



Bern, 2. März 2018

---

# **Kenntnisstand betreffend Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich**

Bericht des Bundesrats  
in Erfüllung des Postulats 08.3475, Fehr Hans-Jürg  
vom 17. September 2008

---

## Zusammenfassung

*Das Postulat 08.3475, Fehr Hans-Jürg, vom 17. September 2008 beauftragt den Bundesrat, von einer von der Atomwirtschaft und vom PSI unabhängigen Institution wissenschaftlich untersuchen zu lassen, welche Auswirkungen die Emission von schwacher Strahlung aus Kernkraftwerken auf Menschen, Tiere und Pflanzen in der Umgebung der schweizerischen KKW hat.*

Die CANUPIS-Studie (Childhood Cancer and Nuclear Power Plants in Switzerland, [www.canupis.ch](http://www.canupis.ch)) wurde von September 2008 bis Dezember 2010 vom Institut für Sozial- und Präventivmedizin (ISPM) der Universität Bern im Auftrag des Bundesamts für Gesundheit (BAG) und der Krebsliga Schweiz (KLS) durchgeführt. Sie sollte zeigen, ob Kinder, die in der Nähe eines Schweizer Kernkraftwerks leben oder aufgewachsen sind, ein höheres Risiko für Krebserkrankungen und insbesondere Leukämie aufweisen. Die 2011 veröffentlichte Studie fand keine Hinweise dafür, dass Kinder, die in der Nähe der Schweizer Kernkraftwerke leben, häufiger an Krebs und Leukämie erkranken als Kinder, die weiter entfernt wohnen. Diese Schlussfolgerung bestätigt die bisherigen Ergebnisse der Umweltüberwachung sowie die Risikoschätzungen, die sich auf den internationalen Konsens im Strahlenschutz stützen und die Grundlage der Schweizer Gesetzgebung bilden.

Studien in einem kleinen Land wie der Schweiz sind jedoch statistisch nicht aussagekräftig, und die Schweiz verfügt auch nicht über ein auf Strahlenbiologie spezialisiertes Institut, das einen direkten Beitrag zur Erforschung der biologischen Wirkmechanismen leisten könnte. Deshalb hat das BAG sich auf die Beteiligung der Schweiz an internationalen Studien und Überlegungen über die Auswirkungen von Niedrigstrahlung konzentriert. Ziel ist es, das in der Schweiz vorhandene Kompetenzniveau in diesem Bereich zu erhalten und die Möglichkeit zu schaffen, dass Schweizer Studien mit europäischen oder internationalen Untersuchungen koordiniert werden. Das BAG hat insbesondere die Tätigkeit des Wissenschaftlichen Ausschusses der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung (UNSCEAR) mitverfolgt und unterstützt. 2016 nahm das BAG Einsitz im Verwaltungsrat des europäischen Projekts CONCERT, das Bestandteil des Forschungsprogramms Horizon 2020 ist. Das BAG beteiligt sich in diesem Rahmen an der strategischen Begleitung zur Bestimmung der Prioritäten in der europäischen Strahlenschutzforschung und unterstützt die Beteiligung von Schweizer Forschungseinrichtungen.

