

Diskussion zur Bewertung von Neutronen

Inhalt

1.	Argumente und ihre Diskussion	2
1.1.	Der Strahlungswichtungsfaktor w_R berücksichtigt Dosis- und Dosisleistungseffekte sowie die RBW von Röntgen- und Gammastrahlung	2
1.2.	Abweichende Stellungnahmen sind Einzelmeinungen ohne wissenschaftliche Begründung.....	2
1.3.	Die Graphik Sinclairs belegt die Berücksichtigung von Dosis- und Dosisleistungseffekten im w_R	3
1.4.	Zu hohe Bewertung durch Kombination jeweils maximal abgeschätzter Faktoren.....	5
1.5.	Neue berechnete Äquivalentdosis nur 1,5fach höher als der Wert nach StrlSchV	6
2.	Literatur	9

¹ Prof. Dr. Horst Kuni, Klinische Nuklearmedizin, Med. Zentrum für Radiologie, Philipps-Universität Marburg, 35033 Marburg/Lahn
<http://staff-www.uni-marburg.de/~kuni/h/>, h.kuni@mail.uni-marburg.de

1. Argumente und ihre Diskussion

1.1. Der Strahlungswichtungsfaktor w_R berücksichtigt Dosis- und Dosisleistungseffekte sowie die RBW von Röntgen- und Gammastrahlung

Argument: Die ICRP 60 hat statt des Qualitätsfaktors Q den Strahlungswichtungsfaktor w_R eingeführt, um die Unterschiede der biologischen Wirkung dichtungisierender Strahlen zu berücksichtigen und dabei nicht nur Dosis- und Dosisleistungseffekte, sondern auch den Wirkungsunterschied zwischen Röntgen- und Gammastrahlung beachtet [ICRP 60 1991].

Richtig ist, daß die ICRP 60 erklärt, wegen der strahlenbiologischen Unsicherheiten in der Q-L-Relation anstelle des Q den Strahlungswichtungsfaktor eingeführt und die Werte dafür unter Berücksichtigung der Beobachtungen zur relativen biologischen Wirksamkeit (RBW)² empfohlen zu haben (Absatz A9). Umso mehr muß die Diskrepanz zwischen den empfohlenen Werten und der experimentellen Erfahrung beachtet werden. Die ICRP 60 hat für alle locker ionisierenden Strahlen den Wichtungsfaktor auf Eins gesetzt. Dazu gehört konsequent auch, daß nicht berücksichtigt wird, ob die Bezugsstrahlung Röntgenstrahlung oder Gammastrahlung ist (Absatz 25).

Dadurch kann aber meiner grundsätzlichen Argumentation nicht ausgewichen werden. Schließlich ist der Unterschied der RBW für stochastische Effekte zwischen Gamma- und Röntgenstrahlen um den Faktor Zwei auch von der ICRP akzeptiert ist (Absätze 25 und B68). Würde Gammastrahlung als Bezugsstrahlung aufgefaßt werden, wüchse entsprechend die Diskrepanz zwischen der experimentell gefundenen RBW und dem empfohlenen Strahlungswichtungsfaktor um den Faktor Zwei, wodurch die Nichtberücksichtigung dieses Unterschieds nur auf eine andere Ebene verschoben wäre.

1.2. Abweichende Stellungnahmen sind Einzelmeinungen ohne wissenschaftliche Begründung

Argument: Die ICRP hat sich bei ihrem Beschluß auf Experten gestützt. Davon abweichende Stellungnahmen können nur Einzelmeinungen darstellen, die sich außerhalb des Standes der wissenschaftlichen Erkenntnisse bewegen.

