

Stephan Böse, Eckhard H. Krüger (Hrsg.)

Kind und Umwelt II

Münchner Ökopädiatrie-Seminar 1993



Mabuse-Verlag

Inhaltsverzeichnis

	Seite
P. Peller <i>Allergische Erkrankungen im Säuglings- und Kleinkindesalter – Allergieprävention</i>	9
U. Potthast <i>Kindliche Ernährung und Schadstoffe</i>	17
∖ V. Zahn <i>Die Bedrohung des weiblichen Geschlechtes durch Umweltgifte</i>	33
∖ H. Müller-Mohnssen, P. Blania <i>Auf der Suche nach einer ärztlichen Kunstregel für die Früherkennung anthropogener Krankheiten am Beispiel der Pyrethroidintoxikation</i>	39
M. Braungart <i>Schadstoffbelastung für Kinder am Beispiel Blei und Agrochemikalien</i>	63
M. Klöppner, E. H. Krüger <i>Asbest</i>	71
M. C. Laub <i>Unfälle im Kindes- und Jugendalter – Unfallursachen, Mechanismen und Prävention</i>	89
∖ O. Wassermann <i>Gesundheitsrisiken und Naturzerstörung durch Luftverschmutzung</i>	103
∖ A. M. Kellerer <i>Was wissen wir über Strahlenrisiken und insbesondere über das Risiko von Bestrahlungen im Kindesalter?</i>	111
∖ S. Böse, E. H. Krüger <i>Auswirkungen des Tschernobylunfalles auf die Säuglingssterblichkeit, auch in Süddeutschland</i>	129
∖ R. Scholz <i>Zur Strahlensensibilität der Kinder</i>	149
∖ R. Scholz <i>Leukämiecluster in der Nähe von Atomanlagen : Ist die Strahlengenese eine plausible Hypothese ?</i>	161
A. Röhl <i>Wie gehen Eltern mit Umweltgiften um?</i>	171
<i>Index</i>	177
<i>Autorenverzeichnis</i>	181

Was wissen wir über Strahlenrisiken und insbesondere über das Risiko von Bestrahlungen im Kindesalter?

A.M. Kellerer; München.

Allgemeine Überlegungen

Energiereiche Strahlung tötet bei hoher Dosis Zellen und Gewebe ab, verursacht verschiedene Symptome der Strahlenkrankheit und kann schließlich zum Tode führen. Solche akuten Strahlenwirkungen sind jedoch nicht das hauptsächlichste und auch nicht ein umstrittenes Thema des Strahlenschutzes. Schwieriger ist es, die Wirkungen abzuschätzen, die selbst dann eintreten können, wenn die Dosen zu klein sind, um unmittelbar bemerkbare Symptome hervorzurufen. Man spricht von den Spätwirkungen der Strahlung. Die Spätwirkungen kommen zustande durch Störungen der DNA, d.h. der Erbsubstanz, die Jahre oder Jahrzehnte später Krebserkrankungen oder – wenn es sich um Schäden in der Keimbahn handelt – Erbschäden auslösen können.

Die besondere Problematik der Spätschäden liegt darin, daß es für sie keine sichere Dosischwelle gibt. Selbst kleine Dosen können – wenn auch mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit – Krebserkrankungen oder Erbschäden verursachen. Strahlenschäden völlig auszuschließen, ist daher unmöglich; die Menschheit war immer der kosmischen und der terrestrischen Strahlenexposition ausgesetzt und wird ihr immer ausgesetzt bleiben. Schutzziel kann es nur sein, durch vernünftige Reduktion der Strahlenexpositionen deren Beitrag zur allgemeinen Krebsrate soweit zu verringern, daß er im Vergleich zu anderen krebs erzeugenden Faktoren unbedeutend bleibt. Die Forderung ist allerdings schwer objektivierbar. Wann ist ein zusätzlicher Beitrag zur Krebswahrscheinlichkeit – und fast jeder vierte von uns stirbt an Krebs – unbedeutend? Die Komplexität dieser Fragestellung erklärt die Schwierigkeiten der Diskussion um das Krebsrisiko.

Die Problematik ist allerdings nicht auf Strahlung beschränkt, sie ist charakteristisch für das Risiko aller genotoxischer Faktoren, z.B. einer Vielfalt krebs erzeugender Chemikalien. In all diesen Fällen kann man nicht vom Vorliegen einer sicheren Schwelle der Dosis ausgehen; auch kleine Dosen können Krebserkrankungen oder Erbschäden auslösen. Risiken können minimiert aber nicht eliminiert werden.

In einer großen epidemiologischen Studie kamen Sir Richard Doll und seine Mitarbeiter [1] zu dem Schluß, daß etwa 90% aller Krebserkrankungen im Grunde vermeidbar sind, auch wenn nicht alle Ursachen im einzelnen bekannt sind. Strahlung ist nicht eine der großen Krebsursachen, wie etwa das Rauchen oder das UV des Sonnenlichtes oder das Aflatoxin (Schimmelpilz) in Ländern ohne Kühlung von Lebensmitteln [2]. Aber es ist der Faktor, der am besten quantitativ erforscht ist. Es ist auch der Faktor, der durch die Assoziation mit dem Grauen der Atombomben besonderen Schrecken auslöst. Es gibt daher gute Gründe für eine genaue Bewertung der Strahlenrisiken.

Strahleninduzierte Erbschäden und Entwicklungsstörungen

Hauptsächlicher Gegenstand der folgenden Diskussion sind strahleninduzierte Krebserkrankungen. Jedoch ist zunächst auch über andere Strahlenschäden zu sprechen.

Seit langem ist bekannt, daß Strahlung Mutationen und damit auch Erbschäden auslöst. Im Tierversuch wurden solche Erbschäden und ihre Dosisabhängigkeit genau untersucht, und es besteht kein Zweifel, daß entsprechende Wirkungen auch am Menschen auftreten. Es mag daher überraschen, daß strahleninduzierte Erbschäden bisher noch nicht am Menschen nachgewiesen werden konnten. Trotz aufwendiger Untersuchungen an den Kindern und Kindeskindern der Überlebenden der Atombombenexplosionen konnten die strahleninduzierten Erhöhungen der Erbschäden bisher nicht erkannt werden, da sie in den statistisch schwankenden Häufigkeiten der spontan auftretenden Erbschäden verborgen geblieben sind [3, 4]. Andere Faktoren, z.B. das die Häufigkeit von Erbschäden stark bestimmende Alter der Eltern bei der Konzeption ihrer Kinder, überdecken durch ihren größeren Einfluß die Wirkungen der Strahlung. Mit aufwendigen neuen Methoden der Molekularbiologie könnte es in Zukunft jedoch noch gelingen, die Untersuchungen so zu präzisieren, daß an den Nachkommen der Atombombenüberlebenden ein Beitrag strahleninduzierter erblicher Veränderungen erkannt wird. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt muß man sich auf Risikoschätzungen beschränken, die auf Versuchen an Mäusen beruhen. Danach könnte eine Strahlenexposition von 1 oder 2 Sv* zu einer Verdopplung der natürlicherweise auftretenden Erbschäden führen). Da die natürliche Strahlenexposition (ohne Einschluß des Radons in Wohnungen) bis zum Alter von 35 Jahren ungefähr 0,03 Sv beträgt, kann man annehmen, daß 1,5% bis 3% aller Erbschäden auf den Einfluß der ionisierenden Strahlung zurückgehen könnte. Da je nach Region die natürliche Strahlenexposition unterschiedlich ist – beispielsweise beträgt sie in Schleswig Holstein nur etwa die Hälfte des Mittelwertes der Bundesrepublik und im Bayerischen Wald etwa das Doppelte – würden also auch die Beiträge zur Rate der Erbschäden entsprechend variieren. Jedoch sind solche Unterschiede, auch wenn sie wirklich vorliegen, keineswegs statistisch erfassbar; andere ebenfalls variierende Einflußfaktoren überdecken sie bei weitem.

