



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

Vergleichbarkeit der natürlichen Strahlenexposition mit der Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 11. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Dezember 1976
Veröffentlicht in: – Bundesanzeiger Nr. 137 vom 27. Juli 1977
– Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 1

Einleitung

Im Rahmen der Auseinandersetzung um die friedliche Nutzung der Kernenergie wird behauptet, daß ein Vergleich der natürlichen Strahlenexposition mit derjenigen, die durch kerntechnische Anlagen verursacht wird, im Hinblick auf ihre biologischen Wirkungen nicht möglich sei [1]. Daher hat die Strahlenschutzkommission eine kritische Bestandsaufnahme des derzeitigen Wissensstandes über beide Strahlenexpositionen durchgeführt, um abzuklären, ob aus biophysikalischer und strahlenbiologischer Sicht Zweifel an der Zuverlässigkeit der Äquivalentdosis als allgemein verwendetem Vergleichsmaß zwischen der Strahlung aus unterschiedlichen Quellen gerechtfertigt sind.

In den Berichten des United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) [2] wurde der Bilanzierung der natürlichen Strahlenexposition und ihrer Variationsbreite großer Raum gegeben. In neuerer Zeit wurde eine umfassende Bestandsaufnahme der natürlichen Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland [3] und den Vereinigten Staaten [4] durchgeführt. Durch das Bundesministerium des Inneren wurde ein Meßprogramm zur Ermittlung der tatsächlichen Schwankungsbreite der terrestrischen Strahlung im Bundesgebiet veranlaßt [5].

Die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen wird aus den gemessenen Abgaberraten radioaktiver Stoffe und ihrer Verteilung in der Umgebung bestimmt. Hierzu fanden umfangreiche Untersuchungen in der Bundesrepublik Deutschland [6, 7] und in anderen Ländern statt [8, 9].

Der Vergleich der Primärereignisse bei der Strahlenwirkung

Alle ionisierenden Strahlen bewirken, unabhängig von der Art ihrer Herkunft, die gleiche Art von primären biophysikalischen Prozessen wie Ionisation und Anregung von Atomen und Molekülen. Von diesen können biologische Wirkungen ausgehen. Auch die Kernumwandlung von radioaktiven Stoffen und die damit u.U. verbundenen atomaren Ladungsänderungen (u.a. Auger-Effekt) oder Änderungen der chemischen Eigenschaften (s. Transmutation) können zu biologischen Wirkungen führen.

Zwischen den verschiedenen Strahlenarten und Expositionsbedingungen können bei gleicher Energiedosis Unterschiede in der relativen zeitlichen und räumlichen Verteilung der primären biophysikalischen Prozesse bei der Absorption der Strahlenenergie bestehen, die Einfluß auf die Wirksamkeit der Bestrahlung haben können. Wenn jedoch im gleichen Objekt bei gleicher Energiedosis die relative zeitliche und räumliche Verteilung der primären biophysikalischen Prozesse gleich ist, ist auch ihre biologische Wirksamkeit gleich.

Bei der Bestrahlung eines Körperorgans mit einer bestimmten mittleren Dosis kommen Unterschiede in der relativen zeitlichen und räumlichen Verteilung der Primärereignisse zustande

- a) durch unterschiedliche Strahlenarten oder -energien,
- b) durch unterschiedliche Verteilung radioaktiver Stoffe in einem Organ oder Gewebe.

Diese Unterschiede zwischen verschiedenen Strahlenexpositionen bei gleicher Energiedosis werden bei der Berechnung der Äquivalentdosis durch Bewertungsfaktoren berücksichtigt, die

für die im Strahlenschutz in Betracht kommenden niedrigen Dosen und Dosisleistungen international einheitlich mit der erforderlichen Genauigkeit festgelegt sind [10]. Die Einschätzung der derzeit von kerntechnischen Anlagen ausgehenden Strahlenexposition der Bevölkerung basiert auf der Überzeugung, daß die solchermaßen ermittelte Äquivalentdosis ein zuverlässiges Maß ist, das auch für den Vergleich der Strahlenexpositionen aus natürlichen Quellen und durch kerntechnische Anlagen eingesetzt werden kann.

