/Härting, 1879/

Härting, F., Hesse, W.;
Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben.
Vierteljahrschr. für gerichtl. Med. u. öffentl. Sanitätswesen 30, p. 296
und 31, p. 102 (1879)

/ICRP 24, 1977/

Radiation Protection in Uranium and other Mines,
ICRP-Publication 24, Pergamon Press Oxford-New York (1977)

/Jacobi, 1975/

Jacobi, W.:

Relation between cumulative exposure to radon-daughters, lung dose, and lung cancer risk.

pp. 492-500 in Noble Gases, R. E. Stanley and A. A. Moghissi, editors,
U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas (1975)

/Kunz, 1978/

Kunz, E., Ševc, J. and Plaček, V.:

Lung cancer mortality in uranium miners (methodological aspects),
Health Physics 35, p. 579 (1978)

/Löwy, 1929/

Löwy, J.:

Über die Joachimstaler Bergkrankheit.

Med. Klin. 25, p. 141 (1929)

/Löwy, 1931/

Löwy, A., Beutel und Woldrich

Z. Krebsforschung 34 (1931)

/Lundin, 1971/

Lundin, F. E., Wagoner, J. K. and Archer, V. E.:

Radon Daughter Exposure and Respiratory Cancer: Quantitative and Temporal Aspects.
NIOSH and NIEHS Joint Monograph No. 1.

National Technical Information Service (Springfield, Va.). (1971)

/Markose, 1978/

Markose, P. M., Eappen, K. P., Venkataraman, S. and Kamath, P. R.:

Distribution of radium and chemical toxins in the environment of a uranium complex, Bhabha Atomic Research Center, Health Physics Division, Bombay (1978)

INIS-mf-4406

/Nelson, 1977/

Nelson, N. S.:

Atmospheric characteristics essential for health effects modeling,

Paper at the Radon Workshop, February 1977, Energy Research and Development Administration, New York, HASL-325 (1977)

/Rajewsky, 1939/

Rajewsky, B.:

Bericht über die Schneeberger Untersuchungen,
Z. Krebsforschung 49, 3, 315 (1939)

/Rostocki, 1923/

Rostocki und Saupe, P.:

Verh. dtsch. Röntgen-Ges. 14, p. 35 (1923)

/Rostocki, 1926/

Rostocki, Saupe, Schmorl:

Die Bergkrankheit der Erzbergleute in Schneeberg in Sachsen / Schneeberger Lungen-
krebs.

Zschr. f. Krebsforschung 23, p. 360 (1926)

/Ševc, 1973/

Ševc, J. and Plaček, V.:

Lung cancer risk in relation to radon daughters, pp. 129-136 in:
Health Problems of Internal Contamination, Akademiai Kiado, Budapest (1973)

/Ševc, 1976/

Ševc, J., Kunz, E. and Plaček, V.:

Lung Cancer in Uranium Miners and Long-term Exposure to Radon Daughter Products,
Health Phys. 30, p. 433 (1976)

/Schüttelkopf, 1979/

Schüttelkopf, H., Kiefer, H.:

Die Dosisbelastung der Umgebungsbevölkerung durch natürliches und aus einer Uran-
untersuchungsgrube emittierte Ra-226. Radioökologische Untersuchungen im Feld-
berggebiet, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Bericht KfK 2866 (1979)

/Snihs, 1975/

Snihs, J. O.:

The significance of radon and its progeny as natural radiation sources in Sweden,
pp. 115-130 in: Noble Gases, R. E. Stanley and A. A. Moghissi editors,
U. S. Environmental Protection Agency, Las Vegas (1975)

/Wagoner, 1965/

Wagoner, J. K., Archer, V. E., Lundin, F. E., Holaday, D. A. and Lloyd, J. W.:

Radiation as the cause of lung cancer among uranium miners,
New Engl. J. Med. 273, pp. 181-188 (1965)

Literatur zu Abschnitt 3.2: Zifferblattmalerinnen

3.2.1: Übersicht

3.2.2: MIT - Gruppe

3.2.3: ANL - Gruppe

3.2.4: Zusammenfassende Studien

3.2.5: Einzelfälle

/Anzai, 1973/

Anzai, I. and Izumi, K.:

Measurement of Ra-226 body burden of a Japanese who was a radium worker between the years 1934-1960, *Radioisotopes* 22, pp. 55-56 (1973)

/Aub, 1952/

Aub, J. C., Evans, R. D., Hempelmann, L. H. and Martland, H. S.:

The late effects of internally-deposited radioactive materials in man, *Medicine* 31, p. 221 (1952)

/BEIR, 1972/

BEIR Report, The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Division of Medical Sciences, National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, D. C., pp. 128-132 (1972)

/Blum, 1924/

Blum, T.:

Osteomyelitis of the mandible and maxilla, American Dental Association, Sept. 1924, see *Month. Labor Rev.*, June 1929, p. 1222

/Brues, 1975/

Brues, A. M. and Littmann, M. S.:

Recent cases of mastoid carcinoma in radium patients, Annual Report of the Argonne National Laboratory, ANL-75-3 Part II, pp. 2-6 (1975)

/Brues, 1976/

Brues, A. M.:

Malignancies in patients contaminated with radium in:
The Health Effects of Plutonium and Radium, edited by Webster S. S. Jee,
University of Utah, Salt Lake City, Utah (1976)

/Chiacchierini, 1970/

Chiacchierini, P. R., Jessup, G. L., Nelson, N. S., Telles, N. C., Tompkins, E.,
Wright, J. F.:

Review of Radium Toxicity Studies, Bureau of Radiological Health, Rockville, Md.
BRH/DBE - 70-5 (1970)

/Delpla, 1968/

Delpla, M. and Schaeffer, R.:

The history of an internal contamination by radium, ANL-Trans-749

(Source: 10th National Conference on Industrial Medicine, Grenoble, France (1968))

/Eng, 1962/

Eng, H., Le Coultre, R. and Lerch, P.:

Etude Statistique de la Radioactivité de Montres-Bracelet, Journal Suisse d'Horlogerie, Edition Suisse No. 1/2 (1962)

/Evans, 1933/

Evans, R. D.:

Radium poisoning - a review of the present knowledge, American Journal of Public Health, Volume 23, No. 10, pp. 1017-1023 (1933)

/Evans, 1969/

Evans, R. D., Keane, A. T., Kolenkow, R. J., Neal, W. R. and Shanahan, M. M.:

Radiogenic tumors in the radium and mesothorium cases studied at M.I.T. in: Delayed effects of bone-seeking radionuclides,

Mays, C. W., Jee, W. S. S., Lloyd, R. D., Stover, B. J., Dougherty, J. H. and Taylor, G. N. eds., University of Utah Press, Salt Lake City, pp. 157-194 (1969)

/Evans, 1974/

Evans, R. D.:

Radium in man, Health Physics 27, pp. 497-510 (1974)

/Failla, 1960/

Failla, G.:

Hearings on radiation protection criteria and standards:

Their basis and use. Joint Committee on Atomic Energy:

86th Congress of the United States, U. S. Government Printing Office, pp. 179-180 (1960)

/Finkel, 1969a/

Finkel, A. J., Miller, C. E. and Hasterlik, R. J.:
Radium-induced malignant tumors in man, pp. 195-225 in:
Delayed effects of bone - seeking radionuclides, Mays, C. W. et al. (eds.)
University of Utah Press, Salt Lake City (1969)

/Finkel, 1969b/

Finkel, A. J., Miller, C. E. and Hasterlik, R. J.:
Radiological parameters in human cancers attributable to long-term radium
deposition, pp. 183-202 in: Radiation-induced cancer, A. Ericson (ed.),
International Atomic Energy Agency, Vienna (1969)