Ziel dieses Berichts ist es, in Erfüllung des Postulats einen aktuellen Überblick zu den Ergebnissen epidemiologischer Studien namentlich aus der Schweiz zu geben und über den heutigen Kenntnisstand zu den Risiken ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich zu informieren. Auf der Grundlage der Stellungnahmen der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz (KSR) von 2013 und 2016 kommt der Bericht zum Schluss, dass aktuelle Studien die Anwendung des linearen Modells ohne Schwellenwert als vorsichtige Basis für den Strahlenschutz in der Schweiz bestätigen. Nach diesem Modell erhöht jede Exposition durch ionisierende Strahlung, selbst bei niedrigen Dosen, das Risiko für Krebs und/oder Erbkrankheiten linear, und es gibt keinen Schwellenwert, unter dem eine Exposition keine Wirkung hat. Die Einhaltung der in der schweizerischen Gesetzgebung festgelegten Dosisgrenzwerte stellt sicher, dass dieses Risiko für die Bevölkerung tolerierbar ist. Darüber hinaus rechtfertigt das Modell die weitere Anwendung des Grundsatzes der Optimierung im Strahlenschutz, der darin besteht, die Dosen so tief wie vernünftigerweise erreichbar zu halten. Die aktuell verwendete Risikoschätzung für die Zwecke des Strahlenschutzes basiert auf einer soliden Grundlage. Dabei werden die Kenntnisse aus epidemiologischen Studien optimal genutzt und die biologischen Mechanismen berücksichtigt. Eine substantielle Verbesserung dieser Modellierung aufgrund der heute vorliegenden epidemiologischen und biologischen Kenntnisse scheint schwierig. Das Strahlenschutzsystem der Schweiz basiert auf dieser realistischen Risikoeinschätzung und gewährleistet einen wirksamen Schutz der Bevölkerung, Arbeitern und Patienten. Die Wirkung ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich auf das Herz-Kreislauf-System ist ungenügend geklärt und verdient besondere Aufmerksamkeit. Auch die Fortschritte in der Zellbiologie sind zu verfolgen, denn sie tragen dazu bei, die Mechanismen der strahlenbedingten Auslösung von Krebserkrankungen besser zu verstehen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>4</b>
1.1.	Auftrag .....	4
1.2.	Rechtsgrundlagen .....	4
1.3.	Internationaler Kontext.....	4
1.4.	Problematik von Strahlung im Niedrigdosisbereich .....	5
<b>2.</b>	<b>Wissenschaftliche Ansätze.....</b>	<b>6</b>
2.1.	Radiobiologischer Ansatz.....	6
2.2.	Epidemiologischer Ansatz .....	7
<b>3.</b>	<b>Kenntnisstand.....</b>	<b>8</b>
3.1.	Induktion von soliden Tumoren und Leukämie .....	8
3.2.	Verursachung von Erbschäden.....	10
3.3.	Verursachung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen .....	10
3.4.	Verursachung von Katarakt.....	10
3.5.	Verursachung von angeborenen Missbildungen durch eine Strahlenbelastung von Embryonen oder Feten.....	10
3.6.	Veränderungen des Geschlechterverhältnisses bei der Geburt.....	11
<b>4.</b>	<b>Aktuelle Schweizer Studien .....</b>	<b>11</b>
4.1.	CANUPIS-Studie.....	11
4.2.	Studie zur Krebsinduktion durch natürliche Strahlung.....	12
4.3.	Studie zur interventionellen Radiologie .....	13
4.4.	Weitere Studien .....	14
<b>5.</b>	<b>Schätzung des Risikos für den Strahlenschutz.....</b>	<b>15</b>
<b>6.</b>	<b>Beurteilung des Kenntnisstands und der Umsetzung des Wissens .....</b>	<b>17</b>
6.1.	Kenntnisstand betreffend Wirkmechanismen auf biologischer Ebene .....	17
6.2.	Kenntnisstand betreffend Strahlenrisiken aufgrund epidemiologischer Studien .....	17
6.3.	Kenntnisstand betreffend Schätzung der Risiken im Strahlenschutz .....	17
<b>7.</b>	<b>Zukünftige Beteiligung der Schweiz .....</b>	<b>18</b>
7.1.	Bereich Radiobiologie .....	18
7.2.	Bereich Epidemiologie .....	18
7.3.	Bereich der Risikoschätzung für den Strahlenschutz .....	19
<b>8.</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>20</b>
<b>9.</b>	<b>Abkürzungen.....</b>	<b>21</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>21</b>

**Anhang: Überblick über epidemiologische Studien zu den Auswirkungen ionisierender Strahlung auf den Menschen**

# 1 Einleitung

## 1.1. Auftrag

*Das Postulat 08.3475, Fehr Hans-Jürg, vom 17.9.2008 hat folgenden Inhalt: "Der Bundesrat lässt von einer von der Atomwirtschaft und vom PSI unabhängigen Institution wissenschaftlich untersuchen, welche Auswirkungen die Emission von Niedrigstrahlen aus Atomkraftwerken auf Menschen, Tiere und Pflanzen in der Umgebung der schweizerischen AKW hat". Der Bundesrat hat seine Annahme am 26. November 2008 beantragt.*

Er erklärte sich bereit, im Rahmen seiner Möglichkeiten und der bereits im Voranschlag und Finanzplan eingestellten Mittel weiter gehende Abklärungen zu den Auswirkungen niedriger Dosen auf Menschen, Tiere und Pflanzen zu unterstützen. Ausserdem verpflichtete er sich, die internationale Forschung in diesem Bereich zu verfolgen. Das Postulat wurde am 19. Dezember 2008 vom Nationalrat angenommen.

Der vorliegende Bericht liefert eine Bestandesaufnahme zu den Kenntnissen über das Strahlenrisiko und das Engagement der Schweiz in diesem Bereich. Der Bericht präsentiert zuerst die rechtlichen Grundlagen, die internationalen Entwicklungen in dieser Thematik und die Problematik von Strahlung im Niedrigdosisbereich. In Kapitel 2 werden die wissenschaftlichen Ansätze zur Untersuchung der Auswirkungen von Niedrigstrahlung beschrieben. Kapitel 3 widmet sich dem aktuellen Kenntnisstand über die Auswirkungen von Niedrigstrahlung Kapitel 4 informiert über die Tätigkeiten der Schweiz in diesem Bereich, insbesondere die Ergebnisse der epidemiologischen Studie CANUPIS, welche die Häufigkeit von Leukämie bei Kindern, die in der Nähe der Schweizer Atomkraftwerke leben, analysierte. Kapitel 5 beschreibt die Modellierung des Risikos für die Anforderungen des Strahlenschutzes. Eine Einschätzung des aktuellen Kenntnisstands über die Auswirkungen von Niedrigstrahlung und die Nutzung dieses Wissens zur Festlegung von Strahlenschutznormen folgt in Kapitel 6. Den Abschluss des Berichts bilden ein Ausblick zum Engagement der Schweiz in Kapitel 7 und die Schlussfolgerungen in Kapitel 8.