Von den Erbschäden sind die Entwicklungsstörungen, d.h. die Schäden, die pränatal am Embryo oder am Fötus erzeugt werden, zu unterscheiden; man spricht hier von Teratogenese (teratos, griechisch für Ungeheuer). Pränatale Mißbildungen durch Röntgenstrahlen wurden auf schreckliche Weise schon in den 20er Jahren beobachtet, als man der Strahlung noch so bedenkenlos gegenüberstand, daß es zu heute völlig unglaublichen Vorkommnissen, wie z.B. dem versuchten Abbruch von Schwangerschaften durch massive Röntgenbestrahlungen, kam.

Bei den pränatal bestrahlten Überlebenden der Atombombenexplosionen konnten bis vor wenigen Jahren Mißbildungen nicht eindeutig der Bestrahlung zugeordnet werden, da es kein Kriterium gab, alle Schadenswirkungen der Bomben hinreichend zu differenzieren. Vor wenigen Jahren jedoch wurde deutlich, daß unter den etwa 2 000 pränatal bestrahlten Kindern etwa 20 Fälle schwerer geistiger Unterentwicklung ganz überwiegend bei denjenigen aufgetreten waren, die sich zum Zeitpunkt der Exposition in der 9. bis zur 20. Woche nach Konzeption, und besonders in der Periode zwischen der 9. und 15. Woche, befanden.

* Sievert (Sv) ist die Einheit der Äquivalentdosis, die als gemeinsames Maß für unterschiedliche Strahlenarten dient. Gray (Gy) ist die Einheit der Energiedosis. Für γ -Strahlung, Röntgenstrahlung und Elektronen sind Energiedosis und Äquivalentdosis gleich. Der Einfachheit halber wird im folgenden nur das Sievert benutzt.

Dies aber ist die Periode stärkster Zellproliferation in der Ausbildung des Gehirns. Man hat also durch diese schlimme Erfahrung gelernt, daß das Zentralnervensystem in seiner pränatalen Entwicklung das strahlenempfindlichste Organ ist. In der kritischen Periode höchster Empfindlichkeit (9. bis 15. Woche) der Schwangerschaft kommt es nach einer Strahlenexposition von 1 Sv in 40% der Fälle zu schweren Schäden [5]. Es gibt zwar gute Gründe für die Annahme, daß durch Dosen von weniger als 0,1 Sv keine massiven Entwicklungsstörungen hervorgerufen werden können, beweisbar ist diese Annahme jedoch nicht. Würde man linear zu kleinen Dosen extrapolieren, so bedeutete eine Dosis von 0,01 Sv während der empfindlichen Periode der Schwangerschaft ein Zusatzrisiko von etwa 1 : 250 für schwere geistige Retardation des Kindes. Die Abschätzung mag übervorsichtig sein, aber sie verdeutlicht doch, daß auch geringe Strahlendosen während der Schwangerschaft vermieden werden sollten.

Andererseits sind manche Bedenken auch unberechtigt. Nicht selten wird gefragt, ob während der Schwangerschaft nicht jede Strahlenexposition zu vermeiden wäre, beispielsweise auch ein Transatlantikflug, der in 6 Stunden eine zusätzliche Strahlenexposition bedingt, die der natürlichen Exposition während einer Woche - etwa 25 μ Sv - entspricht. Unter der linearen Extrapolation wäre das Zusatzrisiko 1 : 100.000, falls es überhaupt bestehen sollte. Der einzelne Flug ist also kaum als Bedrohung anzusehen, während es andererseits völlig gerechtfertigt ist, die häufigen Flüge des Flugpersonals während der Schwangerschaft zu vermeiden.

Krebserkrankungen durch Strahlung

Anders als bei den Erbschäden wurde schon sehr früh aus unmittelbaren Beobachtungen am Menschen deutlich, daß energiereiche Strahlung Krebs erzeugen kann. Als vor nahezu 100 Jahren W.C. Roentgen das neue Agens entdeckte, das er als X-Strahlung bezeichnete, dachte in blindem Fortschrittsglauben niemand an Strahlenschutz. Als weltweit unzählige Röntgenröhren benutzt wurden, und die Hand immer wieder als Testobjekt in den Strahlengang gehalten wurde, traten bald erste Fälle von Hautkrebs auf. Sie wurden jedoch wenig beachtet. Schon 1905 wurde über ein gehäuftes Auftreten von Leukämien bei Radiologen in Berlin berichtet [6]. Über Jahrzehnte wurde Radioaktivität nicht nur als ungefährlich, sondern als generell gesundheitsförderlich angesehen. Es kam zu den unsinnigsten Anwendungen von Radium in der Medizin. Auch ungeschützte industrielle Anwendung führte zu Tragödien, wie der der Leuchtzifferblattmalerinnen. Hunderte von jungen Frauen bemalten in den USA, und auch in anderen Ländern, Zifferblätter mit radiumhaltiger Farbe. Da sie im Akkord arbeiteten, spitzten sie die Pinsel auf die schnellste Weise, mit dem Mund, und inkorporierten dabei so große Mengen Radium, daß viele von ihnen später an Knochenkrebs zugrunde gingen [7]. Als damals ein junger Arzt, Harrison Martland, die Vermutung aussprach, daß die Kieferschäden einer jungen Frau nicht durch Phosphor in den Leuchtfarben, sondern durch das Radium hervorgerufen seien, wurde ihm vorgeworfen, daß nur ein Scharlatan solche Vermutungen aussprechen könne, da man wisse, daß Strahlung nur bei exzessiver und lang dauernder Einwirkung gesundheitliche Schäden hervorrufe. Was den Brief, der diesen Vorwurf enthielt, so bemerkenswert macht, war seine Autorin, eine der größten Wissenschaftlerpersönlichkeiten, Marie Curie.

Andere Tragödien des ungeschützten Umgangs mit ionisierender Strahlung folgten. Die Einstellung gegenüber der Strahlung nahm ihren dramatischen Wandel jedoch erst durch den Horror der Atombomben.

Als 1950 zum ersten Mal deutlich wurde, daß unter den 100 000 Atombombenüberlebenden vermehrt Leukämien auftraten, etwa 10 Fälle pro Jahr, begann man zu verstehen, daß Strahlung in den Zellen – und nicht nur in den Keimzellen – Mutationen auslösen kann, die dann ihrerseits zur Krebserkrankung führen können [8]. Dies war der Beginn der Beobachtung der Gesundheitseffekte an den etwa 100 000 Atombombenüberlebenden, der größten epidemiologischen Studie, die je durchgeführt wurde und die noch bis ins nächste Jahrhundert andauern wird. Es war auch der Beginn der neuen Philosophie des Strahlenschutzes, nämlich der Dosisreduktion, statt der nun als unmöglich erkannten Elimination aller Strahlenrisiken.

Als man die erhöhte Rate der Leukämien erkannt hatte, suchte man nach einem Anstieg auch bei den übrigen Krebserkrankungen. Es dauerte jedoch bis etwa 20 Jahre nach dem Abwurf der Atombomben, bis solche Erhöhungen nachgewiesen werden konnten. Seitdem jedoch hat man diese erkannt und hat gelernt, daß sie bei fast allen Arten von Tumorerkrankungen auftreten. Dieses auf tragische Weise gewonnene Wissen ist heute so detailliert, daß relativ genaue Aussagen über die Abhängigkeit des Risikos von Dosis, Alter bei Bestrahlung und Zeit nach Bestrahlung möglich sind (9-11).

Die unterschiedlichen Zeitabhängigkeiten für Leukämien und andere Krebserkrankungen

Strahleninduzierte Krebserkrankungen können im Einzelfall nicht von Krebserkrankungen unterschieden werden, die spontan oder durch andere Ursachen erzeugt sind. Daß Strahlung zusätzliche Krebserkrankungen auslöst, kann daher nur durch statistische Studien an großen Bevölkerungsgruppen erkannt werden. Solche Beobachtungen sind schwierig, da sie durch eine Fülle verschiedener Einflußfaktoren verfälscht werden können. Sie sind jedoch möglich und können, wie die Beobachtung der Atombombenüberlebenden gezeigt hat, zu zuverlässigen Daten führen. So ergab die bisherige Analyse, daß bei den 70.000 Atombombenüberlebenden von bisher mehr als 200 aufgetretenen Leukämien etwa 40% (80) und von mehr als 7.000 anderen Krebstodesfällen etwa 5% (350) der Strahlung zuzuschreiben sind [9, 10]. Bevor diese Zahlen und ihre Abhängigkeit von der Strahlendosis genauer erörtert werden, muß ein grundsätzlicher Unterschied erklärt werden, der zwischen den strahleninduzierten Leukämien und den übrigen Krebserkrankungen besteht.