/Looney, 1955/

Looney, W. B., Hasterlik, R. J., Brues, A. M. and Skirmont, E.:
A clinical investigation of the chronic effects of radium salts administered
therapeutically (1915-1931), American Journal of Roentgenology 73, pp. 1006-1037
(1955)

/Martland, 1925/

Martland, H. S., Coulon, P. and Knef, J. P.:
Some unrecognized dangers in use and handling of radioactive substances,
The Journal of the American Medical Association 85, pp. 1769-1776 (1925)

/MIT, 1969/

Massachusetts Institute of Technology, Radioactivity Center, Department of
Physics, Annual Progress Report, MIT-952-6 (1969)

/Paul, 1963/

Paul, I. R.:
Control of Luminous Dial Watches in New York City, Radiological Health Data,
U.S. Department of Health, Education and Welfare, Vol. IV, No. 1 (1963)

/Rowland, 1974/

Rowland, R. E.:
The risk of malignancy from internally-deposited radioisotopes,
from: 5th International Congress of Radiation Research,
Seattle, Washington (1974)

/Rowland, 1970/

Rowland, R. E., Failla, P. M., Keane, A. T. and Stehney, A. F.:
Some dose-response relationships for tumor incidence in radium patients,
Research Conference on the Estimation of Low Level Radiation Effects in Human Population,
Argonne National Laboratory, December 7-9 (1970)

/Rowland, 1972/

Rowland, R. E. and Gustafson, P. F.:
Exposure data for radium patients,
Radiological and Environmental Research Division Annual Report,
ANL-7960, pt. II (1972)

/Schlenker, 1973/

Schlenker, R. A. and Oltman, B. G.:
Effects of skeletal radium deposits on bone mineralization, DHEW (NIH) -75 -683,
pp. 302-316 (1973)

/Schlundt, 1931/

Schlundt, H. and Failla, G.:
The detection and estimation of radium in living persons III:
The normal elimination of radium, Am. Journ. Roentgenolog. and Radium Therapy 26,
p. 265-271 (1931)

/Seelentag, 1961/

Seelentag, W. and Schmier, H.:
First Radiation Protection Regulation and Radiation Burden From Luminous Watch Dials,
Bundesgesundheitsblatt, 4:285-8 (September 8, 1961)

/Seil, 1915/

Seil, H. A., Viol, C. H. and Gordon, M. A.:
The elimination of soluble radium salts taken intravenously and per os.
New York Medical Journal 101, pp. 896-898 (1915), auch in:
Radium 5, pp. 40-44 (1915)

/Seltser, 1965/

Seltser, R. and Sartwell, P. E.:
The influence of occupational exposure to radiation on the mortality of American
radiologists and other medical specialists, Am. J. Epidem. 81, pp. 2-22 (1965)

/Spiers, 1974/

Spiers, F. W.:

Radionuclides and bone-from Ra-226 to Sr-90, The British Journal of Radiology 47, pp. 833-844 (1974)

/Stehney, 1971/

Stehney, A. F. and Rowland, R. E.:

Tumor incidence and life span of human radium cases, pp. 502-515 in:
Contamination by Bone-Seeking Radionuclides and Radioprotection, Montrouge, France, Société Française de Radioprotection (1971)

/Stehney, 1972/

Stehney, A. F., Lucas, H. F., Jr. and Rowland, R.E.:

The time distribution of deaths of human radium dial painters with measured body burdens of radium, Argonne National Laboratory Report ANL-7960(1972)

/Taylor, 1962/

Taylor, L. S.:

Radiation hazards in realistic perspective, Physics Today 15, 32 (1962)

/Taylor, 1976/

Taylor, G. N., Jee, W. S. S. and Mays, C. W.:

Some similarities of radium and plutonium toxicity in the beagle and man in:
The Health Effects of Plutonium and Radium, edited by Webster S. S. Jee, University of Utah, Salt Lake City, Utah (1976)

/Tsenterova, 1963/

Tsenterova, L. G.:

The problem of the condition of the cardiovascular System in people working with radioactive luminous compounds, Translation.

JPRS: 23 222 of the U.S. Department of Commerce, Office of Technical Services, (from: Gigiyena i Sanitariya, Moscow, Vol. 28, No. 12, pp. 42-46 (1963))

/Warren, 1956/

Warren, S.:

Longevity and causes of death from irradiation in physicians, J. Am. Med. Assoc. 162, pp. 464-468 (1956)

Literatur zu Abschnitt 3.3:

Radium in der Gynäkologie

/Adler, 1916/

Adler, L.:

Zbl. Gynäk. 40, p. 673 (1916)

/Bach, 1965/

Bach, W. und Wille, P.:

Der Einfluß gynäkologischer Radiumbestrahlung auf die Zerfallsneigung der Thrombozyten,

Zbl. Gynäk. 87, pp. 625-630 (1965)

/Burrows, 1968/

Burrows, B. D., Lynch, G. A.:

Carcinoma of the cervix,

Ulster Medical J. 37, pp. 71-81 (1968)

/Corscaden, 1950/

Corscaden, J. A.:

The treatment of early carcinoma of the cervix uteri,

American Journal of Obstetrics and Gynecology 59, pp. 272-284 (1950)

/Cushing, 1968/

Cushing, R. M., Tovell, H. M. M., Liegner, L. M.:

Major urologic complications following radium and x-ray therapy for carcinoma of the cervix, American Journal of Obstetrics and Gynecology 101, pp. 750-755 (1968)

/Drescher, 1949/

Drescher, H.:

Zur Klinik des Adenokarzinoms der Cervix uteri, Geburtshilfe und Frauenheilkunde 9, pp. 31-37 (1949)

/Gauwerky, 1949/

Gauwerky, F.:

Die Komplikationen bei der Radiumbehandlung der Kollumkarzinome und ihre Bedeutung für den Behandlungserfolg,
Strahlentherapie 80, pp. 51-70 (1949)

/Martin, 1949/

Martin, C. L.:

Low intensity radium element needles,
Am. Journ. Roentg. 62, pp. 467-491 (1949)

/Mc Kelvey, 1949/

Mc Kelvey, J. L., Stenstrom, K. W. and Gillam, J. S.:

Results of an experimental therapy of carcinoma of the cervix
American Journal of Obstetrics and Gynecology 58, pp. 896-907 (1949)

/Meredith, 1950/

Meredith, W. J.:

Dosage distribution and dosage in carcinoma of the uterine cervix,
Radiology 54, pp. 386-390 (1950)

/Morris, 1950/

Morris, J. Mc. L., Meigs, J. V.:

Carcinoma of the cervix-statistical evaluation of 1938 cases and results of treatment,
Surg. Gynecol. Obstet. 90, pp. 135-150 (1950)

/Overstreet, 1964/

Overstreet, E. W.:

Techniques of sterilization,
Clinical obstetrics and gynecology 7, pp. 109-125 (1964)

/Körner, 1962/

Körner, H. J.:

Zur Strahlenschutzpraxis bei der medizinischen Radium-Applikation,
Zentralblatt für Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz 12, pp. 187-190 (1962)

/Sadugor, 1949/

Sadugor, M. G., Palmer, J. P. and Reinhard, M. C.:
Carcinoma of the cervix concomitant with pregnancy,
American Journal of Obstetrics and Gynecology 57, pp. 933-938 (1949)

/Schmid, 1969/

Schmid, E. und Bauchinger, M.:
Über das zeitliche Verhalten strahleninduzierter Chromosomenaberrationen beim
Menschen,
Mutation Research 8, pp. 599-611 (1969)