Der Beschluß im Hauptkomitee der ICRP wurde keineswegs von Experten auf dem Gebiet der RBW gefaßt. Diese waren vielmehr in der task group versammelt, die von der ICRP und der ICRU gemeinsam 1980 installiert worden war und die ihren Bericht 1986 publizierte hatte [ICRU 40 1986]. Es muß ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß die Empfehlung eines pauschalen Q von 25 für

² im Englischen: RBE, relative biological effectiveness

Neutronen unabhängig von der Energie durch diese task group im Hinblick auf zahlreiche beobachtete Werte, die erheblich über 25 lagen, damit begründet wurde, daß die Ergebnisse aller Experimente, die die Wirkung von Neutronen mit ^{60}Co -Gammastrahlung verglichen haben, für eine Verwendung mit der Referenzstrahlung Röntgenstrahlung durch Zwei zu dividieren seien. Das bestätigt zugleich, daß sich die Empfehlung der task group ausdrücklich auf Röntgenstrahlung als Bezugsstrahlung bezieht. Im übrigen hat die ICRU 40 ihre Empfehlungen als "akzeptable Näherung" bezeichnet und ausdrücklich darauf hingewiesen, daß eine Reihe von Untersuchungen bei sehr niedrigen Dosen höhere RBW als die empfohlenen Werte für Q ergeben hätten und deshalb bei dichtionisierender Strahlung besondere Umsicht im Strahlenschutz angezeigt sei.

1.3. Die Graphik Sinclairs belegt die Berücksichtigung von Dosis- und Dosisleistungseffekten im w_R

Argument: Die ICRP 60 hat in den Strahlungswichtungsfaktoren die Abhängigkeit der RBW von der Dosis und Dosisleistung (ausreichend) berücksichtigt, wie aus dem Zitat einer Graphik von Sinclair (1982) hervorgeht (Fig. B-6).

Diese Graphik von Sinclair trägt bemerkenswerterweise weder auf der Y-Achse für den Effekt noch auf der X-Achse für die Dosis eine quantitative Skala. Durch die Position der eingezeichneten Relation von a und b (Dosis einer dicht- und lockerionisierenden Strahlung für einen gleichen Effekt) wird zudem der Eindruck erzeugt, die Relation $\text{RBW} = b/a$ sei im Niedrigdosisbereich abgeleitet worden. Eine Angabe zu den Energien der Strahlenarten fehlt ebenso wie zum Ausmaß der Fraktionierung (Dosisleistung). Wer 1995 seine Argumentation zur RBW von Neutronen auf diese Skizze stützt, dokumentiert, daß an ihm mehr als ein Jahrzehnt Neutronenforschung und strahlenbiologische Erfahrung spurlos vorbeigegangen sind.

Die Skizze von Sinclair demonstriert für lockerionisierende Strahlen einen Wirkungsunterschied zwischen einer Einzeitbestrahlung und einer fraktionierten Applikation, der für stochastische Effekte weder im Experiment noch in epidemiologischen Analysen verifiziert werden konnte. Lediglich für die Induktion von Leukämie beim Menschen kann die Existenz einer linear-quadratischen Dosis-Wirkungsrelation heute noch ernsthaft diskutiert werden. Für solide Tumoren gehen neuere Publikationen einschließlich BEIR V von einer linearen Dosiswirkungsrelation aus [BEIR V 1990, Pierce, Vaeth 1991, Thompson et al. 1992/1994]. Darüber hinaus muß erwähnt werden, daß es auch für lockerionisierende Strahlen ernsthafte Argumente gibt, die die Hypothese einer inversen Dosisrelation zu stützen scheinen [Köhnlein, Nußbaum 1990, 1991]. Auch der Spekulation, der Wirkungsunterschied zwischen ^{60}Co -Gammastrahlung und Röntgenstrahlung beruhe auf einem Dosisleistungseffekt, ist damit der Boden entzogen. Davon abgesehen, wird dieser Wirkungsunterschied unabhängig von Dosisleistung und Dosis bereits durch moderne mikrodosimetrische Modelle in dieser Größe vorhergesagt [ICRU 40 1986].

Die Darstellung des Dosisleistungseffektes für dichtungisierende Strahlen in der Skizze von Sinclair ist ebenfalls mit den inzwischen erhaltenen experimentellen Daten nicht zu vereinbaren. Schließlich sagen die mikrodosimetrischen Modelle von Brenner und Hall, die durch ihre Experimente bestätigt wurden, für Neutronen-Dosen um ein Gray Wirksamkeitsunterschiede zwischen protrahierter und akuter Einwirkung bis zu über das 40fache (!) voraus [Brenner, Hall 1990]. Auch im Niedrigdosisbereich, etwa im Bereich der beruflichen Lebensdosis, resultieren experimentell gestützte Voraussagen mit einem Faktor etwa Drei [Diskussion dazu s. Kuni 1993, 1994].