## 1.2. Rechtsgrundlagen

Die wichtigsten Rechtsgrundlagen im Zusammenhang mit dem Schutz vor ionisierender Strahlung sind in der Schweiz das Strahlenschutzgesetz vom 22. März 1991 (StSG, SR 814.50) und die dazugehörige Anwendungsverordnung vom 22. Juni 1994 (StSV, SR 814.501).

Das Gesetz sieht insbesondere in Artikel 5 Absatz 1 Folgendes vor: «Der Bund fördert die wissenschaftliche Forschung über Strahlenwirkungen und Strahlenschutz sowie die Ausbildung auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.»

In Artikel 8 der Verordnung wird der Auftrag folgendermassen präzisiert: «Die Aufsichtsbehörden können Forschungsprojekte über Strahlenwirkungen und Strahlenschutz in Auftrag geben oder sich an Forschungsprojekten beteiligen.»

## 1.3. Internationaler Kontext

Mit den wissenschaftlichen Grundlagen zu den Auswirkungen ionisierender Strahlung befassen sich auf internationaler Ebene folgende Organismen:

Der UNSCEAR (Wissenschaftliche Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung) ist eine UNO-Kommission mit der Aufgabe, Schätzungen zu den abgegebenen Dosen und den Wirkungen ionisierender Strahlung auf weltweiter Ebene

vorzunehmen und damit eine wissenschaftliche Grundlage für den Strahlenschutz bereitzustellen. Sie legt der UNO-Generalversammlung periodisch Berichte vor.

Die Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection, ICRP) ist eine internationale Nichtregierungsorganisation. Sie hat sich zum Ziel gesetzt, ein internationales System für den Strahlenschutz zu entwickeln und auf dem neuesten Stand zu halten. Sie stützt sich dabei auf die vom UNSCEAR erarbeiteten Kenntnisse, schlägt eine allgemeine Schutzstrategie gegen ionisierende Strahlung vor und gibt Empfehlungen [1] und Informationen über alle Aspekte des Strahlenschutzes ab.

Die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), eine UNO-Organisation, ist zuständig für die Erarbeitung grundlegender Sicherheitsnormen für den Strahlenschutz [2]. Sie stützt sich dazu auf die Empfehlungen und Informationen der ICRP. Die von der IAEO erarbeiteten Normen dienen als Basis zur Erstellung nationaler und regionaler Gesetzgebungen (zum Beispiel der Europäischen Union).

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) ist eine UNO-Sonderorganisation mit der Aufgabe, das internationale öffentliche Gesundheitswesen zu leiten und zu koordinieren und die einzelnen Länder bei der Umsetzung ihrer Gesundheitsziele zu unterstützen. In ihrer Evaluation integriert die WHO das Strahlenrisiko in einen globalen Gesundheitsansatz unter Berücksichtigung der von der IAEO erarbeiteten Normen [3,4].

## 1.4. Problematik von Strahlung im Niedrigdosisbereich

Zur Quantifizierung der Exposition des Menschen mit ionisierender Strahlung werden in diesem Bericht zwei Grössen verwendet: die Äquivalentdosis in Sv für die Exposition eines Organs bzw. die effektive Dosis ebenfalls in Sv für die Exposition des gesamten Körpers.

Es gibt zwei Arten von Auswirkungen im Zusammenhang mit der Belastung des Organismus durch ionisierende Strahlung: deterministische Effekte, auch als Gewebereaktionen bezeichnet, und stochastische Effekte. Deterministische Effekte betreffen die Zerstörung einer grossen Zahl von Zellen des exponierten Organs und verursachen Funktionsstörungen. Bei diesen Effekten gibt es eine Schwellendosis, d.h. einen Wert, unter dem diese Wirkung nicht auftritt. Über einer gewissen Schwelle, die je nach Person unterschiedlich hoch sein kann, steigt die Schwere der Effekte mit der Dosis an. Diese Effekte treten je nach Höhe der Dosis innerhalb weniger Stunden bis Wochen auf. Ein Beispiel sind Verbrennungen der Haut. Stochastische Effekte wiederum sind Veränderungen auf Zellebene. Bisher konnte für diese Wirkungen kein Schwellenwert bestimmt werden. Hier steigt mit zunehmender Dosis nicht die Schwere der Wirkung, sondern die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens. Stochastische Effekte haben zudem eine lange Latenzzeit, das heisst sie treten erst mehrere Jahre nach der Exposition auf. Der wichtigste stochastische Effekt ist die Auslösung von Krebs.