Aus diesem Grunde wurde im einzelnen überprüft, ob bei den durch kerntechnische Anlagen tatsächlich möglichen Strahlenexpositionen relevante Besonderheiten der relativen räumlichen und zeitlichen Verteilung der Primäreignisse bekannt sind, die einen Vergleich mit der natürlichen Strahlenexposition auf der Basis der Äquivalentdosis ungerechtfertigt erscheinen lassen.

Bei beiden Expositionsarten unterscheidet man zwischen der Strahlenexposition von außen und derjenigen von innen. Die äußere Strahlenexposition wird durch energiereiche Teilchen und Photonen hervorgerufen, die von außen in den Organismus eindringen. Die innere Strahlenexposition kommt dadurch zustande, daß mit der Nahrung und der Atemluft radioaktive Stoffe in den Organismus aufgenommen werden, die sich entsprechend ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften in den Organen verteilen und bei ihren Kernumwandlungen Strahlen aussenden.

Die von den natürlich radioaktiven Stoffen und den in den Ableitungen kerntechnischer Anlagen vorkommenden radioaktiven Stoffen ausgesandten Strahlenarten sind prinzipiell gleich. Es handelt sich um γ -Strahlen, β -Strahlen, Röntgenstrahlen (nach K-Einfang) und - vorwiegend bei natürlich radioaktiven Stoffen - um α -Strahlen.

1. Strahlenexposition von außen

Ursachen der natürlichen Strahlenexposition des Menschen von außen sind die primären kosmischen Strahlen und die natürlich radioaktiven Stoffe in unserer Umwelt.

Aufgrund der Wechselwirkung hochenergetischer kosmischer Strahlen mit der Lufthülle der Erde entsteht ein ganzes Spektrum sekundärer ionisierender Strahlen. Wegen der unterschiedlich starken Absorption in der Lufthülle ist die wirksam werdende Äquivalentdosisleistung von der Höhe über dem Meeresspiegel abhängig. Im Bundesgebiet liegt sie auf Meereshöhe bei ca. 28 mrem pro Jahr, in 1000 m Höhe bei 40 mrem pro Jahr und in 3000 m Höhe bei 80 mrem pro Jahr. Die Energiedosisleistung auf Meeresniveau kommt zu 90 % durch leichte Elementarteilchen, wie z.B. Elektronen, zustande, die in ihrer Wirksamkeit den von terrestrischen γ -Strahlen ausgelösten Sekundärelektronen sehr ähnlich sind.

Der Erdboden, und somit auch alle Baumaterialien und alle belebte Materie, enthält natürliche Radionuklide, wie Uran und Thorium mit ihren Folgeprodukten, Kalium-40 u.a. Diese Radionuklide senden z.T. auch γ -Strahlen aus und tragen somit wesentlich zur Strahlenexposition des Menschen von außen bei. Umfangreiche Messungen in vielen tausend Wohnräumen und im Freien ergaben im Bundesgebiet deutliche Schwankungen dieser Strahlenexposition. In *Tabelle 1* sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte für die einzelnen Bundesländer zusammengestellt. Im gesamten Bundesgebiet liegt die terrestrische Strahlenexposition (Keimdrüsendosis) im Bereich von 4 mrem pro Jahr bis 291 mrem pro Jahr [5]. Die Energien der γ -Strahlen der natürlichen Strahlenexposition von außen reichen bis zu etwa 3 MeV.

Durch die radioaktiven Ableitungen von kerntechnischen Anlagen wird eine zusätzliche externe γ -Strahlung verursacht. Sie ist in erster Linie den radioaktiven Gasen der Abluft zuzuschreiben. Die Energien dieser γ -Strahlung liegen zwischen 80 keV und 2 MeV. Die unter Ansatz ungünstiger Bedingungen berechnete Dosisleistung auf der Basis bisher genehmigter Ableitungen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der unmittelbaren Umgebung von Kernkraftwerken ist kleiner als 3 mrem pro Jahr.

