

Krebsrisiko bei Kindern durch Exposition gegenüber ionisierender Strahlung

Antonella Mazzei-Abba^a, Christophe L. Folly^a, Ben D. Spycher^a, Bern

Übersetzung: Astrid Coste^a, Manon Jaboyedoff^a, Christian Kreis^a

Einleitung

Der Einfluss ionisierender Strahlung auf die Gesundheit, insbesondere von Kindern, ist ein Thema welches in der breiten Öffentlichkeit wie auch in der Wissenschaft rege diskutiert wird. Der Fokus dieses Artikels liegt auf dem Zusammenhang zwischen alltäglichen Dosen ionisierender Strahlung und dem Krebsrisiko bei Kindern. Viel von unserem Wissen über schädliche Einflüsse ionisierender Strahlung stammt jedoch aus Studien über hohe Dosen, währenddessen es nur wenig direkte Evidenz aus epidemiologischen Studien über schädliche Folgen niedriger Dosen gibt. Wir beginnen diesen Artikel mit einem Überblick über Resultate der Studien zu hohen Dosen, bevor wir uns dann den tieferen, alltäglichen Dosen zuwenden.

In diesem Artikel erörtern wir folgende Fragen:

- 1) Was ist ionisierende Strahlung und wie wird sie gemessen?
- 2) Welche Krebsrisiken gehen mit einer Strahlenbelastung einher?
- 3) Inwiefern sind Kinder empfindlicher gegenüber einer solchen Belastung als Erwachsene?
- 4) Welches sind die wichtigsten Strahlungsquellen in der Schweiz?

Was ist ionisierende Strahlung, wie wird sie gemessen?

In der öffentlichen Wahrnehmung werden «Radioaktivität» oder «radioaktive Strahlung» und deren Auswirkungen auf die Gesundheit oft mit Katastrophen wie den Reaktorunfällen in Tschernobyl oder Fukushima oder mit der Bedrohung durch Atombomben in Verbindung gebracht. Genau genommen ist «Radioaktivität» eine Eigenschaft von gewissen Atomkernen, sogenannten Radionukliden oder radioaktiven Isotopen, und nicht die von diesen radioaktiven Atomen ausgehende Strahlung. Letztere wird, wie auch andere Strahlung, mit

genügend Energie um Atome oder Moleküle zu ionisieren, ionisierende Strahlung genannt. Der Kern radioaktiver Isotope ist instabil und zerfällt durch verschiedene Prozesse. Beispielsweise durch Emittieren eines Heliumkerns (α -Zerfall) oder eines Elektrons oder Positrons (β^- - und β^+ -Zerfall) in andere Elemente. Nach einem solchen Zerfall befindet sich der übriggebliebene Atomkern oftmals in einem angeregten Zustand, aus welchem er durch Aussenden eines energiereichen Photons in den Grundzustand springt. Dieser Prozess wird γ -Zerfall genannt.

Wir sind der natürlichen (kosmischen und terrestrischen) Hintergrundstrahlung permanent ausgesetzt. Kosmische Strahlen, Höhenstrahlung genannt, sind hoch-energetische Teilchen von ausserhalb unserer Galaxie oder von der Sonne, wobei letztere für die Strahlungsbelastung auf der Erdoberfläche von geringer Bedeutung sind. Bei der Interaktion dieser Partikel mit Molekülen der Atmosphäre entstehen Teilchenkaskaden, welche die Erdoberfläche erreichen. Die terrestrische Strahlung stammt von Kalium-40, Uranisotopen und Thorium-232, welche in der Erdkruste vorkommen. Aufgrund von Zerfallsprozessen dieser Radionuklide und deren Zerfallsprodukte treten permanent γ -Strahlen aus dem Boden und Gestein aus. Von speziellem Interesse ist Radon-222, ein Zerfallsprodukt von Uran, weil es im Gegensatz zu den anderen Zerfallsprodukten als Gas auftritt. Radon kann deshalb vom Boden in die Atmosphäre austreten oder aber sich in den Häusern akkumulieren. Die Radon-Konzentration in Häusern unterliegt grossen Schwankungen, abhängig von der Porosität und Permeabilität von Boden/Gestein, von der Bauart und dem Zustand der Gebäude sowie von den Lüftungsgewohnheiten.

Zwei gebräuchliche Masseinheiten für Strahlungsdosis sind Gray (Gy) und Sievert (Sv) (Tabelle 1). In Gray misst man die pro Masse

absorbierte Energie von ionisierender Strahlung (absorbierte Dosis). Der Effekt auf lebende Zellen einer absorbierten Dosis hängt vom Strahlungstyp ab, für α -Strahlung ist dieser um einen Faktor 20 höher als für γ -Strahlung. Äquivalente Dosis kombiniert Dosen verschiedener Strahlungen, wobei für jeden Strahlungstyp ein Gewichtungsfaktor angewendet wird, und beachtet damit die verschiedene biologische Wirksamkeit. In einer ähnlichen Vorgehensweise wird die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe berücksichtigt, um die effektive Dosis zu erhalten. Die Einheit von effektiver und äquivalenter Dosis ist Sievert. Dosis-Konversionskoeffizienten werden benutzt um basierend auf Messungen der Konzentration von Radionukliden, beispielsweise der oft in Bq/m^3 gemessenen Radonkonzentration, Schätzungen der Dosis zu erhalten.

