

Biologische Auswirkungen kleiner Strahlendosen

Autor(en): **Yalow, Rosalyn S.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 2

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904148>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Biologische Auswirkungen kleiner Strahlendosen

Rosalyn S. Yalow

Gibt es Strahlendosen, unterhalb deren man gesundheitsschädigende Wirkungen nicht wahrnehmen kann? Diese Frage ist Gegenstand des hier wiedergegebenen Vortrages der Nobelpreisträgerin. Aufgrund der Analyse zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten ist für sie die Antwort ein eindeutiges Ja.

Existe-t-il des doses d'irradiation au-dessous desquelles tout effet nuisible à la santé ne peut être observé? Cette question est le thème de l'exposé présenté par la lauréate du prix Nobel, exposé qui est reproduit ici. La réponse tirée de l'analyse de nombreux travaux scientifiques est pour elle un «oui» clair et net.

Leicht gekürzte Fassung eines Vortrages, gehalten am 20. September 1985 anlässlich der Tagung des Forums für Wissenschaft und Energie zum Thema «Kernenergie im Risikovergleich heute» in Basel

Übersetzung aus dem Englischen:
Dr. Irene H. Leupin

Adresse des Autors

Dr. Rosalyn S. Yalow, Veterans Administration Medical Center, New York USA

1. Was ist eine kleine Strahlendosis?

Wir leben in einer Welt, in der die Vorstellung von der Realität allzuoft mit der Realität selbst verwechselt wird. In wenigen Gebieten herrscht diesbezüglich mehr Konfusion als in jenem der Wahrnehmung der Risiken betreffend kleine Strahlendosen und schwach radioaktive Abfälle. Teilweise hängt die Angst vor Strahlung mit der Assoziation von Strahlung und Radioaktivität mit Atombombenversuchen und Atomkrieg zusammen. In den Vereinigten Staaten hat sie derartige Formen angenommen, dass das neue medizinische Abbildungsverfahren «Nuclear Magnetic Resonance» oder «NMR» zu «Magnetic Resonance» oder «MR» umbenannt wurde. Dies nur, um das ungünstige Wort «nuclear» zu vermeiden.

Nachfolgend soll allerdings nicht von Philosophie die Rede sein, sondern davon, was bezüglich gesundheitlicher Auswirkungen und speziell des krebserzeugenden Effektes von kleinen Dosen locker ionisierender Strahlung wissenschaftlich feststeht. Da es zu diesem Thema Zehntausende von Arbeiten gibt, können hier nur einige ausgewählte Studien diskutiert werden.

Zum besseren Verständnis sollen zunächst einige Einheiten definiert werden: Ein «rad» ist die Einheit für absorbierte Dosen oder absorbierte Energie von ionisierender Strahlung pro Masseneinheit und entspricht 100 erg/g. Dicht ionisierende Strahlung wie beispielsweise jene von α -Teilchen, Protonen oder schnellen Neutronen hat eher schädliche biologische Auswirkungen zur Folge als locker ionisierende Strahlung wie im Falle von β -, γ - oder Röntgen-Strahlung. Ein «rem» ist die Einheit für die relative biologische Wirksamkeit von locker ionisierender Strahlung und dicht ionisierender Strahlung. Ein rem ent-

spricht einer absorbierten Dosis, die die gleichen biologischen Auswirkungen hat wie 1 rad locker ionisierender Strahlung, d.h., rad und rem sind in diesem Falle austauschbar. Die relative biologische Wirksamkeit ist nicht für alle ionisierenden Partikel gleich, sondern hängt bis zu einem gewissen Grad sowohl von deren Energie als auch von der beobachteten biologischen Wirkung ab.

Die Frage ist nun: «Was ist eine kleine Strahlendosis?» oder, anders ausgedrückt: Gibt es Strahlendosen, für welche keine schädigenden Auswirkungen festgestellt werden können? Vieles, was man heute über die biologischen Auswirkungen von ionisierenden Strahlen weiss, geht zurück auf epidemiologische Studien an Menschen, die hohen Dosen und/oder hohen Dosisraten ausgesetzt waren. In

«In wenigen Gebieten herrscht mehr Konfusion als in jenem der Wahrnehmung der Risiken betreffend kleiner Strahlendosen ...»

den letzten dreissig Jahren haben nationale und internationale Gremien, die sich mit Strahlenschutz-Richtlinien beschäftigen, die Hypothese der linearen Dosis-Wirkung-Extrapolation ohne jeglichen Grenzwert akzeptiert. Dies basierte auf der Annahme, dass dadurch ein grosszügiger Sicherheitsfaktor für die Voraussage von möglichen strahlenbedingten Schädigungen gegeben sei. Gemäss dieser Hypothese wäre unter 100 000 Menschen, von denen jeder 100 rem erhalten würde, die gleiche Anzahl von strahlenbedingten Krebsfällen oder anderen biologischen Auswirkungen zu finden wie unter 100 Millionen Menschen, von denen jeder 100 mrem bekäme.

Kann diese Hypothese überprüft werden? Um dieses Konzept in die richtige Perspektive zu rücken, sei daran erinnert, dass ungefähr 80 000 Menschen die Bombardierungen Hiroshimas und Nagasakis überlebt haben. Sie empfangen Dosen von weniger als 400 rem. Um mit einfachen Zahlen rechnen zu können, sei angenommen, dass eine Gruppe von 100 000 Menschen einer Strahlendosis von etwa 100 rem ausgesetzt wurde. In nahezu drei Jahrzehnten gab es in dieser Gruppe weniger als 200 zusätzliche strahlenbedingte Todesfälle.

In den meisten Gebieten der Vereinigten Staaten beträgt nun die natürliche Untergrundstrahlung etwa 100 mrem/Jahr, dies aufgrund der kosmischen Strahlung, der natürlichen Radioaktivität des Bodens und von Baumaterialien sowie der körpereigenen Radioaktivität von Lebewesen, wobei die drei Gruppen etwa zu gleichen Teilen, nämlich je einem Drittel, zum Gesamtwert von 100 mrem/Jahr beitragen. Wenn die Hypothese der linearen Extrapolation, basierend auf den Erfahrungen in Japan, gültig wäre, so müsste man ungefähr 200 Todesfälle aufgrund der natürlichen radioaktiven Strahlung erwarten. Da es aber unter 100 Millionen Amerikanern jährlich etwa 200 000 Krebstodesfälle gibt, würden die natürlichen Schwankungen dieser Todesfallrate die Feststellung von wenigen hundert Todesfällen, die der natürlichen ionisierenden Strahlung zuzuschreiben wären, nicht erlauben. Dennoch halten einige Experten daran fest, dass die Extrapolation aus der japanischen Erfahrung die potentiellen Risiken von kleinen Strahlenmengen bei weitem unterschätzt. Kann dies nachgeprüft werden?