Das Schema der Abbildung 1 verdeutlicht diesen grundsätzlichen Unterschied. Im oberem Teil des Diagramms ist als durchgezogene Linie die altersabhängige 'normale' Wahrscheinlichkeit angegeben, im jeweils angegebenen Lebensjahr an Leukämie zu sterben. Wie die Rate der anderen Krebserkrankungen (siehe unteres Diagramm) steigt auch die Leukämierate steil mit dem Alter an; man könnte von einer jährlichen 'Inflationsrate' von etwa 7% sprechen, der keiner von uns entgeht. Mit dem 60. Lebensjahr ist die Wahrscheinlichkeit, an Krebs zu erkranken, etwa 2 mal so hoch wie im 50. Lebensjahr, im 70. Lebensjahr ist sie etwa 4 mal so hoch. Strahlung aber erhöht die Krebsraten über das normale Maß. Die punktierten Linien zeigen die erhöhten Raten, die sich bei einer angenommenen Bestrahlung im Alter von 5 und von 35 Jahren nach den gegenwärtigen

Risikoschätzungen ergeben. Soweit man es aus den Beobachtungen an den Atombombenüberlebenden beurteilen kann, sind die Werten der zusätzlichen Leukämieerkrankungen wenig vom Alter bei Bestrahlung abhängig. Da im Kindesalter die spontanen Erkrankungen jedoch weit seltener sind als in höherem Alter, sind die *relativen* Erhöhungen bei einer bestimmten Bestrahlungsdosis für Kinder weit größer als für Erwachsene. Dies ist der Grund, warum in einer bestrahlten Bevölkerungsgruppe das vermehrte Auftreten kindlicher Leukämien am ehesten deutlich wird. Während im Durchschnitt der Bevölkerung von 10.000 Kindern etwa 6 bis zum Alter von 15 Jahren an Leukämie erkranken, könnte eine Strahlendosis von nur 0,1 Sv diese Zahl auf etwa 10 oder sogar 15 erhöhen.

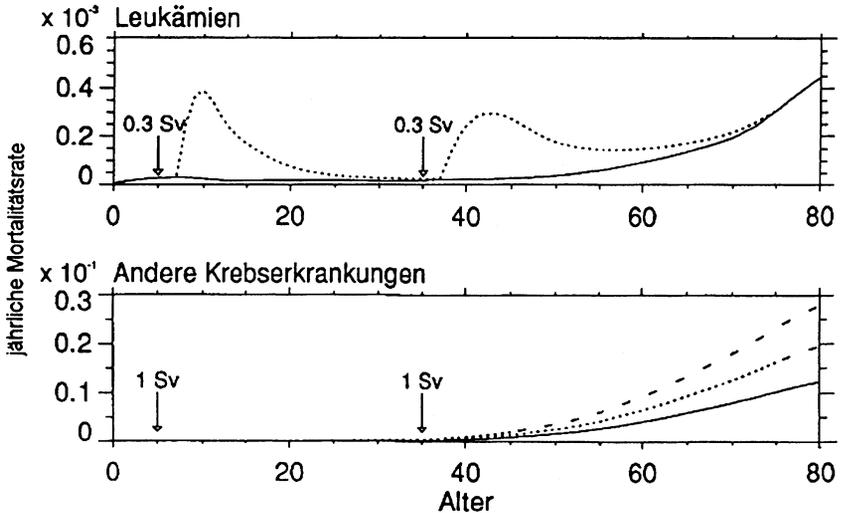


Abb. 1 : Altersspezifische Mortalitätsraten (durchgezogene Linien) für Leukämien (oberes Diagramm) und für die übrigen Krebserkrankungen (unteres Diagramm). Die punktierten Linien zeigen die erhöhten Raten, die sich bei einer angemessenen Bestrahlung im Alter von 5 bzw. 35 Jahren nach den Schätzungen der ICRP ergeben. Die gestrichelten Linien im unteren Diagramm kennzeichnen die Projektion in die Zukunft, d.h. die bisher noch nicht beobachteten Raten.

Leukämien können, wie in der Abbildung dargestellt, schon wenige Jahre nach Strahlenexposition auftreten, und nach einem Gipfel erhöhter Raten verringern sich die zusätzlichen Fälle wieder. Die anderen Krebserkrankungen dagegen weisen erst 5 bis 15 Jahre nach Bestrahlung deutliche Erhöhungen auf, dann aber scheinen die Erhöhungen anzudauern und sich sogar proportional zu den mit dem Alter zunehmenden Raten zu verstärken. Das untere Diagramm deutet diese Abhängigkeit an. Man spricht bei den Leukämien von einem *Modell des absoluten Risikos*, da man es mit einer zusätzlichen Rate zu tun hat, die in keiner deutlichen Beziehung zur Spontanrate steht. Bei den übrigen Tumorerkrankungen, d.h. bei der im unteren Teil der Abbildung dargestellten Abhängigkeit, spricht man vom *Modell des*

relativen Risiken. In seiner einfachsten Form postuliert dieses Modell, daß nach der Latenzzeit die zusätzliche strahleninduzierte Tumorrates proportional der altersspezifischen normalen Rate ist, wobei der Proportionalitätsfaktor von der Dosis abhängt.

Aus den besprochenen Abhängigkeiten für Leukämien und andere Krebserkrankungen folgt ein charakteristischer Unterschied. 20 oder 30 Jahre nach Strahlenexposition sind nach dem Modell des absoluten Risikos die meisten zusätzlichen Leukämiefälle bereits aufgetreten. Die Risikosumme vergrößert sich dann nicht mehr. Bei den anderen Krebserkrankungen ist es, nach dem Modell des relativen Risikos, ganz entgegengesetzt. Auch Jahrzehnte nach Strahlenexposition persistieren die proportionalen Erhöhungen der Tumorraten, und insbesondere für die im jungen Alter Bestrahlten könnten die zusätzlichen Krebserkrankungen erst sehr viel später, nämlich im Alter, wenn auch die spontanen Krebsraten stark zugenommen haben, auftreten.

Dieses zeitlich verzögerte Auftreten der Krebserkrankungen nach Strahlenexposition ist der Grund dafür, daß das gesamte zusätzliche Risiko erst Jahrzehnte später in einer exponierten Bevölkerungsgruppe deutlich wird. In den 30 Jahren von 1945 bis 1975 zeigten sich an den Atombombenüberlebenden Erhöhungen der Tumorraten, auf denen die damaligen Risikoschätzungen der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICRP) beruhten [12]. Als die Beobachtungen bis 1985 fortgeführt wurden, traten bei vielen der Atombombenüberlebenden, die nunmehr das höhere Alter mit höheren Krebsraten erreichten, verstärkt zusätzliche Fälle auf, die die Anzahl der beobachteten Zusatzfälle etwa verdoppelten. Die neuen Berechnungen der Risikofaktoren schlossen diese Fälle zusätzlich ein und darüber hinaus enthielten sie eine Projektion in die Zukunft, die der Annahme entsprach, daß die bisher beobachteten *relativen* Erhöhungen in allen Altersklassen bis ans Lebensende andauern. Dies, und nicht wie manchmal angenommen wird, die Revision der Dosimetrie, führte zu den deutlich erhöhten neuen Risikoschätzungen der ICRP [13]. Der Aspekt der Bestrahlung von Kindern und Jugendlichen ist dabei von besonderer Bedeutung, und sei deshalb näher erläutert.

Tab. 1 : Nominelle Risikokoeffizienten der Krebsmortalität von ICRP [13] für verschiedene Organe. Die Schätzungen enthalten einen Reduktionsfaktor von 2 für die Extrapolation zu geringen Dosen.

Gewebe oder Organ	Geschätzte Anzahl zusätzlicher Krebserkrankungen mit tödlichem Ausgang pro mSv und 1.000.000 Personen
Blase	3
Knochenmark	5
Knochenoberfläche	0,5
Brust	2
Colon	8,5
Leber	1,5
Lunge	8,5
Ösophagus	3
Ovarien	1
Haut	0,2
Magen	11
Schilddrüse	0,8
restliche Organe	5
Gesamt	50

Das Risiko der Bestrahlung für Kinder und Jugendliche.