Darüber hinaus kommt es genauso aus natürlichen wie aus zivilisatorischen Quellen durch β -Strahlen zu einer gleichartigen Exposition der Körperoberfläche.

Die γ - und β -Strahlen aus natürlichen Quellen der Erde wie aus dem Kosmos sowie aus den Ableitungen von kerntechnischen Anlagen sind bezüglich ihrer Energien vergleichbar, und bei beiden ist die Dosisleistung außerordentlich klein. Infolgedessen sind auch zwangsläufig die durch diese externe Strahlenexposition ausgelösten Effekte pro Doseinheit praktisch gleich.

2. Strahlenexposition von innen

Die natürlichen und die künstlich erzeugten Radionuklide in der Umwelt gelangen mit der Nahrung und der Atemluft in den Menschen und bedingen eine Strahlenexposition des Körpers von innen. Die durch die aufgenommenen radioaktiven Stoffe zustande kommenden Äquivalentdosen sind von der Konzentration der Radionuklide in den jeweiligen Organen und der Art und Energie der emittierten Strahlung abhängig.

Die Aufnahme und Verteilung der verschiedenen Radionuklide im Körper hängen ab von dem chemischen Verhalten der Verbindungen, in die sie bei ihrer Aufnahme in den Körper eingebaut sind. Die Einflüsse der chemischen Bindung der wichtigsten natürlicherweise und in den Ableitungen von Kernkraftwerken vorkommenden radioaktiven Stoffe auf die Verteilung der Radionuklide in den verschiedenen Organen des Körpers sind aus den Ergebnissen der Forschung bekannt. Die dadurch bewirkten Strahlendosen sind mit hinreichender Genauigkeit bestimmt worden [11, 12].

Die Strahlenexposition des Menschen durch in den Körper aufgenommene natürlich radioaktive Stoffe kommt vorwiegend durch Radionuklide (wie Tritium, Kohlenstoff-14 und Kalium-40) zustande, die in keinem Organ oder Gewebe bevorzugt angereichert werden und die entweder nur β - oder β - und γ -Strahlen aussenden. Darüber hinaus wird noch eine zusätzliche Strahlenexposition durch die Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen verursacht, die in einzelnen Organen angereichert und überwiegend über ihre α -Strahlen wirksam werden.

Die in den Ableitungen kerntechnischer Anlagen auftretenden radioaktiven Stoffe führen bei ihrer Aufnahme in den Körper fast ausschließlich zu einer inneren Strahlenexposition mit β - und γ -Strahlen. In den Ableitungen deutscher Kernkraftwerke wurden vor allem Radioisotope des Antimon, Barium, Cäsium, Cer, Chrom, Eisen, Jod, Kobalt, Kohlenstoff, Lanthan, Mangan, Niob, Silber, Strontium, Wasserstoff und Zink gemessen. Von diesen Radionukliden, die alle β - oder β - und γ -Strahlen aussenden, wird besonders Jod in der Schilddrüse und Strontium im Knochen konzentriert.

Eine ungleichmäßige Verteilung der Radionuklide in mikroskopischen Bereichen innerhalb einzelner Organe bewirkt nur dann eine entsprechende Ungleichmäßigkeit der räumlichen Verteilung der Strahlendosis, wenn die Reichweite der ausgesandten Strahlen klein ist (also α -Strahlen und energiearme β -Strahlen).

Die ungleichmäßige Dosisverteilung innerhalb eines Organs kann u.U. eine größere Wirksamkeit haben als die gleichmäßige Verteilung der gleichen mittleren Strahlendosis, wenn selektiv bestimmte, für das Leben wesentliche Organstrukturen bzw. Zellen, wie z.B. die knochenbildenden Zellen, die Stammzellen des Blutes oder Fortpflanzungsorgane, betroffen sind. Eine relativ höhere Strahlenbelastung von Zellen oder Strukturen, die nicht für das Entstehen der relevanten Schäden verantwortlich sind, ist nicht von Bedeutung. Das Problem der inhomogenen Dosisverteilung tritt in folgenden Fällen auf:

a) α -Strahlen

Verschiedene natürliche und künstlich radioaktive Stoffe senden bei ihrer Umwandlung α -Strahlen aus. Einige natürlich radioaktive Stoffe führen durch ihre α -Strahlen zu einer inneren Strahlenexposition von Knochen, Leber und Bronchien, die z.T. mehr als doppelt so hoch ist wie die mittlere innere Strahlendosis für den gesamten Körper. Auch in den Ableitungen von kerntechnischen Anlagen wurden α -Strahlen aussendende radioaktive Stoffe in geringen Spuren nachgewiesen.

Die kurze Reichweite der α -Strahlen führt zu relativ hohen Strahlendosen in unmittelbarer Umgebung ihres Entstehungsorts. Die ungleiche Verteilung dieser Radionuklide bedingt daher erhebliche Dosischwankungen von einem Ort des Organs zum anderen oder von einzelnen Zellen zu anderen. Aus diesem Grunde ist für die Abschätzung des Strahlenrisikos der verschiedenen, α -Strahlen aussendenden Radionuklide die genaue Kenntnis ihrer räumlichen Verteilung innerhalb der verschiedenen Organe und Organsegmente auch im mikroskopischen Bereich von Bedeutung.

Dieses Problem ist bei der Abschätzung des Risikos durch α -Strahlen aussendende, sog. "heiße Teilchen" von Bedeutung, zu dem die Strahlenschutzkommission am 19. Februar 1976 eine Stellungnahme abgegeben hat [18]. Sie kam dabei zu folgendem Schluß: "Aus den vorliegenden tierexperimentellen Untersuchungen ergibt sich kein einziger Hinweis auf ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko bei Inhalation heißer Partikel im Vergleich zu einer homogenen Bestrahlung der Lunge. Diese Untersuchungen deuten im Gegenteil darauf hin, daß bei gleicher mittlerer Lungendosis das Strahlenrisiko bei einer stark inhomogenen Dosisverteilung in der Lunge kleiner ist als bei homogener Dosisverteilung."

In ihren Publikationen 11 und 19 [14] hat die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) die Mikroverteilung verschiedener α -strahlender Radionuklide, die in den Knochen eingelagert werden, und deren Einfluß auf die Strahlenbelastung der kritischen Zellen im Knochen und das daraus resultierende Strahlenrisiko diskutiert. Sie kommt zu dem Schluß, daß z.B. die relative Mikroverteilung der Dosis im Knochen durch aufgenommenes Radium-224 oder Thorium ähnlich der durch aufgenommenes Plutonium oder Americium ist. Es wurde kein systematischer Unterschied zwischen natürlich und künstlich radioaktiven, α -strahlenden Radioisotopen bezüglich der Mikroverteilung der von ihnen ausgehenden Strahlendosis festgestellt.

Es bestehen keine systematischen Unterschiede zwischen den möglicherweise aus kerntechnischen Anlagen entweichenden künstlich radioaktiven Stoffen und den überall vorkommenden, natürlich radioaktiven Stoffen hinsichtlich der Energie der ausgesandten α -Strahlen, ihrer Verteilung und ihrem Stoffwechsel im Organismus und auch nicht hinsichtlich ihrer Verteilung in mikroskopischen Bereichen der jeweils kritischen Organe.

b) Energiearme β -Strahlung des Tritium

Tritium aus natürlichen oder zivilisatorischen Quellen liegt meist als Bestandteil von Wassermolekülen vor. Daher wird Tritium in dieser Form in den weichen Organen des Körpers praktisch gleichmäßig verteilt. Nach Aufnahme von tritiumhaltigem Wasser finden jedoch einige Prozent des Radionuklids Eingang in die organische Substanz des Körpers und können so im Körper länger verweilen als Wasser. Dennoch bleibt die Verteilung nahezu gleichmäßig. Dies ist auch der Fall für Tritium, das z.B. mit der festen Nahrung aufgenommen wird. Entsprechend ist die Strahlenexposition von Organen und Zellen gleichmäßig; dies ist unabhängig davon, ob Tritium aus natürlichen oder zivilisatorischen Expositionen stammt.