2. Keine Beeinträchtigungen feststellbar selbst bei erhöhter Strahlenbelastung

Eine Anzahl von Studien versucht, gesundheitsschädigende Auswirkungen in Gebieten zu finden, wo eine erhöhte natürliche Radioaktivität vorliegt. Eine solche Untersuchung wurde in China betreffend 150 000 Han-Bauern mit im wesentlichen gleichen genetischen Anlagen und Lebensgewohnheiten gemacht. Die Hälfte von ihnen lebte in einem Gebiet, wo sie einer fast dreimal höheren Strahlenbelastung aufgrund der Radioaktivität des Bo-

dens ausgesetzt waren. Mehr als 90% der Vorfahren der stärker exponierten Gruppe hatten über mehr als sechs Generationen im gleichen Gebiet gelebt. Bei dieser Untersuchung wurde der Strahlenpegel durch direkte Dosimetrie bestimmt und eine Anzahl von möglichen strahlenbedingten gesundheitlichen Störungen, wie chromosomalen Aberrationen von peripheren Lymphozyten, Häufigkeiten von Erbkrankheiten und Deformationen, bösartigen Tumoren sowie Wachstum und Entwicklung von Kindern und dem Zustand von spontanen Frühgeburten, ausgewertet. Es gelang jedoch nicht, einen wahrnehmbaren Unterschied zwischen den Bewohnern der beiden Gebiete zu finden. Die Autoren der Studie schlossen daraus, dass es entweder einen Grenzwert für die Auswirkungen von Strahlung gebe oder dass die Auswirkungen so gering seien, dass die kumulierte Strahlenexposition bis zum Dreifachen der natürlichen Untergrundradioaktivität zu keiner messbaren Schädigung der nächsten sechs oder mehr Generationen führe.

In Indien und Brasilien gibt es Gebiete, wo die natürliche Untergrundstrahlung bis zu zehnmal höher als üblich ist (~ 1 rem/Jahr). Dennoch konnten dort auch nach intensiver Suche keine Gesundheitsschädigungen gefunden werden. Dies überrascht nicht, da, sogar wenn die lineare Extrapolations-Hypothese gültig wäre, die involvierte Bevölkerung allzu klein wäre, um eine erhöhte Anzahl bösartiger Krankheiten über den natürlichen Schwankungen feststellen zu können. Immerhin geben diese Studien Einblick in die Schwierigkeiten beim Abschätzen von Wahrscheinlichkeiten beim kausalen Zusammenhang mit kleinen Dosen und Dosisraten.

Erlauben epidemiologische Studien, die Gültigkeit der linearen Extrapolations-Hypothese durch Abschätzung der Auswirkungen von geringen Dosen und Dosisraten zu überprüfen? Die Antwort ist eindeutig nein. Wie Land gezeigt hat, wäre, um diese Hypothese zu überprüfen, im Falle von strahlenbedingtem Brustkrebs die Beobachtung von 100 Millionen Frauen notwendig, um mit Sicherheit radiologische Folgen einer einmaligen Belastung von 1 rem für beide Brüste im Alter von 35 Jahren nachzuweisen. Eine solche Probengröße ist praktisch nicht erreichbar, weshalb ein Fall-Kontroll-Vorgehen verwendet wird, wo die Probe aus einer fixen Anzahl

von Krebsfällen und einer festen Anzahl von entsprechenden, gesunden Kontrollpersonen besteht. Land hat berechnet, dass für dieses Probeverfahren nur 1 Million Frauen notwendig wären, um mit Sicherheit Strahlenauswirkungen von 1 rem nachweisen zu können. Natürlich wird beim Fall-Kontroll-Vorgehen nie eine genügend grosse Anzahl von Personen berücksichtigt, und es gibt auch keine zufällige Wahl von Fällen und Kontrollen. Daher haben diese Daten auch *keine statistische Signifikanz*, und geringste Zweifel könnten leicht zu vermeintlich beobachteten Auswirkungen führen.

Während fast 30 Jahren akzeptierter Strahlenschutz-Kommissionen die lineare Extrapolationshypothese ohne Berücksichtigung von Korrekturen für Dosisraten, gestützt darauf, dass sie die potentiellen strahlenbedingten Risiken überschätzt. Daraus ist der Eindruck erwachsen, es sei eine begründete Tatsache, dass jeglicher Strahlenpegel, wie gering er auch sei, Risiken mit sich bringe – selbst dann, wenn letztere nicht messbar sind. Aus dem letzten Bericht des National Academy of Sciences Committee on the Biologic Effects of Ionizing Radiation (BEIR-III-Report) ging hervor, dass eine linear-quadratische Extrapolation zu bevorzugen wäre. Weiter wurde festgehalten, dass die wissenschaftliche Basis für die Abschätzung karzinogener Risiken von Ganzkörper-Bestrahlungen mit kleinen Dosen ungenügend sei. Daten, welche eine Entscheidung

«... ist der Eindruck erwachsen, es sei eine begründete Tatsache, dass jeglicher Strahlenpegel, wie gering er auch sei, Risiken mit sich bringe – selbst dann, wenn letztere nicht messbar sind.»

erlauben würden, ob es irgendein Risiko im Zusammenhang mit Strahlung von Dosen unter 10 rad gebe, seien schlicht nicht verfügbar.

Es gibt eine grosse Gruppe von Personen mit Ganzkörperbestrahlung in diesem Dosisbereich, nämlich Patienten, die mit radioaktivem Jod (¹³¹J) gegen Schilddrüsenüberfunktion behandelt worden sind. Bis 1968 wurde diese Gruppe auf 200 000 Menschen geschätzt; seither dürfte sich ihre Zahl verdoppelt haben. Eine Auswertung von 36 000 Patienten mit Schilddrü-

senüberfunktion aus 26 medizinischen Zentren, von denen 22 000 mit einer einmaligen Applikation von ^{131}J behandelt wurden, während die übrigen meist einer chirurgischen Therapie unterzogen wurden, ergab keinen Unterschied bezüglich des Auftretens von Leukämie in den beiden Gruppen. Die mittlere Knochenmark-Dosis betrug zwischen 8 und 10 rad, ungefähr die Hälfte davon wurde innerhalb einer Woche abgegeben. Die Beobachtung der mit ^{131}J behandelten Gruppe dauerte im Mittel sieben Jahre, lange genug, um den Höhepunkt der Eintretenswahrscheinlichkeit von Leukämie zu erreichen; dies geht aus den Erfahrungen von Hiroshima und Nagasaki hervor. Weitere Untersuchungen drei Jahre später ergaben wieder keine Unterschiede in der Leukämierate zwischen den beiden Gruppen.