Im Gegensatz zu den Folgen hoher Strahlendosen sind die Risiken niedriger Strahlendosen (unter 100 mSv) noch wenig bekannt und mit grossen Unsicherheiten behaftet. Weil die Bevölkerung kontinuierlich einer gewissen Strahlung im Niedrigdosisbereich ausgesetzt ist und diese Belastung überdies infolge des Wohnortes, des Lebensstils sowie der individuellen Empfindlichkeit der exponierten Person schwankt, ist es schwierig, das Risiko einzuschätzen, das mit einer zusätzlichen geringen Dosis verbunden ist. Noch schwieriger sind Schätzungen der krebsauslösenden Wirkungen, umso mehr, als der strahlenbedingte Beitrag zur Krebsinduktion von Schwankungen der Basisinzidenz überlagert ist. In der Schweiz liegt die jährliche Belastung der Bevölkerung durch Strahlung aus natürlichen und künstlichen Quellen durchschnittlich in der Grössenordnung von 4 mSv und somit im Niedrigdosisbereich. Dasselbe gilt für die Strahlenexposition durch medizinische Anwendungen mit Ausnahme von Bestrahlungen gegen Krebserkrankungen.

## 2. Wissenschaftliche Ansätze

### 2.1. Radiobiologischer Ansatz

#### *Ziel der Radiobiologie*

Das Ziel der Radiobiologie ist es, die Wirkmechanismen ionisierender Strahlen zu erklären – über den gesamten Weg von den Schädigungen auf zellulärer Ebene über die Reparatur- und Proliferationsmechanismen bis zu den sichtbaren Auswirkungen auf die Gesundheit. Es besteht eine Vielzahl experimenteller Untersuchungsmethoden, die von der In-vitro-Exposition von Zellen bis zu Tierversuchen reichen.

#### *Mechanismen der Krebsinduktion*

Die hauptsächliche Wirkung ionisierender Strahlung auf der Ebene der Zellen ist die Verursachung von DNA-Schäden in der Zelle. Diese Schädigungen entstehen durch eine direkte Übertragung von Energie oder indirekt durch freie Radikale, die von der Strahlung in der Zelle erzeugt werden. Die wichtigsten DNA-Schäden, die zu Mutationen führen können, sind Doppelstrangbrüche (Double Strand Break, DSB) und gehäufte Läsionen, also mehrfache Schädigungen in einem beschränkten Bereich. Die Zelle verfügt über effiziente Mechanismen zur Reparatur von DNA-Schäden. Diese DNA-Reparatur arbeitet aber nicht völlig fehlerfrei, insbesondere nicht bei Doppelstrangbrüchen, und fehlerhaft reparierte Schäden können zu Gen- und Chromosomenmutationen führen. Erschwerend kommt hinzu, dass auch das Kontrollsystem der Zelle, das die Qualität der Reparatur überwacht, auch (z.B. genetisch bedingt) beeinträchtigt sein kann und dadurch auch zu einer Strahlenüberempfindlichkeit der betroffenen Person führt. Es wird angenommen, dass bestimmte Mutationen am Anfang der Krebsinduktion stehen. Die Krebsentstehung ausgehend von einer einzigen Zelle mit einer Mutation ist ein Prozess, der über mehrere Schritte abläuft. Zellen können zusätzliche Mutationen oder epigenetische Veränderungen akkumulieren, die ihnen Wachstumsvorteile vermitteln, so dass sie sich stark vermehren und schliesslich einen Tumor bilden.

#### *Mechanismen bei der Verursachung von Erbschäden*

Auslöser für vererbte Auswirkungen können wie bei der Krebsinduktion Doppelstrangbrüche und andere DNA-Schäden sein, wenn diese Keimzellen betreffen. Auch hier kann eine fehlerhafte Reparatur Mutationen zur Folge haben. Mutationen, welche die Entwicklung und Überlebensfähigkeit des Embryos und Fötus nicht entscheidend beeinträchtigen, können vom bestrahlten Individuum an die Nachkommen weitergegeben werden. Diese vererbten Mutationen tragen zum Pool von Mutationen bei und können schliesslich zu Erbkrankheiten führen. Versuche mit Labortieren und Untersuchungen bei strahlenbelasteten Mäusen aus der Umgebung von Tschernobyl [5] zeigen höhere Mutationsraten bei den Nachkommen bestrahlter Tiere. Obwohl kein direkter Beweis für ein Risiko erblicher Effekte beim Menschen vorliegt, lassen die Beobachtungen bei Säugetieren annehmen, dass diese Risiken auch für den Menschen bestehen.

