

Horst Kuni:

CASTOR gefährdet Gesundheit

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Köhnlein zum 65. Geburtstag

Dr. Horst Kuni, Universitätsprofessor, Klinische Nuklearmedizin, Philipps-Universität Marburg,
D 35033 Marburg,

<http://staff.uni-marburg.de/~kuni/>; horst@kuni.org

Inhalt

Anmerkung zu diesem Nachdruck	3
Vorbemerkung	3
1. Warum und in welchem Ausmaß wird die Strahlengefahr unterschätzt	4
1.1 Quellen und Arten der Strahlung	4
1.2 Wirksamkeit der Strahlenarten	5
1.3 Das Konzept der Äquivalentdosis	6
1.4 Die Messung der Strahlung	7
1.5 Grenzwert für Gefahrguttransporte veraltet.....	10
1.6 Welches ist die Referenzstrahlung.....	11
1.7 Grenzwerte vom Schicksal der Atombombenopfer abgeleitet	11
1.8 Ausgleich zwischen Stand der Wissenschaft und der Strahlenschutzverordnung.....	13
1.9 Wirkungsverlust im Niedrigdosisbereich - eine Hypothese im Strahlenschutz.....	14
1.10 Kleiner Exkurs für alle, die Formeln schätzen	16
1.11 Wie sieht die PTB den DDREF?.....	17
1.12 Die Realität der Atombombenopfer	19
1.13 Verbesserung der konventionellen Arbeitsbedingungen	23
1.14 Der Einfluß der Bevölkerungsstruktur und Krebssterblichkeit.....	24
1.15 Biologische Wirksamkeit der Neutronen	25
1.16 Bilanz: Biologische Äquivalenz der CASTOR-Strahlung.....	27
2. Praktische Konsequenzen	29
2.1 Nahzone des CASTOR	29
2.1 Anlieger der Transportstrecken	35
Literatur	39

Anmerkung zu diesem Nachdruck

Leider hat dieser Beitrag zum Bericht 19/20 des Otto-Hug-Strahleninstituts 1998 nichts von seiner Bedeutung verloren, nachdem die CASTOR-Transporte wieder aufgenommen worden sind. Wegen des anhaltenden Interesses wird deshalb dieser Nachdruck bereit gestellt. Es wird um Verständnis gebeten, dass Literatur und Rechtschreibung dem Stand des Jahres 1998 entsprechen.

Vorbemerkung

Die Broschüre *Gefährdung der Gesundheit durch Strahlung des Castor* [21] hat eine breite Diskussion ausgelöst, welche Gesundheitsgefahren die Strahlung eines intakten und dichten Atommüllbehälters verursacht. Neue Informationen sind seit dieser Zeit hinzugekommen und viele Fragen aufgeworfen worden. Aus heutiger Sicht stellen sich diese Gefahren noch erheblich ausgeprägter dar. Dieser Beitrag soll darüber allgemeinverständlich berichten.

Die Lektüre wird zeigen, daß der Autor eine andere Sicht hat als der Präsident des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS), der in einer Presseerklärung vom 3.08.1995 (25/95) äußerte: „Von dem Castor gehen keine Strahlengefahren aus“. Im ersten Teil werden die Gründe für diese unterschiedlichen Standpunkte erörtert. Im zweiten Teil über die praktischen Konsequenzen findet sich eine Aktualisierung der gesundheitlichen Gefährdung im Nahfeld des CASTOR sowie im weiteren Abstand für die Anwohner der Transportstrecken.

Kernpunkt der Auseinandersetzung ist die systematische Unterbewertung der Strahlengefahren im amtlichen Strahlenschutz, die sich bei der Neutronenstrahlung besonders drastisch darstellt. Natürlich sind die Vertreter der Atomindustrie und die sie unterstützenden Wissenschaftler nicht so dreist, der Bevölkerung offen Grenzwerte und Strahlendosen zu deklarieren, die um mehr als eine Größenordnung von dem Niveau abweichen, das als akzeptabel unterstellt wird. Vielmehr scheint es erfolgreicher zu sein, auf sehr intelligente Weise die enorme Abweichung in eine Reihe kleinerer, scheinbar unwesentlich abgerundeter Faktoren aufzuteilen. Das macht aber die Analyse entsprechend schwierig und wirkt sich auch auf die Diskussion aus, in der ständig von einem zum anderen Faktor gesprungen wird, wodurch die tatsächlichen Zusammenhänge verschleiert werden können.

Deshalb erfordert dieser Beitrag vielleicht Geduld. Jedoch hat sich der Autor um eine Beschränkung auf die Punkte bemüht, die Leserinnen und Leser bei einer eigenen Urteilsbildung behilflich sein sollen, ob und inwieweit amtliche Verlautbarungen zur Sicherheit des CASTOR zutreffen. Viele Detailfragen

müssen ausgespart bleiben. Interessierte seien auf weitere Diskussionsbeiträge zu dieser Thematik verwiesen [22-27, 29, 30, 31].

1. Warum und in welchem Ausmaß wird die Strahlengefahr unterschätzt

1.1 Quellen und Arten der Strahlung

Die hier besprochenen Behälter für hochradioaktiven Müll dienen dem Transport und häufig auch einer längeren Lagerung. Sie können abgebrannte Brennstäbe aus Atomkraftwerken (AKW) oder Abfall aus Wiederaufarbeitungsanlagen enthalten und verschiedene Bauformen aufweisen. In diesem Beitrag wird als Beispiel in der Regel der CASTOR Ila herangezogen, der 1995 mit neun Brennelementen aus dem AKW Philippsburg nach Gorleben geschafft worden war. Es ist zu beachten, daß sich hinter der Bezeichnung CASTOR verschiedene Bauarten verbergen, auf die aber grundsätzlich die folgenden Ausführungen analog übertragen werden können.

Die wichtigste Strahlenquelle ist der Atommüll im Behälter. Abgebrannte Brennelemente haben ein so intensives Strahlungsfeld, daß sie ohne Behälter sich gegen unbefugten Zugriff selbst schützen. Bereits bei einem kurzen Aufenthalt in ihrer Nähe ruft die intensive Gammastrahlung schwere Krankheitserscheinungen als Vorboten des nahen Todes hervor. Ein dickwandiger Behälter kann diese unmittelbare Gesundheitsgefahr vermeiden. Die im Atommüll freigesetzte Alpha- und Betastrahlung wird durch eine intakte Wand zuverlässig abgeschirmt. Ob der CASTOR auch eine Freisetzung radioaktiver Schadstoffe verhindern kann, die aus defekten Brennelementen austreten, ist fraglich. Auf die Probleme durch ablösbare radioaktive Verschmutzung des CASTOR auf seiner äußeren Oberfläche wird in diesem Beitrag nicht eingegangen. Dazu hat sich der Autor bereits an anderer Stelle geäußert [34]. Interessierte seien auch auf die Beiträge von Schmitz-Feuerhake und der Gesellschaft für Strahlenschutz hingewiesen [10, 40, 41].

Der gelegentlich gebrauchte Ausdruck „Sicherheitsbehälter“ kann irreführen, falls er den Eindruck erweckt, von einem intakten und dichten Behälter ginge keine Gesundheitsgefahr aus. Denn die Wand des intakten Behälters durchdringen zwei Strahlenarten, Gammastrahlung und Neutronen. Beiden Strahlenarten ist gemeinsam, daß ihre Intensität durch eine Materieschicht zwar vermindert werden kann, grundsätzlich aber eine restliche Strahlung übrigbleibt.

Gammastrahlung ist einer Röntgenstrahlung vergleichbar. Es handelt sich um eine elektromagnetische Wellenstrahlung. Sie wird durch die etwas mehr als 40 cm dicke Wand aus Gußeisen sehr kräftig, aber nur unvollständig abgeschirmt.

Neutronen stellen eine Teilchenstrahlung dar und sind damit einem Gas vergleichbar. Die winzigen Partikel haben eine Größe, die mit dem Kern eines Wasserstoffatoms vergleichbar sind, im Gegensatz zu ihm aber keine Ladung. Sie können deshalb keine chemischen Verbindungen eingehen, durch die

sie fixiert werden. So gelingt es ihnen auch, durch das Atomgitter des Gußeisens hindurch zu schlüpfen, das Wasserstoffatome zurückhält. Bei einem Zusammenstoß mit einem Eisenatomkern verlieren sie zwar Energie, können sich aber weiterbewegen. Am effektivsten können sie ihre Energie auf einen Atomkern vergleichbarer Größe übertragen, also auf einen Wasserstoffatomkern. Deshalb sind in der Wand des CASTOR Polyäthylenstäbe eingesetzt. Dennoch ist die Rückhaltung der Neutronen um Größenordnungen geringer als die der Gammastrahlung.

Viele Neutronen werden von den Eisenatomen der Wand eingefangen. Dadurch wird in der Wand eine zusätzliche Gammastrahlung erzeugt. Ihr Beitrag zur Strahlenbelastung kann nahezu so groß werden wie der durch die Gammastrahlung aus dem Atommüll, die noch durch die Behälterwand dringt. Die Neutronen bewirken also, daß die Wand des CASTOR selbst zur kräftigen Strahlenquelle wird. Die dabei entstehende Strahlung hat eine ungewöhnlich hohe Energie, ist also wesentlich durchdringender und schwieriger abzuschirmen.

Mit einer Halbwertszeit von etwa elf Minuten zerfallen Neutronen radioaktiv und senden eine Betastrahlung aus. Es ist deshalb falsch zu behaupten, daß aus einem intakten und dichten CASTOR keine Radioaktivität austritt. Der Eisenbehälter kann das Neutronengas so wenig zurückhalten, wie eine poröse Luftballonhülle eine Füllung von Wasserstoffgas. Der Versuch, Neutronen im CASTOR sicher zurückzuhalten, gleicht dem Vorhaben, Wasser in einem löchrigen Eimer zu tragen - mit dem Unterschied, daß die Neutronen im CASTOR ständig aufs Neue entstehen. Aus einem CASTOR tritt also ständig radioaktives Giftgas aus, dessen Radioaktivität Millionen von Becquerel entspricht.

Für die ständige Bildung der Neutronen sind transurane Atomkerne verantwortlich, die beim Abbrand der Brennstäbe im AKW erbrütet worden sind. Beim CASTOR IIa stammen 95% aus der spontanen Spaltung des ^{244}Cm . Dazu kommen noch spontane Spaltungen des ^{242}Cm . Sehr energiereiche Alphastrahlung kann durch Treffer auf Sauerstoffkerne Neutronen herausschlagen ((α,n) -Reaktion). Deshalb nimmt diese Gefährlichkeit des Atommülls mit dem Abbrand zu. MOX-Brennelemente enthalten eine besonders große Menge dieser hochgefährlichen Brutstoffe. Bei einer Lagerung der Brennelemente zerfallen die radioaktiven Stoffe, aus denen Gammastrahlung entsteht, rascher als die, die für die Bildung der Neutronen verantwortlich sind. Der relative Anteil der Neutronen im Strahlenfeld des CASTOR nimmt also zu, wenn Brennelemente länger abgeklungen sind.

Die Neutronen können im Atommüll noch vorhandene Uranatome spalten und dabei weitere Neutronen freisetzen (unterkritische Neutronenmultiplikation). Diese Komponente nimmt mit dem Abbrand ab.

1.2 Wirksamkeit der Strahlenarten

Eine elektromagnetische Strahlung wie Gammastrahlung überträgt ihre Energie in der Materie, die sie durchdringt, auf Elektronen. Im menschlichen Körper geben diese ihre Energie wiederum in

zahlreichen Treffern an Moleküle weiter. Dabei können Moleküle zerstört werden, z.B. die Moleküle des Erbgutes einer Zelle. Bei einer niedrigen Strahlendosis werden nicht etwa solche Zerstörungen vermieden, sondern nur entsprechend seltener. Aus dem Blickwinkel der Gene einer Zelle gibt es also keine hohe oder niedrige Strahlendosis, sondern nur eine größere oder geringere Wahrscheinlichkeit, getroffen, zerstört oder verändert zu werden. Eine so entstandene Erbgutänderung (Mutation) kann zur Umwandlung einer Körperzelle in eine Krebszelle führen und damit der Beginn einer schweren, oft tödlich verlaufenden Erkrankung sein. In Keimzellen entstanden kann eine Mutation an folgende Generationen weiter vererbt werden und in den Nachkommen zu einer Gesundheitsstörung führen. Elektronenstrahlen und Strahlenarten, die wie Röntgen- oder Gammastrahlen, ihre Energie wesentlich mittels Elektronen übertragen, werden auch als lockerionisierende Strahlen bezeichnet. Die Treffer auf ihrer Bahnspur liegen in einem so großen Abstand voneinander, daß ein Erbgutmolekül in der Regel nur einen einzelnen Treffer erleidet.

Die Wirkung eines Neutrons ist weitaus komplexer. Seine Energie kann Atomkerne, viel tausendfach schwerere Körper als ein Elektron, so anstoßen, daß sie eine intensivere Schneise der Zerstörung im Gewebe hinterlassen. Die ausgelösten Treffer liegen so dicht, daß ein Erbgutmolekül häufig Mehrfachtreffer erhält. Neutronen werden deshalb zu den dichten ionisierenden Strahlen gezählt. Anlaß für diese Einteilung war die Beobachtung, daß eine höhere Dichte der Treffer mit einer stärkeren biologischen Wirksamkeit verknüpft ist. Nicht nur eine höhere Strahlendosis kann also zu einer Vermehrung von Strahlenschäden führen, sondern nach Einwirkung dichten ionisierender Strahlen kommt es auch häufiger zu Schädigungen als bei der gleichen physikalischen Energiedosis einer lockerionisierenden Strahlung.

Die in strahlenbiologischen Beobachtungen und Experimenten beim Vergleich zweier Strahlenarten errechneten Wirksamkeitsunterschiede werden relative biologische Wirksamkeit (RBW) genannt. Die Nennung eines RBW-Wertes für eine Strahlenart hat nur Sinn, wenn zugleich angegeben wird, welches die Strahlenart war, mit der im konkreten Fall verglichen worden ist, die Referenzstrahlung. Nach internationalem Konsens kann auf die ausdrückliche Nennung nur verzichtet werden, wenn es sich um die als Standard empfohlene Referenzstrahlung handelte oder auf sie umgerechnet wurde: Eine Röntgenstrahlung mit einer Erzeugerspannung von 250 kVp.

1.3 Das Konzept der Äquivalentdosis

Strahlenschutz für Menschen macht nur Sinn, wenn nicht die physikalische Energiedosis, sondern ihre schädliche biologische Wirkung verhindert oder begrenzt wird. Eine unterschiedliche Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten kann mit zwei Strategien berücksichtigt werden:

- Für jede Strahlenart werden spezifische Grenzwerte festgelegt.

- Es gibt einen für alle Strahlenarten anzuwendenden Grenzwert, jedoch wird die physikalische Energiedosis der verschiedenen Strahlenarten mit einem Wichtungsfaktor in eine Äquivalentdosis (Gleichwertigkeitsdosis) umgerechnet.

Im amtlichen Strahlenschutz hat man sich für das Konzept der Äquivalentdosis entschieden. Der dabei anzuwendende Wichtungsfaktor wird in der Strahlenschutzverordnung vorgeschrieben und z.Z. als Qualitätsfaktor Q bezeichnet. Damit zu erkennen ist, ob es sich bei einer Dosisangabe um die physikalische Energiedosis oder um die mit dem Wichtungsfaktor umgerechnete Äquivalentdosis handelt, werden beide verschieden benannt, Gray (Gy) und Sievert (Sv).

Häufig wird kein Unterschied zwischen Q und RBW gesehen. Deshalb sei er nochmals hervorgehoben: RBW bezeichnet den in der Strahlenbiologie beobachteten Unterschied zwischen zwei Strahlenarten. Q wird in einer Rechtsverordnung normativ vorgeschrieben, um im Strahlenschutz die physikalische Energiedosis einer Strahlenart in eine Äquivalentdosis umrechnen und mit einem ebenfalls normativ als Äquivalentdosis vorgegebenen Grenzwert vergleichen zu können.

Interessiert die tatsächliche Gefährdung der Gesundheit durch eine Strahlenbelastung, muß geprüft werden, ob die Wirksamkeit der Strahlung durch Q hinreichend modelliert wird. Ist dies nicht der Fall, muß die Berechnung der Schadenserwartung entsprechend korrigiert werden. Weichen die Voraussetzungen, unter denen Q definiert worden sind, von denen ab, die bei der Ableitung der Grenzwerte gegolten haben, ist ebenfalls eine Korrektur erforderlich.