Biologisch relevante Ungleichverteilungen des inkorporierten Tritiums und somit der Strahlendosis können praktisch nur dann auftreten, wenn Tritium nach einer Injektion spezieller chemischer Verbindungen (vor allem von Tritium-Thymidin in hoher spezifischer Aktivität) in das genetische Material des Körpers eingebaut wird. Dies ist im Rahmen des hier behandelten Themas ohne Bedeutung.

c) Transmutation

Unter Transmutation versteht man die Änderung der chemischen Natur eines Radionuklids bei der Umwandlung in ein anderes Element. Die mit der Transmutation verbundenen atomaren Ladungsänderungen und die bei der Aussendung ionisierender Strahlen verursachten Rückstöße der Atomkerne können biologische Effekte erzeugen. Biologisch wirksame Transmutationseffekte wurden für die sowohl natürlich vorkommenden als auch in kerntechnischen Anlagen erzeugten Radionuklide Tritium und Kohlenstoff-14 sowie für Phosphor-32 untersucht, soweit sie in das genetische Material eingebaut sind. Diese Effekte sind in der lebenden Zelle denen der dabei entstehenden ionisierenden Strahlung qualitativ ähnlich, jedoch quantitativ vernachlässigbar [15].

d) Auger -Effekt

Bei der Umwandlung bestimmter Radionuklide werden neben niederenergetischen Röntgenstrahlen auch mehrere Elektronen aus der Atomhülle ausgesandt (Auger-Effekt). Diese Elektronen haben eine kurze Reichweite und erzeugen dadurch eine hohe lokale Dosis in einem sehr kleinen Bereich. Durch den plötzlichen Verlust von mehreren Elektronen aus der Atomhülle entsteht zudem ein atomares Ladungsdefizit, das seinerseits je nach der molekularen Bindung des zerfallenden Nuklids zusätzlich biologische Wirkungen auslösen kann.

Der Auger-Effekt tritt sowohl bei einigen natürlichen als auch künstlichen Radionukliden auf (z.B. bei Kalium-40, Kobalt-58, Jod-125). Bisher gibt es keine Hinweise auf den bevorzugten Einbau solcher Radionuklide in bestimmte kritische Moleküle, Zellen oder Strukturen, insbesondere das genetische Material (DNS), deren Schädigung Krankheiten auslösen kann. Nach derzeitigem Wissensstand tritt eine biologische Wirkung des Auger-Effekts ausschließlich nach Einbau einer natürlicherweise praktisch nicht vorkommenden chemischen Verbindung (des Jod-125-Desoxyuridin) in das genetische Material der Zelle auf [16].

Der Auger-Effekt ist daher in diesem Zusammenhang nicht von Bedeutung.

Schlußfolgerung und Bewertung

Die biologische Wirkung der verschiedenen Strahlenarten aus natürlichen und künstlichen Strahlenquellen beruht auf den gleichen biophysikalischen Mechanismen. Eine äußere oder innere Bestrahlung aus künstlichen Quellen hat bei gleicher Äquivalentdosis, d.h. bei Berücksichtigung von Strahlenart und -energie, Dosisleistung und gegebenenfalls mikroskopischer Dosisverteilung neben der räumlich gemittelten Energiedosis praktisch die gleiche Wirkung wie die Bestrahlung aus natürlichen Quellen.

Eine eingehende Analyse ergab, daß bezüglich dieser Faktoren keine relevanten Unterschiede vorliegen zwischen der natürlichen Strahlenexposition von außen und der äußeren γ -Bestrahlung durch künstlich radioaktive Stoffe, die in den Ableitungen von Kernkraftwerken auftreten. Darüber hinaus bestehen bei Aufnahme der in Frage kommenden Radionuklide in den Körper keine diesbezüglichen Unterschiede zwischen künstlich radioaktiven Stoffen aus den Ableitungen kerntechnischer Anlagen und den vergleichbaren natürlich radioaktiven Stoffen.