/Sievert, 1921/

Sievert, R. M.:
Die Intensitätsverteilung der primären γ -Strahlung in der Nähe medizinischer
Radiumpräparate,
Acta radiol. (Stockholm) 1, p. 89 (1921)

/Steinsträßer, 1975/

Steinsträßer, A. und Leets, K. H.:
Näherungsweise Dosisberechnung in der Umgebung von umschlossenen Radiumpräparaten
und deren Kombination mit der Dosisberechnung für perkutane Bestrahlung,
Strahlentherapie 149, pp. 463-470 (1975)

/Tapert, 1975/

Tapert, A. C. and Lea, W. L.:
The survey of medical radium installations in Wisconsin,
DHEW Publication (FDA) 75-8022 (1975)

/Weghaupt, 1967/

Weghaupt, K.:
Das primäre Scheidenkarzinom und seine Behandlung,
Strahlentherapie 134, pp. 13-20 (1967)

/Wilson, 1948/

Wilson, C. W. and Greewing, J. R.:
Gamma-ray protection in radium therapy,
British Journal of Radiology 21, pp. 211-222 (1948)

/Younge, 1949/

Younge, P., Hertig, A. T. and Armstrong, D.:

A study of 135 cases of carcinoma in situ of the cervix of the free hospital for women,

American Journal of Obstetrics and Gynecology 58, pp. 867-895 (1949)

/Zowers, 1903/

Zowers, Z. T.:

The uses of radium, Correspondence between Z. T. Zowers and Alexander Graham Bell,
Am. Med. 6, p. 261 (1903)

Literatur zu Abschnitt 3.4:

Thorotrast- und Radium-224-Patienten

/Blomberg, 1962/

Blomberg, R., Larsson, L. E., Levdell, B. and Lindgren, E.:
Ann. N. Y. Acad. Sci. 145, 853 (1967)

/Faber, 1962/

Faber, M.:
in: Some Aspects of Internal Irradiation,
Pergamon Press, Oxford-London-New York, p. 473 (1962)

/Faber, 1967/

Faber, M.:
Ann. N. Y. Acad. Sci. 145, 843 (1967)

/Faber, 1973/

Faber, M. (ed.):
Proceedings of the Third International Meeting on the Toxicity of Thorotrast,
Danish Atomic Energy Commission, Risø Report # 294, Denmark (1973)

/Goldin, 1972/

Goldin, A. S., Magno, P. J., Geiger, F. and Janower, M. L.:
Health Physics 22, pp. 471-482 (1972)

/Grillmaier, 1965/

Grillmaier, R., Muth, H., Oberhausen, E.:
Die Strahlenbelastung von Skelett und Auge bei Thorotrastpatienten in:
Biophysikalische Probleme der Strahlenwirkung, Tagungsbericht der Jahrestagung der
Deutschen Gesellschaft für Biophysik, Homburg/Saar, 1965,
Thieme Verlag, Stuttgart (1966)

/Grillmaier, 1968/

Grillmaier, R., Muth, H. und Oberhausen, E.:
Untersuchung zum Stoffwechsel des Radium-224 (ThX) und Abschätzung der Strahlen-
dosen bei therapeutischer Anwendung,
Biophysik 4, pp. 266-288 (1968)

/Haike, 1967/

Haike, H., Steltner, D. und Schulze, H.:
Thorium X - Strahlenmessung zur Bestimmung des Verunreinigungsfaktors,
Strahlentherapie 134, pp. 306-311 (1967)

/Horta, 1967/

Horta, J. and Damotta, L. C.:

Ann. N. Y. Acad. Sci. 145, 830-843 (1967)

/Kaul, 1969/

Kaul, A., Heyder, J.:

Änderung der zeitlich - räumlichen Verteilung von Ra-228 und Ra-224 im RES und markfreien Skelett nach Inkorporierung von kolloidalem ThO₂ (Thorotrast),
Biophysik 5, pp. 331-340 (1969)

/Kaul, 1970/

Kaul, A., Heyder, J.:

Kinetik der Verteilung und Ausscheidung von Radium-Isotopen nach Thorotrastinjektion,
Biophysik 7, pp. 74-84 (1970)

/Laschner, 1973/

Laschner, W.:

Z. Orthop. 111, pp. 743-748 (1973)

/Mays, 1978/

Mays, C. W., Editor:

Biological Effects of ²²⁴Ra and Thorotrast, Proceedings of an
International Symposium held at Alta, Utah, on 21-23 July 1974,
Health Physics 35, pp. 5-174 (1978)

/Müller, 1978/

Müller, W. A. and Ebert, H. G., Editors:

Biological Effects of ²²⁴Ra, Benefit and Risk of Therapeutic Application,
Proceedings of the Second Symposium at Neuherberg/München, September 20-21, 1976
Martinus Nijhoff Medical Division - The Hague/Boston (1978)

/Muth, 1965/

Muth, H., Grillmaier, R., Oberhausen, E.:

Ergebnisse biophysikalischer Untersuchungen an Thorotrastpatienten und deren Bedeutung für die Festlegung maximal zulässiger Mengen von Radionukliden, in:
Biophysikalische Probleme der Strahlenwirkung, Tagungsbericht der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biophysik, Homburg/Saar, 1965,
Thieme-Verlag, Stuttgart (1966)

/Pavlovskaya, 1973/

Pavlovskaya, N. A.:

Basic patterns of metabolism of Th-232 and its dissociation products in the body,
ONRL - tr - 2905 from Gig. Sanit. 11, pp. 55-58 (1973)

/Rajewski, 1936/

Rajewski, B.:

Strahlentherapie 56, p. 703 (1936)

/Rajewski, 1939/

Rajewski, B.:

in Organismen und Umwelt 2. Wiss. Woche, Frankfurt/Main, 1939; p. 93,
Th. Steinkopff, Dresden-Leipzig (1939)

/Rowland, 1959/

Rowland, R. E. and Marshall, J. H.:

Rad. Res. 11, p. 299 (1959)

/Rowland, 1974/

Rowland, R. E.:

The risk of malignancy from internally deposited radioisotopes,
5th International Congress of Radiation Research, Seattle, Washington (1974)

/Snyder, 1973/

Snyder, W. S.:

Age dependance of uptake and retention of radionuclides, from 2nd International
Summer School on Radiation Protection; CONF-730814-3,
Herceg Novi, Yugoslavia (1973)

/Spiers, 1957/

Spiers, F. W. and Burch, P. R. J.:

in: Advances in Biological and Medical Physics, ed. by J. H. Lawrence and
C. A. Tobias, Vol. V, p. 425
Academic Press, New York (1957)

/Spiess, 1969/

Spiess, H.:

Ra-224-induced tumors in children and adults,

in: Delayed effects of bone-seeking radionuclides, pp. 227-247,

C. W. Mays et al. (ed.)

University of Utah Press, Salt Lake City (1969)

/Spiess, 1970a/

Spiess, H. and Mays, C. W.:

Bone cancers induced by Ra-224 (Th X) in children and adults,

Health Physics 19, 713-729 (1970)

/Spiess, 1970b/

Spiess, H. und Mays, C. W.:

Spätschäden nach Ra-224-Injektionen bei Menschen,

Monatsschrift für Kinderheilkunde, Berlin, 119, Nr. 6 (1970)

/Spiess, 1971/

Spiess, H. and Mays, C. W.:

Protraction effect on bone sarcoma induction bei Ra-224 in children and adults

in: Radionuclide Carcinogenesis (C. L. Saunders, R. H. Busch, J. E. Bellon,
and D. D. Mahlum, Eds.),

USA Atomic Energy Commission, CONF-720505 (1973)

/Telles, 1967/

Telles, N. C.:

Ann. N. Y. Acad. Sci. 145, 674-675 (1967)