Die ICRP 60 zitiert eine Zunahme der RBW um das 1,5 bis 2,5fache, weist auf deutlich höhere Werte "unter manchen Umständen" hin, hält aber den inversen Dosisleistungseffekt für "nicht verstanden" (Absatz B64). Es ist nicht nachvollziehbar, daß 1990 den "Experten" die bereits 1990 publizierten mikrodosimetrischen Begründungen für den inversen Dosisleistungseffekt nicht bekannt gewesen sein sollen.

Auch das Argument, Versuche an Zellkulturen seien nicht auf die Induktion humaner Tumore übertragbar, kann angesichts des Modells von Brenner und Hall nicht greifen. Im Gegenteil: Es ist überfällig, dieses Modell auf bekannte zellkinetische Daten menschlicher Organe zu übertragen, um möglichst organspezifische Vorhersagen zur Tumorinduktion beim Menschen treffen zu können.

Auch der Eindruck, die in einschlägigen Tabellen präsentierten Werte für die RBW würden den inversen Dosisleistungseffekt im für den Strahlenschutz relevanten Niedrigdosisbereich bereits berücksichtigen, trügt. Die Versuche wurden mit erheblich höheren Dosen durchgeführt, als sie im heutigen Strahlenschutz relevant sind. Durch die ausführliche Diskussion einiger experimenteller Beobachtungen zum RBW unter Präsentation der Tabelle B-3 scheint die ICRP 60 allen beobachteten Effekten bei der Empfehlung der Strahlungswichtungsfaktoren Rechnung getragen zu haben. Dies läßt sich jedoch noch nicht einmal mit den dort präsentierten Daten nachvollziehen, geschweige denn mit den übrigen experimentellen Befunden.

Darüber hinaus zitiert die ICRP 60 noch nicht einmal korrekt, wenn sie für den Brustkrebs der Maus als Obergrenze der RBW 70 angibt. Die in der Tabelle präsentierten Werte für Tumorinduktion bis zu etwa 200 sind ebenfalls auf indirekte Weise falsch zitiert. Bei der Tabelle handelt es sich um einen Auszug aus der Tabelle D-4 der ICRU 40. Dort ergibt sich aus dem Zusammenhang, daß die Werte teilweise auf eine angenommene Wirkung von Gammastrahlung umgerechnet worden sind. Die höchsten Werte, auf die sich diese Tabelle stützt, stammen aus Versuchen mit Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung, bei denen noch bei 1 mGy Neutronendosis ein signifikanter Tumoreffekt erzielt wurde. Für die niedrigsten Dosen wurde der RBW von 100 sogar noch erheblich überschritten und erreichte etwa den Wert 280 (!) [Shellabarger et al. 1980].

Die Kürzung der Tabelle D-3 in der ICRP 60 im Vergleich zu Tabelle D-4 in der ICRU 40 wird implizit damit begründet, daß nur stochastische Wirkungen aufgeführt sind. In der Tabelle D-4 der ICRU 40 war noch auf die RBW der Trübung der Augenlinse verwiesen worden, wobei RBW-Werte bis 200 angege-

ben worden waren. Auch hier handelt es sich um eine Umrechnung von Versuchsergebnissen, bei denen Röntgenstrahlung als Vergleichsstrahlung gewählt worden war. Bei einer Neutronendosis von $220 \mu\text{Gy}$ war der RBW-Wert wesentlich größer als 100 und erreichte Wert um 570 (!) [Bateman et al. 1972]. Da nach neueren Auswertungen der Hiroshimadaten die Linsentrübung eine lineare Dosiswirkungsrelation zeigt und die statistische Anpassung der Daten ohne Schwelle besser gelingt als mit einer Schwellendosis [Otake et al. 1991], muß wohl auch das Substrat der Schädigung der einzelnen Zellen in einem stochastischen Effekt gesehen werden. Das bedeutet zugleich, daß auch die Ergebnisse dieser Experimente in die Diskussion der RBW stochastischer Wirkungen einbezogen werden müssen.