1.4 Die Messung der Strahlung

Während zur Messung der Gammastrahlung recht zuverlässige Methoden zur Verfügung stehen, ist bereits die physikalische Messung der Neutronen keineswegs trivial. Deshalb war es durchaus sinnvoll, daß das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) bei der Ausmessung des CASTOR IIa nach seiner Einlagerung in Gorleben verschiedene Meßgeräte getestet hat [4]. Das Ergebnis zeigt erhebliche Abweichungen (s. Abb. 1). Es kennzeichnet das Selbstbewußtsein des Meßteams, das Ergebnis des eigenen Meßgerätes als richtig zu bezeichnen, obwohl es an der unteren Grenze des Bereiches liegt, den die Vielfalt der Ergebnisse umfaßt. Dem Autor fällt spontan kein Bereich ein, wo bei Messungen im Alltag und erst recht im High-Tech-Bereich derartige Abweichungen toleriert werden.

Als Grund für die abweichenden Ergebnisse der anderen Meßgeräte wird deren unterschiedliche Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Neutronenenergie gesehen. Dabei konnte das BfS das Neutronenspektrum, also die Energieverteilung der Neutronen, mit seinem Gerät keineswegs direkt bestimmen. Vielmehr konnte es nur mit einem Näherungsverfahren errechnet werden, wobei in den Computer als Ausgangswert ein zuvor theoretisch berechnetes Spektrum eingegeben werden mußte.

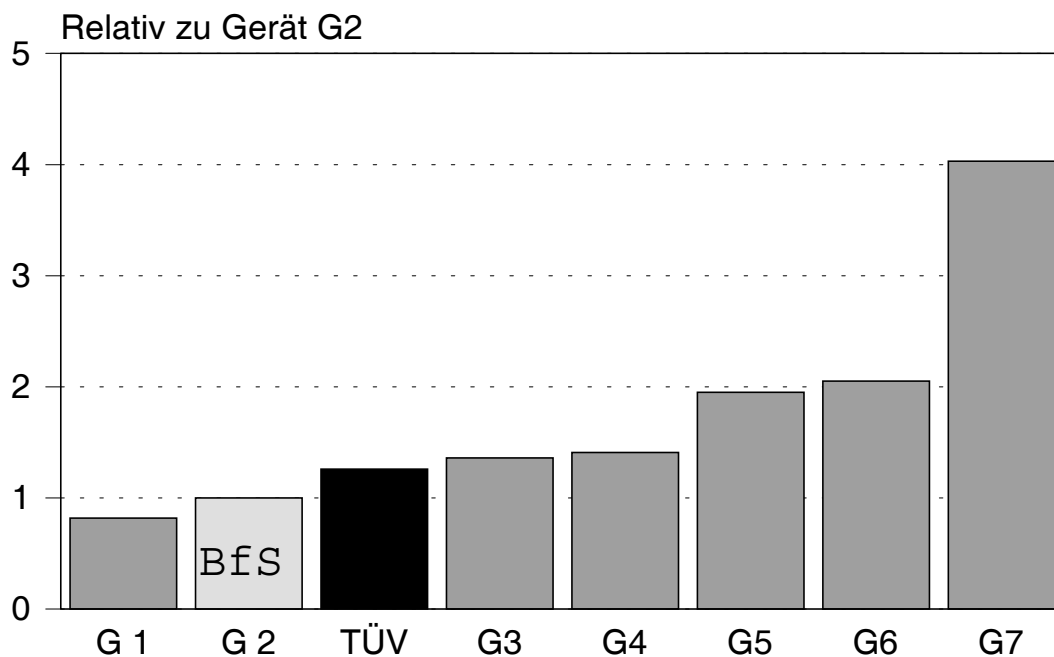


Abb. 1: Vergleich der Meßergebnisse sieben verschiedener Geräte zur Neutronenmessung (G1 bis G7) 1 m Abstand und eines durch den TÜV Hannover-Sachsen-Anhalt e.V. berechneten Wertes (TÜV). Bezugswert ist das vom BfS für richtig angesehene Meßergebnis des Gerätes G2
Der Wert des TÜV wurde auf gleichen Neutronenfluß wie bei G2 korrigiert (Daten nach [4]).

Selbst wenn die Bewertung des BfS akzeptiert wird, die Meßgeräte G5 und G6 seien für die Aufgabe nicht adäquat und das Meßgerät G7 zeige eine inakzeptable Abweichung, muß doch irritieren, daß die Mehrzahl der übrigen Meßergebnisse dem höheren Wert des Berechnungsergebnisses (TÜV) näher liegt als dem „richtigen“ Wert des BfS. Dies gilt um so mehr, als die Berechnungsergebnisse für die Anzahl der (in einem Meter Abstand) pro Sekunde entweichenden Neutronen nur 22% über dem entsprechenden Meßwert des BfS lag und das Berechnungsergebnis für die Darstellung in Abb. 2 auf diese Abweichung korrigiert worden ist. Der größere Anteil der Diskrepanz (26%) liegt offensichtlich an der Umrechnung des Neutronenflusses in die Äquivalentdosis. Die Umrechnungsfaktoren hängen nämlich von der Energie der Neutronen ab. Hier zeigt die berechnete Energieverteilung viele einzelne Gipfel (Peaks), bedingt durch spezifische atomare Wechselwirkungen. Diese gehen aber in der groben Energieverteilung, die sich mit dem Meßgerät des BfS annähern läßt, völlig unter. Dies spricht dafür, daß das Meßergebnis des BfS in Einheiten der Äquivalentdosis um etwa 26% zu niedrig liegt.

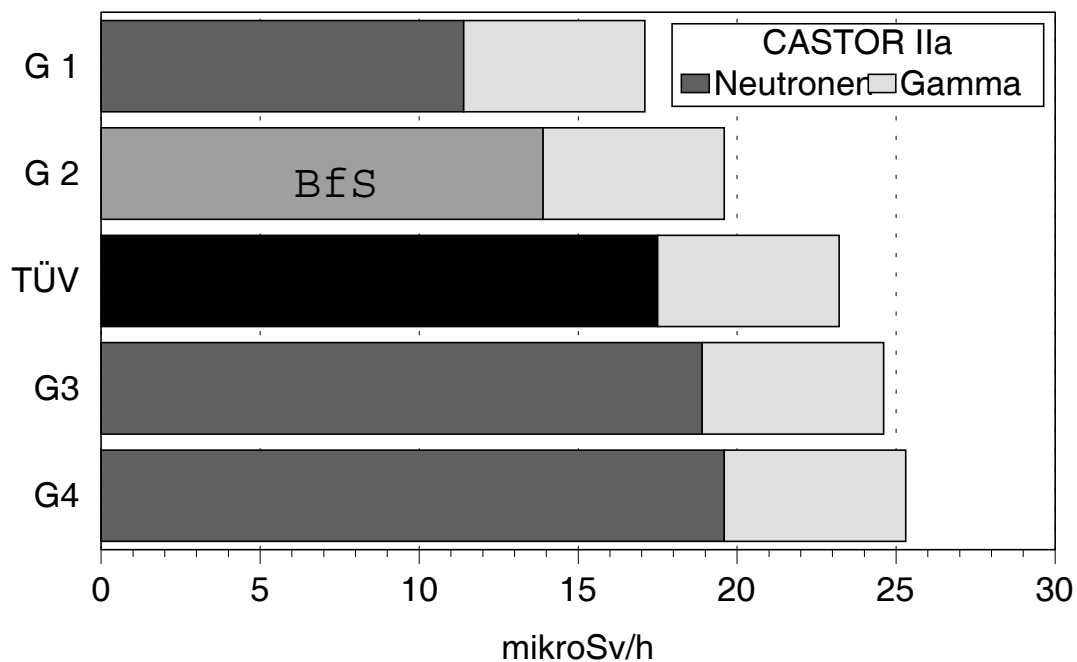


Abb. 2: Vergleich der Äquivalentdosis in 2 m Abstand vom Mantel des CASTOR Ila, Neutronenanteil ermittelt mit den Meßgeräten G1 bis G4 (s. Abb. 2) und berechnet durch den TÜV Hannover-Sachsen-Anhalt e.V. (TÜV) mit Korrektur für den abweichenden Abstand und um die Differenz des Neutronenflusses zum Meßwert G2 (Daten nach [4]).

Aus dem vom TÜV berechneten Neutronenspektrum läßt sich nach ICRP 21 [11] ein mittleres Q von 10,6 ableiten, das dem vom Autor geschätzten Wert von 10,4 sehr nahekommt. Deshalb kann die Auswirkung vernachlässigt werden, wenn nach den Vorschriften der Strahlenschutzverordnung ein pauschaler Wert von 10 verwendet wird. Dieser Wert ist bei einem unbekanntem Spektrum vorgeschrieben. Da das Spektrum vor dem Transport in der Routine schwerlich ermittelt werden dürfte, ist die Anwendung dieser Vorschrift auch angemessen. Zudem sind die energieabhängigen Werte des Q nach der ursprünglichen Empfehlung der ICRP 21 seit einer Novellierung der Strahlenschutzverordnung 1989 außer Kraft gesetzt werden, so daß die Anwendung von Meßgeräten, die auf diesen Empfehlungen beruhen, nicht dem Stand der Verordnung entspricht.

Es entspricht einer angemessenen Vorsicht, hinsichtlich der Neutronendosis des CASTOR Ila von den mithilfe des gemessenen Neutronenflusses korrigierten Rechenergebnissen des TÜV auszugehen, konkret für den CASTOR IIA also von 17,5 $\mu\text{Sv/h}$ in zwei Meter Abstand. Zusammen mit der Dosisleistung der Gammastrahlung ergibt sich eine Dosisleistung von 23,2 $\mu\text{Sv/h}$.

1.5 Grenzwert für Gefahrguttransporte veraltet

Scheinbar liegen die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Werte für die Dosisleistung des CASTOR IIa in zwei Meter Abstand deutlich unter dem Grenzwert für Gefahrguttransporte von $100 \mu\text{Sv/h}$. Dieser Grenzwert ist allerdings revisionsbedürftig. Er geht auf eine Empfehlung der IAEA (Internationale Atomenergiebehörde, Wien) zurück. Diese wiederum fußt auf einer Empfehlung der ICRP aus dem Jahr 1977, nach der zwar generell für die Bevölkerung eine Jahresdosis von 1 mSv nicht überschritten werden sollte, aber einem Teil der Bevölkerung eine Jahresdosis bis 5 mSv vorübergehend zugemutet werden kann [12]. Dem Grenzwert für Gefahrguttransporte lag also ein Szenario zugrunde, nach dem sich in einer Entfernung von zwei Meter nur berufstätige Erwachsene regelmäßig mehr als zehn Stunden pro Jahr aufhalten und auch dieser Aufenthalt auf maximal 50 Stunden pro Jahr beschränkt bleibt.

Unter dem Eindruck der neueren Erkenntnisse über die Folgen der Atombomben hat die ICRP bereits 1985 ihre Empfehlung revidiert: Die Jahresdosis der Bevölkerung sollte bei einer Dauer der Strahlenbelastung über mehr als ein Jahr 1 mSv nicht überschreiten [13]. 1991 wurde diese Empfehlung einer grundsätzlichen Limitierung der Jahresdosis für die Bevölkerung auf 1 mSv bekräftigt, es sei denn, es handelt sich um beruflich Exponierte [14]. Die Konsequenz daraus müßte eine Absenkung des Grenzwertes für Gefahrguttransporte in zwei Meter Entfernung von 100 auf $20 \mu\text{Sv/h}$ sein. Nach der neuen Empfehlung der IAEA soll offensichtlich diese Konsequenz dadurch umgangen werden, daß alle Personen, die einer Jahresdosis von mehr als 1 mSv ausgesetzt sein können, als beruflich Exponierte eingestuft werden. Dabei bleibt offen, wie der Personenkreis, den das angeht, von seiner Strahlenbelastung erfährt.

Es kann festgehalten werden: Bei einer konsequenten Anwendung der Empfehlung neuer Grenzwerte für die Bevölkerung stellte das Strahlenfeld des CASTOR IIa bereits eine Überschreitung der zulässigen Strahlenbelastung für alle Personen dar, die sich in der Nahzone aufhalten müssen.

Während in der Auseinandersetzung um AKW das sog. 30 mrem-Konzept, das entspricht heute einer Jahresdosis von $300 \mu\text{Sv}$, als politisch akzeptiert und juristisch abgesichert angesehen wird, bleibt unbeachtet, daß für eine Strahlenbelastung von außen mit einer rechtlich fragwürdigen Legitimation nach den Vorschriften der Strahlenschutzverordnung dem Transport- und Begleitpersonal sogar ein Jahresgrenzwert von $1,5 \text{ mSv}$ zugemutet werden durfte. Dies galt zunächst nach einem Beschluß der Innenministerkonferenz auch für Polizisten bei der Begleitung eines CASTOR. Lediglich das Land Niedersachsen hatte die Beachtung eines Grenzwertes von 1 mSv für sein Personal vorgeschrieben.

1.6 Welches ist die Referenzstrahlung

Die Probleme reichen allerdings noch wesentlich weiter. Eine Strahlenbelastung kann nämlich nur dann zutreffend mit einem Grenzwert verglichen werden, wenn der Berechnung der Strahlenbelastung und des Grenzwertes übereinstimmende Bedingungen für die biologische Wirksamkeit zugrunde liegen. Dies ist aber hier nicht der Fall. Zunächst soll besprochen werden, welches die Referenzstrahlung für die Definition der Äquivalentdosis ist.

Als die internationale Strahlenschutzkommission ICRP die Werte für Q empfohlen hat, galt als Referenzstrahlung, wie in der Strahlenbiologie üblich, eine 250 kVp-Röntgenstrahlung. Dies bringt auch die frühere Bezeichnung der Äquivalentdosis, die in der Bundesrepublik Deutschland bis zum 31.12.1975 gegolten hatte, zum Ausdruck: rem, d.h. roentgen equivalent man.

Ursprünglich war man der Ansicht, daß sich die RBW der verschiedenen lockerionisierenden Strahlen nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Für alle diese Strahlenarten war deshalb $Q = 1$ empfohlen worden. Dies findet sich noch heute in der Strahlenschutzverordnung.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse haben sich aber wesentlich fortentwickelt. Heute gilt als erwiesen, daß, abhängig von der Strahlenenergie erhebliche Unterschiede bestehen. Wie noch gezeigt wird, hat das auch erhebliche Konsequenzen für den Strahlenschutz. Dennoch hat die ICRP in ihrer jüngsten Empfehlung 1991 an einem einheitlichen Wichtungsfaktor von Eins festgehalten, da „ein wesentlicher Grad an Vereinfachung“ erforderlich sei (§ 85 in [14]). Nur folgerichtig ist es bei dieser Denkweise, daß es scheinbar gleichgültig ist, ob eine Röntgenstrahlung oder Gammastrahlung als Referenzstrahlung gewählt wird.

1.7 Grenzwerte vom Schicksal der Atombombenopfer abgeleitet

Viele Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung und auch die Grenzwerte der Vorschriften zum Gefahrguttransport gehen auf Schadenserwartungen zurück, die vom Schicksal der Atombombenopfer abgeleitet wurden. Die Häufigkeit der zusätzlichen Krebstodesfälle wird zur Strahlendosis in Beziehung gesetzt, denen die Opfer jeweils ausgesetzt waren. Die Strahlung bestand in Nagasaki fast ausschließlich, in Hiroshima weit überwiegend aus einer sehr energiereichen Gammastrahlung. Bis 1995 war angenommen worden, daß diese Energie etwa 1 MeV betragen hat, also der Strahlenenergie von ^{60}Co entsprach. Auch die Berechnungen des Autors zur Gefährlichkeit der Neutronen beruhten zunächst auf dieser Annahme [21].

Abb. 3 zeigt, daß bei einer solchen Strahlenenergie die biologische Wirksamkeit nur etwa halb so groß wie die der Referenzstrahlung ist. Grenzwerte, die von einer solchen Strahlung abgeleitet worden sind, können unmittelbar auch nur auf eine Exposition durch eine Strahlung vergleichbarer Energie

angewendet werden. Tatsächlich wurde aber die Strahlendosis der Atombombenopfer mit einem $Q = 1$ in Äquivalentdosis umgerechnet und die so ermittelten Grenzwerte für alle Strahlenenergien für anwendbar erklärt, also auch für Röntgenstrahlung und alle Strahlenarten, für die Röntgenstrahlung als Referenz dient, wie Neutronen.

Richtig wäre es aber gewesen, die Strahlendosis mit einem Q von 0,5 in eine Äquivalentdosis umzurechnen. Eine in einer Dosisgruppe beobachtete Anzahl zusätzlicher Krebstodesfälle wäre dann einer nur halb so hohen Äquivalentdosis zuzuordnen gewesen. Pro Einheit Äquivalentdosis hätte sich dann die doppelte Anzahl von Schadensfällen errechnet. Die Konsequenz wäre eine Senkung der Grenzwerte auf die Hälfte gewesen. Diese Konsequenz hat die ICRP durch den „notwendigen Grad der Vereinfachung“ vermieden.