Literatur zu Abschnitt 3.5:

Medizinisch-technischer Umgang mit Radium

/Abbatt, 1957/

Abbatt, J. D.:

Investigation of the Radioactivity of a Radium Worker,
Brit. J. Radiol., Suppl. No. 7 (1957), p. 57 ff

/BMI, 1975-1979/

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung,
Jahresberichte 1975-1979 des Bundesministers des Innern

/Dreblow, 1948/

Dreblow, W. und Krebs, A.:

Radiumvergiftungen und ihre physikalische Diagnostik
in: Damages by Radiation, B. Rajewsky, A. Schraub, G. Kahlau, W. Dreblow,
A. Krebs, and H. Schaefer. In FIAT Review of German Science, 1939-1946:
Biophysics, Part I, pp. 123-75. Boris Rajewsky and Michael Schön (senior
authors). Office of Military Government for Germany, Field Information
Agencies Technical (1948)

/Hasterlik, 1964/

Hasterlik, R. J., Finkel, A. J., Miller, C. E.:

The cancer hazards of industrial and accidental exposure to radioactive isotopes,
Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 114, pp. 832-837 (1964)

/Holubar, 1973/

Holubar, K., Helm, F. und Klein, Edmund:

Hautkrebs durch radioaktiven Goldring,

Der Hautarzt 24, 489-91 (1973)

/Inouye, 1938/

Inouye, K. und Krebs, A.:

Strahlentherapie 61, p. 269 (1938)

/Janitzky, 1938/

Janitzky, A., Krebs, A. und Rajewski, B.:

Strahlentherapie 61, p. 254 (1938)

/Jaworowski, 1970/

Jaworowski, Z., Bilkiewicz, J., Zylics, E.:

Influence of industry on radioactive pollution of environment in:

Radioaktive Umgebungsverseuchungen,

Vorträge auf der Tagung der deutsch/polnischen Arbeitsgruppe, Warschau,

22.-24. Juni 1970

/Jaworowski, 1975/

Jaworowski, Z., Bilkiewicz, J., Bysiek, M., Grzybowska, D., Kowuacka, L. and
Wlodek, S.:

The influence on man and the environment of natural radionuclides and heavy
metals from industrial operation in:

Biological Implications of Metals in the Environment,

Symposium of the ERDA (1975)

/Looney, 1956/

Looney, W. B. and Archer, V. E.:

Radium Inhalation Accident-Radium Excretion Study,

Am. J. Roentgenol. Radium Therapy and Nuclear Med. 75, pp. 548-58 (1956)

/Lucas, 1963/

Lucas, H. F., Rowland, R. E., Miller, C. E., Holtzman, R. B., Hasterlik, R. J.
and Finkel, A. J.:

An Unusal Case of Radium Toxicity.

Am. J. Roentgenol. Radium Therapy and Nuclear Med. 90, pp. 1042-51 (1963)

/Muth, 1957/

Muth, H. und Schraub A.:

Über einen neuen Fall von gewerblicher Radiumvergiftung mit tödlichem Ausgang.

Strahlentherapie 102, p. 575 ff (1957)

/Peterson, 1954/

Peterson, O.:

Radiation Cancer.

Acta Radiol. 42, p. 221 ff (1954)

/Rajewsky, 1952/

Rajewski, B. und Muth, H.:

Untersuchungen zum Problem der Radium-Vergiftung,

Strahlentherapie 88, p. 261 ff (1952)

/Roth, 1951/

Roth, H.:

Über gewerbliche Radiumvergiftungen.

Deutsche medizinische Wochenschrift, 76, p. 776 (1951)

/Villforth, 1969/

Villforth, J. C., Robinson, E. W., Wold, G. J.:

A review of radium incidents in the United States of America in:

Proceedings of a Symposium on The Handling of Radiation Accidents,

IAEA-SM-119/26 (1969)

Literatur zu Abschnitt 3.6:

Strahlenbelastung durch natürlich vorkommendes Radium

/Allegrini, 1972/

Allegrini, M., De Bortoli, M., Gaglione, P., Lanzola, E., Mastinn, G. and Santaroni, P.:

Natural radioactivity levels in some drinking mineral water in Italy and related doses to the population in:

The Natural Radiation Environment, Proceedings of the Second International Symposium, Houston, Texas

ed. by J. A. S. Adams, W. M. Lowder and T. F. Gesell,
CONF-720805-P2 (1972)

/Aurand, 1974/

Aurand, K., Gans, I. und Rühle, H.:

Vorkommen natürlicher Radionuklide im Wasser, pp. 30-50 in:

Die natürliche Strahlenexposition des Menschen

(herausgegeben von K. Aurand)

Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1974)

/BMI, 1976-1979/

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung,

Jahresberichte des Bundesministeriums des Innern (1976-1979)

/Bortoli, 1972/

De Bortoli, M. and Gaglione, P.:

Radium-226 in environmental materials and foods,

Health Physics 22, pp. 43-48 (1972)

/Clajus, 1975/

Clajus, P.:

Zur Ökologie des Radiums.

Report SAAS - 183, Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR, Berlin (1975)

/Chhabra, 1966/

Chhabra, A. S.:

Radium-226 in food and man in Bombay and Kerala State (India).

Br. J. Radiol. 39, pp. 141-146 (1966)

/Comar, 1966/

Comar, C. L.:

Natural Radioactivity in the Biosphere and Foodstuffs in:

Toxicants Occuring Naturally in Foods,

Publication 1354, National Academy of Science, Washington D. C. (1966)

/Fisenne, 1970/

Fisenne, I. M. and Keller, H. W.:

USAEC Rep. No. HASL-234 (1970)

/Fritelli, 1973/

Fritelli, L., Martinn, G. G.:

Ra-226 doses due to bottle feeding.

Comitato Nazionale Energia Nucleare, RT/PROT (73) 4 (1973)

/Glöbel, 1974/

Glöbel, B., Muth, H. und Oberhausen, E.:

Interne Strahlenbelastung durch Ra-226 in:

Die natürliche Strahlenbelastung des Menschen,

hrsg. von K. Aurand et al.

Thieme-Verlag, Stuttgart (1974)

/Hardy, 1976/

Hardy, E. P. Jr.:

Environmental Radioactivity Annual Report 1974, Department of Health, New Zealand,

NRL-FI54, HASL-298-UC-11 (1976)

/ICRP 14, 1969/

ICRP Publication 14, Pergamon Press, London, p. 24 (1969)

/ICRP 20, 1972/

Alkaline Earth Metabolism in Adult Man,

A Report prepared by a task group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection,

Pergamon Press (1972); auch Health Physics 24, pp. 125-221 (1973)

/Jaworowski, 1974/

Jaworowski, Z., Bilkiewicz, J., Dobosz, E., Grzybowska, D., Kownacka, L.,
Wronski, Z.:

Radiation hazards to the population resulting from conventional and nuclear
electric power production, Proceedings of a Symposium on "Environmental Surveillance
around Nuclear Installations",
IAEA-SM 180/20 (1974)

/Kahlos, 1973/

Kahlos, H. and Asikainen, M.:

Natural radioactivity of ground water in the Helsinki area,
Institute of Radiation Physics Report,
SFL-A 19, Helsinki (1973)

/Lucas, 1961/

Lucas, H. F. Jr.:

Correlation of the natural radioactivity of the human body to that of its
environment:

Uptake and retention of Ra-226 from food and water,
Radiological Physics Division Semiannual Report, Argonne National Laboratory,
ANL-6297, pp. 55-66 (1961)

/Maeda, 1973/

Maeda, K., Abe, S., Kurokawa, Y., Minagawa, Y.:

Trial evaluation of the long-term survey of death causes in the population
living near radiation rich hot springs,

Proceedings of the Third International Congress of the International Radiation
Protection Association, Washington, D. C. - CONF-730907-P1 (1973)

/Mistry, 1970/

Mistry, K. B., Bharathan, K. G. and Gopal-Ayengar, A. R.:

Radioactivity in the diet of population of the Kerala coast including monazite
bearing high radiation areas.