Im übrigen wird in den Tabellen der Eindruck erweckt, bei allen Effekten sei das Maximum des RBW (RBW_M) gefunden worden. Das würde voraussetzen, daß in mindestens zwei, wegen der Streuung der Ergebnisse möglichst mehreren, aufeinanderfolgenden Bereichen mit abnehmender Dosis keine Steigerung der RBW gefunden worden ist. Dies ist aber keineswegs immer der Fall und insbesondere nicht bei den oben zitierten Werten für Mammatumore und Linsentrübung.

Darüber hinaus weichen sogar die konkreten Ergebnisse in der niedrigsten Dosisklasse erheblich nach oben von der RBW-Dosis-Beziehung ab, die unter der Hypothese einer reziproken Abhängigkeit der RBW von der Wurzel der Dosis berechnet worden war. Für die Mammatumore und die Linsentrübung waren unter dieser Hypothese in der niedrigsten Dosisklasse Werte um 180-190 erwartet worden.

Schließlich stützen die konkreten Dosiswirkungsrelationen keineswegs die ursprünglichen Annahmen, mit denen die Existenz eines RBW_M abgeleitet worden ist [ICRU 40 1986]: Lineare Dosiswirkungsrelation für dicht- und linear-quadratische Dosiswirkungsrelation für lockerionisierende Strahlen. Vielmehr zeigt sich z.B. für den Mammatumor der Maus ein inverser Dosisseffekt für die Wirkung bei Neutronen und eine lineare Dosiswirkungsrelation für Röntgenstrahlung [Shellabarger et al. 1980].

1.4. Zu hohe Bewertung durch Kombination jeweils maximal abgeschätzter Faktoren

Argument: Die von Kuni vorgeschlagenen höheren Bewertungsfaktoren sind dadurch entstanden, daß jeder einzelne Faktor, der zur Gesamtbewertung beiträgt, nach oben abgeschätzt worden ist. Bei einem solchen Verfahren werden maximale Werte erzielt, die jedoch in der Regel zu einer zu hohen Bewertung der Bestrahlung führen.

Wie schon eine flüchtige Durchsicht der Literatur ergibt, ist eine RBW für stochastische Effekte von 25, bezogen auf Röntgenstrahlung keineswegs ein maximaler Wert, sondern eine Näherung der ICRU 40 (s.o.).

Der Wirkungsunterschied von Faktor Zwei zwischen Gammastrahlung und Röntgenstrahlung ist ebenfalls kein maximaler Wert, sondern ein mittlerer Wert, der übereinstimmend sowohl durch mikrodosimetrische Modelle wie experimentelle Beobachtungen gestützt wird.

Die inverse Dosisrelation mit einer reziproken Änderung der RBW mit der Wurzel der Dosis ist ebenfalls sowohl durch mikrodosimetrische Modelle als auch durch experimentelle Beobachtungen belegbar und keine maximale Annahme, da gerade in den niedrigen Dosisklassen die experimentellen Ergebnisse z.T. signifikant von dieser Beziehung nach oben abweichen. Dies gilt sinngemäß auch für die komplexeren Verhältnisse der inversen Dosisleistungsabhängigkeit. Wenn für die Bewertung der Strahlenbelastung von Begleitpersonal nur die inversen Dosisleistungsabhängigkeit mit dem Faktor Drei berücksichtigt wurde, ist dies wahrscheinlich eher eine Unterschätzung der tatsächlichen Gefährdung. Dieser Faktor trifft zu für eine Lebensdosis um 400 mSv, wie sie für beruflich exponierte Personen maximal zulässig ist und wurde deshalb angewendet, weil den Begleitpersonen eine Belastung zugemutet wird, die die Grenzwerte für die normale Bevölkerung übersteigt. Bei niedrigeren Dosen geht nach dem Modell von Brenner und Hall der inverse Dosisleistungseffekt zurück und nähert sich Eins. Dafür muß aber der inverse Dosisseffekt beachtet werden, der für Dosen im Bereich des Bevölkerungsschutzes Faktoren von Vier und mehr verlangt.