Inzwischen hat sich diese Situation noch deutlich verschärft. Im Dezember 1995 veröffentlichte Straume, Mitarbeiter des Lawrence Livermore National Laboratory, eines bedeutenden Forschungszentrums für Atomwaffen in den USA, eine Revision über die Energie der Gammastrahlung, die bei den Atombombenexplosionen freigesetzt worden ist [45]. Danach muß eine mittlere Energie in einem Bereich von 1,7 bis 4,7 MeV angenommen werden. Die RBW dieser Strahlung beträgt nach Straume im Mittel nur etwa 0,25. Die Grenzwerte müßten also um das Vierfache gesenkt werden.

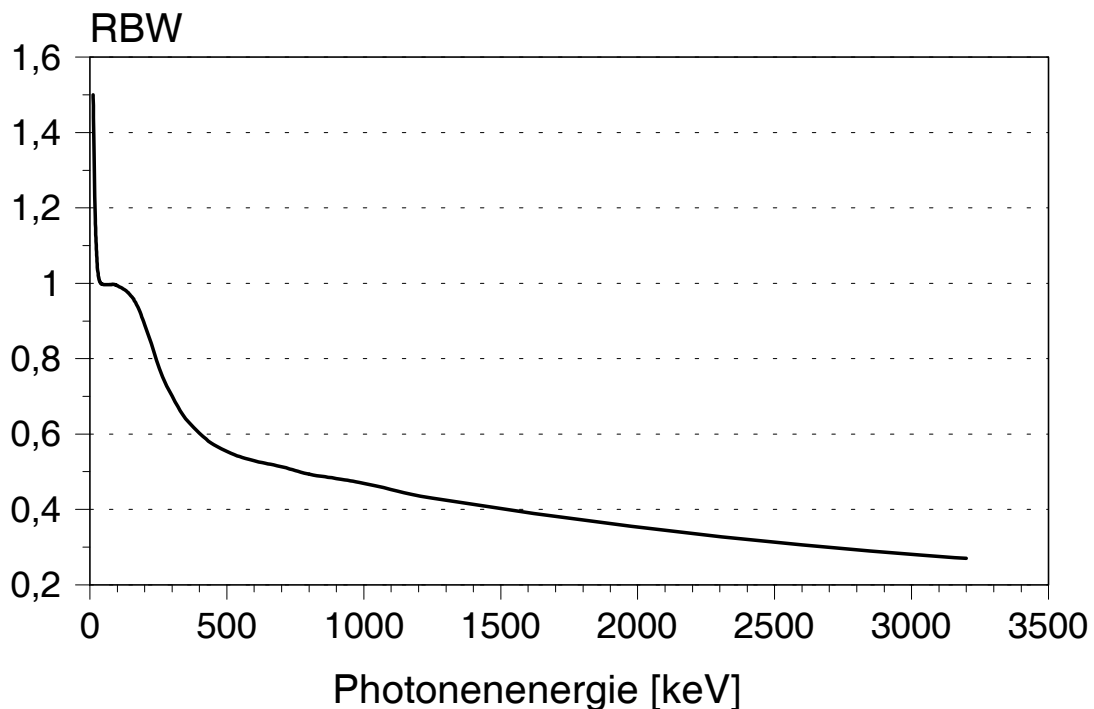


Abb. 3: Abhängigkeit der relativen biologischen Wirksamkeit von Photonen (z.B. Röntgenstrahlen, Gammastrahlen) für die Auslösung stochastischer Effekte (wie z.B. Krebserzeugung) von der Strahlenenergie in keV. Die Kurve nach ICRU 40 [15] wurde nach Daten über die lineare Komponente der Produktion dizentrischer Chromosomenaberrationen extrapoliert [45]. Die Werte wurden auf eine Röntgenstrahlung von 250 kVp standardisiert.

1.8 Ausgleich zwischen Stand der Wissenschaft und der Strahlenschutzverordnung

Wie kann auf diese Erkenntnis reagiert werden? Natürlich ist die adäquate Reaktion eine Senkung der Grenzwerte, wie das der Autor auch mehrfach gefordert hat (zuletzt in [32]). Der Autor hat aber weder die Möglichkeit, den Grenzwert zu ändern noch die Definition der Äquivalentdosis und die Wichtungsfaktoren zu ihrer Berechnung. Er empfiehlt deshalb denen, die eine strahlenbiologisch zutreffendere Bewertung einer Äquivalentdosis bei einem Vergleich mit den Grenzwerten vornehmen wollen, einen Korrekturfaktor einzusetzen. Dieses Instrument legt die Strahlenschutzverordnung nahe. Die vollständige Formel zur Berechnung der Äquivalentdosis H sieht nämlich außer der Multiplikation der physikalischen Energiedosis D mit dem Qualitätsfaktor Q die weitere Multiplikation mit einem „modifizierenden Faktor“ N vor.

$$H = D * Q * N$$

H	Äquivalentdosis
D	physikalische Energiedosis
Q	Qualitätsfaktor
N	modifizierender Faktor

Für den modifizierenden Faktor N war allerdings bislang niemals ein von Eins abweichender Wert empfohlen worden. Einer ähnlichen Anregung von Brenner und Hall [6] folgend wird deshalb vorgeschlagen, diesen Faktor zu verwenden, um Unterschiede zwischen dem aktuellen Stand der Wissenschaft und den amtlichen Vorschriften zur Berechnung der Äquivalentdosis auszugleichen. Die so ermittelte Dosis wird vom Autor „biologisch äquivalente Dosis“ genannt.

Für den Ausgleich des Wirkungsunterschiedes der Atombombenstrahlung und der Gammastrahlung des CASTOR ist etwa $N = 2$ anzusetzen. Dem Wirkungsunterschied zwischen der Atombombenstrahlung und Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung für Neutronen muß mit einem $N = 4$ Rechnung getragen werden.

Mit diesen Ausgleichsmaßnahmen sind aber die notwendigen Korrekturen noch keineswegs erschöpft.

1.9 Wirkungsverlust im Niedrigdosisbereich - eine Hypothese im Strahlenschutz

Die Empfehlungen der internationalen Strahlenschutzkommission ICRP leiten zwar die Grenzwerte von den Beobachtungen an den Atombombenopfern ab, übertragen sie aber nicht direkt auf die Verhältnisse des Strahlenschutzes im Bereich niedriger Dosen und Dosisleistungen. Vielmehr vermutet die ICRP eine geringere Wirkung der Strahlung unter diesen Verhältnissen. Zum Verständnis der Auseinandersetzung sollen zunächst die strahlenbiologischen Hintergründe erläutert werden.

Die ICRP geht davon aus, daß die Anzahl zusätzlicher Krebstodesfälle am zuverlässigsten im mittleren Dosisbereich der Atombombenopfer bestimmt werden kann, das entspricht etwa einer Dosis von 1,5 Sv. Für den praktischen Strahlenschutz ist der Bereich unterhalb dieser Dosis relevant, in der Regel sogar unter 0,2 Sv. Zur Feststellung der zusätzlichen relativen Gefährdung in diesem Bereich stehen sich drei Anschauungen gegenüber:

- Eine lineare Korrelation zwischen der Dosis und dem Effekt. Mit niedrigerer Dosis wird eine proportionale Verminderung der Wirkung angenommen, also eine konstante relative Übersterblichkeit an Krebs pro Dosis über den gesamten Dosisbereich.
- Eine linear-quadratische Korrelation zwischen der Dosis und dem Effekt. Mit niedrigerer Dosis wird eine überproportionale Verminderung der Wirkung angenommen, also eine niedrigere relative

Übersterblichkeit pro Dosis im unteren Dosisbereich. Eine lineare Korrelation hätte in diesem Fall eine Überbewertung der Strahlengefahr im Bereich niedriger Dosen zur Folge.

- Ein überproportionaler Anstieg des Effektes im Bereich niedriger Dosen und eine Abflachung der Dosiswirkungskurve im Bereich hoher Dosen. Eine lineare Korrelation würde in diesem Fall zu einer Unterschätzung der Strahlengefahr führen.

Auf die strahlenbiologische Modelle, mit denen diese drei Vorstellungen begründet werden, kann hier nicht eingegangen werden. Wesentlicher ist es, die Beobachtungen in der Praxis darauf zu überprüfen, durch welche Kurvenform sie am besten beschrieben werden können.

Der Verlauf der linear-quadratischen Korrelation hat eine nach oben gekrümmte Form (s. Abb. 4). Er beginnt mit einem geraden Verlauf, auf den sich eine quadratische Kurve addiert. Wenn er bei einer Dosis von $1,5 \text{ Sv}^1$ zu demselben Effekt führt wie der Verlauf einer linearen Korrelation, bedeutet das im Bereich niedriger Dosen um $0,2 \text{ Sv}$ deutlich niedrigere Werte der Übersterblichkeit pro Dosis. Den flacheren linearen Anfang der linear-quadratischen Korrelation hat die ICRP sogar in den Bereich hoher Dosen extrapoliert und ihn für anwendbar erklärt, wenn die Dosisleistung, also Dosis pro Zeit, niedrig ist. Die Konsequenz dieser Hypothese ist ein doppelt so hoher Grenzwert, als er bei Gültigkeit einer linearen Korrelation zutreffend gewesen wäre.

An dieser Interpretation der Dosiswirkungskurve hat die ICRP in ihrer letzten Empfehlung Nr. 60 von 1991 festgehalten. Den Faktor, um den die Wirksamkeit einer lockerionisierenden Strahlung im Bereich einer niedrigen Dosis (unter 200 mSv) oder einer niedrigen Dosisleistung (unter 100 mSv/h) geringer sein soll und um den deshalb der Grenzwert angehoben worden ist, hat die ICRP mit DDREF (**D**ose and **D**oserate **E**ffectiveness **F**actor) bezeichnet.

¹ Diese Dosis errechnet sich für die Kohorte der Atombombenopfer, wenn die Auswertung, wie international üblich, auf Dosen bis vier Gray beschränkt wird. Für die höheren Dosen wird ein zu großer Fehler bei der Rekonstruktion der Dosis angenommen.

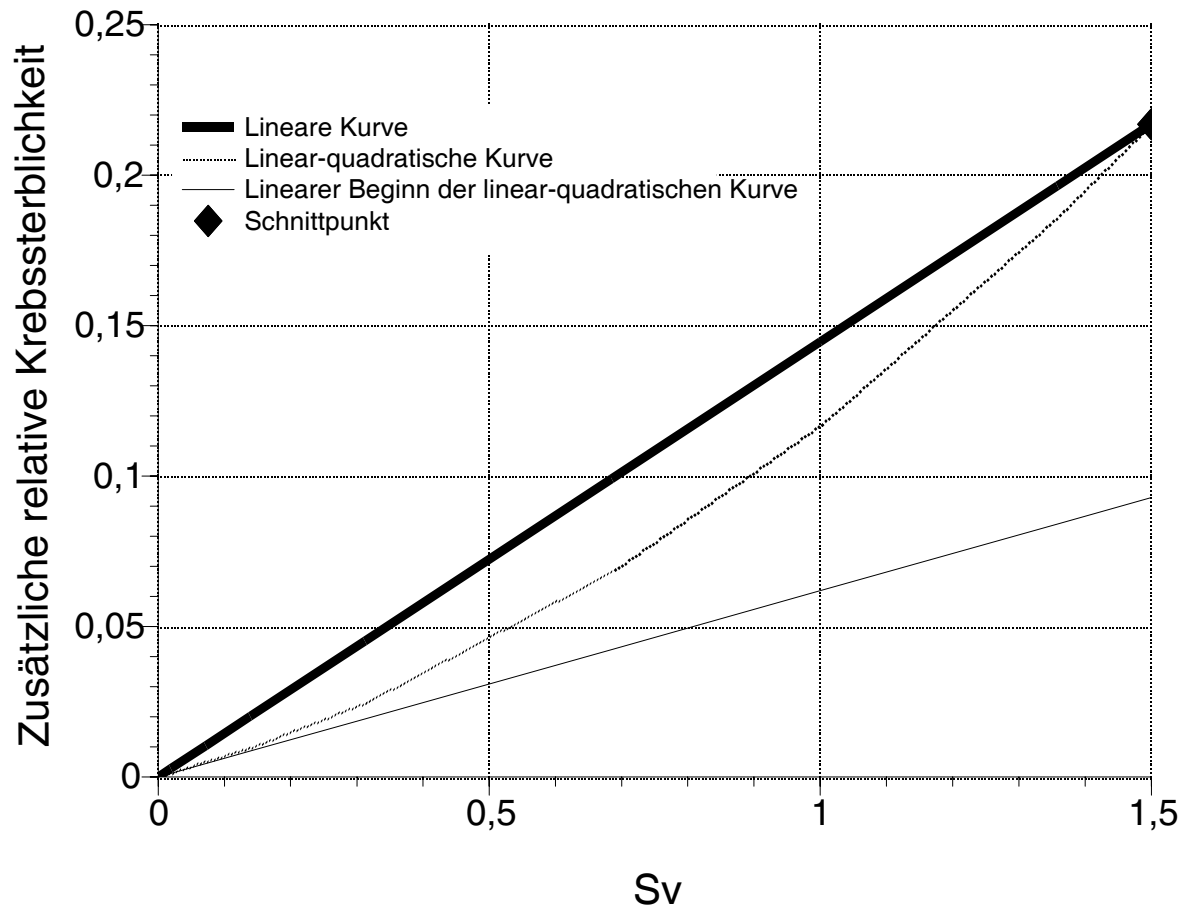


Abb. 4: Dosiswirkungskurven nach verschiedenen strahlenbiologischen Modellen. Die quantitativen Annahmen entsprechen der Empfehlung der internationalen Strahlenschutzkommission von 1977 [12]

Trifft die Hypothese einer linear-quadratischen Korrelation aber nicht zu oder ist die quadratische Komponente viel unbedeutender als angenommen, müßten die Grenzwerte erniedrigt oder sogar halbiert werden - oder - um in der hier gewählten Systematik zu bleiben, die Dosis zum Ausgleich mit einem Faktor Zwei multipliziert werden, bevor sie mit den unkorrigierten Grenzwerten verglichen wird.

1.10 Kleiner Exkurs für alle, die Formeln schätzen

Zwischen der Steilheit der linearen Korrelation, der Form der linear-quadratischen Korrelation und dem DDREF besteht ein quantitativer Zusammenhang. Ist ε die relative Übersterblichkeit an Krebs (excess relative risk), D die Dosis, α der Parameter des linearen Teils, β der Parameter des quadratischen Teils der linear-quadratischen Korrelation und γ der Parameter der linearen Korrelation, dann gilt

$$\varepsilon = \gamma D$$

und

$$\varepsilon = \alpha D + \beta D^2$$

Ist D_0 die mittlere Dosis der Atombombenopfer, die die Steilheit der Dosiswirkungskurve bestimmt hat, also der Schnittpunkt der beiden Korrelationen, so gilt

$$\gamma D_0 = \alpha D_0 + \beta D_0^2$$

Ist F_{DDREF} der Wert für den DDREF, gilt definitionsgemäß

$$\gamma D_0 = \alpha D_0 F_{DDREF}$$

also ist

$$\alpha D_0 F_{DDREF} = \alpha D_0 + \beta D_0^2$$

und

$$F_{DDREF} = 1 + \beta/\alpha D_0$$

Daraus folgt, daß die Krümmung der linear-quadratischen Kurve in Abb. 4 bei einer Dosis D_0 von 1,5 Sv einem DDREF von 2,34 entspricht. Diesen Wert hatte auch 1980 das BEIR III-Komitee aus den Beobachtungen der zusätzlichen Sterbefälle an Leukämie unter den Atombombenopfern abgeleitet und nach einer sehr kontroversen Diskussion auch auf alle anderen Krebsformen angewendet [2]. Keine wesentliche Änderung zu diesem Standpunkt findet sich auch in späteren Reports, sei es im NIH-Report von 1985 [35], in den UNSCEAR-Reports nach der Dosisrevision [47] oder schließlich in den ICRP-Empfehlungen von 1991 [14], abgesehen davon, daß der Faktor für den DDREF auf den Wert Zwei zurückgenommen worden ist. Den Kenner der Literatur darf das auch nicht wundern, da in allen diesen Komitees im wesentlichen dieselben Personen gewirkt haben.

1.11 Wie sieht die PTB den DDREF?

Prof. Dietze von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) hat sich in einem Beitrag kritisch mit den Thesen einer fehlerhaften Bewertung der Äquivalentdosis auseinandergesetzt [9]. Den DDREF veranschaulicht er mit einer Graphik, deren für diese Diskussion wesentlichen Teil die Abb. 5 wiedergibt. Das Bild erweckt den Eindruck, daß im Bereich niedriger Dosen die für die Strahlenschutzpraxis empfohlene lineare Korrelation zwischen Dosis und Effekt den tatsächlichen Zusammenhang trotz Anwendung des DDREF sogar noch überbewertet.

