

Gesellschaft für Strahlenschutz e.V. und Bund zur Unterstützung Radargeschädigter e.V.

Erkrankungen durch ionisierende Strahlen außer Krebs

Neuere Erkenntnisse über Effekte bei niedriger Dosis und chronischer Exposition

Teil 1 Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Inge Schmitz-Feuerhake und Sebastian Pflugbeil

Juli 2013

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	2
Hintergrund	3
Nicht-karzinogene Krankheiten bei den Atombombenüberlebenden und die eingeschränkte Übertragbarkeit für andere Risikogruppen	4
Strahlenbedingte Herz-Kreislaufkrankungen	6
Schlussfolgerungen	12
Referenzen	12

Zusammenfassung

Bis vor wenigen Jahren wurden offiziell nur Krebserkrankungen und genetische Schäden als Niederdosiseffekte ionisierender Strahlung für möglich gehalten. Die vorliegende Arbeit enthält eine Einführung in den gegenwärtigen Erkenntnisstand über andere strahlenbedingte Erkrankungen, die bei niedriger Dosis zu erwarten sind: bei beruflich Strahlenexponierten, nach Umweltkontaminationen und durch diagnostische Expositionen. Es zeigt sich, dass das bislang bevorzugte Referenzkollektiv zur Beurteilung von Strahlenschäden, die Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki, für nicht-karzinogene Krankheiten im Falle chronischer oder fraktionierter Expositionen ungeeignet ist.

Dieses wird anhand der Ergebnisse über Herz-Kreislauf-Erkrankungen dargestellt.

In der Fachwelt wurde der relativ hohe Dosisgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen von 100 Millisievert (mSv) in 5 Jahren früher damit gerechtfertigt, dass die Strahlenrisiken konservativ abgeschätzt seien und statistisch erkennbare Effekte in diesem Dosisbereich nicht zu erwarten seien. Dies trifft jedoch auch für Krebserkrankungen nicht zu, ohne dass diese Erkenntnisse bislang die unzureichende Anerkennung berufsbedingter Erkrankungen verbessert hätten. Die nun evidenten zusätzlichen Gefährdungen durch ionisierende Bestrahlungen am Arbeitsplatz machen eine diesbezügliche Revision der Berufskrankheitenverordnung umso dringender erforderlich.

Hintergrund

Die in der Strahlenschutzverordnung vorgeschriebenen Dosisgrenzwerte beruhen auf den Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP. Diese berücksichtigt bei der Exposition mit ionisierender Strahlung im Niederdosisbereich nur Krebs und Erbkrankheiten als mögliche Schädigungen.

Nach dem Tschernobylunfall 1986 wurde ein Anstieg zahlreicher Nicht-Tumor-Erkrankungen beobachtet, die offensichtlich als Folge der chronischen Radioaktivitätsbelastung in den Anrainerstaaten aufgetreten sind (Yablokov 2009). Diese Effekte wurden bislang von der ICRP nicht zur Kenntnis genommen, wohl aber die Tatsache, dass auch in ihrem bevorzugten Referenzkollektiv, den japanischen Atombombenüberlebenden, in neuerer Zeit etliche strahlenbedingte Krankheitsformen außer Krebs festgestellt wurden. Diese betreffen vornehmlich Herz-Kreislaufleiden sowie Erkrankungen des Magen/Darm-Trakts und des Atemtrakts.

Da die ICRP es aber nicht für gesichert ansah, dass diese Erkrankungen auch unterhalb von 0,5 Sievert (Sv) auftreten, hielt sie es vorläufig nicht für zulässig, diese Ergebnisse in ihre Risikobetrachtungen einzubeziehen (ICRP 2007).

Zu den Erkrankungen, die anerkanntermaßen berufsbedingt auftreten können, gehören auch solche durch ionisierende Strahlen. In der Berufskrankheitenverordnung werden nicht-stochastische und stochastische Strahlenschäden unterschieden. Für erstere ist eine Mindestdosis am Arbeitsplatz erforderlich, unterhalb derer können sie berufsbedingt nicht auftreten. Insbesondere ist das bei Einhaltung der Dosisgrenzwerte für berufliche strahlenexponierte Personen nach dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand gegeben, auf den sich die Verordnung beruft.

Stochastische Schäden können auch bei beliebig niedriger Strahlendosis entstehen. Die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens steigt mit der Dosis. Nur maligne Erkrankungen in bestimmten Geweben, die im Merkblatt M 2402 der Berufskrankheitenverordnung aufgeführt sind, gelten als berücksichtigungsfähige stochastische Schäden.

Prinzipiell gelten auch die genetischen Strahlenfolgen, d.h. Schädigungen der Nachkommen in Folge der Exposition der elterlichen Keimdrüsen, als stochastische Schäden. Die ICRP hält jedoch dieses Risiko bei niedriger Dosis praktisch für bedeutungslos, da bei den japanischen Atombombenüberlebenden keine Erhöhung der Erbkrankheiten festgestellt wurde (ICRP 2007).

Die Kommission, die vom Bundesminister der Verteidigung eingesetzt wurde, um die gesundheitlichen Auswirkungen der Arbeiten in den Radaranlagen der Bundeswehr und der Nationalen Volksarmee der DDR zu begutachten, sah entsprechend keine Veranlassung, nicht-karzinogene Erkrankungen durch ionisierende Strahlung zu bedenken (Radarkommission 2003).

Im Jahr 2012 hat die ICRP sich wiederum zu der Frage der Wirkungsmechanismen der Strahlung im Gewebe geäußert und die Abhängigkeit nicht-karzinogener Effekte von der Dosisleistung (Dosis pro Zeiteinheit) untersucht (ICRP 2012). Für Katarakte und Kreislaufkrankungen kommt sie zu dem Schluss, dass die Folgen bei niedriger Dosis unabhängig von der Dosisleistung sind und daher auf irreparable „Eintreffer“-Schäden zurückzuführen sind wie bei der Krebsentstehung. D.h. eigentlich wären sie den stochastischen Schäden zuzurechnen. Da sie aber – angeblich – sehr selten auftreten, definiert die ICRP einen „praktischen“ Schwellenwert für diese Fälle von 0,5 Sv. Wir haben an anderer Stelle gezeigt, dass diese Beurteilung für Katarakte nicht zutrifft, da zahlreiche Befunde bei radioaktiv kontaminierten Bevölkerungen und Flugpersonal vorliegen (Schmitz-Feuerhake 2006).