Es wurde schon festgestellt, daß nach Bestrahlung von Kindern und Erwachsenen etwa die gleiche Anzahl von zusätzlichen Leukämiefällen entstehen, daß jedoch bei Kindern diese Erhöhungen weit auffälliger sind, da sie die im Kindes- und Jugendalter geringen Eintrittsraten auf ein Vielfaches erhöhen können. Bei Erwachsenen sind die Spontanraten viel höher und die zusätzlichen Fälle daher weniger deutlich. Mit anderen Worten das *relative Risiko* ist bei Kindern selbst bei kleinen Dosen hoch; die Verdopplungsdosis liegt bei nur etwa 0,1 Sv.

Bei den übrigen Tumorerkrankungen findet man nicht, wie bei den Leukämien, einen so deutlichen Gipfel zusätzlicher Fälle nach Bestrahlung, aber auch hier erkennt man aus der sorgfältigen statistischen Analyse der im Kindesalter bestrahlten Atombombenüberlebenden, daß die relativen Erhöhungen der Inzidenz größer sind als bei Bestrahlungen im höheren Alter.

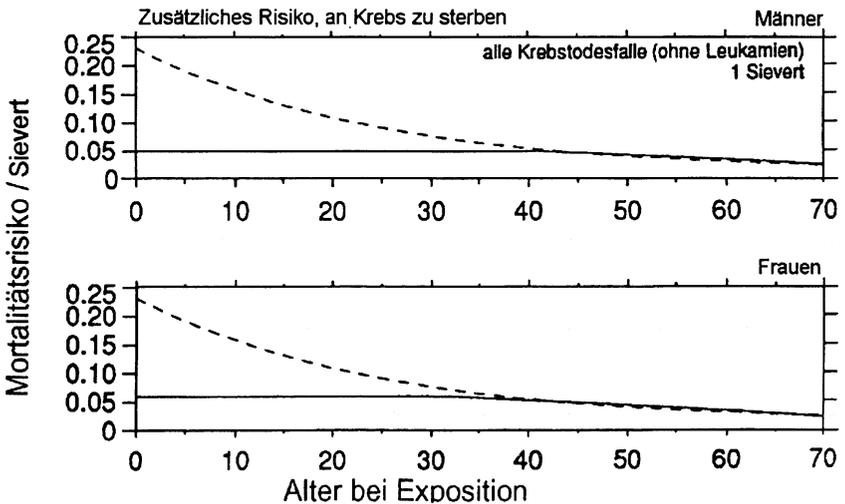


Abb. 2 : Risikoschätzung für die Krebsmortalität (ausgenommen Leukämien) über die gesamte Lebenszeit integriert. Bei den gestrichelten Linien wurde vorausgesetzt, daß das erhöhte Risiko vom Alter bei der Exposition abhängt, bei den durchgezogenen Linien wurde eine Abhängigkeit des Anstiegs lediglich vom erreichten Alter angenommen [14].

Allerdings haben diejenigen, die bei den Atombombenabwürfen 0 bis 10 Jahre alt waren, bis zum Jahre 1985 - dem Zeitpunkt der letzten Zusammenfassung der Daten - erst ein Alter von 40 bis 50 Jahre erreicht. In diesem Alter sind die Raten der Tumorerkrankungen noch so gering, daß nur unscharfe Aussagen möglich sind. Das untere Diagramm der Abb. 1

deutet diese Verhältnisse an. Man erkennt, daß die als Erwachsene bestrahlten Menschen bereits ihre ganze Lebenszeit oder den hauptsächlichsten Teil ihrer Lebenszeit durchlaufen haben und an ihnen die zusätzlichen Krebsfälle tatsächlich beobachtet wurden. Bei den im jugendlichen Alter Bestrahlten sind, von den Leukämien abgesehen, nur sehr wenige zusätzliche Tumorerkrankungen aufgetreten; die hohen von ICRP geschätzten Risikokoeffizienten beruhen daher allein auf der Annahme, daß die bisher beobachteten *relativen* Raten sich auch im hohen Alter unvermindert fortsetzen (gestrichelter Teil der Kurve). Unter dieser vorsichtigen Annahme ergeben sich die hohen über die gesamte Lebenszeit integrierten Risikoschätzungen, die in Abbildung 2 als gestrichelte Kurven wiedergegeben sind. Ein anderes Modell, in dem die relativen Erhöhungen nach Bestrahlung nur vom erreichten Alter und nicht vom Alter bei Bestrahlung abhängen, entspricht den bisherigen Beobachtungen an den Atombombenüberlebenden ebenso gut wie das Modell des relativen Risikos [14]. Ein solches Modell ergibt ein Gesamtrisiko über das ganze Leben, das nur wenig vom Alter bei Bestrahlung abhängt.

Erst die Zukunft kann zeigen, welches der beiden Projektionsmodelle korrekt ist, oder ob die Wahrheit zwischen den Modellen liegt. In jedem Fall jedoch ist es angebracht, von vorsichtigen Annahmen ausgehend sich im Strahlenschutz so zu verhalten, daß Expositionen von Kindern besonders sorgfältig vermieden werden.

Eine andere Problematik ist die der Dosisabhängigkeit. Für Leukämien deutet sich in den Daten von Hiroshima und Nagasaki eine überproportionale Abhängigkeit von der Dosis an, d.h. 1 Sv ist mehr als 10 mal wirksamer als 0,1 Sv; mit anderen Worten: 0,1 Sv scheint ein geringeres Risiko zu bedeuten, als man nach der linearen Extrapolation zu kleinen Dosen erwarten würde. Daß ICRP in den Risikoschätzungen, die primär auf den Beobachtungen bei hohen Dosen beruhen, für die Extrapolation zu kleinen Dosen nicht einfach Proportionalität sondern einen zusätzlichen Reduktionsfaktor von 2 angenommen hat, läßt sich daher - wenn auch nicht mit Sicherheit - aus den Daten begründen.

Bei den übrigen Tumorerkrankungen findet sich eine solche Begründung für den von ICRP angenommenen Reduktionsfaktor 2 nicht. Die Daten selbst zeigen (von sehr hohen Dosen abgesehen) keine Abweichung von der Linearität, die als statistisch signifikant angesehen werden kann. Der Reduktionsfaktor wurde von ICRP lediglich durch Hinweise auf Versuche an Tieren begründet. Ob solche Versuche wirklich auf die Risikoschätzung übertragbar sind, bleibt offen; man kann daher durchaus der Meinung sein, daß der Reduktionsfaktor nicht verwendet werden sollte. Andererseits ist zu bedenken, daß die Risikoschätzungen von ICRP ein konservatives Element durch die Verwendung des vorsichtigen Modells des relativen Risikos mit seiner Projektion der erhöhten relativen Raten in die Zukunft enthält. Insgesamt entsprechen die Risikoschätzungen von ICRP dem heutigen Wissen, spiegeln aber auch die Lücken dieses Wissens wider.

Beobachtungen bei niedrigen Dosen

Risikoschätzungen für niedrige Dosen bleiben unsicher, da sie im wesentlichen auf Beobachtungen nach hohen Dosen, und daher auf einer - meist linearen - Extrapolation zu niedrigen Dosen beruhen. Dies öffnet den Kritikern freien Raum. Es gibt diejenigen, die das Diktum des Paracelsus bemühen, nur die Dosis sei es, die das Gift mache, und die daraus schließen, es gäbe eine sichere Dosischwelle, unterhalb derer keine Krebserkrankungen

durch Strahlung hervorgerufen werden könnten. Es gibt andere, die aus Analogien zu gewissen, allerdings nicht auf Gesundheitseffekte bezogenen, strahlenbiologischen Experimenten von besonders hoher Wirkung kleiner Dosen sprechen. Beide Positionen sind spekulativ. Daß eine Schwellendosis für Strahlenkanzerogenese eher unwahrscheinlich ist, folgt aus der Tatsache, daß Strahlung - wie auch andere genotoxischen Faktoren - die DNA, d.h. die Erbsubstanz, einzelner Zellen mutiert, und daß solche Mutationen - wenn auch im Einzelfall mit geringer Wahrscheinlichkeit - Ausgangspunkt unkontrollierten Wachstums und damit einer Tumorerkrankung sein können. Andererseits gibt es keine verläßlichen Hinweise darauf, daß kleine Strahlendosen überproportional wirksamer sein sollten als höhere Dosen, bei denen man Erhöhungen der Krebsraten tatsächlich beobachtet hat.