#### *Phänomene, die sich noch nicht in die Wirkmechanismen einordnen lassen*

Es gibt einige Phänomene, die sich nicht in die oben beschriebenen Mechanismen einordnen lassen, die aber ebenfalls Krebs oder erbliche Effekte zur Folge haben können. Diese Mechanismen, die im Übrigen auch untereinander zu interagieren scheinen, werden jedoch nicht in die Schätzung der radiologischen Risiken einbezogen, da sie gegenwärtig kein kohärentes Bild ergeben, das für eine solche Schätzung erforderlich wäre. Sie werden nachfolgend auf der Grundlage eines White Paper des UNSCEAR kurz beschrieben, an dem sich das zukünftige Programm des wissenschaftlichen Ausschusses orientieren soll [6]. Als strahleninduzierte **genomische Instabilität** werden genetische Schäden in einem bestimmten Teil der bestrahlten Zellen bezeichnet, die erst viele Zellzyklen nach dem Zeitpunkt der Bestrahlung in Erscheinung treten.

**Ungezielte Wirkungen** sind Wirkungen auf Zellen, die nicht direkt Strahlung ausgesetzt waren. Der Bystander-Effekt betrifft nicht bestrahlte Zellen, die sich in der Nähe von bestrahlten Zellen befinden,

während der abscopale Effekt bei Gewebe auftritt, das nicht bestrahlt wurde und sich in einer gewissen Entfernung des bestrahlten Gewebes befindet. Diese Wirkungen werden durch Signale ausgelöst, die von den bestrahlten Zellen abgegeben werden. Der Mechanismus ist noch nicht aufgeklärt.

In Versuchen zum Zelltod, zu Chromosomenaberrationen und zu Mutationen wurde eine **adaptive Antwort** beobachtet. Sie besteht in einer abgeschwächten Reaktion auf beispielsweise eine Dosis von etwa 1 Sv einige Stunden nach einer ersten schwächeren Dosis von 10 bis 20 mSv. Dieser Effekt konnte bei der Krebsinduktion nicht nachgewiesen werden. Es scheint, dass ungezielte Wirkungen durch vorhandene reaktive Sauerstoffspezies und andere Radikale beeinflusst werden. Deshalb wurde die Wirkung von Strahlung auf die Mitochondrien, in denen die **reaktiven Sauerstoffspezies (ROS)** hauptsächlich entstehen, in mehreren Studien untersucht.

In bestimmten Situationen wird wiederum eine **Hypersensibilität gegenüber geringen Dosen** festgestellt. Der Mechanismus ist noch nicht aufgeklärt. Es wurde auch nicht gezeigt, ob dabei überlebensfähige Zellen entstehen, die an der Entwicklung von Krebs beteiligt sind.

Die **genetische Prädisposition** betrifft die Frage, in welchem Masse bestimmte Individuen besonders anfällig gegenüber einer strahlenbedingten Entwicklung von Krebs sind. Es ist bekannt, dass bestimmte genetische Krankheiten die Entstehung von Krebs begünstigen, wodurch die Betroffenen gegenüber Strahlung besonders empfindlich sind.

Hohe Strahlendosen führen zu einer Immunsuppression, weil die für die Immunabwehr verantwortlichen Zellen (Lymphozyten) zerstört werden. Niedrige Strahlendosen können die **Immunantwort** abschwächen oder auch stimulieren. Die langfristigen Auswirkungen auf das Immunsystem und die damit zusammenhängenden Folgen für die Gesundheit sind zurzeit nicht bekannt.

**Epigenetische Modifikationen** sind Veränderungen der Genexpression, die nicht auf Änderungen der Nukleotidsequenz der genomischen DNA beruhen. Diesen Modifikationen liegen unterschiedliche Mechanismen wie DNA-Methylierungen zugrunde. Epigenetische Prozesse spielen eine wichtige, aber noch unvollständig verstandene Rolle bei der Entwicklung von Krebs, der durch Strahlung induziert wurde. Die Modifikationen scheinen insbesondere an der genomischen Instabilität beteiligt zu sein und können die Dosis-Wirkungs-Beziehung im Niedrigdosisbereich beeinflussen.

#### *Aufgabe der Radiobiologie bei der Bestimmung der Strahlenrisiken*

Das verfügbare Wissen über die Mechanismen, die den Wirkungen von Strahlung auf den Organismus zugrunde liegen, ist bei den Erwägungen im Zusammenhang mit der Einschätzung von Strahlenrisiken wichtig. Dieses Verständnis reicht aber nicht aus, um die Risiken für verschiedene Krankheiten, namentlich für die Entstehung von Krebs, quantifizieren zu können. Dazu wird ein epidemiologischer Ansatz verwendet. Für die Einschätzung des Risikos von Erbschäden, für die keine epidemiologischen Beobachtungen vorliegen, wird ein Modell verwendet, das auf der Übertragung der bei Tierversuchen festgestellten Risiken auf den Menschen beruht.