Health Physics 19, pp. 535-542 (1970)

/Muth, 1960/

Muth, H., Rajewsky, B., Hantke, H. J. and Aurand, K.:

Health Phys. 2, p. 239 (1960)

/Petrow, 1965/

Petrow, H. G., Shiessle, W. J. and Cover, A. et al.:

Radiochemical analysis of Brazilian samples from regions of high natural radioactivity.

Part VI in: Radioactive Studies, New York University Medical Center Report No. NYO-3086-1 (1965)

/Polgar, 1970/

Polgar, E. and Kurcz, I.:

Health-physics investigations in the neighborhood of coal-fired power plants, Egeszseg tu domany 14, pp. 188-191 (in Hungarian) $\hat{=}$ ORNL-tr-2979 (1970)

/Röhnsch, 1974/

Röhnsch, W.:

Erfahrungen bei der Verwendung von Bergbauabraum mit erhöhtem Radionuklidgehalt, Staatliche Zentrale für Strahlenschutz, Report SZS-157 (1974)

/Smith, 1963/

Smith, K. A. and Watson, P. G.:

Agric. Res. Council Radiobiol. Lab., Rep. N. ARCRL-10, 90 (1963)

/Schraub, 1974/

Schraub, A.:

Natürliche Strahlenexposition, Atomkernenergie 23, pp. 127-136 (1974)

/Spencer, 1973/

Spencer, H., Kramer, L., Samachson, J., Fisenne, I. and Harley, N.:

Intake and excretion pattern of naturally occurring radium-226 in humans, Radiation Research 56, pp. 354-369 (1973)

/Spiers, 1957/

Spiers, F. W., Burch, P.:

Advances in Biological and Medical Physics, Bd. 5, p. 425, Academic Press, New York (1957)

/UNSCEAR, 1972/

United Nations

A Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, General Assembly, with annexes.

Volume I. Levels, Volume II: Effects (United Nations publication, Sales No. E. 72 IX 17 and 18), New York (1972)

Literatur zu Abschnitt 3.7: Verteilung von Radium im Körper; Vergleich verschiedener Radium-Isotope

3.7.1: Radium-Aufnahme und Radium-Gehalt

3.7.2: Radium-Retention und Radium-Exkretion

/BMI, 1977 bzw. 1978 oder 1979/

Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung,

Jahresbericht des Bundesministers des Innern (1977 bzw. 1978 oder 1979)

/Chhabra, 1966/

Chhabra, A. S.:

Radium-226 in food and man in Bombay and Kerala State (India),

Br. J. Radiol. 39, pp. 141-146 (1966)

/Chiacchierini, 1970/

Chiacchierini, R.P., Jessup, G. L., Nelson, N. S., Telles, N. C., Tompkins, E.,
Wright, J.:

A review of radium toxicity studies, BRH/DBE 70-5 (1970)

/Finkel, 1966/

Finkel, A. J., Miller, C. E. and Hasterlik, R. J.:

Correlation between retrospective estimates of maximum radium body burdens and
clinical findings in dial painters 40 years later,

III. International Congress of Radiation Research, Cortina d'Ampezzo (1966)

/Finkel, 1969a/

Finkel, A. J., Miller, C. E. and Hasterlik, R. J.:

Radium-induced malignant tumors in man, pp. 195-225 in:

Delayed Effects of Bone-Seeking Radionuclides, C. W. Mays et al. (ed),

University of Utah Press, Salt Lake City (1969)

/Finkel, 1969b/

Finkel, A. J., Miller, C. E. and Hasterlik, R. J.:

Radiological parameters in human cancers attributable to long-term radium
deposition, pp. 183-202 in:

Radiation-Induced Cancer, A. Ericson (ed.), International Atomic Energy Agency,
Vienna (1969)

/Grillmaier, 1968/

Grillmaier, R., Muth, H. und Oberhausen, E.:

Untersuchungen zum Stoffwechsel des Ra-224 (ThX) und Abschätzung der Strahlen-
dosen bei therapeutischer Anwendung,

Biophysik 4, 266-288 (1968)

/Hashimoto, 1976/

Hashimoto, E. G. and Jee, W. S. S.:

Cells at risk from bone-seeking radionuclides - a review, in:
Health Effects of Plutonium and Radium, Webster S. S. Jee (ed.),
Salt Lake City; Univ. of Utah, pp. 643-656 (1976)

/Holtzman, 1976/

Holtzman, R. B. and Simmons, D. J.:

The macrodistribution of Ra-226 in the skeleton of a radium dial painter, in:
Health Effects of Plutonium and Radium, Webster S. S. Jee (ed.),
Salt Lake City; Univ. of Utah, pp. 421-436 (1976)

/Hunt, 1963/

Hunt, Vilma, R., Radford, E. P. and Segall, A. J.:

Comparison of concentrations of alpha-emitting elements in teeth and bones,
Int. J. Rad. Biol., Vol. 7, No. 3, pp. 277-287 (1963)

/ICRP 20, 1973/

International Commission on Radiological Protection. Alkaline earth metabolism
in adult man.

Publication 20. Health Physics 24, pp. 125-221 (1973)

/ICRP 23, 1975/

International Commission on Radiological Protection. Report of the Task Group
on Reference Man.

Publication 23, Pergamon Press (1975)

/Kellerer, 1980/

Kellerer, A. M.:

Die lineare Dosis-Wirkungsbeziehung bei kleinen Dosen.
Jahrestagung Kerntechnik, Berlin (1980)

/Lenger, 1972/

Lenger, V., Houšková, M., Malátová, I.:

The radon emanating fraction in dial painters,
Health Physics 23, pp. 109-111 (1972)

/Lucas, 1974/

Lucas, H. F. and Markum, F.:

Ra-228 and Ra-226 in bone from radium cases, in: Radiological and Environmental Research Division Annual Report, July 1973 - June 1974, Argonne National Laboratory, ANL-75-3 (Pt. 2) (1974)

/Marinelli, 1958/

Marinelli, L., Lucas, H., Gustafson, P. and Miller, C.:

Excretion and retention of Ra-226 in humans: a 2312 day follow-up of a single inhalation case.

ANL 5967 (1958)

/Marinelli, 1962/

Marinelli, L. D., Miller, C. E. and Lucas, H. F.:

Radiology 78, p. 544 (1962)

/Marshall, 1972/

Marshall, J. H., Lloyd, E. L., Rundo, J., Liniecki, J., Marotti, G., Mays, C. W., Sissons, H. A. and Snyder, W. S.:

Alkaline earth metabolism in adult man in:

Radiological and Environmental Research Division Annual Report, Argonne National Laboratory, ANL-7960 Part II (1972)

/Marshall, 1974/

Marshall, J. H. and Hoegerman, S. F.:

Estimation of alpha-particle dose from Ra-226 to blood, in: Radiological and Environmental Research Division Annual Report, July 1973 - June 1974, Argonne National Laboratory, ANL-73-3 (Pt. 2) (1974)

/Marshall, 1975/

Marshall, J. H. and Groer, P. G.:

Theory of the induction of bone cancer by radiation:

A three-stage alpha particle model and the data for radium in man, Radiological and Environmental Research Division Annual Report, July 1974 - June 1975,

Argonne National Laboratory, ANL-75-60 (Pt.2) (1975)