Bedenkt man den Aufwand, der nötig war, um an den Atombombenüberlebenden die Erhöhungen der Leukämieraten und viel später die der anderen Krebshäufigkeiten zu bestimmen, so versteht man die Schwierigkeiten statistischer Beobachtungen an Bevölkerungsgruppen, die geringeren Strahlendosen ausgesetzt waren. Analog den Feststellungen bezüglich der Erbschäden könnten 1% bis 3% aller Krebserkrankungen auf die natürliche Strahlenexposition zurückgehen. Da die Höhe der natürlichen Strahlenexposition regional stark schwankt, müßte auch dieser Beitrag zu den Krebserkrankungen entsprechend variieren. Angesichts der Schwankungen der Krebshäufigkeiten und ihrer Abhängigkeit von zahlreichen anderen Faktoren ist es jedoch ganz unmöglich, solche Verschiebungen zu erfassen. Beispielsweise wurde in den USA eine Studie der Krebshäufigkeiten in der Umgebung von Denver durchgeführt, da diese Region wegen ihrer Höhenlage erhöhte kosmische Strahlung aufweist. Tatsächlich ergaben sich geringere altersspezifische Krebsraten als im Durchschnitt der USA, aber das Ergebnis ist in keiner Weise aussagekräftig, da die Lebensbedingungen um Denver sich in vielen Beziehungen von anderen Regionen in den USA unterscheiden. In einigen Gebieten der Erde gibt es noch stärker erhöhte Strahlenexposition, z.B. im indischen Staat Kerala oder in bestimmten Regionen von China. In keiner dieser Gegenden konnte bisher eine erhöhte Krebshäufigkeit im Vergleich zu ähnlich strukturierten Nachbarregionen nachgewiesen werden. Es wäre falsch, daraus zu schließen, daß die natürliche Strahlenexposition nicht zur Krebshäufigkeit beiträgt. Man kann lediglich folgern, daß die Risiken kleiner Dosen nicht weit höher sind, als es den ICRP-Schätzungen entspricht, da man sonst erhöhte Krebsraten in Gebieten höherer natürlicher Strahlenexposition erkennen müßte.

Der Hauptteil der natürlichen Strahlenexposition betrifft allerdings ein einziges Organ, die Lunge. Sie wird durch die Zerfallsprodukte von Radon exponiert. Radon ist ein radioaktives Edelgas, das beim Zerfall von Radium entsteht. Die Konzentration von Radon in Wohnhäusern hängt stark von der Geologie des Untergrundes ab, sie ist beispielsweise vielfach erhöht in gewissen Gegenden von Sachsen und Thüringen, aber zum Teil auch im Schwarzwald oder in Niederbayern. Daß Radon die Rate von Lungenkrebs erhöht, ist an verschiedenen Gruppen von Bergleuten, insbesondere von Uranbergleuten, erschreckend deutlich geworden. Die schlimmen Erfahrungen, die schon Agricola in seinen Büchern 'De re metallica' zu Beginn des 16. Jahrhunderts beschrieb, haben sich auf tragische Weise im Uranbergbau wiederholt. Hunderttausende von Bergleuten der Wismut AG waren Radonexpositionen ausgesetzt, die schon zu Zeiten der DDR zur Anerkennung von etwa 6.000 Lungenkrebsfällen als Berufserkrankungen führten. Eine große Anzahl zusätzlicher Fälle ist

noch zu erwarten, und die Bewältigung des unseligen Erbes der Wismut AG wird eine kostspielige und langwierige Aufgabe sein.

Da in Häusern hohe Radonkonzentrationen herrschen können, und man auf Grund gegenwärtiger Risikoschätzungen annimmt, daß bis zu 5% aller Lungenkrebskrankungen auf Radonexposition zurückgehen, sind wiederholt Versuche gemacht worden, in Fallkontrollstudien das Auftreten von Lungenkrebs mit den Radonkonzentrationen in den Wohnungen zu korrelieren. Bisher hatten solche Studien (mit der möglichen Ausnahme einer neuen schwedischen Studie) noch keinen Erfolg; der Einfluß des Rauchens, das mehr als 90% der Lungenkrebsfälle hervorruft, erschwert die Analyse.

Es gibt allerdings einige Studien an relativ niedrig exponierten Personengruppen, bei denen erhöhte Krebsraten tatsächlich nachgewiesen wurden.

An beruflich strahlenexponierten Personen in kerntechnischen Anlagen werden seit langem Untersuchungen durchgeführt. Wegen der strengen Einstellungskriterien und der besseren gesundheitlichen Überwachung sind die Erkrankungshäufigkeiten und auch die Krebshäufigkeiten bei den beruflich strahlenexponierten Personen geringer als im Durchschnitt der Bevölkerung. Eine Bestimmung strahleninduzierter Erhöhungen kann also nur durch einen internen Vergleich durchgeführt werden, der die niedrig exponierten Arbeiter den höher exponierten gegenüberstellt. Bisher gab es dazu keine eindeutigen Ergebnisse, in einer neuen Studie an englischen Arbeitern von Nuklearanlagen wurde jedoch eine statistisch signifikante Erhöhung der Leukämierate nachgewiesen [15]. Die Resultate sind mit relativ großer Unsicherheit behaftet, jedoch mit den Risikoschätzungen der ICRP vereinbar.

Besonders zu erwähnen ist die Studie von Modan und Mitarbeitern an Kindern, die bei der Einwanderung nach Israel zur Vermeidung einer parasitären Erkrankung der Kopfhaut (tinea capitis) Röntgenbestrahlungen unterzogen wurden. Die errechneten Dosiswerte für das Gehirn waren relativ hoch, für die Schilddrüse lagen sie jedoch nur zwischen 0,1 und 0,2 Sv. Jahre und Jahrzehnte später ergab sich eine deutliche Häufung von Schilddrüsenkarzinomen in dieser Gruppe bestrahlter Personen. Berücksichtigt man nur die Dosis auf die Schilddrüse, so sind die Risikoeffizienten, die sich aus diesen Beobachtungen ergeben, höher als diejenigen, die an den Atombombenüberlebenden gefunden wurden.

Eine weitere wichtige Studie bezieht sich auf vorgeburtliche Bestrahlung. Noch bis in die 50er Jahre war es weltweit üblich, während der Schwangerschaft Röntgenaufnahmen zur Vermessung des Beckens durchzuführen, um so mögliche Probleme bei der Geburt rechtzeitig zu erkennen. Die damalige Technik führte zu relativ hohen Dosen von 0,01 bis 0,02 Sv pro Röntgenuntersuchung, und nicht selten wurden die Untersuchungen wiederholt durchgeführt. In einer großen Untersuchung kam Alice Stewart [17] zu dem Ergebnis, daß Leukämien bei den Kindern mit vorgeburtlicher Röntgendiagnostik häufiger waren. Während unter 10.000 nicht exponierten Kindern bis zum 15. Lebensjahr etwa 6 Leukämien auftraten, waren es bei den exponierten 7 bis 8. Es wurde zwar häufig argumentiert, daß die pränatalen Röntgenuntersuchungen mit dem Sozialstatus der Eltern korrelieren könnten, und daß es sich bei der Beobachtung um den bekannten Effekt handle, daß in Bevölkerungsgruppen mit höherem Sozialstatus kindliche Leukämie etwas häufiger ist. Es gibt jedoch gute Gründe - die hier nicht erläutert werden - die beobachteten Erhöhungen der Leukämiehäufigkeit in der Studie von Stewart tatsächlich der Strahlenexposition zuzuordnen. Die sich auf diese Weise ergebenden Risikoschätzungen bestätigen die Annahme, daß bei Kindern

die Verdoppelungsdosis von Leukämie nur etwa 0,1 Sv beträgt, und daß sie in der Schwangerschaft möglicherweise noch geringer ist.