Diese Graphik ist in zwei wesentlichen Punkten unzutreffend:

- Wie aus Abb. 4 hervorgeht, entspricht definitionsgemäß die Steigung der Kurve, die den Dosiswirkungszusammenhang unter Anwendung eines DDREF beschreibt, dem linearen Anfangsteil der linear-quadratischen Kurve. Diese Gerade kann also niemals steiler verlaufen als die linear-quadratische Kurve. Sie stellt vielmehr mit zunehmender Dosis eine wachsende Unterschätzung der tatsächlichen Wirkung dar, die nach den Annahmen der ICRP im Bereich höherer Dosen nur bei einer niedrigen Dosisleistung gerechtfertigt sein soll.
- Die Krümmung der linear-quadratischen Kurve in Dietzes Skizze (Abb. 5) entspricht einem DDREF von 10,5, ein Wert den noch nicht einmal die ICRP in die Daten der Atombombenopfer hinein interpretiert. Dies gilt, falls der Schnittpunkt, wie es den Anschein hat, für eine Dosis von 1,7 Sv angesetzt worden ist. Wird der Schnittpunkt auf eine Dosis von 1,5 Sv verschoben, entspricht die Kurve immer noch einem DDREF von 9,1.

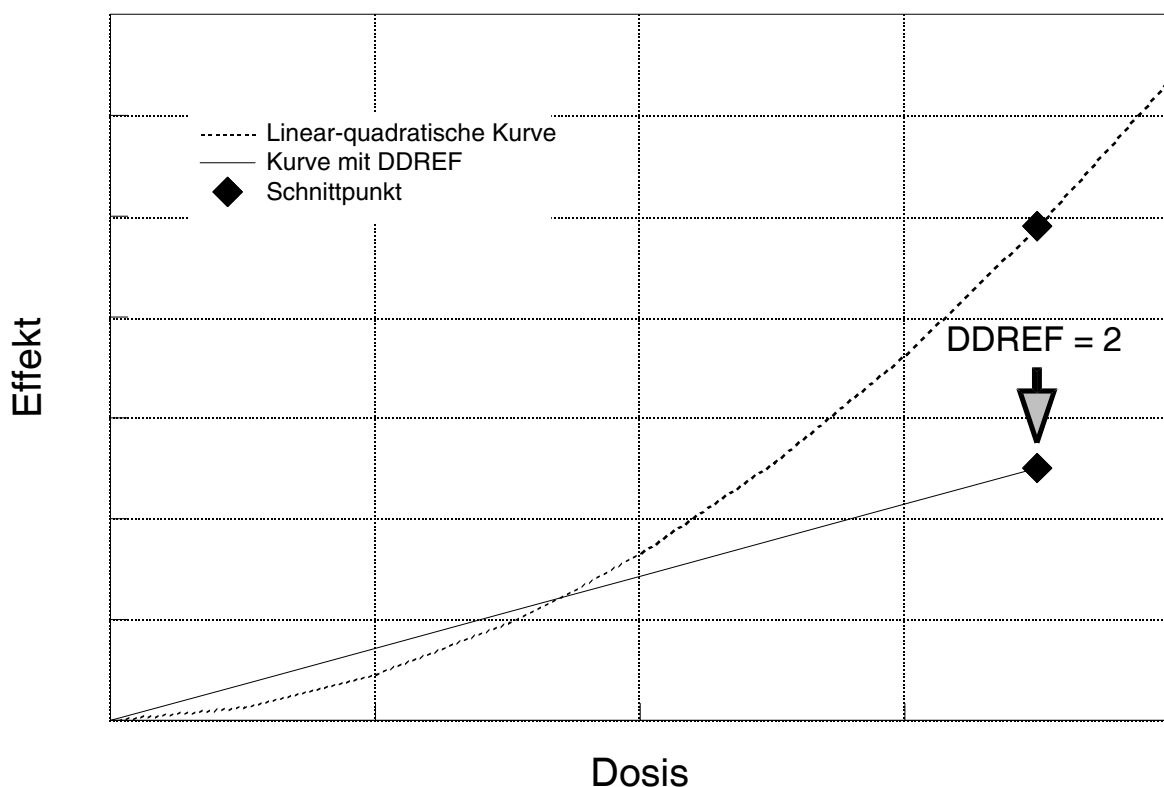


Abb. 5: Auszug aus einer Graphik, mit der Prof. Dietze (PTB) den DDREF veranschaulichen will [9]. Die linear-quadratische Kurve soll den Zusammenhang zwischen der Dosis einer Photonenstrahlung (z.B. Röntgen-, Gamma- oder Atombombenstrahlung) und der Krebsinduktion beschreiben. Die Gerade soll den Zusammenhang beider Größen nach Anwendung eines DDREF von Zwei zeigen, wie er nach den Empfehlungen der ICRP Nr. 60 im Strahlenschutz verwendet werden soll. Die Graphik hat auch im Original keine quantitativen Angaben auf den Achsen!

1.12 Die Realität der Atombombenopfer

Wohl aus gutem Grund findet sich auch in den Empfehlungen der ICRP keine Abbildung, die die Hypothese eines DDREF den realen Beobachtungen in Hiroshima und Nagasaki gegenüberstellt. Schon das BEIR V-Komitee hat für die soliden Tumore, die für etwa 90% der zusätzlichen Sterblichkeit verantwortlich sind, keine Krümmung der Dosiswirkungskurve erkennen können, die einen DDREF von Zwei rechtfertigen würde [3].

Die Wissenschaftler der RERF, des Institutes in Hiroshima zur Erforschung der Folgen der Atombombenabwürfe, heben hervor, daß die Dosiswirkungskurve für solide Tumore so geringfügig von einer linearen Korrelation abweicht, daß dies keinen DDREF von Zwei rechtfertigt. Dies soll ein Blick auf Abb. 6 verdeutlichen.

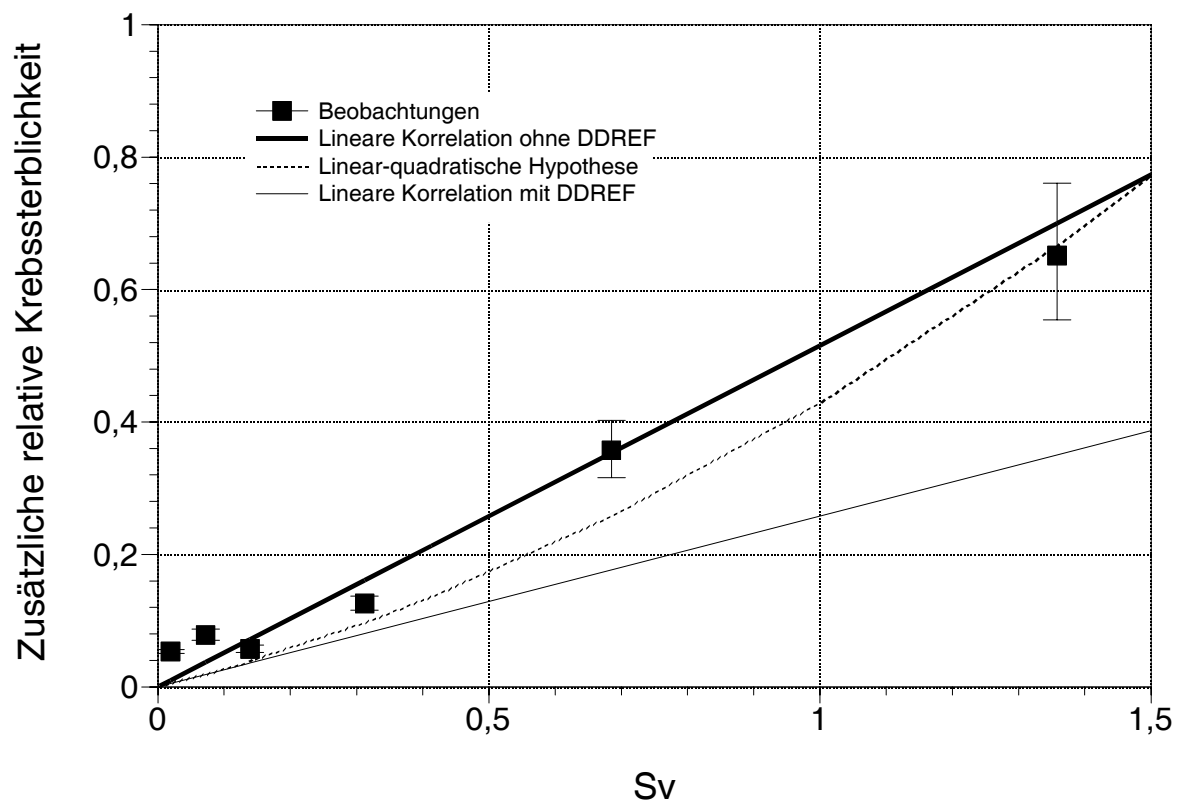


Abb. 6: Zusätzliche relative Übersterblichkeit an soliden Tumoren in Abhängigkeit von der Dosis (Dosis des Dickdarms als repräsentative Dosis für alle Organe). Die durch ICRP 60 angenommene lineare Korrelation ohne DDREF, die von ihr hypothetisch angesetzte linear-quadratische Korrelation und die daraus abgeleitete lineare Korrelation mit einem DDREF von Zwei sind den Beobachtungen gegenübergestellt. Die Breite der Fehlerbalken zeigt den 95%-Vertrauensbereich (Beobachtungen nach [43]). Dem Vergleich zwischen der zusätzlichen absoluten und relativen Krebssterblichkeit liegt eine mittlere Krebsmortalität von 19% zugrunde.

Dennoch wird von Verfechtern der Hypothesen der ICRP damit argumentiert, bei Dosen unter 0,2 Sv liege kein signifikanter Dosisseffekt vor und deshalb könnten die entsprechenden Beobachtungen nicht zur Entscheidung herangezogen werden, welche der Hypothesen richtig sei. Dabei wird übersehen, daß auch in den beiden niedrigsten Dosisklassen die relative Übersterblichkeit an soliden Tumoren signifikant erhöht ist und darüber hinaus auch signifikant über der linearen Korrelation liegt. Köhnlein und Nußbaum haben frühzeitig auf diesen Sachverhalt aufmerksam gemacht, der inzwischen auch von den Forschern des RERF bestätigt worden ist [37]. Sie leiten aus dieser Tatsache die Hypothese ab, daß die Strahlenwirkung im Bereich niedriger Dosen auch dann noch deutlich unterschätzt wird, wenn eine lineare Korrelation ohne DDREF verwendet wird [17, 18, 36].

Die Entscheidung zwischen der linearen und der linear-quadratischen Hypothese ist auch keineswegs, wie behauptet wird, nur auf die Beobachtungen im Bereich niedriger Dosen angewiesen. Auch die Beobachtungen im Bereich hoher Dosen tragen dazu bei. Denn bei Dosen, die den Schnittpunkt bei 1,5 Sv übersteigen, muß die linear-quadratische Kurve weiterhin wesentlich steiler ansteigen als die lineare. Abb. 7 zeigt, daß im Bereich hoher Dosen eine Fortsetzung der hypothetischen linear-quadratischen Kurve nicht festzustellen ist. Wenn auch die Abweichungen vom linearen Verlauf nach unten noch nicht den 95%-Vertrauensbereich überschreiten, deutet sich eher bereits der Trend an, daß sich die Kurve im Bereich sehr hoher Dosen abflacht. Diese Beobachtung wird teils einer wachsenden Ungenauigkeit der Dosen, teils einem zunehmenden konkurrierenden Zellkilling-Effekt zugeschrieben.

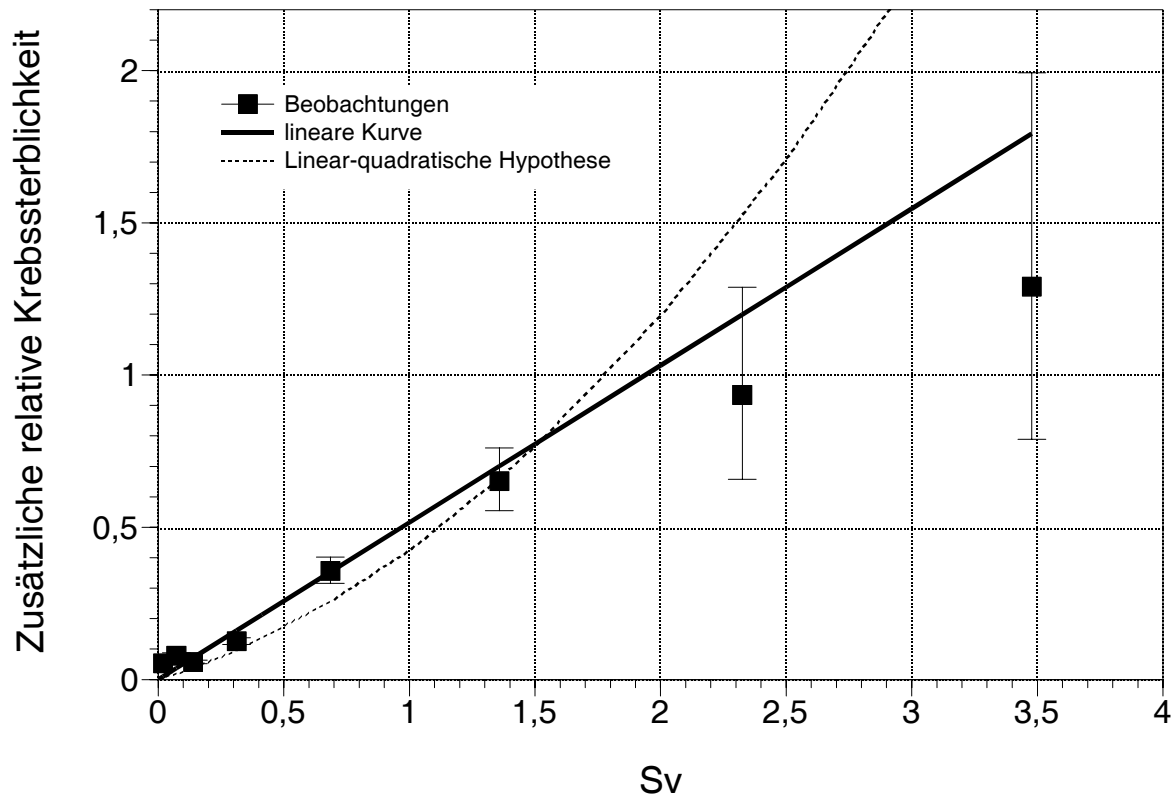


Abb. 7: Vergleich der linearen Korrelation und der linear-quadratischen Hypothese mit den Beobachtungen bis 4 Sv (Daten nach [43]).

Noch wesentlich ist jedoch, daß inzwischen die Statistiken über die Inzidenz, also Erkrankungen, an soliden Tumoren vorliegen [46]. Dabei zeigte sich, daß besonders bei Tumoren mit guter Heilbarkeit, wie z.B. in ausgeprägtem Maße der Hautkrebs, die Sterblichkeitsstatistiken die Strahlengefährdung nicht nur absolut, sondern auch in der relativen Gefährdung deutlich unterschätzen (s. Abb. 8) [39]. Durch die verbesserte Statistik sind nun auch die Zahlen im Bereich niedriger Dosen aussagekräftiger.