Diese Studie unterstreicht die Notwendigkeit einer entsprechenden Kontrollgruppe. Frühere Arbeiten wiesen auf ein 50% wahrscheinlicheres Auftreten von Leukämie bei Patienten mit Schilddrüsenüberfunktion als bei der übrigen Bevölkerung hin. Es scheint jedoch aus dieser Studie hervorzugehen, dass bei Schilddrüsenüberfunktion, ungeachtet der Behandlungsart, eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Leukämie auftritt.

In der Folge gab es zwei Berichte voneinander unabhängiger Institutionen in den Vereinigten Staaten und Schweden, die wiederum kein erhöhtes Auftreten von Leukämie bei Patienten mit Schilddrüsenüberfunktion, die mit ^{131}J behandelt worden waren, feststellen konnten. Die Probengrösse war jedoch klein, wenig über 1000 in der einen Gruppe und 4500 in der anderen.

Es stellt sich die Frage, ob eine grosse epidemiologische Studie unternommen werden könnte oder müsste, um die mehreren hunderttausend Patienten, welche mit ^{131}J gegen Schilddrüsenüberfunktion behandelt worden sind, in der Folge zu beobachten. Die Machbarkeit einer solchen Arbeit sollte geprüft werden. Dies wäre eine Möglichkeit, die Frage, ob eine Ganzkörperexposition im Bereich von 10 rad bei relativ geringer Dosisrate karzinogen sei oder nicht, zu beantworten. Da jedoch Schilddrüsenüberfunktion ohnehin mit Leukämie assoziiert zu sein scheint, sollte eine entsprechende Kontrollgruppe, wie in der Studie von Saenger und anderen, aus chirurgisch behandelten Patienten bestehen. Möglicherweise lässt sich aber

eine derartige, altersangepasste Gruppe nicht finden, zumal die ^{131}J -Therapie zur bevorzugten Behandlungsmethode geworden ist. Bei der Beurteilung, ob Patienten mit Schilddrüsenüberfunktion, die mit Thyreostatika behandelt worden sind, eine geeignete Kontrollgruppe darstellen würden, ist auch die Leukämie induzierende Möglichkeit dieser Medikamente zu berücksichtigen.

Es gab auch verschiedene andere Studien, die das Auftreten von Leukämie als Folge von Strahlung suchten und nicht fanden. Im schon erwähnten BEIR-III-Bericht wurden frühere Arbeiten, die keinen Leukämieanstieg bei

«Sowohl Sorglosigkeit als auch übermässige Angst im Zusammenhang mit Strahlenrisiken wird als schädlich für das öffentliche Interesse betrachtet.» US NCRP

Frauen beobachteten, die entweder mit Radiumeinlagen oder externer Bestrahlung oder beidem gegen Gebärmutterhalskrebs behandelt wurden, nicht berücksichtigt. Der Grund für diese Vernachlässigung in den erwähnten Arbeiten mag die unvollständige Folgebeobachtung der Patienten in jenen früheren Studien gewesen sein.

Dagegen hat ein kürzlich erschiener Bericht einer internationalen Studiengruppe über mehr als 31 000 Frauen mit Gebärmutterhalskrebs, von denen 90% strahlentherapeutisch behandelt wurden – den übrigen kam keine Strahlenbehandlung zu –, ergeben, dass für die bestrahlte Gruppe 15,5 Fälle von Leukämie erwartet, hingegen nur 13 tatsächlich beobachtet wurden (relatives Risiko = 0,8; bei 95%iger Wahrscheinlichkeit 0,4–1,4). In der nicht bestrahlten Gruppe traten zwei Fälle von Leukämie auf, anstatt wie erwartet ein Fall. Die Nachbeobachtung war lang genug, um das wahrscheinlichste Auftreten von Leukämie gemäss den Hiroshima-Nagasaki-Erfahrungen nach vier bis acht Jahren zu berücksichtigen. Die Übereinstimmung dieser Studien lässt vermuten, dass es keine nachweisbar leukämiefördernde Auswirkungen bei Patienten gibt, die mit Radiotherapie gegen Gebärmutterhalskrebs behandelt worden sind. Die Probengrösse dieser Studie lässt sich mit jener der Studie von Court-Brown und Doll vergleichen,

die ein erhöhtes Auftreten von Leukämie bei bestrahlten Patienten im Falle von ankylosierender Spondylitis zeigte. Es bleibt ein Rätsel, weshalb Radiotherapie nur bei gewissen Erkrankungen leukämieerzeugend zu sein scheint, obwohl die therapeutischen Dosen von der gleichen Grössenordnung sind, jedoch nicht auf die gleichen Körperregionen abgegeben wurden.

Es wird allgemein angenommen, dass es früher bei Strahlen ausgesetzten Menschen mehr bösartige Krankheiten gegeben haben muss. Meist kann jedoch die entsprechende Strahlenexposition nicht abgeschätzt werden. Das klassische Bild der Curies, die während vier Jahren in ihrem Schuppen Radium und Polonium separierten und reinigten, wird sich nicht wiederholen. Es ist auch nicht überraschend, dass Marie Curie an aplastischer Anämie starb, wahrscheinlich ein Sekundäreffekt der Strahlenexposition in ihrem Laboratorium und während des Ersten Weltkrieges, als sie hinter der Front Röntgendienst leistete, Röntgentechniker ausbildete und 200 Radiologie-Räume einrichtete. Was daran überrascht, ist, dass sie trotz einer kumulierten Dosis von Tausenden von rem erst 1934 im Alter von 66 Jahren starb.