Die Erkenntnisse über Nicht-Krebserkrankungen im Niederdosisbereich haben sich auch durch Befunde bei beruflich exponierten Arbeitnehmern der Nuklearindustrie erhärtet. Sie müssen Beachtung finden, da sie ja gerade – im Gegensatz zu denjenigen von den japanischen Atombombenüberlebenden - Situationen nach chronischer Bestrahlung entstammen und damit bessere Vergleichsmöglichkeiten für Expositionen am Arbeitsplatz oder durch radioaktive Umweltkontaminationen liefern.

Nicht-karzinogene Krankheiten bei den Atombombenüberlebenden und die eingeschränkte Übertragbarkeit für andere Risikogruppen

Die Forschungen an den Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki erfolgen bis heute in einem japanisch-amerikanischen Institut in Hiroshima, der Radiation Effects Research Foundation (RERF), die lange Zeit von U.S.-amerikanischen Wissenschaftlern dominiert wurde. In der sogenannten Life-Span Study (LSS) befanden sich ursprünglich ca. 120.000 Personen. Mit dem Hinweis auf die besondere Größe dieses Kollektivs und der besonders langen Beobachtungszeit berücksichtigt die ICRP praktisch nur diese Befunde und schließt Untersuchungsergebnisse aus anderen Studien aus, sofern sie im Widerspruch oder scheinbaren Widerspruch zu denjenigen aus Hiroshima stehen. Etwas differenzierter, aber im Prinzip auf gleiche Weise gehen die anderen einflussreichen internationalen Strahlenkomitees vor, das UNSCEAR¹ und das Komitee BEIR².

Über erhöhte Raten von Erkrankungen außer Krebs wurde nach Angabe von Yamada u.a. (2004) erstmalig 1986 berichtet. Eine Ausnahme bilden nicht-maligne Schilddrüsenerkrankungen und Katarakte (Grauer Star), die schon früher gefunden worden waren. Seitdem hat sich das Spektrum der beobachteten strahlenbedingten Erkrankungen erweitert.

Als Kriterium für die Verursachung durch die Bestrahlung gilt die Zunahme des Effektes mit höherer Dosis. Während jedoch für die soliden malignen Tumore (im Unterschied zu Leukämie) bei dem japanischen Kollektiv durchweg ein dosisproportionaler Anstieg der Erkrankungsrate gefunden wird (Preston 2003), sind die Dosiswirkungszusammenhänge bei den nicht-karzinogenen Erkrankungen nicht so einheitlich zu beschreiben.

Yamada und Mitarbeiter untersuchten die Inzidenz – d.h. das Auftreten der Erkrankungen innerhalb eines bestimmten Zeitraums – in einer Untergruppe der LSS von 10.339 Überlebenden zwischen 1958-2003 anhand von zweijährlichen individuellen Routineuntersuchungen. Die derzeit letzte Veröffentlichung der RERF von 2012, die sich auf den Zeitraum 1950 bis 2003 bezieht, enthält ebenfalls Ergebnisse über strahleninduzierte Nicht-Krebserkrankungen (Ozasa 2012). Sie untersucht die Mortalität (Sterblichkeit) in der LSS-Kohorte, d.h. wertet die registrierten Todesursachen aus. Dieses ist für Vergleichszwecke in lebenden Kollektiven grundsätzlich problematisch, weil die strahleninduzierten Erkrankungen nicht notwendigerweise auch als Todesursache auftreten. Wenn z. B. ein Exponierter mit einem strahlenbedingten Diabetes an Herzversagen stirbt, wird der Diabetes in der Statistik nicht aufgeführt. Die Autoren Ozasa u.a. weisen sogar darauf hin, dass viele Totenscheine erstellt wurden ohne sehr genaue Untersuchung der Todesursachen.

Inzidenzstudien sind daher für Strahlenrisikoerhebungen vorzuziehen, oder auch Untersuchungen über die Morbidität (Häufigkeit der Erkrankung).

¹ Komitee der Vereinten Nationen: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

² Komitee der U.S.-amerikanischen Academy of Sciences: Biological Effects of Ionizing Radiation

Im Folgenden wird gezeigt, dass die beobachteten Effekte in anderen exponierten Kollektiven häufig größer sind als bei den japanischen Überlebenden, wenn man sich auf die von der ICRP konzipierte „Äquivalentdosis“ in Sv bezieht. Diese soll ja die verschiedenen Arten ionisierender Strahlen vergleichbar machen (Alpha-, Beta-, Gamma-, Röntgen u.a.) und das Schadensmaß für alle Arten von Expositionen darstellen.

Seit den 1980er Jahren haben Kritiker auf die zahlreichen Einschränkungen hingewiesen, die die Benutzung der japanischen Daten als Referenz für andere bestrahlte Kohorten mit sich bringt, und die durchweg zu einer nennenswerten Unterschätzung der Folgen niedriger Dosen bei Exposition einer normalen westeuropäischen Bevölkerung führt (Tabelle 1).

Tabelle 1 Die Ungeeignetheit des japanischen Referenzkollektives für Strahlenfolgen in normalen Bevölkerungen

Kategorie	Begründung
Dosimetrie	Wirkung bei hoher Dosisleistung überschätzt (DDREF) Geringere Wirkung hochenergetischer Gammastrahlung Radioaktiver Fallout nicht berücksichtigt
Epidemiologie	„Survival of the Fittest“ Gesellschaftliche Ächtung Genetische Unterschiede
Registrierung	Erste 5 Jahre nach Bombardierung fehlen

Zunächst ging es um die Vorstellung, dass die stochastischen Effekte bei hoher Dosisleistung (Dosis pro Zeiteinheit) wesentlich wirksamer sind als bei niedriger Dosisleistung bzw. „chronischer“ Belastung von gleicher Gesamtdosis, wie sie bei Umgebungskontaminationen vorliegt oder bei beruflich Strahlenexponierten. Danach hätte man bei den Atombombenüberlebenden Dosiswirkungskurven zu erwarten, die bei höherer Dosis überproportional ansteigen. Das ist aber nicht der Fall. Außerdem haben zahlreiche Untersuchungen aus dem Berufsmilieu oder in Zusammenhang mit Umweltradioaktivität keine geringeren Risiken bei gleicher Dosis gezeigt als das japanische Kollektiv.