2011 veröffentlichte die Internationale Kommission für Strahlenschutz (ICRP) einen Bericht, welcher Studien über Radon und das Lungenkrebsrisiko analysiert. Aufgrund der Ergebnisse dieser Studien kam die ICRP zum Schluss, dass der Konversionskoeffizient für Radon angepasst werden muss, was gegenüber früheren Radonschätzungen zu doppelt so hohen Dosissschätzungen führte¹⁾. Obwohl Lungenkrebs bei Kindern selten ist, könnte die höhere Strahlungsempfindlichkeit von Kindern bedeuten, dass eine Exposition gegenüber Radon in jungen Jahren das spätere Lungenkrebsrisiko stärker beeinflusst als dieselbe Exposition in höherem Alter.

Krebsrisiko durch mittlere bis hohe Strahlungsdosen

Das meiste was wir über gesundheitsschädliche Effekte von ionisierender Strahlung wissen stammt von relativ kleinen Studienpopulationen, welche Dosen weit über den normalen Werten ausgesetzt waren, insbesondere von den Überlebenden der Atombomben in Hiroshima und Nagasaki. Die Entstehung von Krebs gehört zu den sogenannten stochastischen Effekten von Strahlung. Damit ist gemeint, dass kein Grenzwert erkennbar ist, unterhalb welchem es keinen Effekt gibt, und dass die Wahrscheinlichkeit des Eintretens linear mit der erhaltenen Dosis zu steigen scheint. Demgegenüber treten deterministische Effekte erst oberhalb eines gewissen Grenzwerts auf, wobei das Risiko für das

^aInstitut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Bern

Wichtige Typen ionisierender Strahlung		
α-Strahlung He-Kerne $W_R = 20$ Eindringtiefe: $< 10^2 \mu\text{m}$	β-Strahlung Electrons/Positrons $W_R = 1$ Eindringtiefe: $\sim 10^1 \text{mm}$	γ-Strahlung Photonen mit sehr hoher Energie $W_R = 1$ Können den Körper durchdringen
Physikalische Einheiten im Strahlenschutz		
Aktivität	Die Anzahl Zerfälle pro Zeit. Gemessen in Becquerel: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$	
Absorbierte Dosis	Absorbierte Dosis ist definiert als absorbierte Energie pro Masse. Sie wird in Gray gemessen: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$	
Berechnete Einheiten		
Äquivalente Dosis	Absorbierte Dosis um einen Faktor W_R multipliziert, um die versch. Strahlungstypen nach biologischem Schadenspotential zu gewichten. Gemessen in Sievert: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$	
Effektive Dosis	Äquivalente Dosis multipliziert um Faktor W_T , um Empfindlichkeit der Organe zu beachten. (Wird auch in Sievert angegeben.)	

Tabelle 1: Die wichtigsten bei atomaren Zerfallsprozessen emittierten Strahlungstypen. Da geladene Teilchen durch ihre Ladung mit den Elektronen von Atomen und Molekülen wechselwirken, dringt Strahlung geladener Teilchen im Allgemeinen nicht tief in den Körper ein. Um die Exposition gegenüber ionisierender Strahlung zu messen, werden verschiedene Einheiten und Konzepte benutzt.

Eintreten eines Effekts scharf ansteigt, sobald der Grenzwert überschritten wird.

Überlebende der Atombomben – Life-Span Study (LSS)

Eine Langzeitstudie der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki liefert eindeutige Evidenz für eine Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen akuter Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und erhöhtem Risiko für verschiedene solide Tumore und hämatologische Malignome²⁾. Über einen Dosisbereich von 0,1 bis 2 Gy steigt das Risiko für solide Tumore linear an, während der Zusammenhang für Leukämie leicht aufwärts gekrümmt ist. Wie stark sich das Risiko erhöht, hängt auch vom Alter zum Zeitpunkt der Exposition und der seitdem verstrichenen Zeit ab.

Eine wichtige Erkenntnis aus der Life-Span Study ist, dass Kinder gegenüber ionisierender Strahlung anfälliger sind als Erwachsene. Am augenfälligsten ist dies bei Leukämie. Die LSS-Studie zeigt, dass das spätere Risiko für Leukämie bei einer Exposition während der Kindheit viel stärker mit der Zeit seit der Bestrahlung variiert. Einige Jahre nach einer Bestrahlung steigt dieses stark an und sinkt danach wieder. Aufgrund der geringen Anzahl an Fällen kann die Form dieser zeitlichen Kur-

ve nicht genau bestimmt werden. Allerdings zeigt sich, dass ungefähr 7 Jahre nach einer Bestrahlung während der Kindheit das Risiko vorübergehend um einen Faktor 50 pro Gy oder mehr zunehmen kann³⁾. Hinweise aus der LSS und anderen Studien deuten darauf, dass bei mindestens einem Viertel aller Tumore das Risiko durch Strahlenbelastung bei Kindern grösser ist als bei Erwachsenen. Zu diesen gehören Leukämie, Schilddrüse-, Haut-, Brust- und Hirntumore. Zudem variiert die Anfälligkeit bei Kindern möglicherweise sehr stark mit dem Alter⁴⁾.

Obwohl die Life-Span Study wichtige Evidenz lieferte über die Krebsrisiken in einem breiten Bereich von mittleren bis hohen Dosen, sagt sie wenig über das Risiko von Dosen unter 100 mSv aus. Für den Strahlenschutz wird deshalb oft vorausgesetzt, dass diese Risiken anhand der Dosis-Wirkung Modelle der Life-Span-Studie extrapoliert werden können, wobei man davon ausgeht, dass es keine untere Schwelle für gesundheitsschädigende Effekte gibt³⁾. Diese als «linear no-threshold model» (LNT) bezeichnete Annahme ist jedoch umstritten.