Was aber ist heute zu weniger strahlenexponierten Berufsleuten zu sagen? Ein kürzlich erschienener Bericht über die Krebssterblichkeit und andere Todesursachen von 1338 britischen Radiologen, welche zwischen 1897 und 1954 tätig waren, zeigte, dass für jene, die vor 1921 ins Berufsleben eintraten, die Krebssterblichkeit um 75% höher war als bei anderen Ärzten; bei Berufseintritt nach 1921 war die Krebssterblichkeit vergleichbar mit jener der anderen Kollegen. Obschon die Exposition von Radiologen damals nicht überwacht wurde, wird geschätzt, dass jene, die zwischen 1920 und 1945 in den Beruf eintraten, eine kumulierte Ganzkörperdosis der Grössenordnung von 100 bis 500 rad erhielten.

Es gibt noch eine andere, grössere Gruppe von mit Strahlung Beschäftigten, die ebenfalls untersucht wurden. Während des Zweiten Weltkrieges wurden in der amerikanischen Armee Strahlentechniker ausgebildet, die in der Folge während durchschnittlich 24 Monaten Dienst leisteten. Die Beschreibung ihrer Ausbildung beinhaltet die Bemerkung, dass «die Studenten während der täglich verbleibenden 2 Stunden des Kurses sich damit be-

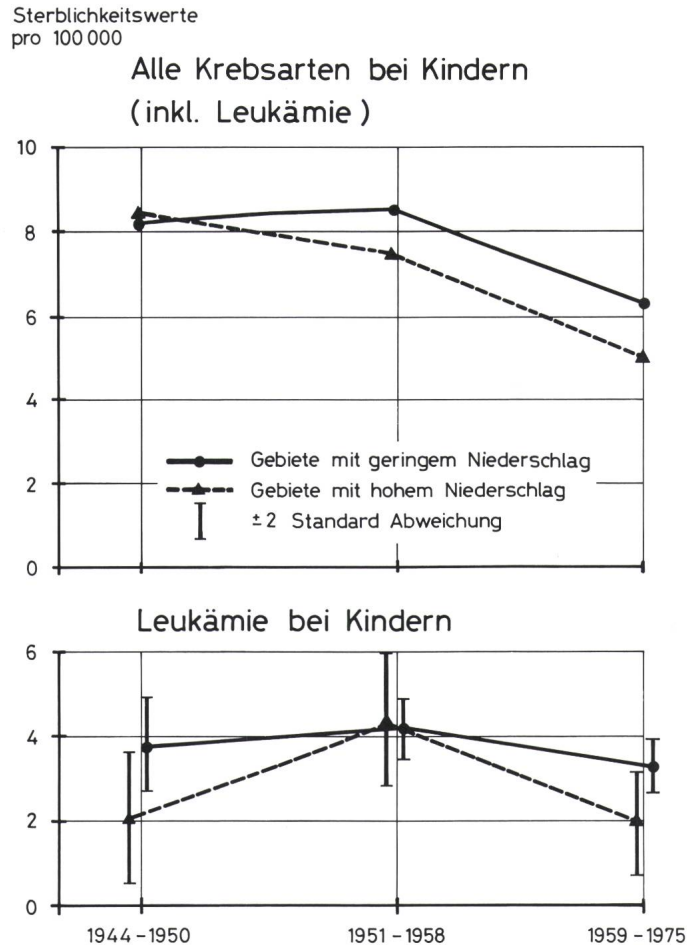
schäftigten, voneinander Röntgenbilder in den eben gelernten Positionen zu machen». Die Studenten hatten dabei weder hautrötende Dosen erhalten, noch hatten sie einen Abfall von weissen Blutkörperchen gezeigt. Diese beiden Parameter sind unempfindlich gegenüber einmaligen Dosen von weniger als 100 rem. Die kumulierte Exposition dieser Radiologie-Techniker wurde damals nicht überwacht. In einer modernen Klinik in Cleveland hat man 1953 die Strahlenexposition von Technikern gemessen; diese bewegte sich im Bereich 5–15 rad pro Jahr. Vermutlich erhielten die Armeetechniker zehn Jahre früher grössere Dosen, vielleicht 10–50 rem für die gesamte Dienstperiode. Man hat diese 6500 Strahlentechniker während 29 Jahren beobachtet und bei ihnen im Vergleich zu einer Kontrollgruppe von ähnlicher Grösse, bestehend aus Medizinal-, Labor- oder Pharmazie-Technikern der Armee, kein erhöhtes Auftreten von malignen Krankheiten beobachten können.

3. Das Problem der ungenügenden Probengrössen

Die hier erwähnten negativen Studien werden im allgemeinen als nicht presswürdig betrachtet. Andererseits machen zumindest in den Vereinigten Staaten Berichte von erhöhtem Auftreten von Leukämie im Zusammenhang mit dem radioaktiven Niederschlag aus atmosphärischen Atomtests Schlagzeilen. 1979 berichtete Lyon, dass die Leukämiersterblichkeit bei Kindern in jenen Gebieten des Staates Utah erhöht sei, die einem höheren Niederschlag aus den atmosphärischen Atomtests zwischen 1951 und 1958 ausgesetzt gewesen seien, dies im Vergleich zu Gebieten in den übrigen USA mit geringerem radioaktivem Niederschlag.

Eine Überprüfung der Original-Daten ist in Figur 1 dargestellt. Sie zeigt die Sterblichkeitsrate für Leukämie und jene für alle Krebsarten, inklusive Leukämie, für Kinder in Gebieten Utahs mit geringem und hohem Niederschlag. Die Zeit zwischen 1944 und 1950, also vor den Niederschlägen, liefert die Kontrollprobe für die geringe Strahlenexposition. Die Gruppe von 1951–1958 wurde als stark exponiert betrachtet, d.h., es gehören ihr jene Leute an, welche in der Zeit der grossen oberirdischen Atomtests in

Fig. 1
Auftreten von Krebs und Leukämie bei Kindern in Gebieten mit geringem und hohem radioaktivem Niederschlag im Staat Utah (nach Lyon et. al. [28])



Nevada geboren wurden. Die zweite Gruppe von niedrig-exponierten Personen besteht aus jenen, die nach Durchführung der meisten oberirdischen Tests geboren wurden.