Daher lässt sich die alte Annahme über einen Dosisleistungseffekt nicht aufrechterhalten. Dennoch wird in den Risikoangaben der ICRP (2007) gegenüber den Resultaten aus Japan für stochastische Schäden weiterhin ein Reduktionsfaktor von 2 benutzt, der sogenannte Dosis- und Dosisraten-Effektivitätsfaktor DDREF.

Die deutsche SSK (2007) und das BfS (2005) haben empfohlen, diesen Faktor wegzulassen, also mit doppelt so hohen Risikowerten zu rechnen wie die ICRP.

Des Weiteren waren die japanischen Überlebenden einer extrem hochenergetischen durchdringenden Gammastrahlung ausgesetzt bis hin zu 20 Mega-Elektronenvolt (MeV) bei einem Mittelwert von 3 MeV (Straume 1995). Es ist strahlenbiologisch erwiesen, dass eine solche Strahlung nicht so wirksam ist wie eine Röntgenstrahlung oder eine Gammastrahlung im Energiebereich der üblichen Umgebungskontaminationen durch natürliche oder künstliche Radioisotope. Dieser Unterschied müsste mindestens mit einem Faktor 2 berücksichtigt werden. Damit hat man bereits einen Faktor 4, den man auf die Angaben zu dem von der ICRP als hauptsächlich relevant angesehenem Spätschaden, dem Krebs beim Bestrahlten selbst, aufschlagen muss.

Die RERF berücksichtigt dosimetrisch nur die Direktstrahlung bei der Bombenexplosion, d.h. die externe Gammastrahlung. Der radioaktive Fallout der Bombe sowie die Aktivierung des Bodens und anderer Materialien in der Umgebung durch Neutronen werden in ihrer Wirkung für vernachlässigbar gehalten, obwohl Kritiker schon früh auf den Tatbestand hingewiesen haben, dass akute Strahlenschäden auch in den Niederdosisgruppen registriert wurden sowie Chromosomenschäden und andere Strahleneffekte bei angeblich Unbestrahlten. Neuerdings gibt es japanische Arbeiten, die diese Defizite aufgreifen und eine Revision verlangen (Watanabe 2008).

Das Stichwort „Survival of the Fittest“ bezieht sich auf die Katastrophensituation, in der sich die Überlebenden befanden, mit Verwundungen durch Trümmer und Feuer, ohne Wasser, Nahrung, Unterkunft und medizinische Versorgung für längere Zeit. Daher muss man davon ausgehen, dass viele Personen noch nachträglich starben und die verbliebenen eine selektive Gruppe der besonders Widerstandsfähigen darstellen. Dies wird dadurch bestätigt, dass die Mortalität bei diesen in den ersten 20 Jahren niedriger war als in der übrigen japanischen Bevölkerung, bevor der Anstieg der soliden Tumore sich auswirkte. Stewart und Kneale befassten sich mit den Todesursachen in der Kohorte und stellten fest, dass die Verteilung anders war als bei der Normalbevölkerung. Sie interpretierten das als Folge der Knochenmarksschädigung in den Hochdosisgruppen, die eine Immunschwäche zur Folge hat (Stewart 2000).

Des Weiteren untersuchten sie die Altersverteilung bei den Überlebenden in den Gruppen „unter 5 Jahre“ bei Bombenexplosion und „älter als 50 Jahre“, da bei diesen per se ein schwächeres Immunsystem angenommen werden muss. Sie fanden so in der Tat einen Verlust an Personen bei den jeweiligen Hochdosisbestrahlten im Vergleich zu den gering Exponierten. Ihre Schlussfolgerung war, dass dadurch die Befunde über im Mutterleib bestrahlte Individuen und geschädigte Nachkommen beeinflusst wurden.

Die Diskriminierung der Überlebenden in der japanischen Gesellschaft ist ein Problem, das besonders in Zusammenhang mit den potentiellen Schädigungen bei ihren Nachkommen diskutiert wird. Um die Heiratschancen ihrer Kinder nicht zu gefährden, wurde ihre Herkunft von den Eltern möglichst verschwiegen (Yamasaki 1990). Ein weiterer bedeutsamer Punkt bezüglich der Vergleichbarkeit sind genetische Unterschiede zwischen Japanern und Europäern.

Da die RERF erst 1950 eröffnet wurde, fehlen Daten aus den ersten 5 Jahren nach Explosion. Dieses muss ebenfalls Auswirkungen haben auf die Erfassung im Mutterleib erzeugter und genetischer Effekte und von Krebserkrankungen mit geringer Latenzzeit (wie Leukämie und Knochensarkome).

Strahlenbedingte Herz-Kreislaufkrankungen

Bereits im Jahr 1978 hatten der Biostatistiker Erwin Bross und Mitarbeiter einen Zusammenhang zwischen Herzerkrankungen und niedrigen Strahlendosen gefunden. Es geschah im Rahmen des „Tri-State Survey“³, in dem das Risiko diagnostischer Röntgenstrahlung bei Erwachsenen in Hinblick auf Leukämie untersucht werden sollte. Die Studie erfasste Personen der Staaten New York, Maryland und Minnesota über 3 Jahre (1960-62). Der Effekt wurde von den Autoren auf genetische Veränderungen in Körperzellen zurückgeführt (Bross 1978). Obwohl sie aus einem mit öffentlichen Mitteln geförderten Forschungsprogramm stammten, wurden die Befunde – wie auch die Leukämieinduktion – von der übrigen Fachwelt ignoriert.

³ Drei-Staaten-Studie

Noch für lange Zeit wurde eine Strahlenwirkung bei niedriger Dosis auf die Blutgefäße bezweifelt mit der Begründung, dass keine plausible Erklärung für den Entstehungsmechanismus vorhanden sei. Aufgrund der eindeutigen Befunde bei Beschäftigten der Nuklearindustrie haben dann der unter Strahlenforschern bekannte Mathematiker Mark Little und sein Team bestätigt, dass Strahlung bestimmte Blutkörperchen zerstört, die Entzündungen in den Arterien verhindern (Little 2009; Little 2010). Allgemein werden strahlenbedingte Gefäßveränderungen derzeit als Ursache kardiovaskulärer Erkrankungen angesehen (Hildebrandt 2010; Lee 2012). Eine andere These ist, dass strahlenbedingte Störungen der Nierenfunktion auf den Kreislauf einwirken und zu dessen Versagen beitragen (Adams 2012).