Radiotherapie

Krebsrisiken wurden auch bei im Rahmen

einer Bestrahlungstherapie für Krebs und verschiedenen historisch mit Bestrahlung behandelten Konditionen (z. B. Thymusdrüsenvergrößerung, Tinea capitis, Haut-Hämangiom) exponierten Kindern untersucht. Die meisten dieser Studien fanden erhöhte Fallzahlen für Leukämie einige Jahre nach der Exposition und bestätigten damit die in der Life-Span Study beobachtete kurze minimale Latenzzeit⁵⁾. Eine Metaanalyse dieser Studien fand konsistent erhöhte Risiken für Tumore des zentralen Nervensystems⁶⁾, jedoch variierte die Stärke dieses Zusammenhangs stark zwischen den einzelnen Studien.

Ergebnisse von Studien über therapeutische Expositionen sollten mit Vorsicht interpretiert werden. Im Falle einer Krebsbehandlung dürften die geschätzten Effekte der Bestrahlung von Begleitbehandlungen wie Chemotherapie beeinflusst sein. Zudem sind Kinder, welche eine Strahlentherapie durchmachen, vermutlich nicht repräsentativ für die gesamte Bevölkerung und haben möglicherweise genetisch bedingt eine höhere Anfälligkeit für Krebs.

Epidemiologische Studien mit Fokus auf niedrige Dosen

Nur sehr wenige Kinder sind solch hohen Dosen ausgesetzt wie in der Strahlentherapie. Häufiger sind jedoch niedrige Dosen durch Röntgenaufnahmen oder Computertomographien (CT-Scans) und durch die natürliche Hintergrundstrahlung (Tabelle 2). Das von diesen niedrigen Dosen ausgehende Krebsrisiko wird normalerweise durch Extrapolation von Modellen zu höheren Dosen berechnet, insbesondere aufgrund von Resultaten der japanischen Überlebenden der Atombomben. Der Grund dafür ist, dass die direkte epidemiologische Evidenz für eine Erhöhung des Krebsrisikos bei Exposition gegenüber niedrigen Dosen weniger klar und schwieriger zu erlangen ist. Das grösste Problem dabei ist die Grösse der benötigten Studienpopulationen, um die erwartete kleine Wirkung auf das Krebsrisiko mit genügender statistischer Aussagekraft nachweisen zu können. Die Exposition für so grosse Populationen zuverlässig zu messen, ist kaum machbar.

Diagnostische Radiographie

In den letzten Jahren haben mehrere Kohorten-Studien das Krebsrisiko bei Kindern in Zusammenhang mit CT-Scans untersucht. Die zwei bisher grössten, eine britische Studie mit 180 000 und eine australische Studie mit 680 000 Kindern, welche einen CT-Scan er-

hielten, zeigten überraschend einheitliche Resultate^{7,8}). Für Hirntumore wurde die Risikoerhöhung auf 2,3% (95% CI: 1,0-4,9%) pro mGy in Grossbritannien respektive 2,1% (1,4-2,9%) pro mGy in Australien geschätzt. Entsprechende Schätzungen für Leukämie waren 3.6% (0.5-12%) und 3.9% (1.4-7.0%). Dies würde nahelegen, dass kumulierte Dosen im roten Knochenmark von etwa 50 mGy (ungefähr 5-10 CT-Scans vom Kopf in der britischen Studie) und kumulierte Dosen im Hirn von etwa 60 mGy (2-3 CT-Scans vom Kopf) das Risiko für Leukämie respektive Hirntumore verdreifachen könnten. Beide Studien weisen zudem auf einen klaren Anstieg des durch die Bestrahlung induzierten Krebsrisikos bei jüngerem Alter zum Expositionszeitpunkt. Zwei kleinere Studien in Frankreich und Deutschland deuten ebenfalls auf ein erhöhtes Risiko durch pädiatrische CT-Scans, jedoch sind die Konfidenzintervalle breit und vereinbar mit einem Nulleffekt.

Resultate von Studien zu pädiatrischen CT-Scans müssen mit Vorsicht interpretiert werden. Hauptsorge ist, dass CT-Scans möglicherweise wegen eines Verdachts auf Krebs durchgeführt werden könnten («Reverse causation») oder aber zur Diagnose oder Überwachung einer Erkrankung, die selber krebsbegünstigend ist («Confounding by indication»)⁹). In der erwähnten französischen Studie waren unter Berücksichtigung solcher prädisponierender Faktoren die für das Risiko geschätzten Werte kleiner. Ein weiteres Problem dieser Studien ist die Unsicherheit bei der Rekonstruktion der erhaltenen Dosen. In Anbetracht dieser Schwierigkeiten wurde die EPI-CT-Studie gestartet, ein grosses internationales Projekt, um die Risiken von pädiatrischen Patienten mit CT-Behandlung zu untersuchen,

und erste Resultate werden bald erwartet. Die Studie versucht organspezifische Dosen aus CT-Scans durch verbesserte Methoden zur Dosisabschätzung zu rekonstruieren und plant, Daten von über 1 000 000 Patienten in verschiedenen europäischen Ländern zu erfassen (<http://epi-ct.iarc.fr>).