Die Strahlenschutzkommission stellt fest, daß die Äquivalentdosis für den Strahlenschutz ein zuverlässiges, hinreichend genaues Vergleichsmaß für unterschiedliche Strahlenexpositionen ist. Die durch die natürliche Strahlenexposition des Menschen erzeugten Äquivalentdosen und ihre örtlichen und zeitlichen Schwankungen stellen ein geeignetes Bezugssystem für die Abschätzung und Bewertung der Strahlenexposition durch kerntechnische Anlagen dar.

Tabelle 1: Keimdrüsendosis durch terrestrische Strahlenexposition von außen in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland (mrem/Jahr)

Land	Werte im Freien			Werte in Wohnungen ^{*)}		
	Mittel	Maximal	Minimal	Mittel	Maximal	Minimal
Baden-Württemberg	45	165	11	57	134	11
Bayern	50	291	14	61	243	14
Berlin	42	133	22	50	129	17
Bremen	30	45	20	38	65	18
Hamburg	40	86	22	40	77	21
Hessen	43	108	7	65	144	24
Niedersachsen	34	80	7	47	122	12
Nordrhein-Westfalen	42	118	4	55	154	14
Rheinland-Pfalz	49	90	22	74	180	23
Saarland	57	114	22	87	158	28
Schleswig-Holstein	37	57	13	43	124	19
Gesamt	43	291	4	57	243	11

^{*)} Wohnungsmittelwerte aus allen Räumen einer Wohnung

Literaturhinweise

- [1] Fachgespräch: Die Vergleichbarkeit der natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexposition des Menschen.
FU Berlin. 2.7.1976
- [2] Ionizing Radiations; Levels. A Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
United Nations, New York 1972
- [3] Aurand, K. et al. (Hrsg.): Die natürliche Strahlenexposition des Menschen.
Thieme, Stuttgart 1974
- [4] Natural background radiation in the United States, Report of the National Council on Radiation Protection and Measurement
Nr. 45. 1975
- [5] Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung 1975. Bundesminister des Innern, Bonn, 1976
- [6] Aurand, K., Arndt, J., Gans, I., Rühle, H., Wolter, R.: Abgaben radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland.
Bundesgesundheitsamt, WaBoLu-Bericht 18-74
- [7] Winkelmann, I., Endrulat, J. H., Haubelt, R., Westpfahl, U.: Zusammenstellung von Daten über die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1975. Bundesgesundheitsamt, STH-Bericht 2-76
- [8] Commission of the European Communities: Radioactive effluents from nuclear power stations in the community 1969-1974 (1975)
- [9] AEC, Office of Operations Evaluation: Summary of radioactivity released from nuclear power plants during 1973. NTIS 1975
- [10] Radiation quantities and units, ICRU Report 19
International Commission on Radiation Units and Measurements. 7910, Woodmont Av., Washington D.C., 1971
- [11] International Commission on Radiation Protection (ICRP)
Publication 2: Permissible dose for interval radiation (1959)
Publication 23: Report of the Task Group on Reference Man (1975)
Pergamon Press, Oxford

- [12] Kaul, A., Oeff, K., Roedler, H.D., Vogelsang, T.:
Die Strahlenbelastung von Patienten bei der
nuklearmedizinischen Anwendung offener radioaktiver Stoffe.
Informationsdienst für Nuklearmedizin, Klinikum, Steglitz, Berlin 1973
- [13] Empfehlung der Strahlenschutzkommission: Zur Toxizität inhalierter heißer Partikel
insbesondere von Plutonium.
Der Bundesminister des Innern, RS II 2 - 517 027
- [14] International Commission on Radiation Protection (ICRP):
Publication 11: A Review of the Radiosensitivity of the Tissues in Bone,
1968
Publication 19: Metabolism of Compounds of Plutonium and other Actinides, 1972
Pergamon Press, Oxford
- [15] Biological Effects of Transmutation and Decay of Incorporated
Radionuclides. International Atomic Energy Agency, Wien 1968
- [16] Im Druck in: Current Topics in Radiation Research 1977