Nach einer Durchsicht von Lyons Daten könnte vernünftigerweise geschlossen werden, dass im Mittel während der ganzen Zeitspanne von 30 Jahren in Gegenden starken Niederschlags möglicherweise weniger Leukämiefälle auftraten als in Gegenden geringen Niederschlags, dass aber wegen der grossen Unsicherheitsfaktoren nicht mit Sicherheit geschlossen werden kann, ob dies tatsächlich einem Trend entspricht oder nicht. Betrachtet man die Summe aller bösartigen Krankheiten in der Kindheit (Leukämie und andere Arten von Krebsdesursachen), so scheint generell parallel zum Abfall der Niederschläge ein Abwärtstrend zu gelten, der sich in den Gegenden hohen Niederschlags etwas stärker auswirkte als in den Gegenden tieferen Niederschlags, obwohl unter Berücksichtigung der Standardabweichungen der Unterschied nicht signifikant gewesen wäre.

Die Schlagzeilen in der Presse im Anschluss an Interviews mit Dr. Lyon

wären weniger sensationell ausgefallen, wenn er betont hätte, dass diese Daten keine Beziehung zwischen der Gesamtheit der bösartigen Krankheiten im Kindesalter und den Atomtests der fünfziger Jahre gezeigt hätten. Statt dessen ist selektiv über etwas berichtet worden, was einem Experimental-Wissenschaftler, dessen Resultate nicht von nebensächlichen Wahrscheinlichkeitswerten abhängen, als eine nichtssagende Beobachtung der Beziehung zwischen Leukämie und atomarem Niederschlag erscheinen muss.

Lyons Arbeit ist im New England Journal of Medicine von verschiedenen Biostatistikern kritisiert worden. Ihre Kritik galt im allgemeinen der angeblichen Unterschlagung oder Fehldiagnose in früheren Proben und Fehlern betreffend die Analyse kleiner Proben.

Bader stellte beispielsweise eine jährliche Auflistung von Leukämiefällen im Seattle-King County vor, einem Gebiet mit einer grösseren Bevölkerung als die südlichen Gebiete von Utah. Daraus geht hervor, dass es 1959 zwei und 1963 zwanzig von insgesamt 217 Fällen waren, von denen zwischen

1950 und 1972 berichtet wurde. Wenn der Probenumfang zu klein ist, ist eine zehnfache Differenz in der jährlichen Auftretensrate einzig der statistischen Unsicherheit zuzuordnen. Obwohl die jährliche Verteilung von Leukämiefällen in keiner von Lyons Arbeiten oder den entsprechenden Presseberichterstattungen angegeben wurde, sind diese doch im Bericht des Government Accounting Office über die Probleme beim Erfassen von Krebsrisiken nach Belastung mit kleinen Strahlendosen tabellarisch angegeben.

Es ist zu erwähnen, dass die von Lyon und anderen berichteten, sogenannten zusätzlichen Leukämiefälle auf die Anhäufung von 13 Fällen in den Jahren 1959 und 1960 zurückzuführen sind. Tatsächlich traten 22 von den 32 Leukämiefällen zwischen 1951 und 1960, also in den ersten zehn Testjahren auf. Da nun die Latenzzeit zwischen der Strahlenexposition und dem Einsetzen der Leukämieerkrankungen einige Jahre beträgt, hätten diese zusätzlichen Leukämiefälle als Konsequenz der Atomtest der fünfziger Jahre eher nach 1960 als vorher auftreten müssen.

Ein weiterer Bericht, der ebenfalls mehr Publizität erhielt, als er aus wissenschaftlicher Sicht verdiente, ist die Studie von Mancuso betreffend Arbeiter der Hanford Laboratories, auf deren Gelände verschiedene AEC-Reaktoren stehen. Die Geschichte dieser Studie geht auf das Jahr 1964 zurück, als Dr. Mancuso beauftragt wurde, die Gesundheit der AEC-Arbeiter zu untersuchen. Dr. Barkev Sanders, ein Statistiker, und Dr. Allen Brodsky, ein Gesundheitsphysiker, waren Mitarbeiter in diesem Projekt. Die Projekt-Jahresberichte hielten über Jahre einzig fest, dass es negative Anzeichen gebe für eine Beziehung zwischen Krebs und Strahlung. Dr. Sanders und Dr. Brodsky zogen sich aus dem Projekt zurück. Während der Zeit, wo die beiden an der Datenanalyse dieses Projektes mitarbeiteten, wurden keine Berichte mehr veröffentlicht.

Etwa 1976 schlossen sich Alice Stewart (Pädiatrie) und der Statistiker Kneale, die für ihre Arbeiten über die Beziehungen zwischen diagnostischer Röntgenbestrahlung und Krebs im Kindesalter bekannt waren, Mancuso an. Sie schrieben zusammen eine umstrittene Arbeit, um zu zeigen, dass es bei Arbeitern in Hanford ein statistisch signifikant erhöhtes Auftreten von zwei Arten von Krebs, nämlich

dem multiplen Myelom und Pankreaskrebs, gebe.

Gemäss Tabelle 10 ihrer Arbeit war die mittlere kumulative Strahlendosis für Hanford-Arbeiter, die in der Folge an Herz- und Gefässerkrankung starben, 1,05 rad, im Falle von soliden Tumoren 1,3 rad und bei Leukämie und Lymphomen 2,2 rad. Diese zusätzliche Strahlenexposition ist vergleichbar mit jener, die man während 10 bis 20 Lebensjahren in Colorado erhält, wobei dieser Staat eine geringe Krebssterblichkeitsrate aufweist.

Eine Aussage im Mancuso-Bericht, die nicht weit verbreitet wurde, war, dass Hanford-Arbeiter, die der höchsten Strahlendosis ausgesetzt waren (mehr als 15 rem), eine geringere Todesfallrate für alle Ursachen und alle malignen Neoplasien aufwiesen, als dies anhand der Referenzgruppe in der Bevölkerung erwartet wurde. Wegen der kleinen Anzahl von Arbeitern mit der erwähnten Exposition und der kleinen Anzahl von Krebstodesfällen in dieser Gruppe schien die Verteilung unter die verschiedenen Krebserkrankungen als Todesursache einem Muster zu folgen, das nicht identisch war mit jenem, das man bei grösseren Gruppen fand.