/Marshall, 1976/

Marshall, J. H. and Groer, P. G.:

A theory of the induction of bone cancer by alpha radiation: a summary, in:
Health Effects of Plutonium and Radium, Webster S. S. Jee (ed.),
Salt Lake City; Univ. of Utah, pp. 717-728 (1976)

/Miller, 1968/

Miller, C. E. and Finkel, A. J.:

Radium retention in man after multiple injections,
Am. J. Roentgenol. 103, pp. 871-880 (1968)

/Norris, 1948/

Norris, W. P. and Kisielleski, W.:

Comparative metabolism of radium, strontium and calcium,
in: ColdSpring Harbour Symposia on Quantitative Biology, Vol. III, pp. 164-172
(1948)

/Norris, 1955/

Norris, W. P., Speckmann, W. and Gustafson, P. F.:

Studies of the metabolism of radium in man,
Am. J. Roentgenol. 73, pp. 785-802 (1955)

/Oberhausen, 1966/

Oberhausen, E.:

Die Strahlendosis und deren zeitlicher Verlauf nach Inkorporation von Ra-226
und Radium-224 (ThX-Therapie). In: Biophysikalische Probleme der Strahlenwirkung.
Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biophysik 23./24.4.1965, Homburg/Saar.
Thieme-Verlag, Stuttgart (1966)

/Rowland, 1960/

Rowland, R. E.:

Late observations of the distribution of radium in the human skeleton.
Radioisotopes in the biosphere (R. S. Caldecott and L. A. Snyder, eds.) (1960)

/Rundo, 1976a/

Rundo, J., Essling, M. A. and Huff, D. R.:

Gross distribution of Ra-226 in man from external counting, in:
Health Effects of Plutonium and Radium, Webster S. S. Jee (ed.),
Salt Lake City; Univ. of Utah, pp. 409-420 (1976)

/Rundo, 1976b/

Rundo, J. and Holtzman, R. B.:

Comparison of the late excretion of Ra-226 and Pu-239 by man, in:
Health Effects of Plutonium and Radium, Webster S. S. Jee (ed.),
Salt Lake City; Univ. of Utah, pp. 497-594 (1976)

/Schales, 1964/

Schales, F.:

The excretion of Thorium X and its daughter products after intravenous injection in man. In: Assessment of radioactivity in man. Vol. II, p. 267,
Wien: IAEA (1964)

/Schales, 1965/

Schales, F.:

Strahlenbelastung bei der therapeutischen Anwendung von Thorium X (Radium-224)
XI. International Congress of Radiologie, Sept. 22-28, 1965, Rom,
AED-CONF-65-380 (1965)

/Schales, 1966a/

Schales, F.:

Biophysikalische Untersuchungen über Verteilung und Ausscheidung von Thorium X (Ra-224) und seinen Folgeprodukten nach intravenöser Zufuhr beim Menschen.
Inaugural-Dissertation, Frankfurt am Main (1966)

/Schales, 1966b/

Schales, F.:

Strahlenbelastung bei der therapeutischen Anwendung von Thorium-X (Ra-224).
Strahlentherapie 130, 420 (1966)

/Spiers, 1953/

Spiers, F. W.:

Alpha-ray dosage in bone containing radium.

Brit. J. Radiol. 26, p. 296 (1953)

/Spiers, 1966/

Spiers, F. W.:

A review of the theoretical and experimental methods of determining dose in bone.

Brit. J. Radiol. 39, p. 216 (1966)

/Stahlhofen, 1964/

Stahlhofen, W.:

Der natürliche Gehalt des menschlichen Körpers an alphastrahlenden Nukliden,

Dissertation, Universität Frankfurt am Main (1964)

/Stark, 1968/

Stark, G.:

Untersuchungen an synthetischem Hydroxylapatit im Hinblick auf den Knochenstoffwechsel von Calcium, Strontium, Barium und Radium,

Biophysik 5, pp. 42-65 (1968)

/Stover, 1970/

Stover, B. J. and Eyring, H.:

The dynamics of life I. Death from internal irradiation by Pu-239 und Ra-226, aging, cancer and other diseases, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 66, No. 1, pp. 132-39 (1970)

/UNSCEAR, 1977/

Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

1977 Report to the General Assembly, with annexes, New York (1977)

/Wenger, 1975/

Wenger, P. and Soucas, K.:

Retention and excretion curves of persons containing strontium-90 and radium-226 after a chronic contamination.

Health Physics 28, pp. 145-152 (1975)

Literatur zu Abschnitt 4: Tierversuche mit Radium

4.1: Frühe Tierversuche

4.2: Neuere Untersuchungen

4.3: Beagle-Hunde

4.4: Verschiedene Versuchstiere, insbesondere Nagetiere

4.5: Zusammenfassende Studien

/Chiacchierini, 1970/

Chiacchierini, R. P., Jessup, G. L., Nelson, N. S., Telles, N. C., Tompkins, E. A. and Wright, J. F.:

A review of radium toxicity studies,
U. S. Department of Health, Education and Welfare,
BRH/DBE 70-5 (1970)

/Davis, 1969/

Annual Report of the University of California,
Davis, Radiobiology, UCD472-116 (1969)

/Van Dilla, 1958/

Van Dilla, M. A., Stover, B. J., Floyd, R. L., Atherton, D. R. and Taysum, D. H.,
Ra-226 and Rn-222 metabolism in dogs,
Rad. Res. 8, 417 (1958)

/Dougherty, 1969/

Dougherty, T. F. and Mays, C. W.:

Bone cancer induced by internally-deposited emitters in beagles, pp. 361-367 in:
Radiation-Induced Cancer, A. Ericson (ed.)
International Atomic Energy Agency, Vienna (1969)

/Finkel, 1969/

Finkel, M. P., Biskis, B. O. and Jinkins, P. B.:

Toxicity of radium-226 in mice, pp. 369-391 in:
Radiation Induced Cancer, A. Ericson (ed.)
International Atomic Energy Agency, Vienna (1969)

/Goldman, 1975/

Goldman, M., Rosenblatt, L. S.:

Some speculations on the role of radiation quality on "injury" and tumor risk
from bone seeking radionuclides, pp. 151-153,
Annual Report of the Radiobiology Laboratory, School of Veterinary Medicine,
University of California, Davis (1975)

/Gridgeman, 1971/

Gridgeman, N. T.:

Methods of assay of the relative toxicity of certain bone-seeking radionuclides,
Radiation Research 48, pp. 291-302 (1971)

/Jacobson, 1948/

Jacobson, L. O. and Simmons, E. L.:

Studies of the metabolism and toxic action of injected radium. Part II. The
hematological effects of parenterally administered radium; a comparison of
plutonium and radium effects,
AECD-2372 (CH-3884) (1948)

/Kaul, 1969/

Kaul, A., Heyder, J.:

Änderung der zeitlich-räumlichen Verteilung von Ra-228 und Ra-224 im RES und mark-
freien Skelett nach Inkorporierung von kolloidalem ThO₂ (Thorotrast),
Biophysik 5, pp. 331-340 (1969)

/Kaul, 1970/

Kaul, A., Heyder, J.:

Kinetik der Verteilung und Ausscheidung von Radium-Isotopen nach Thorotrast-
injektion,
Biophysik 7, pp. 74-84 (1970)

/Klener, 1973/

Klener, V., Kofránek, V., Onyskiová, Z., Holuša, R. and Svoboda, V.:

The late effects induced by Ra-226 in mice,
in: Health Physics Problems of Internal Contamination, Proceedings of the IRPA
Second European Congress on Radiation Protection,
Budapest (1973)

/Marshall, 1972/

Marshall, J. H. and Lloyd, E.:

Toxicity of Pu-239 relative to Ra-226 in man and dog, in:
Radiobiology of Plutonium, ed. by B. J. Stover and W. S. S. Jee, Utah (1972)

/Marshall, 1973/

Marshall, J. H. and Lloyd, E.:

The effect of the remodeling of bone upon the relative toxicities of radium and plutonium in man and dog, in: Radionuclide Carcinogenesis, Ed. C. L. Sanders et al., U. S. Atomic Energy Commission Publication, CONF-720555, pp. 421-436 (1973)

/Meyer, 1906/

Meyer, G. M.:

The fate of radium after its introduction in to the animal organism, with some remarks on the excretion of barium,
Journal of Biological Chemistry, Vol. 2, pp. 461-479 (1906)

/van Middlesworth, 1975/

van Middlesworth, L. and Robinson, W. L.:

Thyroid concentration of barium and radium,
International Journal of Nuclear Medicine and Biology, Vol. 2, pp. 1-4 (1975)

/Moskalev, 1974/

Moskalev, Yu. I.:

Experiments dealing with distribution of thorium-X, a radium-isotope.
Translated from pp. 29-34 of: Raspredelenie, Biologicheskoe Deistirie, Uskovenie Vyvedeniya Radioaktivnykh Izotopov, Meditsina, Moscow, 1964 in:
Distribution, Biological Effects and Accelerated Excretion of Radioactive Isotopes, AEC-W-7590 (1974)

/Salant, 1907/

Salant, W. and Meyer, G. M.:

The elimination of radium from normal and nephrectomized animals,
Am. J. Physiol. 20, pp. 366-377 (1907)

/Smith, 1911/

Smith, E. B.:

The distribution and excretion of radium and its emanation after internal administration,
Quarterly Journal of Medicine, Oxford, 5, pp. 249-265 (1911)

/Spiers, 1974/

Spiers, F. W.:

Radionuclide and bone - from Ra-226 to Sr-90,
The British Journal of Radiology, Vol. 47, pp. 833-844 (1974)

/Stover, 1970/

Stover, B. J. and Eyring, H.:

The dynamics of life. I. Death from internal irradiation by Pu-239 and Ra-226,
aging, cancer, and other diseases, Proceedings of the National Academy of
Sciences, Vol. 66, pp. 132-139 (1970)

/Taylor, 1976/

Taylor, G. N., Jee, W. S. S., Mays, C. W.:

Some similarities of radium and plutonium toxicity in the beagle and man, in:
The Health Effects of Plutonium and Radium, Webster, S. S. Jee (ed.),
Salt Lake City; Univ. of Utah, pp. 523-536 (1976)

/Utah, 1969/

Annual Report of the University of Utah,
Work in Progress in the Internal Irradiation Program,
C00-119-240 (1969)

Literatur zu Abschnitt 5:

Dosis-Wirkungs-Beziehung bei der Krebsentstehung

/Ellett, 1977/

Ellett, W. H.:

Recent advances in understanding the risk due to the inhalation of radon daughters. Paper at the Radon Workshop, February 1977, Energy Research and Development Administration, New York, HASL-325, pp. 102-104 (1977)

/Evans, 1967/

Evans, R. D.:

The radium standard for bone seekers - Evaluation of the data on radium patients and dial painters,
Health Physics 13, pp. 267-278 (1967)

/Evans, 1969/

Evans, R. D., Keane, A. T., Kolenkow, R. J., Neal, W. R. and Shanahan, M. M.:

Radiogenic tumors in the radium and mesothorium cases studied at M.I.T. in:

Delayed effects of bone-seeking radionuclides,

Mays, C. W., Jee, W. S. S., Lloyd, R. D., Stover, B. J., Dougherty, J. H. and

Taylor, G. N. eds., University of Utah Press, Salt Lake City,

pp. 157-194 (1969)

/Evans, 1974/

Evans, R. D.:

Radium in man,

Health Physics 27, pp. 497-510 (1974)

/Failla, 1972/

Failla, P. and Rowland, R. E.:

Causes of death in the human radium population in:

Radiological and Environmental Research Division Annual Report,

ANL-7960, Part II (1972)

/Finkel, 1969/

Finkel, A. J., Miller, C. E. and Hasterlik, R. J.:
Radium induced malignant tumors in man in: Delayed Effects of Bone-
Seeking Radionuclides, pp. 195-225, ed. by C. W. Mays et al.,
University of Utah Press, Salt Lake City (1969)

/ICRP 3, 1959/

International Commission on Radiological Protection, Report of Committee II on
Permissible Dose for Internal Radiation,
ICRP-Publication 3, Pergamon Press, New York (1959)

/ICRP 20, 1973/

International Commission on Radiological Protection, Report of a Task Group of
Committee 2, Alkaline earth metabolism in adult man,
ICRP-Publication 20, Pergamon Press, Oxford (1973)

/ICRP 23, 1975/

International Commission on Radiological Protection,
Report of the Task Group on Reference Man,
ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford (1975)

/Kaul, 1973/

Kaul, A.:
Mean organ dose rates in man following intravascular injection of thorotrast,
pp. 40-51 in: Proceedings of the
Third International Meeting on the Toxicity of Thorotrast,
The Finsen Institute, Copenhagen 1973, Risø Report No. 294,
Danish Atomic Energy Commission Research Establishment Risø, Copenhagen (1973)

/Loutit, 1970/

Loutit, J. F.:
Malignancy from radium,
British Journal of Cancer, Vol. 24, pp. 195-207 (1970)

/Luz, 1972/

Luz, A., Müller, W. A., Gössner, W., Hindringer, B. and Hug, D.:
The role of dose and dose-protraction for the induction of osteosarcomas after
incorporation of short-lived α -emitting bone-seekers, Rome:
9th Annual Meeting of the European Society for Radiation Biology (1972)

/Marshall, 1975/

Marshall, J. H. and Groer, P. G.:
Theory of the induction of bone cancer by radiation,
A preliminary report. I
A three-stage alpha particle model and the data for radium in man in:
Radiological and Environmental Research Division Annual Report, ANL-75-60,
Part II (1975)

/Marshall, 1976/

Marshall, J. H. and Groer, P. G.:
A theory of the induction of bone cancer by alpha radiation: A summary in:
The Health Effects of Plutonium and Radium, ed. by W. S. S. Jee, Utah (1976)

/Marshall, 1978/

Marshall, J. H., Groer, P. G. and Schlenker, R. A.:
Dose to endosteal cells and relative distribution factors for radium-224 and
plutonium-239 compared to radium-226,
Health Physics 35, pp. 91-101 (1978)

/Mays, 1973/

Mays, C. W.:
Cancer induction in man from internal radioactivity,
Health Physics 25, pp. 585-592 (1973)

/NYO, 1968/

Epidemiological follow-up of the New Jersey radium cases.
Final Report, November 1957 - June 1967. New Jersey State Dept. of Health,
West Orange, Radium Research Project, p. 613 (1968)

/Pusey, 1911/

Pusey, W. A.:

The biological effects of radium,
Science 33, pp. 1001-1005 (1911)

/Rowland, 1973/

Rowland, R. E., Keane, A. T. and Lucas, H. F. Jr.:

A preliminary comparison of the carcinogenicity of Ra-226 and Ra-228 in man.
Pages 406-420 in Radionuclide Carcinogenicity,
U. S. Atomic Energy Commission Office of Information Services, Washington, D. C.
(1973)

/Rowland, 1975/

Rowland, R. E. and Durbin, P. W.:

Survival, causes of death and estimated tissue doses in a group of human beings
injected with plutonium,
Prepared for the Workshop on the Biological Effects and Toxicity of Pu-239 and
Ra-226,
Sun Valley, Idaho (1975)