Natürliche Hintergrundstrahlung

Im letzten Jahrzehnt haben mehrere, landesweite Studien in Europa, unter anderem in der Schweiz, den Zusammenhang zwischen natürlicher Hintergrundstrahlung und Krebs bei Kindern untersucht. Um genügend grosse Studienpopulationen zu erhalten, basieren diese Studien auf nationalen (Kinder-)Krebsregistern sowie repräsentativen Kontrollgruppen aus nationalen Routinedatensätzen. In Grossbritannien beispielsweise wurde die Kontrollgruppe auf Basis von Geburtenregistern zusammengestellt, während in der Schweizer Studie eine zensusbasierte Kohorte verwendet wurde (*Swiss National Cohort*). Diese sogenannten register-basierten Studien schätzen die Exposition gegenüber natürlicher Hintergrundstrahlung (wie Radon oder terrestrische γ -Strahlung) am Wohnort der Kinder aufgrund von geografischen Expositionsmodellen, welche auf Basis verschiedener Messungen im ganzen Land berechnet werden. Dadurch müssen weder für jeden Studienteilnehmer einzelne Messungen noch über Fragebögen zusätzliche Informationen eingeholt werden, was beides zu einer tiefen Studienbeteiligung und damit möglicher Verzerrungen führen kann.

Die erste dieser Studien wurde in Dänemark durchgeführt und fand ein erhöhtes Risiko für Leukämie bei Personen, welche hohen Radonkonzentrationen ausgesetzt sind¹⁰). Eine gros-

se Studie in Grossbritannien fand später ein um 12% (95% CI: 3-22%) erhöhtes Risiko für Leukämie pro mSv kumulierte spezifische Dosis im Knochenmark durch terrestrischer γ -Strahlung, jedoch keine Hinweise für einen Zusammenhang mit anderen Krebsarten oder für Radon in Wohngebäuden¹¹). In einer Studie basierend auf Daten des Schweizer Kinderkrebsregisters und des Swiss National Cohort haben wir vergleichbare Resultate gefunden. Für Radon stellten wir keine Hinweise auf einen Zusammenhang mit Kinderkrebs fest¹²), jedoch fanden wir Hinweise auf einen Zusammenhang der Strahlungs-dosis aus terrestrischer γ - und kosmischer Strahlung mit Leukämie und Tumoren des zentralen Nervensystems¹³). Für beide dieser Diagnosegruppen wurde eine Risikosteigerung von 4% (95% CI: 0-8%) pro mSv kumulierter effektiver Ganzkörperdosis geschätzt. Trotz grosser Unsicherheiten zeigen die Risikoeinschätzungen aus Grossbritannien und der Schweiz für Leukämie und γ -Strahlung weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Studien von Überlebenden der Atombombenabwürfe. Im Gegensatz dazu steht eine kürzlich veröffentlichte grosse Studie aus Frankreich, welche weder für Radon noch für natürliche Hintergrundstrahlung einen Zusammenhang mit Leukämie bei Kindern beobachten konnte¹⁴). Zuletzt zeigte eine Studie in Finnland Anhaltspunkte für einen Zusammenhang zwischen Leukämie bei Kindern und terrestrischer γ -Strahlung, jedoch nur bei Kindern von 2-6 Jahren, das Alter in dem die Leukämieinzidenz ihr Maximum erreicht¹⁵).

Wie die Studien zu CT-Scans haben solche Studien ihre Einschränkungen. Am wichtigsten sind die vielfältigen Fehlerquellen und Unsicherheiten beim Schätzen der erhaltenen Dosis auf Basis der Wohnadresse der Kinder, wie beispielsweise des selten komplett verfügbaren Adressverlaufs oder Ungenauigkeiten bei der Schätzung der Strahlenbelastung am Wohnort der Kinder. Ebenfalls bestehen Unsicherheiten bezüglich des Zusammenhangs zwischen Alter und Empfindlichkeit gegenüber Strahlen (die im Laufe der Zeit erhaltenen Dosen müssten je nach Alter des Kindes verschieden gewichtet werden) sowie der Latenzzeit.

Kontamination mit radioaktiven Stoffen

Bei Nuklearwaffentests während den späten 1950er und frühen 1960er Jahren wurden beachtliche Mengen radioaktiven Materials

Quelle	Typische Dosen	In Jahren natürlicher Hintergrundstrahlung
Radiotherapie	10 - 100 Gy	>2300 Jahre
Überlebende Atombomben	<0,1 - 1 Sv	<20 - 235 Jahre
CT Abdomen	5 - 13 mSv	1.3 - 3 Jahre
Natürliche Hintergrundstrahlung CH	~4,3 mSv/y	1 Jahr
CT Kopf	~ 2 mSv	~ 6 Monate
X-ray Brustkorb	0,1 mSv	1 Woche
Überseeflug	0,06 mSv	5 Tage
X-ray Extremitäten	0,001 mSv	2 Stunden

Tabelle 2: Typische Strahlenbelastung einiger medizinischer Verfahren, eines Überseefluges und der Atombombenüberlebenden in Japan im Vergleich zu der in der Schweiz während einem Jahr durch natürliche Hintergrundstrahlung und Radon erhaltenen Dosis. Quellen: UNSCEAR, 2008⁵) und Wakeford, 2013⁵)

freigesetzt, welches sich über die Atmosphäre verstreut und auf der Erdoberfläche abgelagert hat¹⁶). Die resultierenden durchschnittlichen Strahlungsdosen der Bevölkerung erreichten in den frühen 1960er Jahren den Zenit und waren höher in der Nordhemisphäre, wo die meisten Tests stattfanden. Eine Trendanalyse der Anzahl von Fällen von Leukämie bei Kindern auf der Basis von grösseren Krebsregistern aus verschiedenen Ländern ergab über diesen Zeitraum keinen namhaften Anstieg, obwohl eine Studie über eine Häufung in den Skandinavischen Ländern berichtete¹⁷). Ein erhöhtes Risiko für Schilddrüsenkrebs oder Leukämie (in jedem Alter) ergab sich für die Bevölkerungen, welche in der näheren Umgebung der Testgelände höheren Dosen ausgesetzt waren (Nevada, Marschall Inseln)⁵).