## 2.2. Epidemiologischer Ansatz

#### *Ziel der Epidemiologie*

Die Epidemiologie untersucht Häufigkeit und Verteilung von Krankheiten über Zeit und Raum in menschlichen Populationen sowie die bestimmenden Faktoren. Von Interesse ist dabei die Inzidenz einer Krankheit, die von der Qualität der verwendeten therapeutischen Mittel unabhängig ist, oder die Sterblichkeit, die sich meist einfacher feststellen lässt. Nachfolgend werden die wichtigsten Parameter einer epidemiologischen Studie dargestellt, wie sie namentlich in Anhang A des UNSCEAR-Berichts von 2006 [7] beschrieben sind.

#### *Arten epidemiologischer Studien*

Es gibt zwei Arten analytischer epidemiologischer Studien: (prospektive oder retrospektive) Kohortenstudien und Fall-Kontroll-Studien. Die LSS-Studie (Life Span Study; Untersuchung bei den Überlebenden der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki) ist eine teils retrospektiv,

teils prospektiv durchgeführte Kohortenstudie. Die Korrelationsstudie ist ein Spezialfall der Kohortenstudie, bei der die Daten über Gruppen gemittelt werden. Die wichtigste Form einer Korrelationsstudie ist die geografische Studie, die sogenannte «ökologische Studie», bei der die Personen nach ihrem Aufenthaltsort in Gruppen zusammengefasst werden. Solche Studien sind sehr empfindlich gegenüber dem Einfluss externer Faktoren, man spricht vom ökologischen Bias. Eine Fall-Kontroll-Studie untersucht Daten von Personen mit einer bestimmten Krankheit (zum Beispiel Krebs) – dem «Fall». Zusätzlich wird eine beispielsweise bezüglich Geschlecht oder Alter passende Gruppe von Personen ohne die betreffende Krankheit rekrutiert – die «Kontrolle». Nun werden die beiden Gruppen hinsichtlich ihrer Exposition verglichen. Der Vorteil einer Fall-Kontroll-Studie liegt darin, dass sie detaillierte Untersuchungen der Expositionsbedingungen und anderer Einflussfaktoren ermöglichen, was bei einer Kohorte ausgeschlossen ist.

#### *Eigenschaften einer epidemiologischen Studie*

Die **statistische Aussagekraft** einer epidemiologischen Studie, d.h. ihre Kapazität, eine Wirkung nachzuweisen, hängt von der durchschnittlichen Dosis ab, der die Kohorte ausgesetzt war, sowie vom Zusammenhang zwischen Dosis und Risiko und von der Grösse der Kohorte.

Die **Genauigkeit** der Studienergebnisse, die oft mit einem Konfidenzintervall um den geschätzten Wert für das Risiko angegeben wird, hängt stark von den genannten drei Parametern ab.

Die **Signifikanz des Ergebnisses** einer epidemiologischen Studie wird mit dem p-Wert angegeben, der die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, mit der ein Ergebnis bei oder über dem Wert liegt, der ohne eine Wirkung erreicht wird. In der Epidemiologie wird ein Ergebnis normalerweise als signifikant bezeichnet, wenn der p-Wert unter 0,05 liegt.

Die **Unsicherheiten** im Zusammenhang mit der Exposition können Auswirkungen auf die Ergebnisse einer epidemiologischen Studie haben. Diese Fehler schränken die statistische Aussagekraft der Studie ein und verwischen den Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung.

Unter dem **Bias** oder der Verzerrung wird in einer Studie jeder Prozess verstanden, der dazu neigt, Ergebnisse oder Schlussfolgerungen zu produzieren, die von der Wirklichkeit abweichen.

Ein **Störfaktor** ist ein spezieller Fall einer Verzerrung aufgrund eines Parameters, für den eine Korrelation zwischen der Krankheit und der untersuchten Exposition besteht. Rauchen ist beispielsweise der wichtigste Störfaktor, wenn die Induktion von Lungenkrebs untersucht wird. Abhilfe kann geschaffen werden, indem die Störfaktoren in ein Regressionsmodell einbezogen werden, oder indem die Daten in Abhängigkeit der Ausprägung des Störfaktors geschichtet werden.

Die **Latenzzeit** – die Zeit, die von der Exposition bis zum Auftreten einer Krankheit bzw. bis zum Eintreten des Todes verstreicht – ist ein wichtiger in Studien analysierter Faktor. Bei soliden Tumoren liegt die Latenzzeit bei mindestens 5 Jahren und kann bis zu mehrere Jahrzehnte betragen, bei Leukämie dauert sie mindestens 2 Jahre. Die Berücksichtigung der Latenzzeit in einer Studie erhöht deren Aussagekraft.