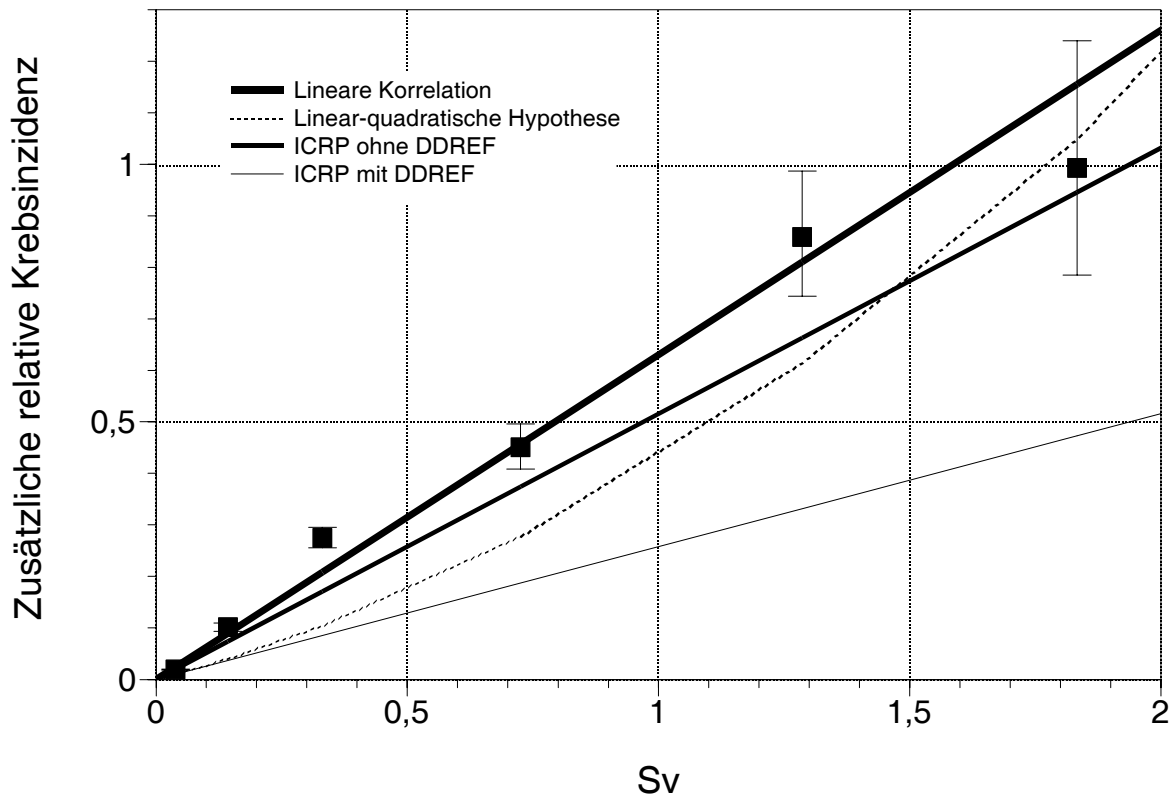


Abb. 8: Zusätzliche relative Häufigkeit an Erkrankungen mit soliden Tumoren in Abhängigkeit von der Dosis (Dosis des Dickdarms als repräsentative Dosis für alle Organe). Die durch ICRP 60 angenommene lineare Korrelation ohne DDREF, die von ihr hypothetisch angesetzte linear-quadratische Korrelation und die daraus abgeleitete lineare Korrelation mit einem DDREF von Zwei sind den Beobachtungen gegenübergestellt. Die Breite der Fehlerbalken zeigt den 95%-Vertrauensbereich (Beobachtungen nach [46]).

Da der Anteil der Leukämien, für die möglicherweise eine lineare Dosiswirkungskurve nicht zutrifft, es handelt sich dabei um die akuten myeloischen Leukämien, nur wenige Prozent der gesamten zusätzlichen strahlenbedingten Krebserkrankungen ausmacht, ist ihr Einfluß auf die Form der Dosiswirkungskurve für alle Erkrankungen insgesamt vernachlässigbar geworden.

Es kann nun keinen Zweifel mehr daran geben, daß die linear-quadratische Hypothese verworfen werden muß. Der DDREF hat seine Berechtigung endgültig verloren. Seine fehlerhafte Berücksichtigung bei der Festsetzung der Grenzwerte muß durch einen Faktor Zwei ausgeglichen werden. Da nicht nur der Tod, sondern auch bereits die Erkrankung an Krebs das Grundrecht auf körperliche Unversehrtheit beeinträchtigt, muß das Verhältnis Schadenserwartung aus der Inzidenzstatistik im Vergleich zum Wert aus der Mortalitätsstatistik mit einem Faktor 1,4 berücksichtigt werden.

1.13 Verbesserung der konventionellen Arbeitsbedingungen

Nicht nur die Grenzwerte für beruflich Strahlenexponierte, sondern auch für die Bevölkerung wurden von der ICRP durch einen Vergleich mit den gesundheitlichen Beeinträchtigungen im konventionellen Arbeitsleben gerechtfertigt. Für Berufstätige ist ein solcher Vergleich unmittelbar einleuchtend. Für die Bevölkerung wurde unterstellt, daß nur ein Bruchteil der Gefährdung Berufstätiger akzeptiert wird.

Nun ist die gesundheitliche Gefährdung im Berufsleben nicht konstant. In praktisch allen Industrienationen ist ein Rückgang der Arbeitsunfälle mit einem langfristigen Trend von etwa 3% pro Jahr festzustellen. In der Bundesrepublik Deutschland fiel die Häufigkeit tödlicher Arbeitsunfälle in drei Jahrzehnten auf ungefähr ein Viertel (s. Abb. 9).

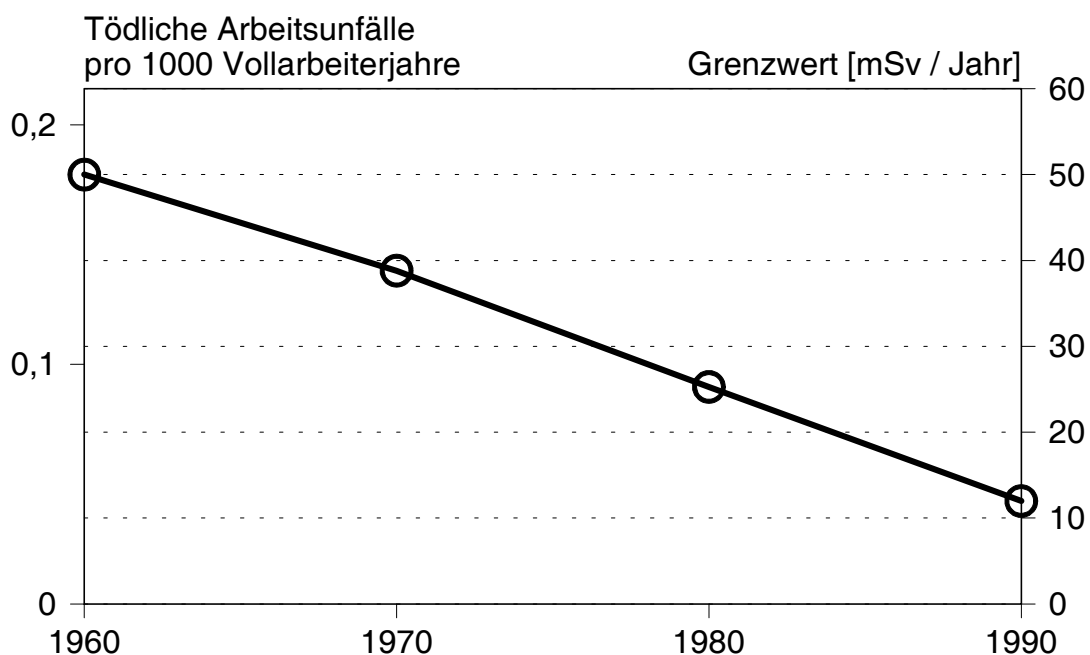


Abb. 9: Notwendige Senkung des Jahresgrenzwertes für beruflich Strahlenexponierte, um der Verbesserung der konventionellen Arbeitsbedingungen proportional zu folgen. Die tödlichen Arbeitsunfälle sind Mittelwerte über alle Branchen ohne Wegeunfälle. Daten nach [7]

Unabhängig von allen neuen Erkenntnissen zur Strahlenwirkung müssen also alleine aus diesem Grund die Grenzwerte um den Faktor Vier gesenkt werden.

1.14 Der Einfluß der Bevölkerungsstruktur und Krebssterblichkeit

Je länger die Beobachtung der überlebenden Atombombenopfer fortgesetzt werden kann, umso klarer zeigt sich, daß für die Beschreibung des Dosis-Wirkungszusammenhanges das relative risk-Modell zutrifft. Das bedeutet, daß durch eine bestimmte Strahlendosis die zusätzlich auftretenden Tumore sich proportional zur Anzahl der spontanen Tumorfrequenz vermehren. Nimmt in einer Bevölkerung die Häufigkeit spontaner Tumore zu, wächst entsprechend auch die Schadenserwartung nach einer Strahlenbelastung.

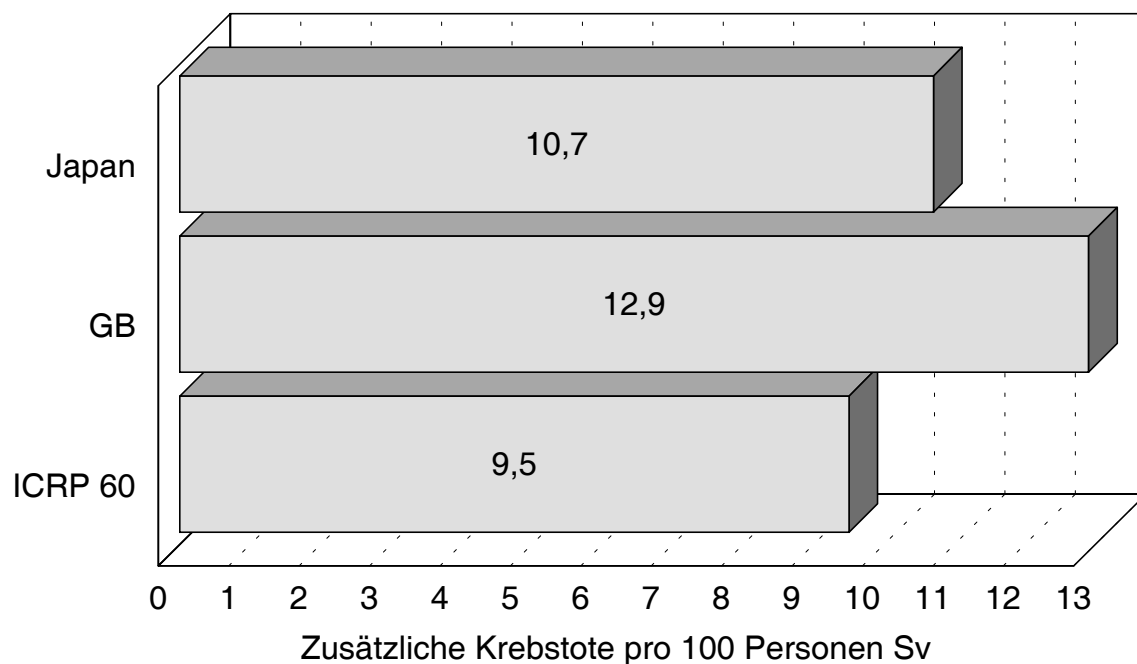


Abb. 10: Schadenserwartung für Krebstodesfälle, wie sie für die Bevölkerung von Japan errechnet worden ist, verglichen mit der Extrapolation auf die Bevölkerung von Großbritannien als Beispiel eines europäischen Landes mit hoher Lebenserwartung und Festsetzung der ICRP für eine „Weltbevölkerung“ als Grundlage der Grenzwerte [14].

In europäischen Ländern mit einer hohen Lebenserwartung liegt die Wahrscheinlichkeit, an einer Krebserkrankung zu sterben, aus verschiedenen Gründen 20% höher als in Japan, wie es am Beispiel von Großbritannien, das im Gegensatz zu Deutschland ein Krebsregister besitzt, gezeigt werden konnte (s. Abb. 10). Die ICRP hat aber zur Begründung ihrer Grenzwerte eine spezielle „Weltbevölkerung“ mit einer reduzierten Lebenserwartung konstruiert, ein Mittel aus China, Großbritannien, Japan, Puerto Rico und USA. Bei einer adäquaten Berücksichtigung der Bevölkerungsstruktur und der Krebshäufigkeit in europäischen Ländern mit einer hohen

Lebenserwartung, zu denen auch Deutschland zählt, muß der Grenzwert um den Faktor 1,4 vermindert werden.

1.15 Biologische Wirksamkeit der Neutronen

Neutronen haben als dichtungisierende Strahlen, bezogen auf die gleiche physikalische Dosis, eine größere strahlenbiologische Wirksamkeit als lockerionisierende Strahlen, zu denen auch die Gammastrahlen zählen. Dem versucht die Strahlenschutzverordnung Rechnung zu tragen, in dem die physikalische Neutronendosis durch Multiplikation mit einem Qualitätsfaktor Q von Zehn bei unbekannter Energieverteilung in die Äquivalentdosis umgerechnet wird. Seit mehr als einem Jahrzehnt besteht wissenschaftlicher Konsens, daß dieser Qualitätsfaktor nicht dem Stand der Wissenschaft entspricht. Bereits im September 1990 hat die Internationale Strahlenschutzkommission ICRP für den Fall eines unbekanntes Spektrums einen Strahlungswichtungsfaktor von 20 beschlossen [14]. Je nachdem, ob auf das für den CASTOR IIa berechnete Spektrum die Formeln oder die vereinfachten Tabellenwerte der ICRP 60 für den Strahlungswichtungsfaktor der Neutronen angewendet werden, resultieren mittlere Werte von 21 bzw. 19,7, also keine wesentliche Abweichung vom pauschalen Wert 20.

Dennoch gibt das BfS für die Dosisleistung der Neutronen einen Wert nach ICRP 60 an, der den Wert nach ICRP 21 nicht, wie zu erwarten um 100%, sondern lediglich um etwa 50% übersteigt. Das beruht im wesentlichen auf neuen Berechnungen der Physikalisch Technische Bundesanstalt [44], die noch nicht in Empfehlungen der ICRP und erst recht nicht in eine Richtlinie der EG oder gar die Strahlenschutzverordnung eingeflossen sind. Sie sind genauso abzulehnen wie die verfehlten Empfehlungen der ICRP selbst, die sie modifizieren.

Die vom Hauptkomitee der ICRP empfohlenen Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen haben in der Fachwelt überrascht, da sie deutlich hinter der Empfehlung einer Wissenschaftlergruppe zurückgeblieben sind, die die ICRP selbst und ihre Schwesterorganisation ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) zur Ausarbeitung neuer Qualitätsfaktoren eingesetzt hatte. Wegen der zahlreichen Hinweise in strahlenbiologischen Versuchen, daß insbesondere im Bereich niedriger Dosen die relative biologische Wirksamkeit der Neutronen noch viel höher ist als ursprünglich angenommen, hatte diese Wissenschaftlergruppe unabhängig von der Energie der Neutronen einen Qualitätsfaktor von 25 vorgeschlagen [15].

Die bisher diskutierten Qualitätsfaktoren und Strahlungswichtungsfaktoren für Neutronen sind aus strahlenbiologischen Experimenten mit relativ hohen Dosen und Dosisleistungen abgeleitet worden. Für niedrigere Dosen und Dosisleistungen, wie sie bei der Konfrontation mit den hier diskutierten Grenzwerten zu beachten sind, zeigen Neutronen einen sog. inversen Dosis- und Dosisleistungseffekt [19]. Das bedeutet, daß mit abnehmender Dosis und abnehmender Dosisleistung die biologische

Wirksamkeit pro Dosis zunimmt. Diesem Effekt muß mit dem Faktor Drei Rechnung getragen werden, was auf der Basis des Qualitätsfaktors der ICRU von 25 zu einem Strahlungswichtungsfaktor von 75 führt.

Die meisten Erkenntnisse zur RBW der Neutronen waren aus Experimenten mit Tieren und Zellkulturen gewonnen worden. Inzwischen liegen aber auch erste Erfahrungen mit menschlichen Daten vor, die am fliegenden Personal erhoben worden sind. Das fliegende Personal ist beruflich durch den langen Aufenthalt in großen Flughöhen einer erhöhten Strahlenbelastung vor allem durch Neutronen mit einer niedrigen Dosisleistung ausgesetzt. Diese Daten könnten verwendet werden, um die These zu überprüfen, daß für die Berechnung der Äquivalentdosis mindestens ein Strahlungswichtungsfaktor von 75 verwendet werden muß [28]. Nach dieser These müßte die beobachtete Steigerung der Krebshäufigkeit etwa 16fach größer sein, als es die nach den Empfehlungen der ICRP 60 berechnete Äquivalentdosis erwarten läßt (Wirkungsunterschied der Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung der Neutronen gegenüber der Atombombenstrahlung: 4, inverser Dosisleistungseffekt für Neutronen: 3, Relation des Qualitätsfaktors nach ICRU 40 gegenüber Strahlungswichtungsfaktor nach ICRP 60: 1,25 ergibt: $4 \cdot 3 \cdot 1,25 = 16$). Die beobachteten Vielfachen zwischen 16 und 41 sprechen nicht nur für die Richtigkeit dieser These (s. Abb. 11), sondern wecken sogar den Verdacht, daß die RBW der Neutronen auch noch mit diesem Ansatz unterschätzt wird (Ausführlichere Diskussion dazu s. [28, 33]). Speziell für den Fall des Brustkrebses gibt es auch aus Tierexperimenten Hinweise auf eine besondere Empfindlichkeit dieses Organs gegenüber Neutronen [42].