/Schubert, 1958/

Schubert, J. and Lapp, R. E.:

Global Radiation Limits,
Bulletin of the Atomic Scientists 14, pp. 23-26 (1958)

/Von Seggen, 1974/

Von Seggen, W., Farnham, J. and Schlenker, R. A.:

An example of skeletal variability of bone mineral content caused by internally
deposited radium-226. In: Radiological and Environmental Research Division Annual
Report, July 1973 - June 1974,
Argonne National Laboratory, ANL-75-3 (Pt. 2), pp. 98-104 (1974)

/Spiers, 1976/

Spiers, F. W. and Whitwell, J. R. :

Dosimetry of Pu-239 and Ra-226 in man and animals in:
The Health Effects of Plutonium and Radium, ed. by W. S. S. Jee,
Salt Lake City, Utah (1976)

/Spiess, 1970a/

Spiess, H. and Mays, C. W.:

Bone cancers induced by Ra-224 (Th X) in children and adults,
Health Physics 19, pp. 713-729 (1970)

/Spiess, 1970b/

Spiess, H. and Mays, C. W.:

Spätschäden nach Ra-224-Injektionen bei Menschen,
Monatsschrift für Kinderheilkunde, Berlin, 119, No. 6, pp. 224-226 (1970)

/Stehney, 1971/

Stehney, A. F. and Rowland, R. E.:

Tumor incidence and life span of human radium cases in:
Contamination par radionuclides ostéotropes et radioprotection,
5. Congrès International de la Société Française de Radioprotection, Grenoble (1971)

/Stehney, 1972/

Stehney, A. F., Lucas, H. F. Jr. and Rowland, R. E.:

The time distribution of deaths of women radium dial painters with measured
body burdens of radium in: Radiological and Environmental Research Division
Annual Report,
ANL-7960, Part II (1972)

/Strel'tsova, 1964/

Strel'tsova, V. N., Moskalev, Ju. I.:

Blastomogenic action of ionizing radiation,
Moscow - in AEC-tr-7595 (1964)

/UNSCEAR, 1972/

Report of the United Nations Committee on the effects of atomic radiations,
p. 9 in Vol. I and pp. 303-358 in Vol. II, United Nations, New York (1972)

Literatur zu Abschnitt 6: Publikationen der ICRP und Grenzwerte für Radium

6.1: Frühe Grenzwerte

6.2: ICRP-Grenzwerte

/Evans, 1966/

Evans, R. D.:

The effect of skeletally deposited alpha-ray emitters in man (Silvanus, Thompson Memorial Lecture)

Br. J. Radiol. 39, pp. 881-895 (1966)

/Evans, 1967/

Evans, R. D.:

The radium standard for boneseekers - evaluation of the data on radium patients and dial painters,

Health Physics 13, pp. 267-278 (1967)

/ICRP 2, 1959/

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Report of Committee 2 on Permissible Dose for Internal Radiation,

ICRP-Publication 2, Pergamon Press, London (1959)

/ICRP 6, 1964/

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,

Report on Permissible Doses for Internal Radiation, as amended 1959 and revised 1962,

ICRP-Publication 6, Pergamon Press, London (1964)

/ICRP 9, 1966/

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, adopted September 17, 1965,

ICRP-Publication 9, Pergamon Press, Oxford (1966)

/ICRP 10, 1968/

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Report of Committee IV on Evaluation of Radiation Dose to Body Tissues

from Internal Contamination due to Occupational Exposure,

Pergamon Press (1968)

bzw.

Veröffentlichungen der internationalen Strahlenschutzkommission,
herausgegeben von BGA. Ermittlung der Körperdosis bei beruflich strahlen-
exponierten Personen nach Inkorporation radioaktiver Stoffe.
Abschätzung der Körperdosis nach sich wiederholenden oder länger andauernden
Aufnahmen radioaktiver Stoffe.
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. New York (1978)

/ICRP 10a, 1969/

The assessment of internal contamination resulting from recurrent or prolonged
uptake, A Report by Committee 4 of the International Commission on Radiological
Protection,
ICRP-Publication 10a, Pergamon Press (1969)

/ICRP 11, 1967/

A review of the radioactivity of the tissues in bone, A Report Prepared for
Committees 1 and 2 of the International Commission on Radiological Protection,
ICRP-Publication 11, Pergamon Press (1967)

/ICRP 20, 1972/

Alkaline Earth Metabolism in Adult Man,
A Report prepared by a task group of Committee 2 of the International Commission
on Radiological Protection,
Pergamon Press (1972); auch Health Physics 24, pp. 125-221 (1973)

/ICRP 24, 1977/

Radiation Protection in Uranium and other Mines,
ICRP-Publication No. 24, Annals of the ICRP, Vol. I,
Pergamon Press (1977)

/ICRP 30, 1979/

Limits for Intakes of Radionuklide by Workers, Annals of the ICRP,
ICRP-Publication 30, Part I,
Pergamon Press (1979)

/Mole, 1966/

Mole, R. H.:

Personal communication, quoted in ICRP 11.(1966)

/StrlSchV, 1976/

Verordnung über den Schutz von Schäden durch ionisierende Strahlen

(Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 13. Oktober 1976,

Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 125

Literatur zu Abschnitt 7:

Transferfaktoren

/Berechnungsgrundlage, 1980/

Allgemeine Berechnungsgrundlage für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer.

Bundesministerium des Innern, Bonn,

Gemeinsames Ministerialbl., A. v. 31(30) p. 576-577 (1980)

/BMI, 1980/

Der Bundesminister des Innern,

Statusbericht über den Transfer von Radionukliden,

Bonn (1980)

/Bortoli, 1972/

De Bortoli, M. and Gaglione, P.:

Radium-226 in environmental materials and foods,

Health Physics 22, pp. 43-48 (1972)

/Clajus, 1975/

Clajus, P.:

Zur Ökologie des Radiums - Literaturbericht,

Report SAAS-183, Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR, Berlin (1975)

/Davy, 1975/

Davy, D. R.:

Rum Jungle environmental studies,

Australian Atomic Energy Commission Research Establishment, Lucas Heights, AAEC/E-365 Chapter 8+9 (1975)

/Ettenhuber, 1975/

Ettenhuber, E., Clajus, P., Röhnsch, W.:

Bestimmung der Akkumulationsfaktoren Fisch/Wasser einiger für die Strahlenbelastung des Menschen wichtiger Radionuklide,

Report SAAS-175, Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz, Berlin/DDR (1975)

/Heit, 1977/

Heit, M.:

A review of current information on some ecological and health related aspects of the release of trace metals into the environment associated with the combustion of coal,
HASL-320 (1977)

/Russel, 1966/

Russel, R. S.:

Radioactivity and Human Diet,
Pergamon Press, Oxford (1966)

/Schüttelkopf, 1979/

Schüttelkopf, H., Kiefer, H.:

Die Dosisbelastung der Umgebungsbevölkerung durch natürliches und aus einem Uranbergwerk emittiertes Ra-226 - Radioökologische Untersuchungen im Feldberggebiet,
KfK 2866 (1979)

/Souza, 1969/

D'Souza, R. J., Mistry, K. B.:

Comparative uptake of thorium-230, radium-226, lead-210 and polonium-210 by plants,
Radiation Botany 10, pp. 293-295 (1970)

/Verkhovskaya, 1972/

Verkhovskaya, I. N., Vavilov, P. P. and Maslov, V. I.:

Distribution and redistribution of uranium, radium and thorium in natural biogeocenoses, Translated from pp. 243-256 of Radioekologicheskie Issledovaniya v Prirodnykh Biogeotsenozakh, Izdatel'stvo Nauk, Moskau (1972)