Dr. Brodsky und Dr. Sanders, die anfänglich mit Dr. Mancuso zusammenarbeiteten, waren sehr kritisch gegenüber dieser Arbeit. Eine unabhängige Analyse von Gilbert und Marks ist sehr aufschlussreich: Die positive Korrelation, die im Mancuso-Bericht scheinbar gezeigt wird, scheint auf die

«In jedem der oben beschriebenen Fälle kann das scheinbare Ansteigen der Krebserkrankungen im Zusammenhang mit kleinen Strahlendosen den Fehlern der kleinen Probengrösse zugeschrieben werden.»

drei Todesfälle infolge von Pankreaskrebs bei Arbeitern mit mehr als 15 rem Strahlenbelastung zurückführbar zu sein. Gemäss Gilbert und Marks ist diese Diagnose jedoch nur in einem Fall bestätigt worden. Ferner sollte auch festgehalten werden, dass der Bericht des Atomic Bomb Casualty Committee eine wesentlich grössere Probe mit wesentlich höherer Strahlenexposition (bis 400 rad) beschrieb

und keine positive Beziehung zwischen Neoplasien des Pankreas und Strahlung fand. Die zweite Kategorie von zusätzlichen Krebstodesfällen war angeblich dem multiplen Myelom zuzuschreiben, welche 3 Fälle im Vergleich zu einer erwarteten Anzahl von 0,6 enthielt. Ob dieser Überschuss von zwei Todesfällen in dieser Kategorie auf die statistische Variation oder die Auswirkung von anderen Karzinogenen zurückzuführen ist, ist nicht entschieden. Da in der Gruppe jener, die eine kumulative Exposition von 15 rem erhielten, nur 14 Krebsfälle im Vergleich zu den 24 erwarteten in der Referenzgruppe beobachtet wurden, ist man um so mehr versucht, den Schluss zu ziehen, dass Strahlung auf diesem Niveau eher schützend gegen Krebserkrankung sei!

In jedem der oben beschriebenen Fälle kann das scheinbare Ansteigen der Krebserkrankungen im Zusammenhang mit kleinen Strahlendosen den Fehlern der kleinen Probengrösse zugeschrieben werden.

Webster hat eine einfache Demonstration des Problems der kleinen Anzahl von Beobachtungen durch Bestimmung der Zählrate von schwach radioaktiven Quellen geliefert. Eine derartige Zählrate, wie auch Krebsfälle, folgt der Poissonschen Verteilung. In 20 aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten hat die Zählrate zwischen 0 und 8 Impulse pro Zeiteinheit variiert, dies mit einem Mittel von 4. Wie Tabelle I zeigt, bewegt sich das Verhältnis des tatsächlichen Auftretens einer speziellen Zählrate zu der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens zwischen 0,6 und 2,8. Diese Verhältnisse entsprechen dem «relativen Risiko» bei Anwendung des Fall-Kontroll-Vorgehens in epidemiologischen Studien mit der Ausnahme, dass kein Vorurteil bezüglich der «Referenz»- oder Poisson-Wahrscheinlichkeitsverteilung eingeführt wurde.

Aus diesen Beispielen von Berichten geht deutlich hervor, dass Studien am Menschen im Bereich der niedrigen Dosen und Dosisraten durch Unsicherheiten bezüglich der Fall-Kontroll-Methode, die begrenzte Gültigkeit einer kleinen Anzahl von Beobachtungen sowie die natürliche Vielfalt von Krankheitsbildern in einer heterogenen Gesellschaft erschwert werden. Es scheint deshalb unwahrscheinlich, dass durch solche Studien je die Frage des Grenzwertes der strahlenbedingten Karzinogenese endgültig beantwortet wird.

| | Beobachtete Zählrate | Wahrscheinlichkeit aufgrund Poissonscher Verteilung % | Verhältnis des effektiven Auftretens zu seiner Wahrscheinlichkeit |
|---|--|--|---|
| Effektive Zählrate in 20 aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten | 6, 3, 5, 4, 2, 2, 4, 4, 7, 3, 8, 6, 6, 2, 0, 5, 2, 3, 6, 1 | | |
| Theoretischer Erwartungswert und Vergleich zum effektiven Auftreten der einzelnen Zählraten | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 | 1,8 7,3 14,6 19,5 19,5 15,6 10,4 5,9 3,0 | 2,8 0,6 1,4 0,8 0,8 0,6 1,9 0,8 1,6 |

* nach Webster [39]

4. Die Botschaft der Wissenschaft

In der Einführung zu diesem Referat stellte ich die Frage: «Was ist eine kleine Strahlendosis?» oder ob es Strahlenpegel gebe, unterhalb denen man schädliche Auswirkungen von Strahlung nicht wahrnehmen kann. Die Antwort auf diese Frage ist ja. Wenn man sagt, dass es Dosen gebe, für welche schädigende Auswirkungen von Strahlen nicht wahrgenommen werden können, so ist das nicht dasselbe, wie wenn man zu Schlussfolgerungen betreffend die Existenz eines Grenzwertes gelangt, unterhalb dessen es beim Menschen keine Auswirkungen gibt. In der Wissenschaft können

«... ist man sich einig, dass es keine nachvollziehbaren Untersuchungen gibt, die eindeutig zeigen, dass solche Effekte sichtbar gemacht werden können.»

nur jene Gesetze als gültig akzeptiert werden, die experimentell bewiesen sind. Man kann Hypothesen aufstellen, sollte diese jedoch nicht mit der Realität verwechseln.

Es ist tatsächlich schwierig, zu beurteilen, welche Art von Studien in der radiologischen Forschung finanziell unterstützt werden sollen. Es ist offensichtlich, dass epidemiologische Arbeiten keine wichtigen Daten über die

Existenz eines Grenzwertes für Strahlenauswirkungen liefern können. Molekulare und zelluläre Studien können eventuell einen Einblick in diesbezügliche Auswirkungen geben, jedoch nicht wichtige Fragen betreffend Wiederherstellungsmechanismen beim gesunden Tier oder Menschen beantworten, falls Strahlung mit geringen Dosisraten abgegeben wird. Zur Zeit gibt es keine wirklich guten Ideen, die einen Durchbruch auf dem Gebiete der Auswirkungen kleiner Strahlendosen erlauben würden.

Es ist wichtig, die Öffentlichkeit und durch sie die Regierungsstellen wissen zu lassen, dass wir alle nur verlieren, wenn talentierte Wissenschaftler und Mittel wegen irrationaler, durch wohlmeinende oder übelwollende, aber oft uninformierte Cassandras geschürte Ängste von wissenschaftlich wichtigen und gesellschaftlich wünschbaren Arbeiten auf vorhersagbar negative Untersuchungen umgelenkt werden.