Als Folge des Reaktorunfalls von Tschernobyl im Jahre 1986 wurden sehr grosse Mengen radioaktives Material in die Atmosphäre freigesetzt. Dies führte über weite Gebiete zu einer erhöhten Strahlenbelastung der Bevölkerung, primär durch das kurzlebige radioaktive Isotop Iod-131, welches sich bei Einnahme über die Nahrung oder die Atmung in der Schilddrüse akkumuliert, aber auch mit stabileren Isotopen wie Caesium-137, welches über weite Distanzen transportiert und durch Niederschläge im Boden abgelagert wurde. In den stark strahlenbelasteten Gebieten (in der heutigen Ukraine, Weissrussland und Russland) wurde ein erhöhtes Risiko für Leukämie festgestellt bei Personen, welche im Alter von unter 6 Jahren oder noch im Mutterleib exponiert waren⁵). Obwohl die Schätzungen des Risikos im Wesentlichen mit den anhand der Überlebenden der Atombomben entwickelten Risikomodellen übereinstimmen, gibt es Vorbehalte bezüglich der Verlässlichkeit der in dieser Studie verwendeten Daten. Kein erhöhtes Risiko für Leukämie bei Kindern wurde für Gebiete ausserhalb der ehemaligen Sowjetunion festgestellt. Unter den nicht-evakuierten Einwohnern der kontaminierten Gebiete in der Ukraine, Weissrussland und Russland, welche zum Zeitpunkt des Unfalls weniger als 18 Jahren alt waren, werden ungefähr ein Viertel der im Zeitraum 2001-2008 beobachteten Fälle von Schilddrüsenkrebs auf die Strahlenbelastung zurückgeführt¹⁸).

Im Jahre 2011 verursachte das Erdbeben und der folgende Tsunami in Ost-Japan Schäden am Kernkraftwerk von Fukushima-Daiichi, worauf beträchtliche Mengen radioaktiven

Materials freigesetzt wurden. Verglichen mit Tschernobyl waren die von der Bevölkerung erhaltenen Strahlendosen viel kleiner. Ein Programm zur Überwachung der Gesundheit der lokalen Bevölkerung wurde initiiert. Dieses umfasst eine Befragung zur Gesundheit und die Untersuchung sämtlicher Einwohner der Evakuierungszonen sowie wiederholte Ultraschall-Untersuchungen der Schilddrüsen aller Kinder, welche zum Zeitpunkt des Unglücks 18 Jahre alt oder jünger waren und soll mindestens für die nächsten 30 Jahre fortgeführt werden. Zwei Untersuchungsrunden sind abgeschlossen und die Ergebnisse führten keinen Zusammenhang zwischen der Prävalenz von Schilddrüsenkrebskrankungen und dem Expositionslevel zu Tage. Die Prävalenz war im Allgemeinen höher als erwartet, aber dies wurde dem «Screening effect» der Untersuchungen zugeschrieben¹⁹). Die Kohorte ist jedoch noch zu jung für Schlussfolgerungen, da die Gesundheitsfolgen auch noch in Zukunft auftreten können.

Kernkraftwerke

Beachtliche Aufmerksamkeit kommt der Frage nach dem Risiko von Leukämie bei Kindern im Umfeld von Atomkraftwerken und anderen nuklearen Einrichtungen zu²⁰). Entfacht worden war dieses Interesse hauptsächlich durch Berichte über Leukämie-Häufungen in der Umgebung solcher Anlagen, in erster Linie dem Leukämie Cluster in Seascale in der Nähe der nuklearen Wiederaufbereitungsanlage in

Sellafield in Nordengland. Eingehende Untersuchungen vermochten diese Cluster jedoch nicht der radioaktiven Belastung durch diese Anlagen zuzuschreiben. Im normalen Betrieb machen die von der Bevölkerung in der Umgebung von AKWs aufgrund des Austritts von Radionukliden zusätzlich absorbierten Dosen nur einen Bruchteil der Belastung durch die natürliche Hintergrundstrahlung aus. Einige Studien, welche die Inzidenz von Kinderkrebs in der Umgebung von AKWs untersuchten, fanden ein erhöhtes Risiko, allen voran die deutsche KIKK-Studie, welche für unter 5-jährige Kinder ein doppelt so hohes Risiko im Umkreis von 5 km um AKWs herum fand. Für diese Ergebnisse gibt es jedoch noch keine Erklärung²¹). In einer Studie in der Schweiz (CANUPIS-Studie) fanden wir wenig Hinweise für ein erhöhtes Risiko in der Nähe von AKWs²²).

Exposition gegenüber ionisierender Strahlung – Situation in der Schweiz

Die Anteile der verschiedenen Strahlungsquellen zur Exposition der Wohnbevölkerung in der Schweiz sind in *Abbildung 1* dargestellt.