Im Gegensatz zur ICRP, die zur Zeit auf einem „praktischen“ Schwellenwert von 0,5 Sv beharrt, verfestigt sich in weiten Kreisen der Fachwelt die Erkenntnis, dass die Auswirkungen niedriger Dosen unterhalb dieses Wertes auf den Kreislauf ebenfalls relevant sind. Im November 2012 haben Little und 26 weitere Wissenschaftler aus verschiedenen Ländern eine Übersichtsarbeit dazu veröffentlicht. Sie machten eine Literaturrecherche zum Thema ab 1990. Von über 6000 Eintragungen hielten sie 10 Untersuchungen an bestrahlten Bevölkerungen und Arbeitnehmern, bei denen individuelle Dosisangaben vorliegen, für eine zusammenfassende Auswertung geeignet. Ihr vorläufiges Ergebnis ist, dass die strahlenbedingte Mortalität an Herz-Kreislaufkrankungen etwa so hoch ist wie diejenige durch strahlenbedingten Krebs. Die ausgewählten Studien sind in Tab.2 genannt.

Tabelle 2 Verwendete Studien in der Metaanalyse von Little et al. 2012 über strahlenbedingte Herz-Kreislaufkrankungen

Nr.	Exponiertes Kollektiv	Referenz
1	Japanische Atombombenüberlebende Mortalität	Shimizu 2012
2		Yamada 2004
3/4	Beschäftigte in Mayak	Arizova 2010a,b
5	Tschernobyl-Liquidatoren ⁴	Ivanov 2006
6	Deutsche Uranbergarbeiter	Kreuzer 2006
7	Beschäftigte des französ. Staatskonzerns EDF ⁵	Laurent 2010
8	Eldorado Arbeiter in Uranminen und Uranverarbeitungsanlagen	Lane 2010
9	3. Analyse des U.K.-Nationalregisters über strahlenexponierte Arbeitnehmer	Muirhead 2009
10	15 Länder-Studie über Nukleararbeiter des IARC ⁶	Vrijheid 2007

Die Studien Nr.3 und 4 beziehen sich auf Arbeitnehmer, die in der größten sowjetischen Atomwaffenfabrik Mayak im Südrural zwischen 1948-1958 beschäftigt waren.

Die Erkrankungen teilten Little u.a. nach der Internationalen Klassifikation der Krankheiten (WHO⁷) im Code ICD-10 ein (Tabelle 3).

⁴ Liquidatoren sind Personen, die am Unfallreaktor Abschirm- und Aufräumarbeiten versahen

⁵ Electricité de France

⁶ International Agency for Resarch on Cancer, eine Einrichtung der Weltgesundheitsorganisation WHO

⁷ World Health Organisation

Tabelle 3 ICD-10 (10. Revision) Kapitel IX Krankheiten des Kreislaufsystems

- I00-I02** Akutes rheumatisches Fieber
- I05-I09** Chronische rheumatische Herzkrankheiten
- I10-I15** Hypertonie (Hochdruckkrankheit)
 - I10 Essentielle (primäre) Hypertonie
 - I11 Hypertensive Herzkrankheit
 - I12 Hypertensive Nierenkrankheit
 - I13 Hypertensive Herz- und Nierenkrankheit
 - I15 Sekundäre Hypertonie
- I20-I25** Ischämische Herzkrankheiten
 - I20 Angina pectoris
 - I21 Akuter Myokardinfarkt
 - I22 Rezidivierender Myokardinfarkt
 - I23 Bestimmte akute Komplikationen nach akutem Myokardinfarkt
 - I24 Sonstige akute ischämische Herzkrankheit
 - I25 Chronische ischämische Herzkrankheit
- I26-I28** Pulmonale Herzkrankheit und Krankheiten des Lungenkreislaufes
 - I26 Lungenembolie
 - I27 Sonstige pulmonale Herzkrankheiten
 - I28 Sonstige Krankheiten der Lungengefäße
- I30-I52** Sonstige Formen der Herzkrankheit
- I60-I69** Zerebrovaskuläre Krankheiten
 - I60 Subarachnoidalblutung
 - I61 Intrazerebrale Blutung
 - I62 Sonstige nichttraumatische intrakranielle Blutung
 - I63 Hirninfarkt
 - I64 Schlaganfall, nicht als Blutung oder Infarkt bezeichnet
 - I65 Verschluss und Stenose präzerebraler Arterien ohne resultierenden Hirninfarkt
 - I66 Verschluss und Stenose zerebraler Arterien ohne resultierenden Hirninfarkt
 - I67 Sonstige zerebrovaskuläre Krankheiten
 - I68 Zerebrovaskuläre Störungen bei andernorts klassifizierten Krankheiten
 - I69 Folgen einer zerebrovaskulären Krankheit
- I70-I79** Krankheiten der Arterien, Arteriolen und Kapillaren
- I80-I89** Krankheiten der Venen, Lymphgefäße u. Lymphknoten, andernorts nicht klassifiziert
- I95-I99** Sonstige und nicht näher bezeichnete Krankheiten des Kreislaufsystems

Aus diesen bildeten sie 4 Gruppen, in die sie die Befunde der ausgewerteten Studien einordneten:

Gruppe 1	I20-I25	(IHD) hier genannt „Herzinfarktgruppe“
Gruppe 2	I26-I52	hier genannt „Pulmonale Herzkrankheiten“
Gruppe 3	I60-I69	(CVA) hier genannt „Schlaganfallgruppe“
Gruppe 3	I00-I19; I53-59; I70-99	Hier genannt „Hochdruckgruppe“

Das Strahlenrisiko wird entweder als Relatives Risiko RR pro Sv oder als Absolutes Risiko AR pro Sv ausgedrückt. Unter dem Relativen Risiko versteht man das Verhältnis der Erkrankungsrate in der exponierten Gruppe zur Erkrankungsrate in der Kontrollgruppe ohne Exposition. Hat das Relative Strahlenrisiko ($RR \text{ pro Sv} = RR/Sv = RR \text{ Sv}^{-1}$) den Wert 2, ist die Erkrankungsrate in der exponierten Gruppe bei einer mittleren Dosis von 1 Sv genau doppelt so groß wie in der Kontrollgruppe. Man spricht dann auch von einer Verdopplungsdosis in Höhe

von 1 Sv. Beträgt der Wert 1, sind die Erkrankungsraten in beiden Gruppen gleich und ein Strahleneffekt besteht gar nicht. Häufig wird daher in den Risikobestimmungen das „Excess⁸ Relative Risk“ ERR angegeben, in dem man im Zähler eine 1 abzieht. ERR = 1 bedeutet, dass der Effekt in der exponierten Gruppe genauso so groß ist wie in der Kontrolle und die Verdopplungsdosis wiederum 1 Sv beträgt.