Zu den Gefahren radioaktiver Freisetzungen

Weltweite Besorgnis über die Freisetzung radioaktiver Stoffe entstand während der Jahre der oberirdischen Atomwaffenversuche. Bei diesen Versuchen wurden gewaltige Mengen von Radioaktivität in die Stratosphäre getragen und von dort aus über die nördliche Halbkugel der Erde verteilt. Durch die Bestrahlung von außen und durch die Aufnahme von verschiedenen Radionukliden mit der Nahrung, kam es zu erhöhter Strahlenexposition. Zwar blieb der zusätzliche Beitrag deutlich geringer als die Exposition durch kosmische Strahlung, terrestrische Strahlung und durch die Radioaktivität des menschlichen Körpers, insgesamt jedoch bewirkten die Atomwaffenversuche für die Bewohner der nördlichen Halbkugel, über das gesamte Leben summiert, eine zusätzliche Dosis von etwa 2 mSv [22]. Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch Kernkraftwerke im Normalbetrieb ist demgegenüber verschwindend gering.

Tab. 2 : Dosisbeiträge der wichtigsten Radionuklide aus den Atomwaffenversuchen [22]. (a: Jahr; d: Tag; - : vernachlässigbar)

Nuklid	Halbwertszeit	Inhalation (mSv)	Ingestion (mSv)	Externe Bestrahlung (mSv)	Summe (mSv)
H-3	12,3 a	0,00	0,05	-	0,05
C-14	5730 a	-	0,18	-	0,18
Sr-90	28,6 a	0,01	0,17	-	0,18
Zr-95	64 d	-	-	0,29	0,29
Ru-103	39,4 d	-	-	0,03	0,03
Ru-106	1 a	0,05	-	0,09	0,14
I-131	8 d	-	0,05	-	0,05
Cs-137	30,2 a	-	0,28	0,60	0,88
Ba-140	12,8 d	-	-	0,04	0,04
Ce-144	284 d	0,06	-	0,03	0,09
Pu-239	24 100 a	0,04	0,00	-	0,04
Pu-240	6 578 a	0,03	0,00	-	0,03
Pu-241	14,4 a	0,01	-	-	0,01
Alle Nuklide		0,22	0,78	1,10	2,10

Ernste Besorgnisse beziehen sich jedoch auf mögliche Unfälle von Kernreaktoren. Sie wurden dramatisch bestätigt durch die gewaltige Freisetzung von Radionukliden bei der Katastrophe von Tschernobyl. Durch die Hitze der 200 Tonnen brennenden Graphits im Unglücksreaktor wurden die Spaltprodukte in große Höhe getragen und über Tausende von Kilometer transportiert. In Süddeutschland kam es durch starke Gewitterregen beim Durchzug der radioaktiven Wolke zu Kontaminationen von etwa 30.000 Bq Cäsium-137 pro m²; dies war etwa 5 mal mehr als der gesamte Beitrag der oberirdischen Kernwaffenversuche. Andererseits bewirkten die Kernwaffenversuche eine weit höhere Kontamination durch das als Knochensucher besonders gefährliche Strontium. Insgesamt verursachte der Unfall von

Tschernobyl für die Bewohner der am stärksten kontaminierten Gebiete Südbayerns etwa dieselbe effektive Dosis wie die Kernwaffenversuche, d.h. eine Dosis, die etwa einem zusätzlichen Jahresbeitrag der natürlichen Strahlenexposition (mit Einschluß des Radons) entspricht.

Tab. 3 : Dosisbeiträge der nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl wichtigsten langlebigen Radionuklide.

Nuklid	Effektive Dosis bei Ingestion von 1 000 Bq (mSv)	Gesamtdosis in 50 Jahren über die Nahrung +	
		bei Deposition von 10 000 Bq / m ²	bei Deposition nach dem Unfall von Tschernobyl im Norden von München (mSv)
Cs-137	0,01	0,09 (pflanzlich) 0,22 (tierisch)	0,59
Cs-134	0,02	0,01 (pflanzlich) 0,03 (tierisch)	0,04
Sr-90	0,035 ++	0,54 (pflanzlich) 0,07 (tierisch)	0,01

+ Ohne Beitrag durch oberflächliche Kontamination

++ 0,39 mSv Knochenoberfläche

0,17 mSv Knochenmark

Bei den Kernwaffenversuchen spielten wegen des langsamen Transportes über die Stratosphäre die kurzlebigen Radioisotope nur eine geringe Rolle. Bei Reaktorunfällen dagegen stellt das kurzlebige Radiojod, das sich in der Schilddrüse ansammelt, eine besondere Gefahr dar. Ein einziges Gramm Jod-131 wurde nach dem Reaktorunfall über die Bundesrepublik verteilt; es genügte, um in Süddeutschland Salat und Gemüse und, über das Futtergras, auch die Milch, zu kontaminieren und unbrauchbar zu machen. Nach den ersten Wochen wurde das Cäsium zum kritischen Nuklid, sowohl hinsichtlich der externen als auch der internen Exposition. Gegenüber einem weitverbreiteten Vorurteil bestand dabei kein prinzipieller Unterschied zwischen Exposition von außen und Exposition von innen durch mit der Nahrung aufgenommenes Cäsium. In beiden Fällen werden fast gleichmäßig im Körper verteilt energiereiche Elektronen ausgelöst, die dieselbe physikalische und damit biologische Wirkung haben. Die Tabelle gibt die Dosen an, die durch verschiedene Radionuklide hervorgerufen werden.

Benützt man die Risikoschätzung der ICRP, so erhält man für 1 mSv ein Zusatzrisiko für Krebsmortalität von $0,5 \cdot 10^{-4}$, d.h. eine Erhöhung der bestehenden Krebssterblichkeit um 0,02%. Diese rechnerische Erhöhung des Krebsrisikos ist statistisch völlig unaufweisbar, man kann sie jedoch deshalb nicht als irrelevant abtun, denn in der Fülle der für Krebskrankungen verantwortlichen Faktoren ist jeder Zusatzbeitrag, und sei er noch so gering, nachteilig.

Deutlich höher ist der rechnerische Beitrag zum relativen Risiko für Leukämien bei Kindern. Wenn 0,1 Sv die kindliche Leukämierate verdoppelt, so entspräche 1 mSv immerhin einer Erhöhung um 1%. Auch diese Erhöhung bleibt statistisch unsichtbar, aber sie ist offensichtlich nachteilig. Andererseits darf das Bestreben, Strahlenexpositionen zu minimieren, keineswegs zur Vernachlässigung anderer Risiken führen.

Eine schlimmere Dimension radioaktiver Kontamination ergab sich in den unmittelbar vom Reaktorunfall betroffenen Gebieten der vormaligen Sowjetunion. So makaber es unter den schlimmen Umständen klingen mag, ist festzustellen, daß diese Regionen durch glückliche Wetterbedingungen, das heißt, durch geringe Niederschläge, vor weit Schlimmerem bewahrt wurden. Trotzdem war die Katastrophe gewaltig. Mehrere hunderttausend Menschen wurden evakuiert, die künftige Evakuierung zusätzlicher Bevölkerungsgruppen erscheint unvermeidbar. Über die Auswirkungen der Strahlung selbst hinaus kam es, z.B. durch die Einschränkung in der Erzeugung und Nutzung von Lebensmitteln und durch Abwanderung eines Teils der Bevölkerung mit allen Folgeerscheinungen, zu einem verhängnisvollen Wechselspiel indirekter Effekte und damit zum Zusammenbruch normaler Lebensbedingungen in großen Gebieten.

Als Evakuierungskriterium wurde ein Lebenszeitdosis von 0,3 Sv festgesetzt. Diese Dosis entspräche nach den Risikoschätzungen der ICRP einer Erhöhung der Krebsrate um etwa 10%, beispielsweise von 0,2 auf 0,22. Selbst wenn eine solche Erhöhung für Erwachsene noch als annehmbar angesehen würde, fiele eine entsprechende Bewertung für Kinder schwer. Die Gesamtanalyse der Situation, die hier nicht erläutert werden kann, führt zu dem Schluß, daß aus einer Vielfalt von Gründen die Evakuierungskriterien verschärft werden müssen. Geschieht dies bis heute in den betroffenen Gebieten nicht, so spiegelt sich darin lediglich der Zusammenbruch der politischen und wirtschaftlichen Situation wider.