Der Faktor Zwei zum Ausgleich des für dichtungisierende Strahlen bei der Ableitung von Grenzwerten nicht anwendbaren DDREF ist sogar niedrig gegriffen, wenn man berücksichtigt, daß die derzeitigen Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung auf Empfehlungen rekurrieren [ICRP 26 1977], bei denen zwischen einer linearen und einer linear-quadratischen Dosiswirkungsrelation noch ein Wirksamkeitssunterschied im Niedrigdosisbereich von etwa 2,3 angesetzt worden war [s. auch BEIR III 1980, NIH 1985].

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, daß meine Abschätzungen der Gesundheitsgefährdung des Begleitpersonals von der Werten der Dosisleistung ausgegangen sind, die von den Betreibern mitgeteilt wurde. Dabei scheint es sich um mittlere Werte zu handeln, von denen an einzelnen Aufpunkten um den CASTOR herum auch deutliche Abweichungen nach oben zu erwarten sind. Deshalb kann eine individuelle Belastungssituation durchaus unterschätzt worden sein.

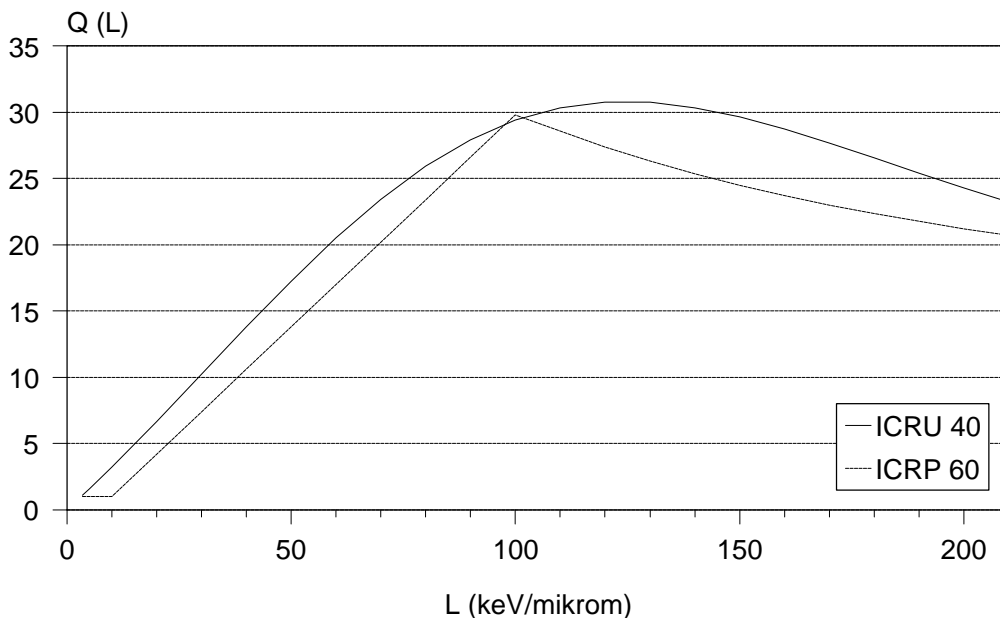
1.5. Neue berechnete Äquivalentdosis nur 1,5fach höher als der Wert nach StrISchV

Argument: Rechnungen für Neutronenstrahlenfelder an Brennelementtransportbehältern zeigen, daß die neue Meßgröße für die Äquivalentdosis um einen Faktor 1,4-1,5 über den zur Zeit vorgegebenen Meßgrößen liegt und nicht 1,86, wie von Kuni angenommen.

In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, daß dabei keineswegs die empfohlenen Wichtungsfaktoren der ICRP 60 angewendet worden sind. Vielmehr hat die PTB mit Hilfe neuer Daten für die stopping power, die für Protonen und Alphateilchen bis 30 MeV publiziert worden sind [Caswell, Coyne 1980], neue Werte für Q in Abhängigkeit von der Neutronenenergie ausgerechnet, wobei die Q-L-Relation verwendet worden ist, die die ICRP 60 in Tab. A-1 (Absatz A8) angegeben hat [Siebert, Schumacher 1995].