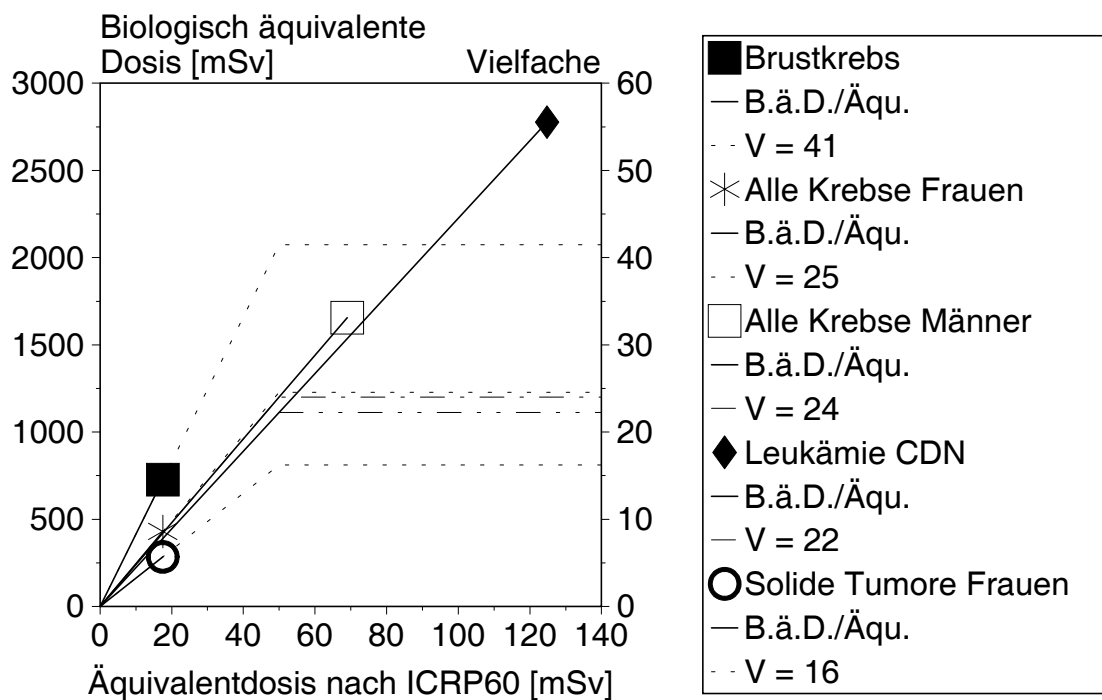


Abb. 11: Vergleich der beruflichen Lebensdosis verschiedener Gruppen des fliegenden Personals, berechnet als Äquivalentdosis mit den Strahlungswichtungsfaktoren der ICRP 60, mit der biologisch äquivalenten Dosis, die erforderlich ist, um die beobachtete Zunahme der Krebshäufigkeit zu erklären (linke Skala). Die Vielfache (V) aus der Division dieser biologisch äquivalenten Dosis (B.ä.D./Äqu.) durch die Äquivalentdosis nach ICRP 60 (Äqu.) ist auf der rechten Skala aufgeführt. Die Daten für Brustkrebs, alle Krebserkrankungen der Frauen und die soliden Tumore der Frauen nach [38], für alle Krebstodesfälle der Männer nach [16] und der Leukämien kanadischer Piloten nach [1].

1.16 Bilanz: Biologische Äquivalenz der CASTOR-Strahlung

Hier sollen nun die Korrekturfaktoren systematisch zusammengefaßt werden, um das wahre Ausmaß der gesundheitlichen Gefährdung beim Vergleich mit Grenzwerten zu bewerten, die auf Empfehlungen der ICRP zurückgehen. Zugleich soll in dieser Bilanz die Weiterentwicklung der Korrekturfaktoren in den letzten Jahren veranschaulicht werden, um den Überblick behalten zu können (s. Tab. 1). Schließlich kann leicht Verwirrung entstehen, wenn ständig von neuen Korrekturfaktoren die Rede ist. Es erscheint fast wie in einem Kriminalstück: Wenn im Vorgarten eines Serienmörders eine Leiche entdeckt worden ist und nun neugierig weiter gegraben wird, kommt im Laufe der Zeit eine weitere Leiche nach der anderen zum Vorschein. Der Einfallsreichtum, mit dem an den verschiedensten Stellen immer etwas an Faktoren zurück geschraubt worden ist, um das gefährliche Niveau der Grenzwerte halten zu können, kann nur erstaunen. Da alle Rundungen, „Vereinfachungen“ und

Anpassungen immer in die gleichen Richtung gehen, nämlich eine Unterbewertung der Gefährlichkeit, und sich in ihrer Auswirkung multiplizieren, resultiert aus der Kettenmultiplikation der notwendigen Korrekturen eine geradezu abstruse Abweichung zwischen Ist und Soll im Strahlenschutz.

Für alle Strahlenarten war bisher der Faktor 2 zum Ausgleich des fehlerhaft angewendeten DDREF zu beachten, 1998 sind hinzugekommen: Faktor 1,4 zum Ausgleich des Unterschiedes zwischen Inzidenz- und Mortalitätsstatistik, Faktor 4 zur Nachführung an die Verbesserung der konventionellen Arbeitssicherheit, Faktor 1,4 zum Ausgleich der stärkeren Gefährdung der europäischen Bevölkerung, zusammen jetzt also $2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 = 15,7$, das sind rund 16.

Für die Gammastrahlung des CASTOR muß seit 1996 als Konsequenz aus der Publikation Straumes vom Dezember 1995 zusätzlich noch mit dem Faktor 2 dem Wirkungsunterschied gegenüber der Atombombenstrahlung Rechnung getragen werden. Insgesamt ergibt sich aus heutiger Sicht für Gammastrahlung also ein Faktor von 32.

Tab. 1: Übersicht über die Korrekturfaktoren zur Berechnung einer biologisch äquivalenten Dosis zum Vergleich mit Grenzwerten nach den Empfehlungen der ICRP und ihre Entwicklung im Laufe der letzten Jahre.

	1995	1996	1998
Alle Strahlenarten	2	2	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \approx 16$
Gammastrahlung	2	$2 \cdot 2 = 4$	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 2 \approx 32$
Röntgenstrahlung	$2 \cdot 2 = 4$	$2 \cdot 4 = 8$	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 4 \approx 64$
Neutronen	$2 \cdot 2 \cdot 7,5 = 30$	$2 \cdot 4 \cdot 7,5 = 60$	$2 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 1,4 \cdot 4 \cdot 7,5 \approx 480$

Für Röntgenstrahlung als Referenzstrahlung für die Bewertung der Neutronen war der Wirkungsunterschied zur Atombombenstrahlung bis zum Dezember 1995 mit dem Faktor 2 zu bemessen, danach als Konsequenz aus der Publikation Straumes mit Faktor 4. Dadurch stieg der Faktor insgesamt von 4 auf 8. Aus heutiger Sicht beträgt er 64.

Im Vergleich zur Röntgenstrahlung ist von einer RBW der Neutronen im Bereich niedriger Dosen und Dosisleistungen von 75 auszugehen. Der Korrekturfaktor hängt nun davon ab, mit welchem Qualitätsfaktor oder Strahlungswichtungsfaktor bei der Dosimetrie gearbeitet worden ist. Es errechnet sich ein Faktor 7,5 gegenüber der Dosisleistung, die nach den Empfehlungen der ICRP 21 bei der Ausmessung des CASTOR IIa in Gorleben ermittelt wurde und bei der ein Q von 10 zur Anwendung kam. 1995 betrug deshalb der Faktor insgesamt 30, 1996 stieg er auf 60, aus heutiger Sicht muß 480 angewendet werden!

2. Praktische Konsequenzen

2.1 Nahzone des CASTOR

In der Nahzone des CASTOR IIa hat sich bei Messungen die Abschätzung des Autors bestätigt, daß die Verringerung der Dosisleistung mit zunehmendem Abstand wegen der umfangreichen Quelle, die sich erst in größeren Abständen hinlänglich als Punktquelle beschreiben läßt, nicht dem inversen quadratischen Abstandsgesetz gehorcht, sondern deutlich geringer ausfällt (s. Abb. 12). Dennoch sind im näheren Bereich ab etwa 5m die Befürchtungen noch übertroffen worden.

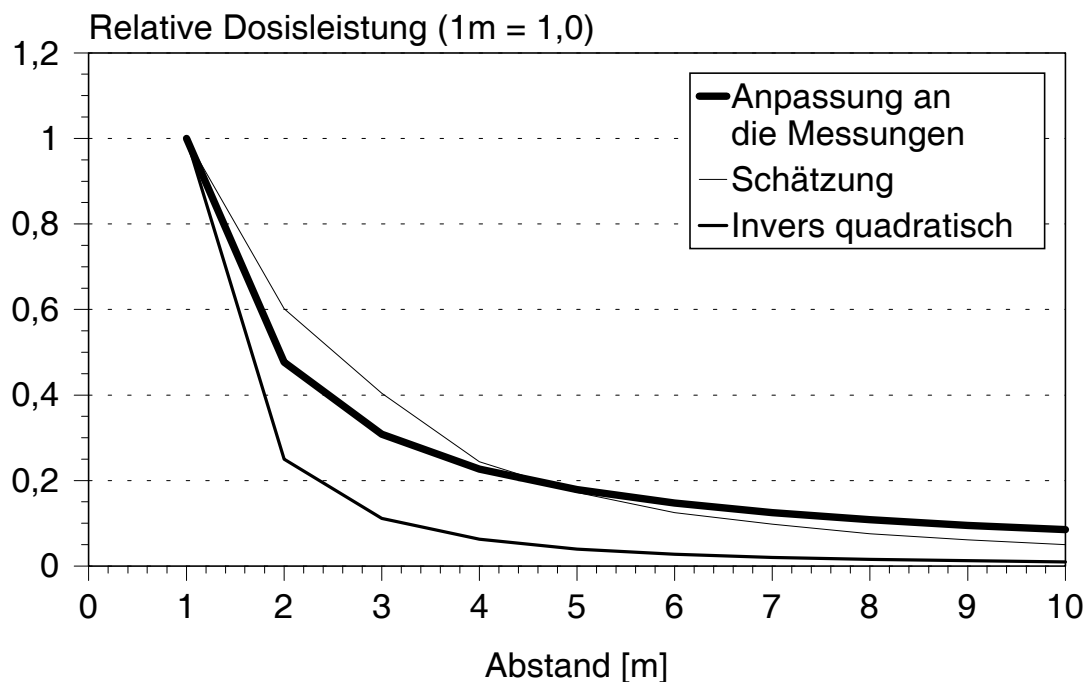


Abb. 12: Relative Änderung der Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand in der Nahzone des CASTOR IIa etwa in Höhe der Behältermitte. Der Verlauf entspricht der Kurvenanpassung durch das BfS durch gemessene Stützpunkte [4] und wurde den Schätzungen aus [21] und einer invers quadratischen Abnahme der Dosisleistung mit zunehmendem Abstand gegenübergestellt.
Bezugswert: Dosisleistung im Abstand von 1m

Korrigiert als biologisch äquivalente Dosisleistung stellt sich die Gesundheitsgefährdung dramatisch dar (s. Abb. 13): In einem Abstand von weniger als etwa fünf Meter herrscht Sperrbereich! Es sei daran erinnert, daß nach der Bewertung der Strahlenschutzverordnung der Grenzwert der Gefahrgutverordnung von $100 \mu\text{Sv/h}$ beim CASTOR IIa in 2m Abstand zu knapp einem Viertel

ausgeschöpft war. Schon bei einer größeren Ausschöpfung des Grenzwertes bis etwa zur Hälfte verschiebe sich der Sperrbereich über die 10m-Zone hinaus.

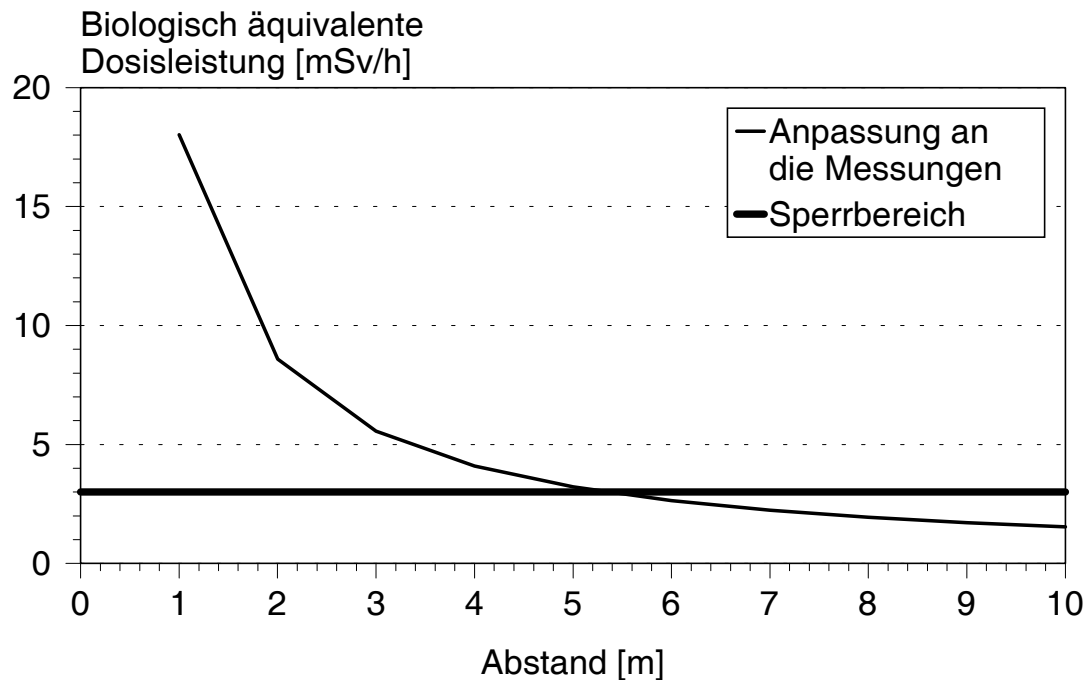


Abb. 13: Biologisch äquivalente Dosisleistung in Abhängigkeit vom Abstand in der Nahzone des CASTOR IIa etwa in Höhe der Behältermitte. Ausgangswert ist der Meßwert in 2m Abstand korrigiert auf die Berechnung des Spektrums durch den TÜV. Der Verlauf entspricht der Kurvenanpassung durch das BfS durch gemessene Stützpunkte [4].
 Bezugswert: Auf Neutronenfluß korrigiertes Rechenergebnis des TÜV in 1m Abstand etwa in Behältermitte.
 Eingezeichnet ist zusätzlich die Dosisleistung, ab der nach Strahlenschutzverordnung ein Sperrbereich herrscht.

Das hat auch Konsequenzen für das Ausmaß der gesundheitlichen Gefährdung, die durch einen Vergleich mit dem konventionellen Arbeitsleben veranschaulicht werden sollen.

In der Bundesrepublik Deutschland ereignete sich pro Jahr auf 10.000 Vollbeschäftigte etwa ein Todesfall durch einen Arbeitsunfall oder eine anerkannte Berufskrankheit (ohne Wegeunfälle) [7] (s. Abb. 14). Die Bedeutung der Strahlenbelastung wird zunächst am Beispiel der Arbeiter in Leistungsatomkraftwerken gezeigt. Hier waren deutlich weniger Todesfälle durch konventionelle Ursachen als im Spartendurchschnitt zu beklagen. Durch die zusätzliche Strahlenbelastung nimmt aber die Anzahl der zu erwartenden tödlichen Krebserkrankungen so zu, daß der Gewinn durch die unterdurchschnittliche Gefährdung aus dem konventionellen Bereich mehr als ausgeglichen wird. Dabei liegt die

durchschnittliche Strahlenbelastung dieser Beschäftigten mit ca. 1 mSv/a weit unter dem festgesetzten Grenzwert von 50 mSv/Jahr [5].

Bei diesem Szenario ist die Wahrscheinlichkeit tödlicher Krebserkrankungen von den Auswertungen des BEIR-Komitees abgeleitet worden [3]. Dieses Wissenschaftlerkomitee verwendet (mit Ausnahme für Leukämien) eine lineare Dosiswirkungskurve, die keinen Raum für einen Reduktionsfaktor für niedrige Dosen und Dosisleistungen läßt. Deshalb ist eine Korrektur der Dosis auf DDREF nicht erforderlich. Die Schadenserwartung war für eine heutige Population berechnet worden, so daß eine demographische Korrektur nicht notwendig ist. Da dieser Wert der aktuellen Situation im konventionellen Arbeitsbereich gegenübergestellt wird, ist auch keine Korrektur für veränderte Arbeitssicherheit erforderlich. Lediglich die Anpassung an den Wirksamkeitsunterschied der Gammastrahlung im Vergleich zur Atombombenstrahlung (Faktor 2) wurde vorgenommen. Bei der Neutronenkomponente wurde der Wirksamkeitsunterschied der Referenzstrahlung im Vergleich zur Atombombenstrahlung (Faktor 4) sowie der Unterschied des geforderten Qualitätsfaktors von 75 im Vergleich zu dem der Strahlenschutzverordnung von 10 beachtet (Faktor 7,5).