Radon: Die höchste Dosis von ungefähr 3,2 mSv/y erhält die Schweizer Bevölkerung durch Radon in Wohnräumen²³). Die durchschnittlichen Radonkonzentrationen variieren stark zwischen den verschiedenen Regionen (*Abbildung 2.B*). Noch entscheidender für die Radonkonzentration in Wohnräumen sind die

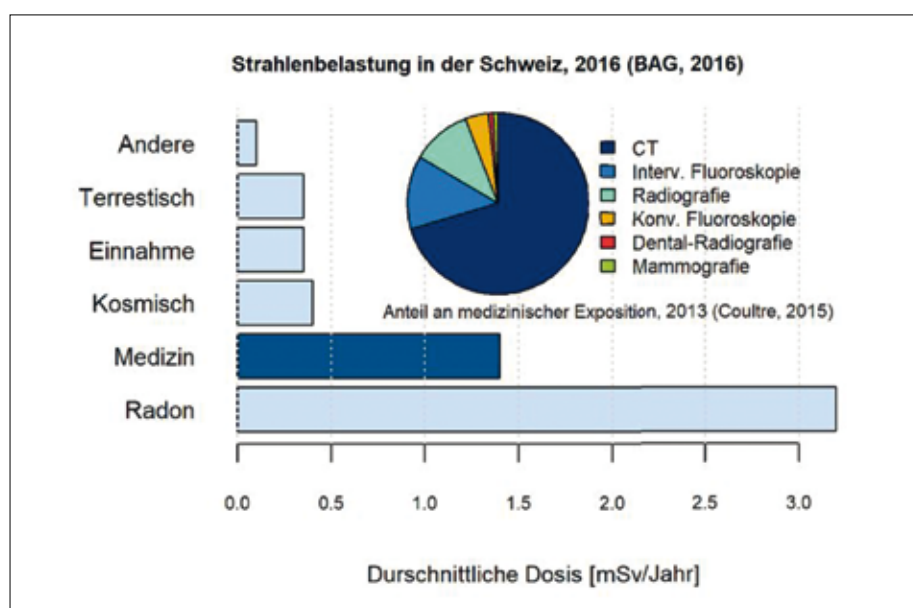


Abbildung 1: Die Strahlungsbelastung in der Schweiz auf Basis von Zahlen des aktuellen Berichts vom Bundesamt für Gesundheit, Sektion Umweltradioaktivität. Die Anteile verschiedener medizinischer Expositionen basieren auf Zahlen aus Coultre, 2015²⁴).

Eigenschaften der Gebäude sowie Gewohnheiten beim Heizen, bei der Klimatisierung und beim Lüften. Da Radon ein α -Strahler ist, welcher nicht tief ins Gewebe eindringt, wird der grösste Anteil der Dosis durch die Lunge und Haut absorbiert. Radon ist nach dem Rauchen die zweitwichtigste Ursache für Lungenkrebs.

Terrestrische und kosmische Strahlung: Aufgrund der komplexen Geologie und Topologie der Schweiz variieren die Dosisleistungen von terrestrischer und kosmischer Strahlung sehr stark. Aufgrund der dünner werdenden schützenden Atmosphäre steigt die Dosisleistung von kosmischer Strahlung auf der Erdoberfläche mit zunehmender Höhe an und erreicht bei Flugreisen ein beachtliches Niveau. Die terrestrische Strahlung hängt vornehmlich von der Konzentration radioaktiver Isotope in der obersten Bodenschicht ab. Durchschnittlich erhaltene Dosen der Schweizer Bevölkerung sind 0,4 mSv/y an kosmischer Strahlung und 0,35 mSv/y an terrestrischer Strahlung²³⁾. γ -Strahlung von Radionukliden im Boden als Folge von Atomwaffentests und dem Reaktorunglück von Tschernobyl spielen dabei eine vernachlässigbare Rolle.

Nahrungsaufnahme: Die Einnahme von radioaktiven Isotopen über die Nahrung trägt ungefähr 0,35 mSv/y zur erhaltenen Dosis bei. Mit 0,2 mSv/y stammt dabei der höchste Anteil von Kalium-40. Menschgemachte Iso-

tope sind nur von untergeordneter Bedeutung. Die häufigsten, Strontium-90 und Cäsium-137, sind für weniger als 0,01 mSv/y verantwortlich²³⁾.

Medizinische Diagnostik: Zusammen mit Radon und natürlicher Hintergrundstrahlung ist die medizinische Diagnostik eine der Hauptquellen für die Strahlenbelastung in der Schweiz. Zwischen 2008 und 2013 stieg die Exposition gegenüber ionisierender Strahlung aufgrund von medizinischer Diagnostik um geschätzte 17% an²⁴⁾. Im Jahr 2013 lag die durchschnittlich pro Person in der Schweiz erhaltene Dosis bei 1,4 mSv/y²³⁾. Dieser Durchschnittswert ist jedoch etwas irreführend, da mehr als zwei Drittel der Bevölkerung nur einer marginalen Belastung ausgesetzt sind, währenddessen ein kleiner Prozentsatz der Bevölkerung ein Vielfaches der Durchschnittsdosis erhält. Den grössten Anteil an der Strahlenbelastung im medizinischen Umfeld machen mit ungefähr 70% die CT-Scans aus.