Das ist zunächst ein bemerkenswerter Widerspruch gegen die Aussage in der ICRP 60, Werte für w_R unter Berücksichtigung biologischer Beobachtungen zu empfehlen und nicht von einer Q-L-Relation abzuleiten. In diesen Widerspruch hat sich übrigens auch bereits die ICRP 60 verwickelt, wenn sie Berechnungen für Q in Abhängigkeit von der Energie von Neutronen (Fig. A-3) und Photonen (Fig. A-2) präsentiert, um die Plausibilität ihrer Empfehlungen für w_R zu unterstreichen, die in beiden Fällen mit der in der ICRP 60 empfohlenen Q-L-Relation (Absatz A8) berechnet worden waren.

Eine nachvollziehbare Ableitung dieser Q-L-Relation findet sich allerdings nicht. Auch die Begründung der ICRP, daß von ihr weiterhin Q vom LET (L) abgeleitet wird (Absatz A6), ist nicht nachvollziehbar. Die Begründung, L sei meistens in den praktisch existierenden Strahlenschutzberechnungen verwendet



worden, ist ein Zirkelschluß, da diese Berechnungen auf Empfehlungen der ICRP zurückgehen.

Abb. 1: Abhängigkeit des Qualitätsfaktors Q vom linearen Energie Transfer (LET) L.
 ICRU 40: Aus der Abhängigkeit des Q von der linealen Energie nach ICRU 40 [1986] umgerechnet, wobei für L 8/9 der linealen Energie gewählt wurde.
 ICRP 60: Von der ICRP 60 [1991] angenommene Q-L-Relation.

Stand der Wissenschaft ist seit vielen Jahren, daß die Ableitung von Q aus der linealen Energie (l) zu Resultaten führt, die die strahlenbiologischen Erfahrungen besser beschreiben. Rechnet man die von ICRU 40 beschriebene Q-I-Relation in eine Q-L-Relation um, ergeben sich für viele Bereiche des LET deutlich höhere Q-Werte als bei Anwendung der Relation aus der ICRP 60 (s. Abb. 1, S. 7). Eine plausible Begründung für diese Abweichungen findet sich in der Literatur nicht.

Seit mehr als einem Jahrzehnt wird nach den modernen mikrodosimetrischen Konzepten eine Ableitung des Q vom LET als obsolet angesehen. Zum Beispiel führt dies im Bereich der lockerionisierenden

Strahlung zu einem errechneten Wirksamkeitsunterschied zwischen Gammastrahlung und Röntgenstrahlung in der Größenordnung eines Faktors 16, der weit von jeder experimentellen Erfahrung entfernt liegt [ICRU 40 1986]. Die Ableitung des Q aus der linealen Energie führt dagegen für eine Kugel mit einem Mikrometer Durchmesser zu einem berechneten Wirkungsunterschied zwischen Röntgenstrahlung und Gammastrahlung von Zwei, der die gefundenen experimentellen Werte befriedigend vorhersagt. Auch die RBW der Neutronen für Effekte, wie die Inaktivierung von Hamsterzellen und die Wachstumshemmung der Wurzelspitze der Bohne, lassen sich mit dieser Relation recht gut erklären. Andererseits gibt es im stochastischen Bereich beachtliche Abweichungen zwischen der beobachteten RBW und dem so berechneten Q. Daraus kann geschlossen werden, daß das zugrundegelegte Treffervolumen und andere Modellannahmen nicht der biologischen Realität entsprechen. Diese Diskrepanzen legen zwar nahe, sich bei der Empfehlung eines Strahlenwichtungsfaktors zusätzlich an experimentellen Daten zu orientieren, wie es allerdings ICRP 60 nicht ausreichend vollzieht, rechtfertigen aber in keiner Weise den Rückgriff auf die obsolete Q-L-Relation.