Der Mangel an zuverlässigen Gesundheitsstatistiken erlaubt bisher keine verlässlichen Aussagen über die an sich zu erwartenden Erhöhungen kindlicher Leukämieraten in den am stärksten durch den Reaktorunfall betroffenen Gebieten. In den noch nicht evakuierten Gebieten mit einer Cäsiumkontamination von mehr als 0,5 MBq pro m² leben noch etwa 300.000 Menschen, davon sind etwa 100.000 Kinder. Unter diesen Kindern wären pro Jahr etwa 4 Leukämien zu erwarten. Nimmt man an, daß die Kinder im Durchschnitt eine zusätzliche Dosis von 0,05 Sv oder 0,1 Sv erhalten haben, so könnte sich die Zahl auf 6 oder auch auf 8 Fälle erhöhen. Bisher sind die Statistiken zu unsicher, um die tatsächlichen Zahlen zu erfassen.

Sehr deutlich jedoch erhöhte sich die Anzahl der kindlichen Schilddrüsenkarzinome, vor allem in Weißrußland [18, 19]. Dies entspricht der Tatsache, daß in den ersten Tagen des Unfalls wegen fehlender Warnungen und mangelnder Gegenmaßnahmen außerordentlich hohe Schilddrüsendosen durch Radiojod verursacht wurden. Bis zum März 1993 wurden allein in Weißrußland 174 kindliche Schilddrüsenkarzinome registriert. Selbst wenn man berücksichtigt, daß die Diagnose der Schilddrüsenkarzinome je nach Intensität der Untersuchungsprogramme und der diagnostischen Maßnahmen schwankt – beispielsweise ist sie in Schweden aufgrund dieser Unterschiede etwa 10 mal häufiger als in Dänemark – so ist die Häufung der kindlichen Schilddrüsenkarzinome in Weißrußland doch so ausgeprägt und auch geographisch so unterschiedlich, daß die Verursachung durch die Strahlung sicher erscheint. Aber selbst hinsichtlich der Schilddrüsenkarzinome sind die quantitativen Analysen und medizinischen Berichte noch sehr unvollständig.

Als der 2. Weltkrieg durch den kalten Krieg abgelöst wurde, wurde im Westen und Osten die Entwicklung von Nuklearwaffen vorangetrieben ohne Rücksicht auf die Folgen und auf die Belange des Strahlenschutzes. Im südlichen Ural bei Tscheljabinsk wurden in einer Aufbereitungsanlage für Plutonium Tausende von Arbeitern über Jahre hohen Strahlendosen

ausgesetzt, die bis zur chronischen Strahlenkrankheit führten. Gleichzeitig wurden gewaltige Mengen von Spaltprodukten in den Fluß Tetscha geleitet. Die Bevölkerung der Dörfer am Fluß erhielt von 1949 bis 1953 hohe Strahlendosen durch externe Bestrahlung und durch die Inkorporation von Strontium aus dem Trinkwasser. In einigen Dörfern betrug die Dosis pro Jahr bis zu einige Sievert. Trotz der Geheimhaltung und der Täuschung der Bevölkerung, wurden genaue Messungen und eine umfassende Analyse der Krebshäufigkeiten durchgeführt. Insbesondere fand man eine Verdoppelung der Leukämierate. Unter etwa 40.000 Personen traten in der Beobachtungszeit nahezu 40 Leukämien auf, von denen die Hälfte der Strahlenexposition zugerechnet werden muß. Die quantitative Analyse der Erhöhungen bei den als Kinder Exponierten steht noch aus. Wie schon in der Vergangenheit stellt sich auch hier die Aufgabe, aus tragischen Geschehnissen und aus dem Schicksal der Opfer mehr über die Risiken ionisierender Strahlung zu lernen.

Abschließende Bemerkungen

Die Kenntnis der Risiken ist von geringem Wert, wenn sie sich nicht umsetzen läßt in erhöhte Vorsorge und verbesserten Schutz. Die Strategien für solche Umsetzungen können hier nicht erörtert werden. Wesentliche Voraussetzung ist jedoch der sinnvolle Vergleich der Größenordnungen von Risiken durch Strahlung und durch andere Schadensfaktoren.

Tab. 4 : Relative Anteile verschiedener Krebsursachen (nach Henschler [2]);
 oberer Teil : auf Fallbeobachtungen beruhend;
 unterer Teil: Extrapolationen nach konservativen mathematischen Modellen.

35	%	Nahrung, Ernährung
30	%	Tabak
7	%	Fortpflanzung, Sexualverhalten
4	%	Beruf
3	%	Alkohol
2	%	Luft- und Wasserverunreinigung
1,5	%	Sonnenlicht (UV)
1	%	Medikamente
1,5	%	Natürliche Strahlenexposition (incl.Radon)
< 1	%	Nahrungszusätze, Haushaltchemikalien
0,5	%	Medizinische Strahlenexposition
~ 0,01	%	Kernwaffenversuche (weltweit)
~ 0,01	%	Tschernobyl, Südbayern
~ 0,002	%	Tschernobyl, Bundesrepublik
0,0001	%	Kernkraftwerke, Normalbetrieb

Summarisch gibt Henschler eine Schätzung der wichtigsten Krebsursachen [2]. Bezüglich der hauptsächlichsten Ursachen bezieht sich diese Zusammenstellung auf die umfassende Analyse von Doll und Peto [1]. Die im unteren Teil der Tabelle aufgeführten Beiträge sind zwar nicht epidemiologisch aufweisbar; es wäre jedoch eine grobe Verkennung der

Epidemiologie, wenn diese Risiken als nicht existent oder belanglos angesehen würden. Auch bedeutsame Einzelbeiträge können innerhalb der ausgeprägten Schwankungen der Krebsraten verborgen bleiben.

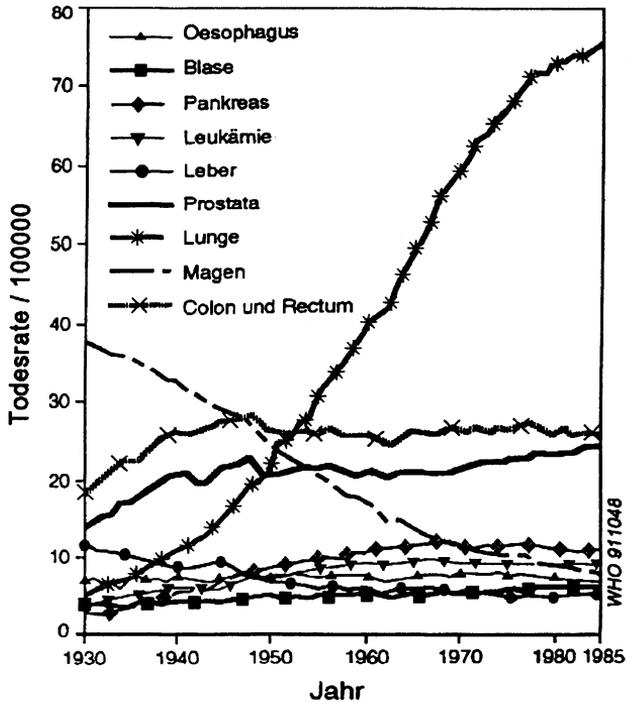


Abb. 3 : Altersstandardisierte Todesraten für Krebs der männlichen Bevölkerung in den USA in den Jahren 1930 bis 1985.

Abbildung 3 zeigt die Veränderungen der altersstandardisierten Krebsraten für Männer in den USA im Zeitraum 1930 bis 1985. Diese von der Welt-Gesundheits-Organisation (WHO) zusammengestellten Daten zeigen, wie unmöglich es wäre, Veränderungen von nur wenigen Prozent im Einzelfall nachzuweisen. Auch für Kinder und Jugendliche besteht diese Einschränkung. Abbildung 4 ist einer Veranschaulichung der Krebssterblichkeit in der Bundesrepublik entnommen, die Breckow und Mitarbeiter erarbeitet haben [20]. Dargestellt ist die kumulative Mortalitätsrate, d.h. die Wahrscheinlichkeit im Kindesalter (bis zum Alter von 15 Jahren) an Krebs zu sterben. Insgesamt besteht ein positiver Trend, offensichtlich jedoch können in den Schwankungen der jährlichen Statistik auch bedeutsame Verschiebungen verborgen bleiben.