#### *Aufgabe der Epidemiologie bei der Bestimmung der Strahlenrisiken*

Gegenwärtig ist die Epidemiologie die einzige Disziplin, welche die strahlenbedingten Risiken für die meisten Erkrankungen quantifiziert. Wie bereits erwähnt, ist die Schätzung des strahlenbedingten Risikos für Erbkrankheiten eine Ausnahme, weil keine Daten epidemiologischer Studien zur Verfügung stehen.

## 3. Kenntnisstand

### 3.1. Induktion von soliden Tumoren und Leukämie

#### *Die wichtigsten epidemiologischen Studien*

Die wichtigsten epidemiologischen Studien zur Bestimmung des Risikos für die Krebsinduktion durch Strahlung betreffen die Bevölkerung, die durch den Atombombenabwurf über Hiroshima und Nagasaki

hohen Strahlenbelastungen ausgesetzt war, die Nachverfolgung der Arbeiter und der Bevölkerung nach nuklearen Unfällen, Patientengruppen mit Strahlenbelastungen im Rahmen medizinischer Untersuchungen sowie die Belastung von Bevölkerungsgruppen mit ionisierender Strahlung aus natürlichen Quellen. Eine Übersicht über diese Studien mit den betreffenden Ergebnissen ist im Anhang dieses Berichtes zusammengestellt. Die aufgeführten Daten beruhen hauptsächlich auf Anhang A des Berichts von 2006 [7] und von 2017 [8] des UNSCEAR.

#### *Schlussfolgerungen zur Schätzung des Krebsrisikos auf der Grundlage epidemiologischer Studien*

Die von der Radiation Effects Research Foundation (RERF) durchgeführte LSS Studie (Life Span Study) über die Überlebenden der Bombenangriffe auf Hiroshima und Nagasaki, ist die wichtigste Studie, mit der sich das Krebsinduktionsrisiko am besten abschätzen lässt. Ohne Zweifel sind die anderen Studien ebenfalls wertvoll, weil sie im Allgemeinen innerhalb ihres Konfidenzintervalls die Ergebnisse der LSS stützen und weil mit diesen geprüft werden kann, ob sich die Risiken auf den Niedrigdosisbereich und auf chronische Expositionen korrekt übertragen lassen. Aufgrund der Unterschiede nach dem Geschlecht, nach dem Alter zum Zeitpunkt der Exposition und nach dem erreichten Alter lassen sie aber keine direkten Schlüsse auf die Risiken für die einzelnen Organe zu. Zusammengefasst verfügen wir mit der LSS über eine Schätzung des radiologischen Risikos für die Gesamtheit der Krebserkrankungen und für Leukämie. Im Niedrigdosisbereich unterhalb von 100 mSv sind die im Rahmen der LSS gemessenen Wirkungen nicht signifikant, vielleicht wegen einer zu geringen Aussagekraft dieser Studie. Die Risikofaktoren hängen vom Alter zum Zeitpunkt der Exposition, vom erreichten Alter und vom Geschlecht ab. Die Beziehung zwischen dem Leukämierisiko und der Dosis ist linear-quadratisch. Die neueste und wichtigste Studie über Arbeiter in Kernkraftwerken, die 300'000 Menschen in Frankreich, dem Vereinigten Königreich und den USA umfasst (INWORKS-Studie), weist ein Krebsrisiko bei Niedrigdosen nach (< 100 mSv), bestätigt die Ergebnisse der LSS und stützt die Hypothese einer linearen Dosis-Risiko-Beziehung. Für Leukämie zeigt die Studie im Gegensatz zur LSS eine lineare Beziehung zwischen der Dosis und dem Risiko.

#### *Empfindlichkeit von Kindern/Jugendlichen und Föten/Embryonen gegenüber einer Krebsinduktion durch Strahlung*

Ein systematischer Überblick über die Empfindlichkeit junger Personen (Kleinkinder, Kinder und Jugendliche) wird in Anhang B des 2013 veröffentlichten UNSCEAR-Berichts vermittelt [27]. Diese Analyse zeigt, dass das Verhältnis der Empfindlichkeit junger Personen zur Empfindlichkeit der Gesamtbevölkerung bei etwa 2 bis 3 liegt. Einen Einfluss auf dieses Verhältnis hat die Tatsache, dass strahleninduzierte Krebserkrankungen zu irgendeinem Zeitpunkt im Leben auftreten können. Das Verhältnis der Empfindlichkeit junger Personen zur Empfindlichkeit Erwachsener ist je nach Art der Krebserkrankung unterschiedlich. Bei 25% der Krebsarten sind junge Personen empfindlicher als Erwachsene, bei 15% ist die Empfindlichkeit gleich gross und bei 10% niedriger als bei Erwachsenen. Bei 20% der Krebsarten konnte der Unterschied zwischen jungen Personen und Erwachsenen nicht ermittelt werden und bei 30% der Krebsarten schliesslich konnte weder bei jungen Personen noch bei Erwachsenen ein ursächlicher Zusammenhang bestätigt werden. Die epidemiologischen Studien zur Empfindlichkeit junger Personen müssen einen sehr langen Zeitraum erfassen, um das ganze Leben der strahlenexponierten Personen abzudecken. Aus dieser Perspektive kann selbst mit der LSS das Risiko einer Strahlenexposition in der Kindheit über das ganze Leben gesehen bisher nicht geschätzt werden. Die Empfindlichkeit von Fötus/Embryo gegenüber der Krebsinduktion wurde bei medizinischen Bestrahlungen der Gebärmutter *in utero* untersucht [28]. Diese Studie war mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass das Risiko einer Krebsinduktion bei einer Bestrahlung *in utero* gleich gross ist wie mit der Strahlenbelastung bei einem Kleinkind, also in der Grössenordnung von 3 Mal höher als bei der Gesamtbevölkerung.