Für den Fall, daß der Grenzwert der Dosisleistung von 100 μ Sv/h in 2m Abstand mit den konkreten Anteilen von Neutronen und Gammastrahlung wie beim CASTOR IIa eine Stunde eingewirkt hätte (entspricht einer Dosis von 0,1 mSv), übersteigt die Wahrscheinlichkeit zusätzlicher Todesfälle durch die Strahlenbelastung nicht nur das konventionelle Todesrisiko erheblich, sondern liegt auch noch höher als das, dem die beruflich Strahlenexponierten in den Atomkraftwerken ausgesetzt sind. Dieses Ausmaß der Gefährdung wird noch überschritten, wenn sich z.B. eine Person in 2m Abstand vom CASTOR IIa sechs Stunden im Jahr aufhält.

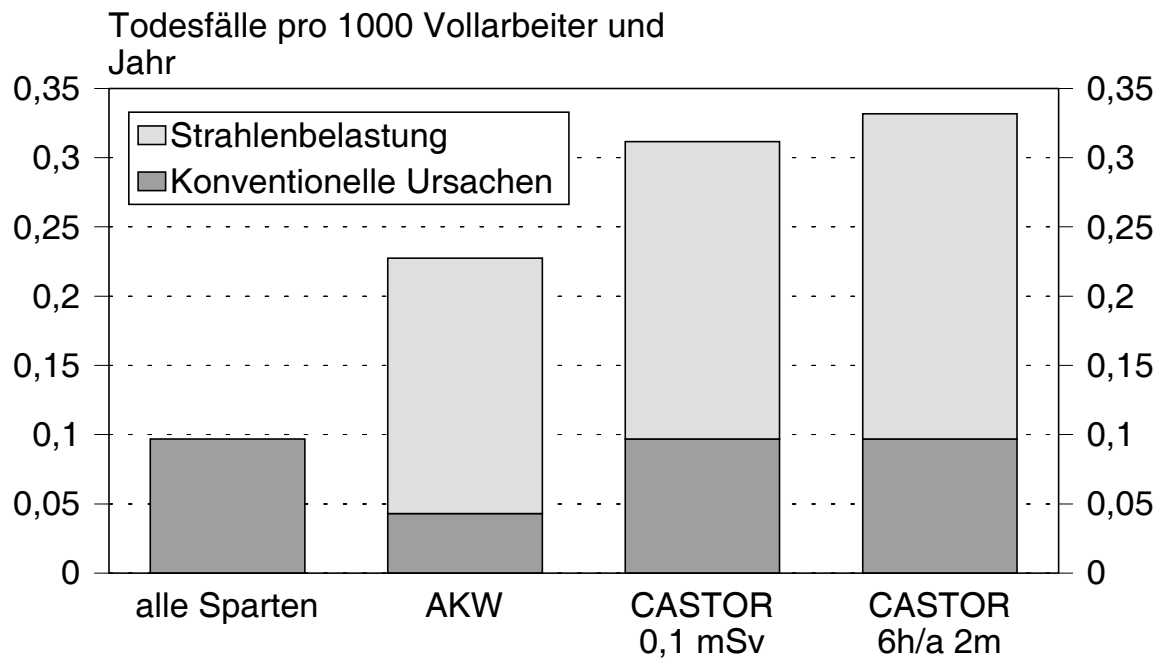


Abb. 14: Relative jährliche Häufigkeit der Todesfälle durch Arbeitsunfälle und anerkannte Berufskrankheiten im Spartendurchschnitt (alte Bundesländer 1990) und bei Beschäftigten in deutschen Leistungsatomkraftwerken im Vergleich zu der Häufigkeit zusätzlicher Krebstodesfälle durch die jährliche Strahlenbelastung dort und im Strahlenfeld eines CASTOR IIa für zwei Szenarien:
 1. Belastung mit einer Dosis von 0,1 mSv
 2. Sechs Stunden im Jahr im Abstand von 2m

Werden die zusätzlichen Gesundheitsschäden durch nicht tödlich verlaufende Krebserkrankungen in die Betrachtung einbezogen, übersteigt die Gesundheitsgefährdung den Durchschnitt aller Sparten noch deutlicher, obwohl dort die Häufigkeit anerkannter Berufskrankheiten hinzugerechnet worden ist (s. Abb. 15).

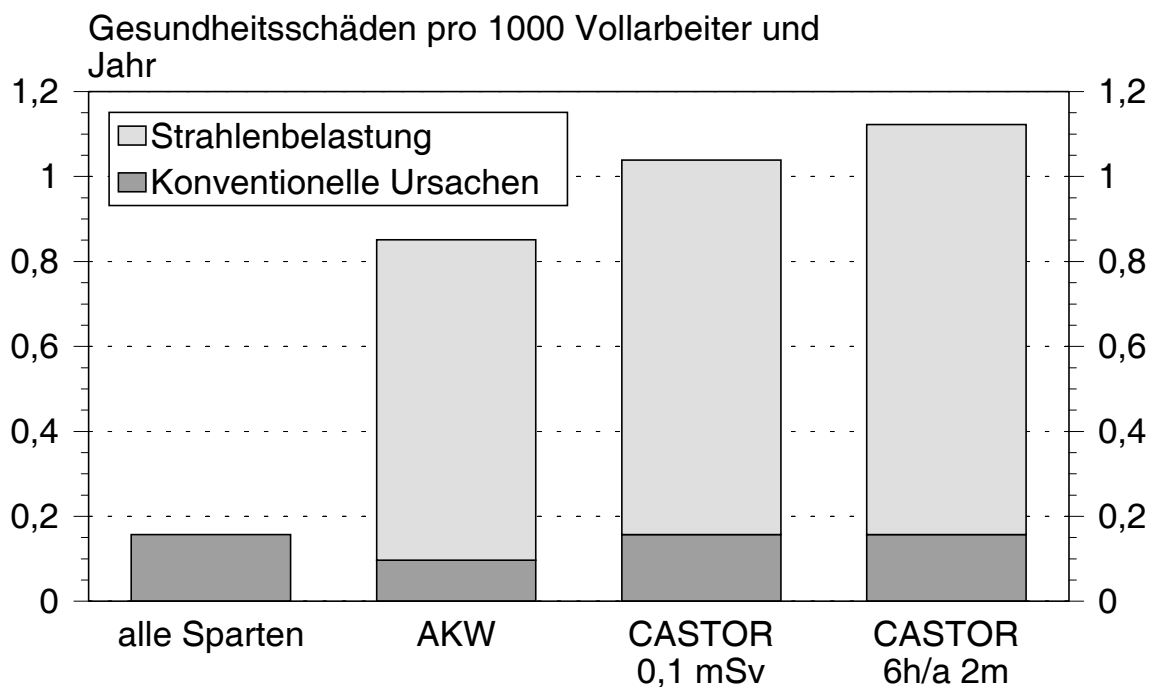


Abb. 15: Wie Abb. 914, jedoch unter zusätzlicher Berücksichtigung nichttödlicher Krebserkrankungen als Folge der Strahlenbelastung und anerkannter Berufserkrankungen im konventionellen Bereich

In Abb. 16 wird veranschaulicht, nach welcher Zeit des Aufenthaltes in der Nahzone des CASTOR IIa sich das Ausmaß der gesundheitlichen Gefährdung konventioneller Art durch strahleninduzierte Krebserkrankungen verdoppelt.

Teilweise wurde versucht, die behauptete Harmlosigkeit eines beruflichen Einsatzes im Nahbereich des CASTOR dadurch zu belegen, daß Personendosimeter für Neutronen ausgegeben wurden, die wegen ihrer mangelhaften Empfindlichkeit in diesem Dosisbereich auch prompt keine Strahlendosis anzeigen. Hier sollte das ernst gemeinte Argument einiger Experten für Strahlenschutz gegenüber dem Autor beachtet werden, die von ihm geforderten Faktoren für die adäquate Bewertung der Neutronen seien schon deshalb abzulehnen, weil dann die physikalischen Dosen, die als Bruchteil des Grenzwertes nach den Anforderungen eines guten Personenstrahlenschutzes gemessen werden müßten, weit unter den Nachweisgrenzen der Dosimeter lägen.

Alle Beschäftigten sollten darauf achten, daß Abstände und Zeitdauer ihres beruflichen Einsatzes dokumentiert werden. Es ist abzusehen, daß in einigen Jahren oder Jahrzehnten, wenn sich möglicherweise eine gesundheitliche Beeinträchtigung einstellt, die Anschauungen im Strahlenschutz und bei der Anerkennung von Berufskrankheiten sich so weiter entwickelt haben, daß eine dokumentierte Belastung im adäquaten Umfang dann auch zur Anerkennung führt.

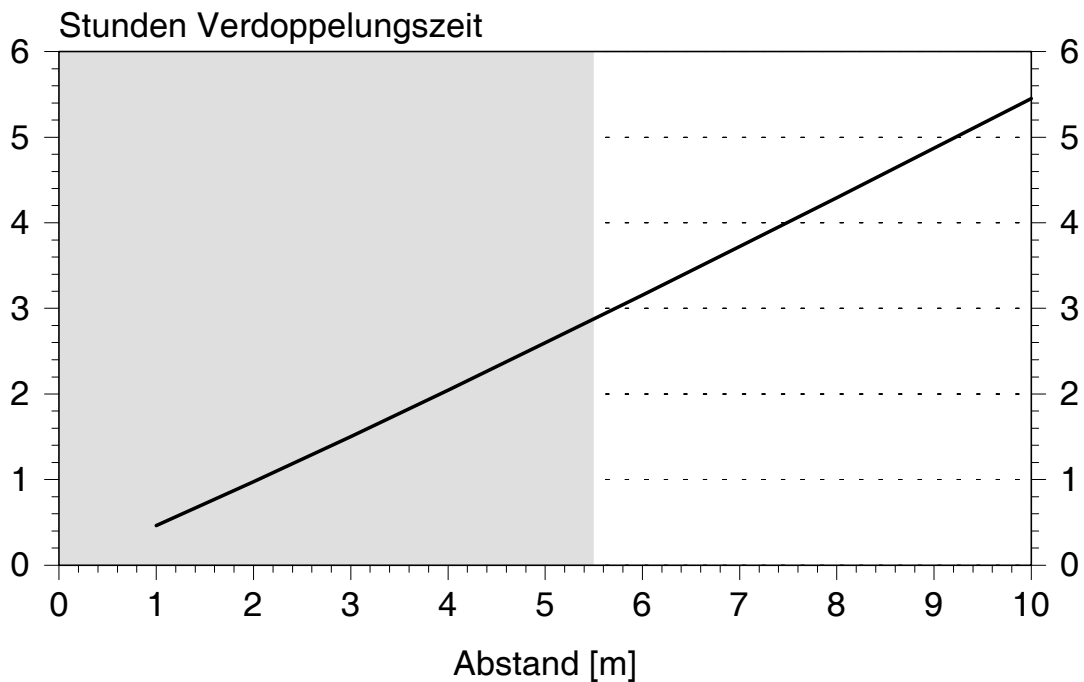


Abb. 16: Aufenthaltszeit in der Nahzone des CASTOR IIa, die zu einer Verdoppelung der konventionellen gesundheitlichen Gefährdung (Durchschnitt aller Sparten) durch strahleninduzierte Krebserkrankungen führt.
Grau unterlegt: Sperrbereich.

Bei diesem Vergleich ist zu beachten, daß Todesfälle und Berufskrankheiten im konventionellen Bereich keineswegs ohne Reaktion hingenommen werden, sondern daß ständig und langfristig auch nicht ohne Erfolg an einer Verbesserung der Arbeitssicherheit gearbeitet wird. Auch die durchschnittliche Strahlenbelastung von Beschäftigten in den Atomkraftwerken konnte über eine längere Zeitspanne deutlich vermindert werden. An dem Grenzwert dagegen wird unverändert festgehalten. Die Opfer einer beruflichen Strahlenbelastung haben unter diesen Bedingungen so gut wie keine Chance, daß erlittene Strahlenschäden als Berufserkrankungen anerkannt werden. Meist dürften sie noch nicht einmal über die Tatsache und das Ausmaß ihrer Strahlenbelastung informiert sein. Zu beachten ist, daß sich unter realistischen Bedingungen eine genügend große Kollektivdosis ergeben kann, bei der sich die Einzelwahrscheinlichkeiten für einen Gesundheitsschaden zu einer konkreten Schadenserwartung in ganzen Zahlen aufsummieren.

Besonders schwierig ist im Vergleich die gesundheitliche Situation der polizeilichen Einsatzkräfte zu beurteilen. Sie gehören zu den wenigen Beschäftigten in einem modernen Industriestaat, für die keine Statistiken über die gesundheitlichen Folgen der Berufstätigkeit existieren wie sie im Bereich der

Berufsgenossenschaften seit vielen Jahren als unverzichtbares Instrument auch prophylaktischen Handelns unverzichtbar sind. Auch Beschäftigte in einem Beruf, die gewohnt sind, gefährlichen Einsätzen ins Auge zu blicken, werden ins Grübeln kommen, wenn sie sich die besondere Heimtücke der Strahlengefährdung bewußt machen: Während eine konventionelle gesundheitliche Gefahr, z.B. Gewalteinwirkung oder Verletzung, in der Freizeit oder im Ruhestand beendet ist, nimmt die Entwicklung einer Krebskrankheit darauf keine Rücksicht. Im Gegenteil: Sie ist eine typische Erkrankung des fortgeschrittenen Lebensalters, in dem Nichtbetroffene den wohlverdienten Ruhestand genießen können. Schließlich kommt für junge Beschäftigte die seelische Belastung hinzu, daß sie die genetischen Schäden durch die Strahlenbelastung an ihre Nachkommen weiter vererben können.

Zu beachten ist zudem, daß die dargestellte Gefährdung einen mittleren Wert für beide Geschlechter darstellt, bei Frauen je nach Alter jedoch zwei- bis dreimal mehr Krebserkrankungen durch die gleiche Strahlendosis ausgelöst werden als bei Männern.

2.1 Anlieger der Transportstrecken

Bei den Berechnungen zur gesundheitlichen Gefährdung von Beschäftigten war keine zusätzliche Abschwächung des Strahlenfeldes durch Abschirmung berücksichtigt worden, da dies für viele Bestrahlungsbedingungen auch praxisgerecht sein dürfte. Bei einer Betrachtung möglicher Gesundheitsschäden in der normalen Bevölkerung soll zurückhaltend eine zusätzliche durchschnittliche Abschwächung der Strahlung durch Abschirmung einberechnet werden, um der Tatsache Rechnung zu tragen, daß hier ein Aufenthalt in geschlossenen Räumen häufiger ist. Für die Gammastrahlung ist eine Schwächung um zwei Halbwertsschichtdicken, also auf ein Viertel, und für Neutronen um eine Halbwertsschichtdicke, also auf die Hälfte, angenommen worden. Zunächst wird der Fall betrachtet, daß ein durchschnittlicher Anlieger der Transportwege im Laufe seines Lebens 50 Stunden dem Strahlenfeld eines CASTOR ausgesetzt ist. Es wird eine durchschnittliche Transportstrecke von 400km betrachtet und von einer durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von 250 Einwohner pro Quadratkilometer ausgegangen. Die durchschnittliche Distanz zwischen den Einwohnern beträgt dann 63,2m. Es wird deshalb vereinfachend davon ausgegangen, daß der durchschnittliche Einwohner auf beiden Seiten des Transportweges in einem Abstand von 30m zum Transportweg alle 63,2m aufgereiht ist.

Wegen der dominierenden Bedeutung der Neutronen für die biologisch äquivalente Dosis sind im folgenden charakteristische Abweichungen des Verhältnisses zwischen Gamma- und Neutronenstrahlung beispielhaft aufgeführt, wie sie bei Brennelementen mit einem mittleren Abbrand von 35 GWd/t zu erwarten sind. Während bei frischen Brennelementen das Neutronenfeld, berechnet jeweils mit den Qualitätsfaktoren der Strahlenschutzverordnung, die halbe Dosisleistung des Gammastrahlenfeldes haben kann, steigt das Verhältnis bei einer Lagerung eines Brennelementes von sieben Jahren auf 2,3:1 und kann, wenn es sich um ein MOX-Brennelement handelt, ein Verhältnis von

z.B. 31,6:1 erreichen. Für die folgenden Beispiele wurde unterstellt, daß mit diesen Verhältniszahlen und mit Anwendung der Qualitätsfaktoren der Strahlenschutzverordnung jeweils der 2m-Grenzwert durch eine entsprechende Beladung des CASTOR ausgeschöpft wird.