Das Absolute Strahlenrisiko gibt die strahlenbedingte Erkrankungsrate pro Sv an, d.h. die Anzahl der strahleninduzierten Fälle pro Anzahl Personen und Sv. Es bezieht sich also nur auf die zusätzlich erzeugten Fälle. Die Spontanrate oder anderweitig gewonnene Kontrollwerte werden entsprechend vorher abgezogen. Das Risiko für Krebssterblichkeit bei Exposition einer Bevölkerung mit niedriger Dosis wird von der ICRP mit 5,5 % pro Sv als absolutes Risiko angegeben (ICRP 2007). Es bedeutet, dass bei Bestrahlung einer Bevölkerung mit im Mittel 1 Sv dadurch 5,5 % der Personen einen strahlenbedingten Krebssterblichkeit erleiden werden.

Die von Little u.a. in der Metaanalyse erhaltenen Koeffizienten für das ERR wurden anhand zweier statistischer Modellannahmen bestimmt und sind in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4 Strahlenrisiko für die Mortalität durch Kreislauferkrankungen nach Little u.a. 2012 (Werte in Klammern: 95% Vertrauensbereich)

Krankheitsgruppe	ERR/Sv Modell 1	ERR/Sv Modell 2	Absolutes Risiko für Deutschland in % pro Sv
Herzinfarktgruppe	0,10 (0,05-0,15)	0,10 (0,04-0,15)	1,71 (0,76-2,65)
Pulmonale Herzkrankheiten	0,12 (-0,01-0,25)	0,08 (-0,12-0,28)	0,97 (-1,52-3,46)
Schlaganfallgruppe	0,20 (0,14-0,25)	0,21 (0,02-0,39)	1,69 (0,19-3,19)
Hochdruckgruppe	0,10 (0,05-0,14)	0,19 (-0,00-0,38)	1,38 (-0,01-2,76)
Kreislauferkrankungen insgesamt			5,75 (2,39-9,10)

Aus den Relativen Risikowerten der Tab.4 ergeben sich Verdopplungsdosen im Bereich von 12,5 bis 4,8 Sv für die einzelnen Krankheitsgruppen. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich dabei um Mittelwerte für eine Bevölkerung handelt. Bekanntlich ist das Spontanvorkommen sehr stark vom Lebensalter abhängig, so dass bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für die Strahlenbedingtheit einer Erkrankung im Individualfall das absolute Strahlenrisiko zur Spontanwahrscheinlichkeit im Alter des Betroffenen in Beziehung gesetzt werden muss.

Little u.a. haben daher aus den Relativen Risiken Werte für das Absolute Strahlenrisiko bestimmt, in dem sie die Spontanraten für die Kreislauferkrankungen in verschiedenen Ländern ermittelten – wiederum als Mittelwerte. Diese sind nicht nur vom Alter sondern auch von genetischen Faktoren und verschiedenen Lebensumständen abhängig. Die Ergebnisse für alle Kreislauferkrankungen zusammengenommen liegen zwischen 2,5 % pro Sv (Frankreich) und 8,5 % pro Sv (Russland). Die Werte für Deutschland sind in Tabelle 4 (letzte Spalte) aufgeführt.

Es ist nicht anzunehmen, dass die Ergebnisse von Little u.a. der Weisheit letzter Schluss bleiben werden. Die Autoren haben sie als gewichtete Mittelwerte aus den Einzelergebnissen der genannten Studien gewonnen, die untereinander sehr große Differenzen aufweisen. Die Probleme dabei sind vielfältig:

⁸ Überschuss

- 1) wurden die Ergebnisse über die japanischen Atombombenüberlebenden kritiklos einbezogen, obwohl es insbesondere für die strahlenexponierten Arbeitnehmer zunächst wesentlich wäre, die Wirkungen bei chronischer Niederdosisbestrahlung zu betrachten und nicht nach einer „Blitzbestrahlung“. Little selbst hatte die Entstehung von Gefäßveränderungen als Folge „fraktionierter“ Bestrahlung beschrieben (2009).
- 2) wurde den Problem möglicher Latenzzeiten (Zeit zwischen Exposition und Auftreten der Krankheit bzw. Tod durch die Krankheit) nicht ausreichend Beachtung geschenkt. In dem japanischen Kollektiv zeigten sich Erhöhungen bei den Nicht-Krebserkrankungen insgesamt und bei den Kreislauferkrankungen erst nach 1965, d.h. 20 Jahre nach der Exposition (Ozasa 2012). In den anderen zugrundegelegten Untersuchungen wurden entsprechende Zeiträume aber durchweg nicht abgewartet.
- 3) wurden Dosisangaben notgedrungen übernommen, die innerhalb der verwendeten Studien nicht gleichermaßen vertrauenswürdig sind.
- 4) besteht das genannte Problem bei der Verwendung von Mortalitätsdaten.

Aus diesen Gründen haben wir in der folgenden Betrachtung die japanischen Daten und einige andere der verwendeten Studien ausgeschlossen oder durch Folgestudien ersetzt, s. Tabelle 5. Von den in Tabelle 2 genannten verwenden wir nur Nr.3, Nr.5, Nr.7 und Nr.9.