In der Wissenschaft wird beobachtet, behauptet und wieder beobachtet mit der Absicht, festzustellen, ob die Hypothese mit den Beobachtungen übereinstimmt. Wissenschaftler sind nicht Aristoteliker; wenn wir die Anzahl der Zähne in einem Pferdemaul feststellen wollen, so öffnen wir dieses und zählen die Zähne nach. Manchmal können die kritischen Experimente mit den verfügbaren Werkzeugen nicht durchgeführt werden. So konnten die Gesetze von Newton, welche mehr als zwei Jahrhunderte alten Dogmen gleichkommen, das Verhalten bei hohen Geschwindigkeiten oder atomaren bzw. subatomaren Dimensionen

nicht voraussagen. Dies ist aber einfach im Vergleich zur Voraussage der Gesetze, welche die viel komplizierteren Beziehungen in biologischen Systemen inklusive Mensch regeln.

Bezüglich der Auswirkungen von kleinen Strahlendosen ist man sich einig, dass es keine nachvollziehbaren Untersuchungen gibt, die eindeutig zeigen, dass solche Effekte sichtbar gemacht werden können.

Die Uneinigkeit betrifft einzig die Methode der Extrapolation von höheren Dosisraten und Gesamtdosen zum nicht messbaren Bereich. Der BEIR-III-Bericht kam zum Schluss, dass den verfügbaren Daten die linearquadratische Extrapolation am ehesten entspreche; ein Mitglied der Kommission

«Wenn man sagt, dass es Dosen gebe, für welche schädigende Auswirkungen von Strahlen nicht wahrgenommen werden können, so ist das nicht dasselbe, wie wenn man zu Schlussfolgerungen betreffend die Existenz eines Grenzwertes gelangt, unterhalb dessen es beim Menschen keine Auswirkungen gibt.»

war anderer Meinung und behauptete, dass die lineare Extrapolations-Hypothese angemessen konservativ sei; ein anderes verlangte nach der quadratischen Extrapolation. Es gibt auch Fachleute, die daran festhalten, dass es keinen Beweis gebe, der die Möglichkeit eines Grenzwertes ausschliesse, unterhalb dessen es keine Strahlenauswirkungen gebe.

Alles in allem haben wir anhand dessen, was wir in den letzten Jahren aus Arbeiten in der Molekularbiologie gelernt haben, allen Grund zur Annahme, dass es bisher ungeahnte Wiederherstellungsmechanismen gibt. Die Uneinigkeit auf dem Gebiet der kleinen Strahlendosen betrifft Hypothesen, nicht beobachtete Tatsachen.

Die Gültigkeit der Gesetze von Newton für subatomare Dimensionen konnte auch erst nachgewiesen werden, als die entsprechenden Werkzeuge vorlagen. In jenem Fall war es jedoch nicht notwendig, politische Entscheide aufgrund von Extrapolation zu fällen. Dagegen müssen im Falle

der Auswirkungen geringer Strahlendosen politische Entscheidungen ohne das Vorliegen wissenschaftlicher Beweise gefällt werden. Es sollte eingesehen werden, dass dies willkürliche Entscheidungen sind, basierend auf Philosophie statt Tatsachen, die sich aus politischen oder anderen Gründen wieder ändern können. Es wird jedoch keine Veränderung in der Haltung der Öffentlichkeit in demokratischen Staaten geben, solange nicht die Wissenschaftler, die informiert sind, auch gewillt sind, Anstrengungen zu unternehmen, um die Medien und die Öffentlichkeit aufzuklären.

Als Schlussfolgerung soll an dieser Stelle der Bericht Nr. 43 des US National Council on Radiation Protection (NCRP) über die Strahlenschutzphilosophie zitiert werden: «Anhaltspunkte für einen signifikanten Einfluss der Dosisrate auf Strahleneffekte würden die gängige Praxis der Aufsummierung von Dosen aller Größen und Raten zu einer Gesamt-Individual-rem-Dosis unhaltbar machen, aufgrund deren eine Berechnung der Bevölkerungsrisiken erfolgt, und zwar auf der Basis der Extrapolation von geschätzten Risiken, abgeleitet aus Daten für hohe Dosen und Dosisraten... Der NCRP möchte Regierungsgremien darauf hinweisen, dass es unvernünftig wäre, obere Grenzwertschätzungen für die karzinogenen Risiken bei kleinen Dosen und Dosisraten, welche mittels linearer Extrapolation aus Daten für hohe Dosen und Dosisraten abgeleitet worden sind, als tatsächliche Risiken zu interpretieren oder anzunehmen und hierauf eine unangebracht restriktive Politik abzstützen. Sowohl Sorglosigkeit als auch übermäßige Angst im Zusammenhang mit Strahlenrisiken wird als schädlich für das öffentliche Interesse betrachtet.»

Das ist die Botschaft, die von der wissenschaftlichen Gemeinschaft aus weiter vermittelt werden muss.