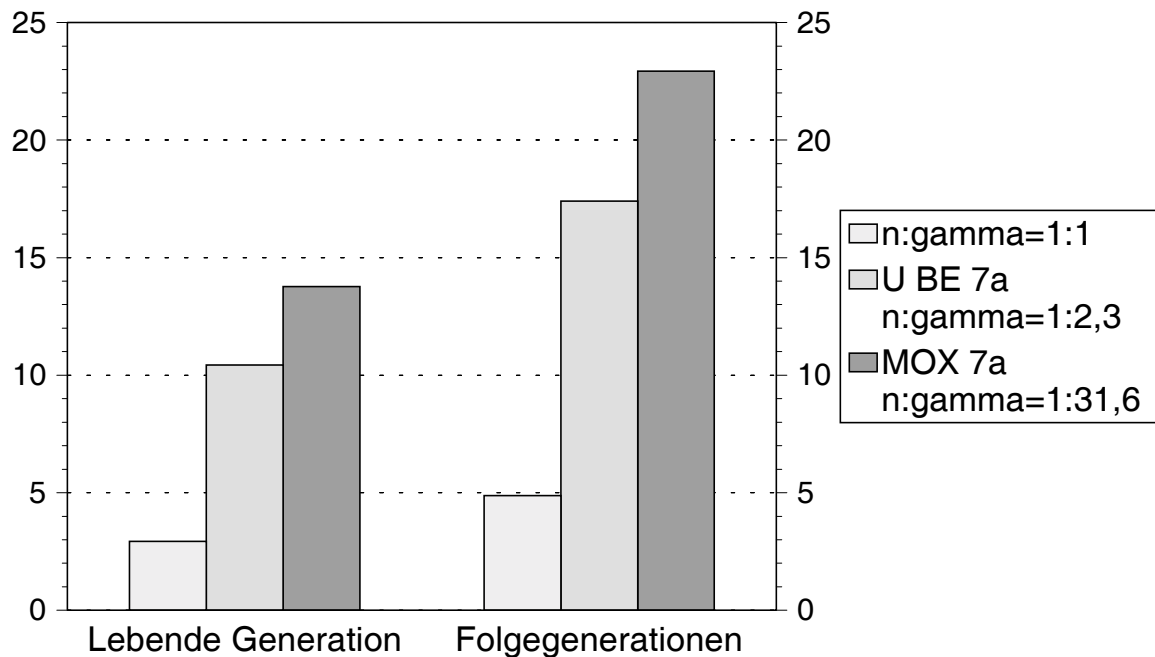


Abb. 17: Zusätzliche Gesundheitsschäden in der lebenden Generation durch Krebserkrankungen und in den Folgegenerationen durch genetische Schäden und multifaktorielle Erkrankungen bei Anliegern der Transportwege von CASTOR mit abgebrannten Brennelementen bei Ausschöpfung des 2m-Grenzwertes der Gefahrgutverordnung.

Abb. 17 zeigt, daß bei Ausschöpfung des 2m-Grenzwertes der Gefahrgutverordnung nach den Qualitätsfaktoren der Strahlenschutzverordnung bei dem gewählten Szenario bereits in der lebenden Generation die Gesundheitsschäden (tödliche und nicht tödlich verlaufende Krebserkrankungen) so wahrscheinlich sind, daß bei einer gesamten Expositionszeit von 50 Stunden sich die individuelle Gesundheitsgefährdung zu einer konkreten Schadenserwartung aufsummieren kann. Noch stärker betroffen sind die Folgegenerationen, bei denen schwere genetische Schäden und die in ihrer Manifestationswahrscheinlichkeit genetisch mitbeeinflussten, sog. multifaktoriellen Erkrankungen nach einer Strahlenbelastung vermehrt auftreten (Näheres zum heutigen Stand der genetischen Gefährdung s. [20]).

Die gesamte Expositionszeit von 50 Stunden, die zur Manifestation dieser Schadenserwartung angenommen worden ist, ist ein sehr hoher Wert. In siebzig Jahren ist dazu immerhin eine Exposition von etwa 40min in jedem Jahr erforderlich. Aber auch bei niedrigeren Werten verbleibt eine beachtliche

Gesundheitsgefährdung. Allerdings ist zu beachten, daß auf Schwerpunkstrecken nicht nur Transporte von CASTOR mit abgebrannten Brennelementen erfolgen, sondern auch andere hochradioaktive Quellen mit ähnlichen Strahlenfeldern befördert werden können, wie z.B. Behälter mit hochradioaktivem Abfall aus Wiederaufarbeitungsanlagen. Diese Transporte sind in der Berechnung noch nicht enthalten.

Das Szenario der Gefahrgutverordnung unterstellt, daß sich die normale Bevölkerung nicht länger als 10 Stunden im Jahr in einer Entfernung von radioaktiven Transportstücken aufhält, in der eine Strahlenbelastung von $100 \mu\text{Sv}$ pro Stunde herrscht, also in einem Jahr der Grenzwert von 1 mSv nicht überschritten wird. Bei einer Ausschöpfung des Grenzwerte von $100 \mu\text{Sv}$ pro Stunde in 2 m Abstand nach den Bewertungen der Strahlenschutzverordnung wird nach diesem Szenario bei einer biologisch äquivalenten Bewertung der Strahlung der Grenzwert von 1 mSv pro Jahr erst in wesentlich größerem Abstand nicht mehr überschritten (s. Abb. 18).

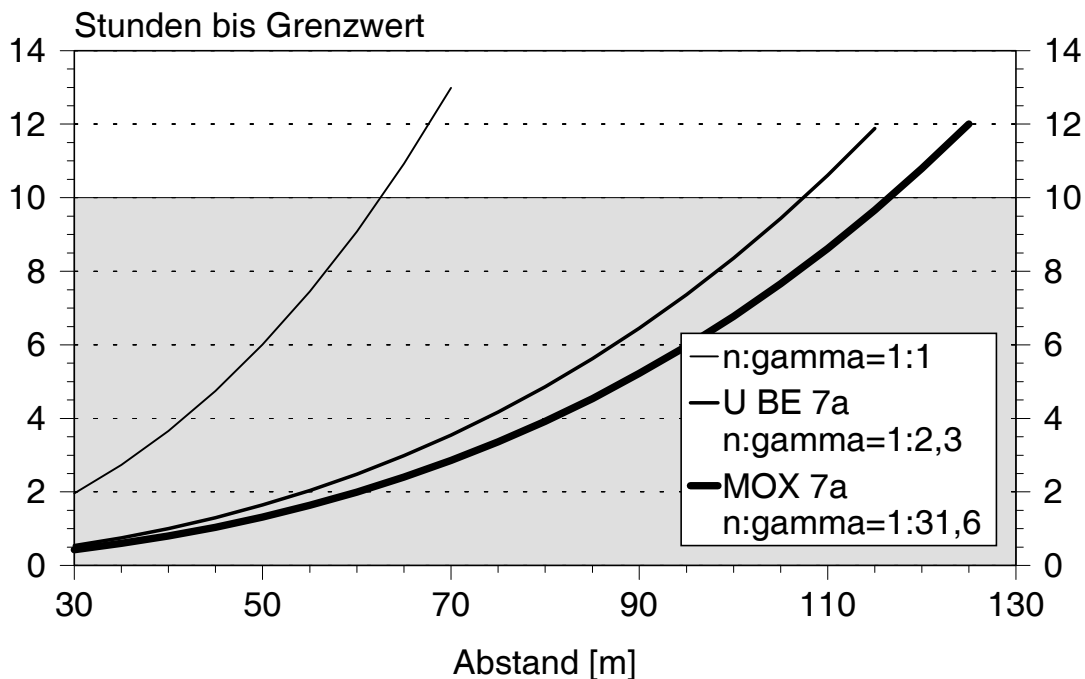


Abb. 18: Mögliche Aufenthaltsdauer bis zur Überschreitung des Grenzwertes für die normale Bevölkerung von 1 mSv pro Jahr nach den Empfehlungen der ICRP bei Ausschöpfung des 2 m -Grenzwertes der Gefahrgutverordnung in Abhängigkeit vom Abstand zum CASTOR. Grau hinterlegt: Szenario der Gefahrgutverordnung für Aufenthaltsdauer der normalen Bevölkerung in der Nähe radioaktiver Transportstücke pro Jahr.

Es kann für Anwohner durchaus interessant sein, mithilfe automatisierter Meßgeräte CASTOR-Transporte und ihre Auswirkungen auf die Strahlenbelastung der Anwohner zu dokumentieren (zur Methodik z.B. [8]). Wie dies für die Beschäftigten schon ausgeführt worden ist, kann dies eventuell später einmal die Grundlage für Schadensersatzansprüche gegen die Verursacher der Strahlenbelastung und der dadurch ausgelösten Gesundheitsschäden sein. Noch besser ist es natürlich, durchzusetzen, daß die Transporte unterbleiben.

Literatur

- 1 Band, S. R., Le, N.D., Fang, R., Deschamps, M., Coldman, A.J., Gallagher, R.S. , Moody, J. 1996
Cohort Study of Air Canada Pilots: Mortality, Cancer Incidence, and Leukemia Risk
Am. J. Epidemiol. 143, 137-143
- 2 BEIR III 1980
Committee on the **B**iological **E**ffects of Ionizing **R**adiations
The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: 1980
National Academy Press, Washington DC
- 3 BEIR V 1990
Committee on the **B**iological **E**ffects of Ionizing **R**adiations
Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation
National Academy Press, Washington DC, 1990
- 4 BfS 1997
Bundesamt für **S**trahlenschutz
Messungen im Neutronen- und Gamma-Strahlungsfeld eines beladenen Castor-IIa-Behälters im
Transportbehälterlager Gorleben und Vergleich der Meßergebnisse für Neutronen mit Monte-
Carlo-Rechnungen
BfS-ET-Berichte, Salzgitter, BfS-ET-24/97
- 5 BMU 1992
Der **B**undesminister für **U**mwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bericht der
Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1990
Drucksache 12/2677, Verlag Dr. Heger, Bonn, 1992
- 6 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
- 7 BMA 1991
Der **B**undesminister für **A**rbeit und Sozialordnung
Arbeitssicherheit '91, Unfallverhütungsbericht
Reihe Berichte und Dokumentationen, Bonn, 1991
- 8 Burg, R. 1998
Automatic survey of transport of nuclear fuel elements from nuclear installations
3. Internationaler Kongreß der Gesellschaft für Strahlenschutz, Universität Münster,
19.-21.03.1998
- 9 Dietze, G. 1996
Die Bewertung von Neutronen im Strahlenschutz
Strahlenschutzpraxis Heft 3, 59-62

- 10 GSS 1998
Gesellschaft für Strahlenschutz
Pressemitteilung v. 23.05.98
zum CASTOR - Skandal
Link: <http://staff-www.uni-marburg.de/~kuni/gss/gssp2305.htm>
- 11 ICRP 21 1973
International Commission on Radiological Protection
Publication 21
Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP
Publication 15, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
Pergamon Press, Oxford, New York
- 12 ICRP 26 1977
International Commission on Radiological Protection
Publication 26
Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
Annals of the ICRP Vol. 1, No. 3, Pergamon Press, Oxford, New York
- 13 ICRP 45 1985
International Commission on Radiological Protection
Publication 45
Quantitative Bases for Developing a Unified Index
of Harm
Annals of the ICRP Vol. 15, No. 3, Pergamon Press, Oxford, New York
- 14 ICRP 60 1991
International Commission on Radiological Protection
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
- 15 ICRU 40 1986
International Commission on Radiation Units and Measurements
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
- 16 Kaji, M., Tango, T., Asukata, I., Tajima, N., Yamamoto, K., Yamamoto, Y., Hokari, M. 1993
Mortality Experience of Cockpit Crewmembers from Japan Airlines
Aviat. Space Environ. Med. 748-750
- 17 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, Kuni, Schmitz-Feuerhake (Hrsg.):
Niedrigdosisstrahlung und Gesundheit, Medizinische, rechtliche und technische Aspekte mit
dem Schwerpunkt Radon
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, HongKong, Barcelona,
1990, S. 201-214

- 18 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
- 19 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
- 20 Kuni, H. 1994
Niedrige Strahlendosen und Gesundheit der Arbeitnehmer,
Berichte des Otto Hug Strahleninstitutes, Bonn, Bericht 8-11, MMV Verlag München
- 21 Kuni, H. 1995
Gefährdung der Gesundheit durch Strahlung des CASTOR
IPPNW, Berlin
- 22 Kuni, H. 1995
Stellungnahme zur Presseerklärung des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) vom 3.08.1995
25/95
Marburg, Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/anti-bfs.pdf> (5 kB)
- 23 Kuni, H. 1995
Diskussion zur Bewertung von Neutronen
Marburg, Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/discas.pdf> (32 kB)
- 24 Kuni, H. 1995
1. Stellungnahme zur Erklärung der Strahlenschutzkommission (SSK) vom Sept. 1995
Marburg Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/anti-ss1.pdf> (6 kB)
- 25 Kuni, H. 1995
RBW der Neutronen und Epidemiologie der Atombombenopfer in Hiroshima und Nagasaki
Manuskript, Marburg, Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/rbw-ab.pdf> (67 kB)
- 26 Kuni, H. 1996
2. Stellungnahme zur Erklärung der Strahlenschutzkommission (SSK) vom Sept. 1995
Marburg, Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/anti-ss2.pdf> (29 kB)
- 27 Kuni, H. 1996
Stellungnahme zur Presseinformation des Niedersächsischen Umweltministeriums vom
24.01.1996
Marburg, Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/anti-ns.pdf> (5 kB)
- 28 Kuni, H. 1996: Epidemiologische Hinweise zur RBW von Neutronen
Update 5/96, Marburg, Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/rbw-epi.pdf> (29 kB)
- 29 Kuni, H. 1996
RBW der Neutronen bei Affen - auf den Menschen übertragbar?
Manuskript, Marburg
Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/n-affen.pdf> (11 kB)

- 30 Koelschky, M. (Interviewerin), Kuni, H. 1996
Keine kopernikanische Wende in Sicht
Interview über Castor-Transporte und das strahlenbiologische Weltbild
Forum Wissenschaft 13 (3), 10-14

- 31 Kuni, H. 1997
Biologische Wirksamkeit der Neutronen im Strahlenschutz unterschätzt
Kurzfassung einer Stellungnahme zur Podiumsdiskussion des GAST in Stuttgart-Hohenheim
14.01.1997, Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/GAST-stg.pdf> (10 kB)

- 32 Kuni, H. 1998
The Concept of Equivalent Dose and Dose Limits - Urgent Improvements
STOA Workshop Survey and evaluation of criticism of basic safety standards for the protection of workers and the public against ionising radiation, Brüssel, 5.02.98,
Download: <http://staff.uni-marburg.de/~kunih/all-doc/stoakuni.pdf> (75 kB)

- 33 Kuni, H. 1998
Strahlenbelastung des fliegenden Personals - Bewertung und gesundheitliche Konsequenzen
3. Internationaler Kongreß der Gesellschaft für Strahlenschutz, Universität Münster,
19.-21.03.1998

- 34 Koelschky, M. (Interviewerin), Kuni, H. 1998
Im eigenen Netz verfangen
Interview zur Kontamination der Castor-Transporte und den Grenzen wissenschaftlicher Erkenntnis
Forum Wissenschaft 15 (3), 38-42,
Link: <http://www.gfstrahlenschutz.de/gssfowi1.htm>

- 35 NIH 1985
Report of the National Institutes of Health, ad hoc working group to develop radioepidemiological tables
NIH Publ. 85-2748, 1985

- 36 Nussbaum, R.H. 1998
The Linear No-Threshold Dose Effect Relation: Is it Relevant to Radiation Protection Regulation
Med. Physics 25, 291-299

- 37 Pierce, D.A., Shimizu, Y., Preston, D.L., Vaeth, M., Mabuchi, K. 1996
Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 12, Part I. Cancer: 1950-1990
Radiat. Res. 146, 1-27

- 38 Pukkala, E., Auvinen, A., Wahlberg, G. 1995
Incidence of Cancer among Finnish Airline Cabin Attendants, 1967-92
Brit. Med. J. 311, 649-652

- 39 Ron, E., Preston, D.L., Mabuchi, K., Thompson, D.E., Soda, M. 1994
Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part IV: Comparison of Cancer Incidence and Mortality
Radiat. Res. 137, 98-112

- 40 Schmitz-Feuerhake, I. 1998
Gesundheitsgefährdung durch kontaminierte CASTOR - Behälter
Link: <http://www.gfstrahlenschutz.de/gsscont.htm>
- 41 Schmitz-Feuerhake, I. 1998
Atommülltransporte und Ganzkörpermessungen
Link: <http://www.gfstrahlenschutz.de/gssgkz.htm>
- 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
- 43 Shimizu, Y., Kato, H., Schull, W.J. 1988
Life Span Study Report 11, Part 2. Cancer Mortality in the Years 1950-85 Based on the Recently Revised Doses (DS86)
Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Technical Report, RERF TR 5-88, 1988
- 44 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
- 45 Straume, T. 1995
High-Energy Gamma Rays in Hiroshima and Nagasaki: Implications for Risk and w_R
Health Phys. 69, 954-956
- 46 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
Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, Technical Report, 1992, RERF TR 5-92
Radiat. Res. 137 (1994), S17-S67
- 47 UNSCEAR 1994
United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation
UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes
United Nations, New York, 1994