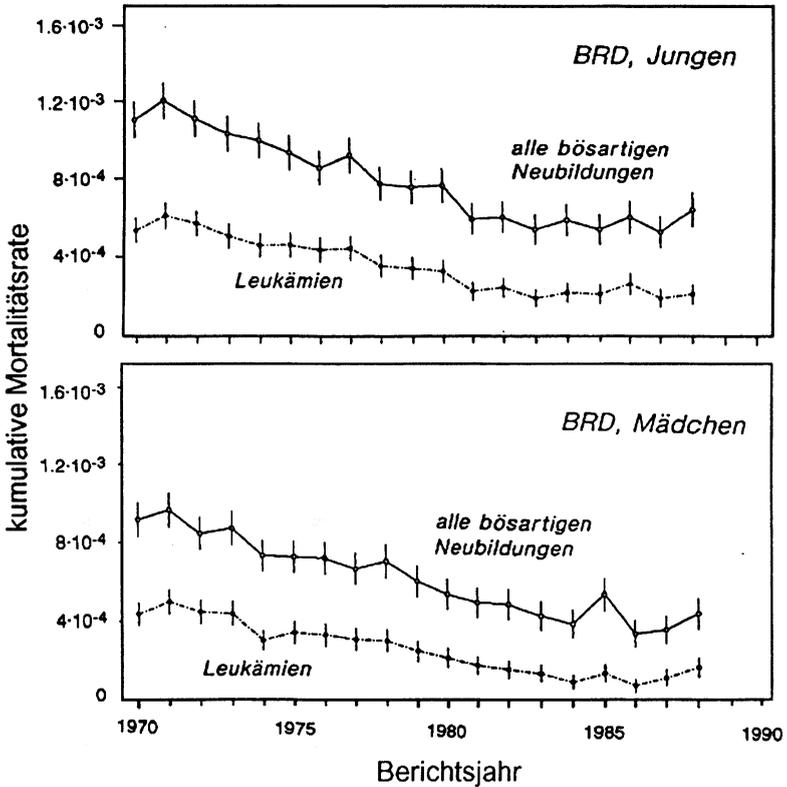


Abb. 4 : Zeitliche Entwicklung der kumulativen Krebssterblichkeit (bis zum Alter von 15 Jahren) in den alten Ländern der Bundesrepublik Deutschland [20].

Trotz aller Einschränkungen sind Gesundheitsstatistiken und ihre epidemiologische Auswertung ein wichtiges Instrument zur Erkennung und Begrenzung von Schadensfaktoren. Zur Nutzung dieses Instrumentes benötigt man verlässliche Krebsregister. Die Bundesrepublik besitzt ein ausgezeichnetes Kinderkrebsregister in Mainz, bezüglich der allgemeinen Krebsregister ist sie jedoch, abgesehen von Saarland und Hamburg, ein Notstandsgebiet. Das Krebsregister der DDR birgt wichtige Daten für die Vergangenheit, seit der deutschen Vereinigung aber hat es seine Funktionsfähigkeit verloren. Es ist dringend nötig, in der Bundesrepublik die gesetzliche Grundlage für umfassende Krebsregister zu schaffen; der Entwurf eines solchen Gesetzes liegt vor.

Literatur

- [1] Doll R., Peto R.: The causes of cancer: quantitative estimates of avoidable risk of cancer in the United States today. *J. Natl. Cancer Inst.* 66, 1192-1308 (1981).
- [2] Henschler D.: Krebsrisiken im Vergleich. In: 'Mensch und Umwelt', 8. Ausgabe, GSF, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, pp. 65-73, München 1993.
- [3] UNSCEAR: Sources and effects in ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the effects of ionizing radiation, United Nations Sales Publ. No. E.77.IX.1, New York, 1977.
- [4] UNSCEAR: Genetic and somatic effects of ionizing radiation, Annex B. dose response relationships for radiation induced cancer. United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation, United Nations Sales Publ. No. E.86. IX.9, New York, 1986.
- [5] Schull W.J., Otake M., Yoshimaru H.: Effect on intelligence test score of prenatal exposure to ionizing radiation in Hiroshima and Nagasaki: A Comparison of the T65DR and DS86 Dosimetry Systems. RERF TR 3-88, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, 1988.
- [6] Jagie von N., Schwarz G., Siebenrock von I.: Blutbefunde bei Röntgenologen. *Berl.Klin.Wschr.* 48, 1220-1222 (1911).
- [7] Gössner W., Gerber G.B., Hagen U., Luz A.: The Radiobiology of Radium and Thorotrast. Urban & Schwarzenberg, München, 1986.
- [8] Lewis E.B.: Leukemia and ionizing radiation. *Science* 125, 965-972 (1957).
- [9] Shimizu Y., Kato H., Schull W.J., Preston D.L., Fujita S., Pierce D.A.: Life Span Study Report 11. Part I. Comparison of risk coefficients for site-specific cancer mortality based on the DS86 and T65DR Shielded Kerma and Organ Dose. RERF TR 12-87, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima, 1987.
- [10] Preston D.L., Pierce D.A.: The effects of changes in dosimetry on cancer mortality risk estimates in atomic bomb survivors. *Radiat.Res.* 114, 437-466 (1988).
- [11a] BEIR IV-Report: Health risks of radon and other internally deposited alpha emitters. National Research Council, Committee on the effects of ionizing radiations, National Academy Press, Washington DC, 1988.
- [11b] BEIR V-Report: Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. National Research Council, Committee on the effects of ionizing radiations, National Academy Press, Washington DC, 1990.
- [12] ICRP Publication 26: Recommendations of the international commission on radiological protection. Pergamon Press, Oxford, 1977
- [13] ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the international commission on radiological protection. Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [14] Kellerer A.M., Barclay D.: Age dependences in the modelling of radiation carcinogenesis. In: Radiation Protection Dosimetry (D.M Taylor, G.B.Gerber, J.W. Stather, eds.) Vol. 41, pp. 273-281, Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent, 1992.
- [15] Kendall G.M., Muirhead C.R., Mac Gibbon B.H., O'Hagan J.A., Conquest A.J., Goodill A.A., Butland B.K., Fell T.P., Jackson D.A., Webb M.A., Haylock R. G., Thomas J.M., Silk T.J.: Mortality and occupational exposure to radiation: First analysis of the national registry for radiation workers. *BMJ* 304, 220-225 (1992).
- [16] Modan B., Baidatz D., Mart H. et al.: Radiation-induced head and neck tumours. *Lancet* 1, 277-279 (1974).
- [17] Stewart A., Webb J., Giles D., Hewitt D.: Malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in utero. *Lancet* 2, 447-448 (1956).
- [18] Kazakov V.S., Demidchik E.P., Astakhova L.N.: Thyroid cancer after Chernobyl. Letter to the Editor. *Nature* 359, 21 (1992).
- [19] Baverstock K., Egloff B., Pinchera A., Ruchti Ch., Williams D.: Thyroid cancer after Chernobyl. Letter to the Editor. *Nature* 359, 21-22 (1992).

- [20] Breck J., Geuer W., Kvasnicka E., Schnadt H.: Das Informationssystem über Krebsmortalität und Kreischarakteristika (IKK) des TÜV Rheinland. Technischer Überwachungs-Verein Rheinland E.V., Projektgruppe 'Empirisch-statistische Ermittlungen zum Strahlenkrebsrisiko', Im Auftrag des Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit RS I 2 (N) 510 322/119 (St.Sch.634), Köln, August, 1992.
- [21] Matthies M., Eisfeld K., Müller H., Paretzke H.G., Pröhl G., Wirth E.: Simulation des Transfers von Radionukliden in landwirtschaftlichen Nahrungsketten. GSF-Bericht S-882, München 1982.
- [22] UNSCEAR: Ionizing Radiation: Sources and biological effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionizing Radiation, United Nations Sales Publ. No. E.82.IX.8, New York, 1982.