Die Befunde an Uranbergarbeitern (Nr.6, 8) halten wir für nicht geeignet. Little u.a. berücksichtigen von der Dosis nur diejenige durch externe Gammastrahlung in den Stollen. Die Betroffenen haben aber radioaktive Stoffe bei ihrer Arbeit inkorporiert, die sich im Körper sehr inhomogen verteilen. Die hauptsächliche Strahlenbelastung erhält die Lunge. Es ist nicht klar, wie sich diese Verhältnisse auf die Bildung von Kreislauferkrankungen auswirken. Außerdem liegen für die deutsche Studie (Nr.6) gar keine gemessenen Individualdosen vor. Vielmehr wurden diese nach einem Verfahren abgeschätzt, das kritisiert werden muss (Eigenwillig 2007, Schmitz-Feuerhake 2011).

Die 15 Länder-Studie (Nr.10) wird ebenfalls nur teilweise übernommen, da sie viele Untersuchungen mit nur sehr kurzer Beobachtungsdauer aufweist (mittlere Beobachtungsdauer nach Vrijheid u.a. 14,8 J.). Es handelt sich dabei nicht um 15 verschiedene Länder sondern um 15 Untersuchungen aus verschiedenen Ländern. Wir haben nur solche berücksichtigt, bei denen die mittlere Beobachtungsdauer mindestens 15 Jahre beträgt, dadurch fallen 9 der Studien heraus. Davon können wir 2 nicht auswerten, die den „Healthy-Worker-Effekt“⁹ nicht berücksichtigen und keine Trendanalyse nach Dosisklassen vornehmen, aus der man den Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung erhalten kann. Damit bleiben 4 Studien aus 3 Ländern, von denen wir 3 durch neuere publizierte Fortsetzungsuntersuchungen ersetzen (Tabelle 5).

Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass auch die neueren Studien große Abweichungen in den Einzelergebnissen für das relative Risiko pro Doseinheit zeigen. Am auffälligsten sind die hohen Werte für die Beschäftigten des französischen Energiekonzerns EDF (Electricité de France), wobei aber nur derjenige für die Schlaganfallgruppe signifikant ist. Für die Krankheitsgruppe Herzinfarkt ergab jedoch eine Untersuchung an Arbeitern in U.S.-Atomkraftwerken (Howe 2004) ebenfalls ein sehr hohes und signifikantes Risiko – ein ERR pro Sv von 8,78 (Bereich 2,1-20,0). Dies würde einer Verdopplungsdosis von nur 114 mSv entsprechen. (Die Studie fehlt in Tabelle 5, da sie nur eine mittlere Beobachtungsdauer von 11,7 Jahren zugrundelegt.)

⁹ Strahlenarbeiter sind eine gesundheitlich ausgelesene Personengruppe, daher ist die Normalbevölkerung keine geeignete Kontrollgruppe

Tabelle 5 Herz-Kreislauf-Erkrankungen in Kollektiven nach chronischer Niederdosisexposition

Gruppe	Kollektiv	Anzahl unters. Pers.	Mittl. Beobachtungsdauer	Mittlere Dosis Sv	Excess Rel. Risiko ERR/Sv *)	Abs. Risiko pro Sv 10 ⁴ PY**)	Bemerkungen
Herzinfarkt IHD	Beschäftigte in Mayak ¹	18763	20,4 J.	0,63 (0,2-0,5)	0,10 (0,05-0,15)		Morbidität Morbidität Mortalität Mortalität
	Tschernobyl-Liquidatoren ²	61017	nicht angeg.	0,109 (0->1,5)	0,41 (0,05-0,78)		
	Beschäftigte frz. EDF ³	22393		0,0215 (0-0,6)	4,1 (-2,9-13,7)		
	U.K. Nationalregister ⁴	174541	22,3 J.	0,0249(<0,01->0,4)	0,26 (-0,05-0,61)		
Pulmonale Herzkrankh.							
Schlaganfall CVA	Beschäftigte in Mayak ⁵	12210	18,7 J.	0,84 (0-5,92)	0,45 (0,34-0,56)		Morbidität Morbidität Mortalität Mortalität
	Tschernobyl-Liquidatoren ²	61017	nicht angeg.	0,109 (0->1,5)	0,45 (0,11-0,80)		
	Beschäftigte frz. EDF ³	22393		0,0215 (0-0,6)	17,4 (0,20-43,9)		
	U.K. Nationalregister ⁴	174541	22,3 J.	0,0249(<0,01->0,4)	0,161 (-0,42-0,91)		
Hochdruck	Tschernobyl-Liquidatoren ²	61017	nicht angeg.	0,109 (0->1,5)	0,26 (-0,04-0,56) 0,36 (0,05-0,78)		Morbidität I10-I15 Morbidität I10
Alle	Belgische Nukleararbeiter ⁶	7229	22 J.	< 0,02	kein signif. Anstieg		Mortalität 1969-1994 Mortalität Männer Mortalität Mortalität 1951-1995
	Tschernobyl-Liquidatoren ²	61017	nicht angeg.	0,109 (0->1,5)	0,18 (-0,03-0,39)		
	Beschäftigte frz. EDF ³	22393	19,7 J.		2,7 (-2,3-9,1)		
	Kanada Nationalregister ⁷	169256	16,5 J.	0,0086	1,22 (0,47-2,10)	37,6	

EDF Electricité de France; ¹Azizova 2012, ²Ivanov 2006, ³Laurent 2010, ⁴Muirhead 2005, ⁵Azizova 2010, ⁶Engels 2005, ⁷Zielinski 2009,

*) in Klammern 95 % Vertrauensbereich **)PY Personnjahre

Für Strahlenschutz Zwecke erscheint es daher gegenwärtig nicht angebracht, sich auf Mittelwerte von stark divergierenden Einzelergebnissen zu stützen, sondern die ganze Spannweite möglicher Risiken muss gewürdigt werden.

Aus Tabelle 5 ergeben sich Verdopplungsdosen für die Herzinfarktgruppe zwischen 0,24 und 10 Sv, für die Schlaganfallgruppe zwischen 0,057 und 6,2 Sv, und für die Hochdruckgruppe 2,8 Sv.

Für die gesamten Kreislauferkrankungen ergibt sich in der weitaus größten Gruppe, aus dem kanadischen Nationalregister, mit einem ERR/Sv=1,22 eine Verdopplungsdosis von 0,82 Sv. Demgegenüber beträgt das ERR/Sv in der neuesten Auswertung bei den Atombombenüberlebenden (Ozasa 2012) für Kreislauferkrankungen 0,11 (Bereich 0,05-0,17) und entspräche damit einer Verdopplungsdosis von 9,1 Sv (Bereich 5,9-20).