2. Literatur

Bateman, J.L., Rossi, H.H., Kellerer, A.M., Robinson, C.V., Bond, V.P. 1972
Dose-Dependence of Fast Neutron RBE for Lens Opification in Mice
Radiat. Res. 51, 381-390

BEIR III 1980
Committee on the **B**iological **E**ffects of **I**onizing **R**adiations
The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: 1980
National Academy Press, Washington DC

BEIR V 1990
Committee on the **B**iological **E**ffects of **I**onizing **R**adiations
Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation
National Academy Press, Washington DC

Brenner, D.J., Hall, E.J. 1990
The Inverse Dose-Rate Effect for Oncogenic Transformation by Neutrons and Charged Particles:
A Plausible Interpretation Consistent with Published Data
Int. J. Radiat. Biol. 58, 745-758

Caswell, R.S., Coyne, J.J. 1980
Kerma Factors for Neutron Energies below 30 MeV
Radiat. Res. 83, 217-254

ICRP 60 1991
International **C**ommission on **R**adiological **P**rotection
Publication 60
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
Annals of the ICRP Vol. 21, No. 1-3
Pergamon Press, Oxford, New York, Seoul, Tokyo

ICRU 40 1986
International **C**ommission on **R**adiation **U**nits and **M**easurements
The Quality Factor in Radiation Protection
Report of a Joint Task Group of the ICRP and ICRU to the ICRP and ICRU
Report 40, Bethesda, Maryland 20814, USA

Köhnlein, W., Nußbaum, R.H. 1990
Die neueste Krebsstatistik der Hiroshima-Nagasaki-Überlebenden: Erhöhtes Strahlenrisiko bei
Dosen unterhalb 50 cGy (rad); Konsequenzen für den Strahlenschutz
In: Köhnlein, W., Kuni, H., Schmitz-Feuerhake, I. (Hrsg.) 1990, Niedrigdosisstrahlung und Ge-
sundheit, Medizinische, rechtliche und technische Aspekte mit dem Schwerpunkt Radon,
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, HongKong, Barcelona, S.
201-214

Köhnlein, W., Nußbaum, R.H. 1991
Reassessment of Radiogenic Cancer Risk and Mutagenesis at Low Doses of Ionizing Radiation
Adv. Mutag. Res. 3, 53-80

Kuni, H. 1993

Die Bewertung von Alpha- und Neutronenstrahlen bei der Berechnung der Äquivalentdosis
In: Lengfelder, E., Wendhausen, H. (Hrsg.):
Neue Bewertung des Strahlenrisikos, Niedrigdosis-Strahlung und Gesundheit
MMV Medizin Verlag, München, 1993, S. 19-27

Kuni, H. 1994

Niedrige Strahlendosen und Gesundheit der Arbeitnehmer,
Berichte des Otto Hug Strahleninstitutes, Bonn, Bericht 8-11, MMV Verlag München

NIH 1985

Report of the **National Institutes of Health**
ad hoc working group to develop
radioepidemiological tables
NIH Publ. 85-2748

Otake, M., Finch, St.C., Choshi, K., Takaku, I., Mishima, H., Takase, T. 1991

Radiation-related Ophthalmologic Changes and Aging among the Atomic Bomb Survivors: A Re-analysis
Technical Report, Hiroshima, 1992, RERF TR 18-91

Pierce, D.A., Vaeth, M. 1991

The Shape of the Cancer Mortality Dose-Response Curve for the A-Bomb Survivors
Radiat. Res. 126, 36-42

Shellabarger, C.J., Chmelevsky, D., Kellerer, A.M. 1980

Induction of Mammary Neoplasms in the Sprague-Dawley Rat by 430-keV Neutrons and X-Rays
J. Natl. Cancer 64, 821-833

Siebert, B.R.L. Schumacher, H. 1995

Quality Factors, Ambient and Personal Dose Equivalent for Neutrons, Based on the New ICRU
Stopping Power Data for Protons and Alpha Particles
Radiat. Prot. Dosim. 58, 177-183

Thompson, D.E., Mabuchi, K., Ron, E., Soda, M., Tokunaga, M., Ochikubo, S., Sugimoto, S., Ikeda, T.,
Terasaki, M., Izumi, S., Preston, D.L. 1992/1994

Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part II: Solid Tumors, 1958-1987
Technical Report, Hiroshima, 1992, RERF TR 5-92
Radiat. Res. 137, 1994, S17-S67