Literatur

- [1] G.W. Beebe, H. Kato and C.E. Land: Life span study report 8. «Mortality Experience of Atomic Bomb Survivors 1950-74» Technical Report RERF TR 1-77. Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation, 1978.
- [2] High Background Radiation Research Group, China, Health Survey in High Background Radiation Areas in China. Science 209:877...880, 1980.
- [3] M.A. Barcinski, M.-D.A. Abreu, J.C.C. DeAlmeida, J.M. Naya, L.G. Fonseca and L.E. Castro: Cytogenetic investigation in a Brazilian population living in an area of high natural radioactivity. Am J. Hum. Genet. 27:802...806, 1975.
- [4] T.L. Cullen: Dosimetric and cytogenetic studies in Brazilian Areas of high natural activity. Health Phys. 19:165...166, 1970.
- [5] H. Gruneberg, G.S. Bains, R.J. Berry, L. Riles, C.A.B. Smith and R.A. Weiss: A search for genetic effects of high natural radioactivity in South India. Med. Res. Council Special Report Series No. 307, H.M.S.O. London, 1966.
- [6] A.R. Gopal-Ayengar, K. Sundaram, K.B. Mistry, C.M. Suinta, K.S.V. Nambi, S.P. Kathuria, A.S. Basu and M. David: Evaluation of the long-term effects of high background radiation on selected population groups on the Kerala Coast. Peaceful Uses of Atomic Energy II:31...51, 1972.
- [7] Y.R. Ahuja, A. Sharma, K.U.K. Nampoothiri, M.R. Ahuja and E.R. Dempster: Evaluation of effects of high natural background radiation on some genetic traits in the inhabitants of monazite belt in Kerala, India. Hum. Biol. 45:167...179, 1973.
- [8] C.E. Land: Estimating cancer risks from low doses of ionizing radiation. Science 209:1197...1203, 1980.
- [9] B. MacMahon: Prenatal x-ray exposure and childhood cancer. J. Natl. Cancer Inst. 28:1173...1191, 1962.
- [10] B. MacMahon, S. Yen, D. Trichopoulos, K. Warren and G. Nardi: Coffee and cancer of the pancreas. New Engl. J. Med. 304:630...633, 1981.
- [11] BEIR III Report. The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Assembly of Life Sciences. National Academy Press, National Academy of Sciences, Washington, D.C. 20418, 1980.
- [12] E.L. Saenger, G.E. Thoma and E.A. Tompkins: Incidence of leukemia following treatment of hyperthyroidism. JAMA 205:855...862, 1968.
- [13] E.L. Saenger, E. Tompkins and G.E. Thoma: Radiation and leukemia rates. Science 171:1096...1098, 1971.
- [14] E.E. Pochin: Leukemia following radioiodine treatment of thyrotoxicosis. Brit. Med. J. 2:1545, 1960.
- [15] S.C. Werner, A.M. Gittleson and A.B. Brill: Leukemia following radioiodine therapy of hyperthyroidism. JAMA 177:646...648, 1961.
- [16] D.A. Hoffmann, W.M. McConeahy, J.F. Fraumeni, Jr. and L.T. Kurland: Cancer incidence following treatment of hyperthyroidism. J. Epidemiology 11:218...224, 1982.
- [17] L.-E. Holm, I. Dahlqvist, A. Israelsson and G. Lundell: Malignant thyroid tumors after iodine-131 therapy. A retrospective cohort study. N. Engl. J. Med. 303:188...191, 1980.
- [18] N. Simon, M. Bruger and R. Hayes: Radiation and leukemia in carcinoma of the cervix. Radiology 74:905...911, 1975.
- [19] G.B. Hutchinson: Leukemia in patients with cancer of the cervix uteri treated with radiation. A report covering the first 5 years of an international study. J. Natl. Cancer Inst. 40:951...982, 1968.
- [20] J.D. Boice and G.B. Hutchinson: Leukemia in women following radiotherapy for cervical cancer: Ten-year follow-up of an international study. JNCI 65:115...129, 1980.
- [21] W.M. Court Brown and R. Doll: Leukemia and aplastic anemia in patients irradiated for ankylosing spondylitis. Med. Res. Council. Spec. Rep. (London) 295:1...135, 1957.
- [22] W.M. Court Brown: Mortality from cancer and other causes after radiotherapy for ankylosing spondylitis. Br. Med. J. 2:1327...1332, 1965.
- [23] P.G. Smith and R. Doll: Mortality from cancer and all causes among British radiologists. Br. J. Radiol. 54:187...194, 1981.
- [24] W.W. McCaw: Training of x-ray technicians at the School for Medical Department Enlisted Technicians. Radiology 42:384...388, 1944.
- [25] R.M. Geist Jr., O. Glasser and C.R. Hughes: Radiation exposure survey of personnel at the Cleveland Clinic Foundation. Radiology 60:186...191, 1953.
- [26] R.W. Miller and S. Jablon: A search for late radiation effects among men who served as x-ray technologists in the U.S. Army during World War II. Radiology 96:269...274, 1970.
- [27] S. Jablon and R.W. Miller: Army technologists: 29-year follow-up for cause of death. Radiology 126:677...679, 1978.
- [28] J.L. Lyon, M.R. Klauber, J.W. Gardner and K.S. Udall: Childhood leukemias associated with fallout from nuclear testing. New Engl. J. Med. 300:397...402, 1979.
- [29] C.E. Land: The hazards of fallout or of epidemiologic research? New Engl. J. Med. 300:431...432, 1979.
- [30] M. Bader: Leukemia from atomic fallout. New Engl. J. Med. 300:1491, 1979.
- [31] J.E. Enstrom: Editorial. New Engl. J. Med. 300:1491, 1979.
- [32] Report to the United States Congress by the Comptroller General. Problems in Assessing the Cancer Risks of Low-Level Ionizing Radiation Exposure. U.S. General Accounting Office, Vol. 2 of 2 Volumes, Gaithersburg, MD, 1981, p. XVIII-43.
- [33] H.L. Beck and P.W. Krey: External Radiation Exposure of the Population of Utah from Nevada Weapons Tests. DOE/EML-401 (DE82010421), National Technical Information Service, US Department of Energy, NY, January 1982, p. 19.
- [34] G.G. Caldwell, D.B. Kelley and C.W. Heath Jr.: Leukemia among participants in military maneuvers at a nuclear bomb test. JAMA 244:1575...1578, 1980.
- [35] C.D. Robinette, S. Jablon and T.L. Preston: Studies of participants in nuclear tests. Report to the National Research Council. Mortality of Nuclear Weapons Test Participants. National Academy Press, Washington, D.C., May 1985.
- [36] T.F. Mancuso, A. Steward and G. Kneal: Radiation exposure of Hanford workers dying from cancer and other causes. Health Phys. 33:369...385, 1977.
- [37] E.S. Gilbert and S. Marks: An analysis of the mortality of workers in a nuclear facility. Radiat. Res. 79:122...148, 1979.
- [38] G.W. Beebe, H. Kato and C.E. Land: Studies of the mortality of A-bomb survivors, 6. Mortality and radiation dose, 1950-1974. Radiat. Res. 75:138...201, 1978.
- [39] E.W. Webster: On the question of cancer induction by small x-ray doses. Garland Lecture. AJR 137:647...666, 1981.
- [40] Tumorigenesis in Experimental Laboratory Animals. NCRP Report No. 64. Influence of Dose and Its Distribution in Time on Dose-Response Relationships for Low-Let Radiations. National Council on Radiation Protection and Measurements. Washington, D.C. 1980.
- [41] R.L. Ulrich and J.B. Storer: Influence of dose, dose rate and radiation quality on radiation carcinogenesis and life shortening in RfM and BALB/c mice. In: Late Biological Effects of Ionizing Radiation, Vol. II, IAEA/STI/PUB/489 (International Atomic Energy Agency, Vienna) p. 95, 1978.
- [42] W.J. Schull, M. Orake and J.V. Neel: Genetic effects of the atomic bombs: A reappraisal. Science 213:1220...1227, 1981.
- [43] Review of the Current State of Radiation Protection Philosophy. NCRP Report No. 43. National Council on Radiation Protection and Measurements, Washington, D.C. 1975.