Schlussfolgerungen

Es ist unbestritten, dass die Exposition gegenüber ionisierender Strahlung beim Menschen Krebs verursachen kann. Die wissenschaftliche Faktengrundlage, um dieses Risiko zu quantifizieren, stammt grösstenteils nach wie vor aus Studien von relativ kleinen Populationen, welche Dosen weit über der gewöhnlichen Strahlenbelastung ausgesetzt waren.

Diese Studien zeigen, dass Kinder gegenüber Strahlenbelastung empfindlicher sind als Erwachsene. Schätzungen des mit der Exposition gegenüber niedrigen Dosen verbundenen Krebsrisikos stützen sich gemeinhin auf Extrapolation der Standard Risikomodelle, welche basierend auf den Studien zu den Überlebenden der Atombomben berechnet wurden.

Direkte epidemiologische Evidenz zum Krebsrisiko von niedrigen Dosen ist schwieriger zu erlangen, da grosse Studienpopulation erforderlich sind und die Exposition schwierig abzuschätzen ist. Neuere Kohortenstudien zu CT-Scans bei Kindern fanden Erhöhungen des Krebsrisikos, welche mit den Standard Risikomodelle im Wesentlichen übereinstimmen. Studien über den Zusammenhang zwischen natürlicher Hintergrundstrahlung sowie Radon und Krebs bei Kindern zeigen ein weniger klares Bild mit inkohärenten Resultaten betreffend potentieller Krebsrisiken.

Das grösste Risiko für die Allgemeinbevölkerung betreffend ionisierender Strahlung ist Radon in Wohnräumen, welches für mehr als 50% der durchschnittlich erhaltenen Dosis in der Schweiz verantwortlich ist. Neue Regulationen und eine Kampagne des Bundesamtes für Gesundheit versuchen, dem «Radon-Problem» entgegenzuwirken, mit dem Ziel, das Aktivitätsniveau in Häusern überall unter 300 Bq/m³ zu senken (Radonaktionsplan 2012-2020). Ungefähr ein Viertel der jährlichen

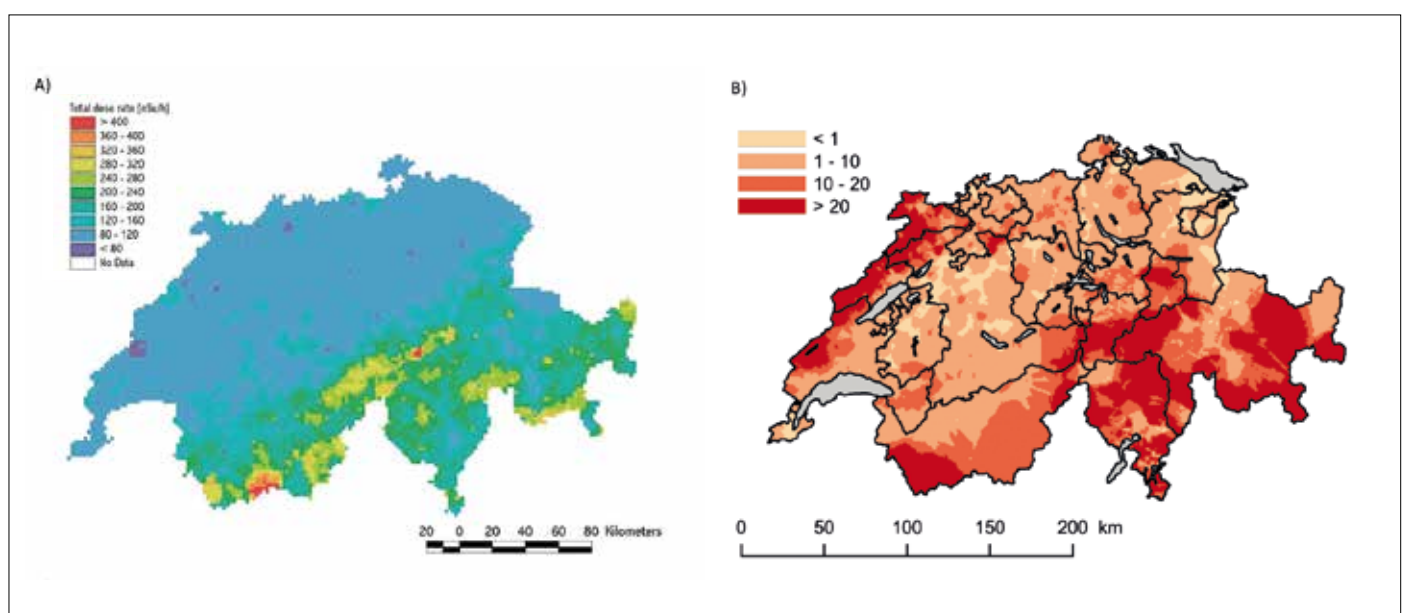


Abbildung 2: A) Karte der terrestrischen und kosmischen Hintergrundstrahlung in der Schweiz basierend auf einem Modell von Rybach et al. 2002²⁶⁾. **B)** Radonkarte der Schweiz. Angegeben ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gebäude den Referenzwert von 300 Bq/m³ überschreitet. Quelle: Bundesamt für Gesundheit

durchschnittlichen Dosis in der Schweiz stammt aus der diagnostischen Radiologie, grösstenteils aus CT-Scans. In Anbetracht der erhöhten Empfindlichkeit von Kindern gegenüber ionisierender Strahlung ist die Regel unnötige Strahlungsbelastungen zu vermeiden, in der Pädiatrie besonders wichtig.