Der vom kanadischen Register angegebene Wert für das absolute Risiko bezieht sich auf die Anzahl der Risikojahre und kann so mit der jeweiligen spontanen Inzidenz verglichen werden. Bei 16,5 Jahren Beobachtungszeit ergibt sich ein Gesamtrisiko von 6,2 % pro Sv für die Exposition erwachsener Männer.

Schlussfolgerungen

Die Empfehlung der ICRP von 2012, einen praktischen Schwellenwert von 0,5 Sv für strahleninduzierte Nicht-Krebskrankheiten anzusetzen, ist nach den vorliegenden wissenschaftlichen Ergebnissen nicht nachvollziehbar. Die derzeit in Strahlenschutzkreisen favorisierte Einschätzung, das Strahlenrisiko für nicht-karzinogene Erkrankungen sei etwa so hoch wie für Krebserkrankungen, ist erkennbar nicht konservativ, selbst wenn man nur die Kreislaufleiden als relevant ansieht.

Referenzen

Adams, M.J., Grant, E.J., Kodama, K., Shimizu, Y., Kasagi, F., Suyama, A., Sakata, R., Akahoshi, M.: Radiation dose associated with renal failure mortality: a potential pathway to partially explain increased cardiovascular disease mortality observed after whole-body irradiation. *Radiat. Res.* 177 (2012) 220-228

Alexanin, S.S., Slozina, N.M., Neronova, E.G., Makarova, N.V.: Chromosomal aberrations and sickness rates in Chernobyl clean-up workers in the years following the accident. *Health Phys.* 98 (2010) 258-260

Azizova, T.V., Muirhead, C.R., Druzhinina, M.B., Grigoryeva, E.S., Vlasenko, E.V., Sumina, M.V., O'Hagan, J.A., Zhang, W., Haylock, R.G., Hunter, N.: Cardiovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948-1958. *Radiat. Res.* 174 (2010a) 155-168

Azizova, T.V., Muirhead, C.R., Druzhinina, M.B., Grigoryeva, E.S., Vlasenko, E.V., Sumina, M.V., O'Hagan, J.A., Zhang, W., Haylock, R.G., Hunter, N.: Cerebrovascular diseases in the cohort of workers first employed at Mayak PA in 1948-1958. *Radiat. Res.* 174 (2010b) 851-864

Azizova, T.V., Muirhead, C.R., Moseeva, M.B., Grigoryeva, E.S., Vlasenko, E.V., Hunter, N., Haylock, R., O'Hagan, J.A.: Ischemic heart disease in nuclear workers first employed at the Mayak PA in 1948-1972. *Health Phys.* 103 (2012) 3-14

Bross, I.D.J., Ball, M., Rzepka, T., Laws, R.E.: Preliminary report on radiation and heart disease. *J. Med.* 9 (1978) 3-15

BfS Bundesamt für Strahlenschutz: Positionsbestimmung des BfS zu Grundsatzfragen des Strahlenschutzes. Leitlinien Strahlenschutz des BfS. 01.06.2005, www.bfs.de

- Eigenwillig, G.G.: Fehlerhafte Ermittlung und Zuordnung von Expositionswerten für Hauer in den Objekten 02, 03 und 09 der WISMUT in den Jahren 1946 bis 1976. *Zbl. Arbeitsmed.* 57 (2007) 375-390
- Engels, H., Swaen, G.M., Slangen, J., van Amersvoort, L., Holmstock, L., van Mieghem, E., van Regenmortel, I., Wambersie, A.: Radiation exposure and cause specific mortality among nuclear workers in Belgium (1969-1994). *Radiat. Prot. Dosimetry* 117 (2005) 373-381
- Hildebrandt, G.: Non-cancer diseases and non-targeted effects. *Mutat. Res.* 687 (2010) 73-77
- Howe, G.R., Zablotska, L.B., Fix, J.J., Egel, J., Buchanan, J.: Analysis of the mortality experience amongst U.S. nuclear power industry workers after chronic low-dose exposures to ionizing radiation. *Radiat. Res.* 162 (2004) 517-526
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP-Publication 103, Ann. ICRP 37 Nos. 2-4 (2007)
- ICRP, International Commission on Radiological Protection: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP-Publication 118, Ann. ICRP 41 Nos. 1-2 (2012)
- Ivanov, V.K., Maksioutov, M.A., Chekin, S.Y., Petrov, A.V., Biryukov, A.P., Kruglova, Z.G., Matyash, V.A., Tsyb, A.F., Manton, K.G., Kravchenko, J.S.: The risk of radiation-induced cerebrovascular disease in Chernobyl emergency workers. *Health Phys.* 90 (2006) 199-207
- Kreuzer, M., Kreisheimer, M., Kandel, M., Schnelzer, M., Tschense, A., Grosche, B.: Mortality from cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study, 1945-1998. *Radiat. Environ. Biophys.* 45 (2006) 159-166
- Lane, R.S., Frost, S.E., Howe, G.R., Zablotska, L.B.: Mortality (1950-1999) and cancer incidence (1969-1999) in the cohort of Eldorado uranium workers. *Radiat. Res.* 174 (2010) 773-785
- Laurent, O., Metz-Flamant, C., Rogel, A., Hubert, D., Riedel, A., Garcier, Y., Laurier, D.: Relationship between occupational exposure to ionizing radiation and mortality at the French electricity company, period 1961-2003. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 83 (2010) 935-944
- Lee, M.O., Song, S.H., Jung, S., Hur, S., Asahara, T., Kim, H., Kwon, S.M., Cha, H.L.: Effect of ionizing radiation induced damage of endothelial progenitor cells in vascular regeneration. *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* 32 (2012) 343-352
- Little, M.P., Gola, A., Tzoulaki, I.: A model of cardiovascular disease giving a plausible mechanism for the effect of fractionated low-dose ionizing radiation exposure. *PLoS Comput. Biol.* 2009 Oct;5(10):e1000539. Epub 2009 Oct 23
- Little, M.P., Tawn, E.J., Tzoulaki, I., Wakeford, R., Hildebrandt, G., Paris, E., Tapio, S., Elliott, P.: Review and meta-analysis of epidemiological associations between low/moderate doses of ionizing radiation and circulatory disease risks, and their possible mechanisms. *Radiat. Environ. Biophys.* 49 (2010) 139-153
- Little, M.P., Azisova, T.V., Bazyka, D., Bouffier, S.D., Cardis, E., Chekin, S., Chumak, V.V., Cucinotta, F.A., de Vathaire, F., Hall, P., Harrison, J.D., Hildebrandt, G., Ivanov, V., Kasheev, V.V., Klymenko, S.V., Kreuzer, M., Laurent, O., Ozasa, K., Schneider, T., Tapio, S., Taylor, A.M., Tzoulaki, I., Vandoolaeghe, W.L., Wakeford, R., Zablotska, L.B., Zhang, W., Lipschultz, E.: Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and estimates of potential population mortality risks. *Environ Health Perspect.* 120 (2012) 1503-1511
- Muirhead, C.R., O'Hagan, J.A., Haylock, R.G.E., Phillipson, M.A., Willcock, T., Berridge, G.L.C., Zhang, W.: Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers. *Brit. J. Cancer* 100 (2009) 206-212
- Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, Sakata R, Sugiyama, Kodama K.: Studies of the mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and non-cancer diseases. *Radiat. Res.* 177 (2012) 229-243

- Preston, D.L., Shimizu, Y., Pierce, D.A., Suyama, A., Mabuchi, K.: Studies of mortality of atomic bomb survivors, Report 13: solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat. Res.* 160 (2003) 381-407
- Schmitz-Feuerhake, I., Pflugbeil, S.: Strahleninduzierte Katarakte (Grauer Star) als Folge berufsmäßiger Exposition und beobachtete Latenzzeiten. *Strahlentext* Nr. 456-457 v. 5.1.2006, S. 1-7
- Schmitz-Feuerhake, I., Pflugbeil, S.: Gesundheitliche Auswirkungen des Uranbergbaus - Erfahrungen in Deutschland. *umwelt-medizin-gesellschaft* 24/1 (2011) 35-41
- Shimizu, Y., Kodama, K., Nishi, N., Kasagi, F., Suyama, A., Soda, M., Grant, E.J., Sugiyama, H., Sakata, R., Moriawaki, H., Hayashi, M., Konda, M., Shore, R.E.: Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. *BMJ* 2010;340:b5349
Online first
- SSK Strahlenschutzkommission: Krebsrisiko durch mehrjährige Expositionen mit Dosen im Bereich des Grenzwerts für die Berufslebensdosis nach § 56 StrlSchV. Empfehlung der SSK vom 20.04.07, *Bundesanzeiger* Nr. 183a vom 28.09.2007
- SSK, Strahlenschutzkommission: Strahleninduzierte Katarakte. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. Bonn 14.5.2009, www.ssk.de
- Stewart AM, Kneale GW.: A-bomb survivors: factors that may lead to a re-assessment of the radiation hazard. *Int. J. Epidemiol.* 29 (2000) 708-14
- Straume, T.: High-energy gamma rays in Hiroshima and Nagasaki: implications for risk and w_R . *Health Physics* 69 (1995) 954-956
- Radarkommission, Expertenkommission zur Frage der Gefährdung durch Strahlung in früheren Radarreinrichtungen der Bundeswehr und der NVA: Bericht, Berlin, 2.Juli 2003 www.bfs.de/bfs/fue-beitraege/radar/abschlussbericht.html
- Vrijheid, M., Cardis, E., Ashmore, P., Auvinen, A., Bae, J-M., Engels, H., Gilbert, E., Gulis, G., Habib, R.R., Howe, G., Kurtinaitis, J., Malker, H., Muirhead, C.R., Richardson, D.B., Rodriguez-Artalejo, F., Rogel, A., Schubauer-Berigan, M., Tardy, H., Telle-Lamberton, M., Usel, M., Veress, K.: Mortality from diseases other than cancer following low doses of ionizing radiation: results from the 15-Country Study of nuclear industry workers. *Int. J. Epidemiol.* 36 (2007) 1126-1135
- Watanabe, T., Miyao, M., Honda, R., Yamada, Y.: Hiroshima survivors exposed to very low doses of A-bomb primary radiation showed a high risk for cancers. *Environ. Health Prev. Med.* 13 (2008) 264-270
- Yablokov, A.V., Nesterenko, V.B., Nesterenko, A.V.: Chernobyl. Consequences of the catastrophe for people and environment. *Ann. New York Acad. Sci.* 1181 (2009) 327 Seiten
- Yamada, M., Wong, F.L., Fujiwara, S., Akahoshi, M., Susuki, G.: Noncancer disease incidence in atomic bomb survivors, 1958-1998. *Radiat. Res.* 161 (2004) 622-632
- Yamasaki, J.N., Schull, W.J.: Perinatal loss and neurological abnormalities among children of the Atomic bomb. Nagasaki and Hiroshima revisited, 1949 to 1989. *JAMA* 264 (1990) 605-609
- Zielinski, J.M., Shilnikova, N., Krewski, D.: Canadian National Dose Registry of Radiation Workers: overview of research from 1951 through 2007. *Int. J. Occ. Med. Environ. Health* 21 (2008) 269-275
- Zielinski, J.M., Ashmore, P.J., Band, P.R., Jiang, H., Shilnikova, N., Tait, V.K., Krewski, D.: Low dose ionizing radiation exposure and cardiovascular disease mortality: cohort study based on Canadian national dose registry for radiation workers. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 22 (2009) 27-33

Ausblick

Gesellschaft für Strahlenschutz e.V./Bund zur Unterstützung Radargeschädigter e.V.

Erkrankungen außer Krebs durch ionisierende Strahlen nach chronischer Exposition

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Nicht-karzinogene Krankheiten bei den Atombombenüberlebenden und die eingeschränkte Übertragbarkeit für andere Risikogruppen

Herz-Kreislaufkrankungen

Blutkrankheiten

Verdauungsorgane

Endokrines System

Nervensystem

Fertilität

Knochen-Muskel-System

Haut- und Unterhautgewebe

Gutartige Tumore

Katarakte

Genetische Schäden