Referenzen

- 1) Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, Paquet F, Blanchardon E, Marsh JW. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. *Annals of the ICRP*. 2010;40(1):1-64.
- 2) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2006, Effects of ionizing radiation, Vol. I Annex A, Epidemiological studies of radiation and cancer. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2006.
- 3) Richardson D, Sugiyama H, Nishi N, Sakata R, Shimizu Y, Grant EJ, et al. Ionizing radiation and leukemia mortality among Japanese Atomic Bomb Survivors, 1950-2000. *Radiation research*. 2009;172(3):368-82.
- 4) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2013, Sources, effects and risks of ionizing radiation, vol. II Annex B, Effects of radiation exposure of children. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2013.
- 5) Wakeford R. The risk of childhood leukaemia following exposure to ionising radiation-a review. *Journal of radiological protection : official journal of the Society for Radiological Protection*. 2013;33(1):1-25.
- 6) Braganza MZ, Kitahara CM, Berrington de Gonzalez A, Inskip PD, Johnson KJ, Rajaraman P. Ionizing radiation and the risk of brain and central nervous system tumors: a systematic review. *Neuro-oncology*. 2012;14(11):1316-24.
- 7) Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2012;380(9840):499-505.
- 8) Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, Butler MW, Goergen SK, Byrnes GB, et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *Bmj*. 2013;346:f2360.
- 9) Journy N, Rehel JL, Ducou Le Pointe H, Lee C, Brisse H, Chateil JF, et al. Are the studies on cancer risk from CT scans biased by indication? Elements of answer from a large-scale cohort study in France. *British journal of cancer*. 2015;112(1):185-93.
- 10) Raaschou-Nielsen O, Andersen CE, Andersen HP, Gravesen P, Lind M, Schuz J, et al. Domestic radon and childhood cancer in Denmark. *Epidemiology*. 2008;19(4):536-43.
- 11) Kendall GM, Little MP, Wakeford R, Bunch KJ, Miles JC, Vincent TJ, et al. A record-based case-control study of natural background radiation and the incidence of childhood leukaemia and other cancers in Great Britain during 1980-2006. *Leukemia*. 2013;27(1):3-9.
- 12) Hauri D, Spycher B, Huss A, Zimmermann F, Grotzer M, von der Weid N, et al. Domestic radon exposure and risk of childhood cancer: a prospective census-based cohort study. *Environmental health perspectives*. 2013;121(10):1239-44.
- 13) Spycher BD, Lupatsch JE, Zwahlen M, Roosli M, Niggli F, Grotzer MA, et al. Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study. *Environmental health perspectives*. 2015;123(6):622-8.
- 14) Demoury C, Marquant F, Ielsch G, Goujon S, Debayle C, Faure L, et al. Residential Exposure to Natural Background Radiation and Risk of Childhood Acute Leukemia in France, 1990 - 2009. *Environmental health perspectives*. 2016.
- 15) Nikkila A, Erme S, Arvela H, Holmgren O, Raitanen J, Lohi O, et al. Background radiation and childhood leukemia: A nationwide register-based case-control study. *International journal of cancer Journal international du cancer*. 2016;139(9):1975-82.
- 16) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2000, Sources and effects of ionizing radiation, vol. I Sources, Annex C, Exposures to the public from man-made sources of radiation. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2000.
- 17) Wakeford R, Darby SC, Murphy MF. Temporal trends in childhood leukaemia incidence following exposure to radioactive fallout from atmospheric nuclear weapons testing. *Radiation and environmental biophysics*. 2010;49(2):213-27.
- 18) UNSCEAR. Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2018.
- 19) UNSCEAR. Developments since the 2013 UNSCEAR Report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the great East-Japan earthquake and tsunami. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2017.
- 20) Wakeford R. Childhood leukaemia and nuclear installations: the long and winding road. *British journal of cancer*. 2014;111(9):1681-3.
- 21) Laurier D, Jacob S, Bernier MO, Leuraud K, Metz C, Samson E, et al. Epidemiological studies of leukaemia in children and young adults around nuclear facilities: a critical review. *Radiation protection dosimetry*. 2008;132(2):182-90.
- 22) Spycher BD, Feller M, Zwahlen M, Roosli M, von der Weid NX, Hengartner H, et al. Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland: a census-based cohort study. *International journal of epidemiology*. 2011;40(5):1247-60.
- 23) Bundesamt für Gesundheit. Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz, Jahresbericht 2017. Bundesamt für Gesundheit BAG, Abteilung Strahlenschutz, Schweizerische Eidgenossenschaft; 2018.
- 24) Coultre RL, Bize J, Champendal M, Wittwer D, Trueb P, Verdun FR. Exposure of the Swiss population to ionizing radiation in medical radiology in 2013. Lausanne: University of Health Sciences HESAV; 2015.
- 25) UNSCEAR. UNSCEAR Report 2008, Sources and effects of ionizing radiation, vol. I Sources, Annex A, Medical radiation exposures. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations; 2008.
- 26) Rybach L, Bachler B, Bucher B, Schwarz G. Radiation doses of Swiss population from external sources. *J Environ Radioact*. 2002;62(3):277-86.

Korrespondenzadresse

ben.spycher@ispm.unibe.ch

Die Autoren haben keine finanzielle Unterstützung und keine anderen Interessenskonflikte im Zusammenhang mit diesem Beitrag deklariert.