### **3.2. Verursachung von Erbschäden**

Beim Menschen wurde bisher keine vererbte Wirkung der Strahlung nachgewiesen. Weil aber die Belastung mit ionisierender Strahlung auch bei Keimzellen Mutationen verursacht, wie dies bei Tierversuchen belegt wurde, und weil Mutationen in den Keimzellen vererbbar Auswirkungen haben können, lässt sich die logische Schlussfolgerung ziehen, dass die Strahlenbelastung der Geschlechtsdrüsen beim Menschen zu vererbaren Schäden führen kann. Da keine Daten aus epidemiologischen Studien zu Erbschäden vorliegen, stützt sich die Bestimmung der Häufigkeit von Erbschäden auf Daten aus Versuchen bei Tieren, hauptsächlich bei Mäusen, und auf die Übertragung dieser Information auf den Menschen. Die entsprechenden Modelle für die Bedürfnisse des Strahlenschutzes werden in Anhang A der ICRP-Publikation 103 beschrieben.

### **3.3. Verursachung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen**

Für ein mechanistisches Modell zur Erklärung von Strahlenwirkungen auf das Herz wird eine Schädigung durch mikrovaskuläre Veränderungen vorgeschlagen. Bei der Autopsie junger verstorbener Patienten, deren Herz einer Dosis in der Grössenordnung von 35 Sv ausgesetzt war, wurde die Bildung von fasrigem Bindegewebe festgestellt. Man vermutet, dass die Kapillaren, die gegenüber Strahlung empfindlichsten Elemente der Vaskularisierung, an diesem Prozess beteiligt sind. Das Auftreten von Beschwerden des Kreislaufsystems nach einer hochdosierten Strahlenexposition wurde bei Patienten unter Strahlentherapie festgestellt. Sie scheinen in bestimmten epidemiologischen Studien auch bei mittleren Dosen aufzutreten. Die Verursachung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen wird in Anhang B des UNSCEAR-Jahresberichts 2006 [29] angesprochen. Die wichtigsten Punkte sind im Anhang des vorliegenden Berichtes aufgeführt.

Zusammenfassend zeigen einige Studien, einschliesslich der LSS, das Auftreten von Herz-Kreislauf-Erkrankungen bei Dosen unter einigen Sv. Da bisher aber keine Mechanismen bekannt sind, die für diese Wirkung verantwortlich sein könnten, verzichten UNSCEAR und ICRP gegenwärtig darauf, diese Auswirkungen in der Schätzung der Risiken schwacher Dosen zu berücksichtigen.

### **3.4. Verursachung von Katarakt**

Die Schwelle für eine Auslösung von Katarakt, der von der ICRP als deterministische Wirkung eingeschätzt wird (Geweberreaktion), wurde bisher auf 5 Sv geschätzt. In der LSS wurde jedoch ein Kataraktrisiko bereits bei Dosen unter 1 Sv festgestellt, was darauf hindeutet, dass die Schwelle tiefer als bisher angenommen liegt. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse hat die ICRP 2012 (Publikation 118) ihre Schätzung der Dosischwelle revidiert [33]. Die Schwelle liegt nun bei 0,5 Gy bei akuter oder längerer Exposition. Eine solche Schwelle schliesst die Auslösung von Katarakt bei niedrigen Dosen (< 100 mSv) aus. Folglich wird diese Wirkung bei der Einschätzung der Risiken von Strahlung im Niedrigdosisbereich nicht berücksichtigt und in diesem Bericht nicht weiter angesprochen.

### **3.5. Verursachung von angeborenen Missbildungen durch eine Strahlenbelastung von Embryonen oder Feten**

Angeborene Missbildungen betreffen hauptsächlich das zentrale Nervensystem. Das Auftreten hängt von der Dosis und vom Entwicklungsstadium des Embryos oder Fetus zum Expositionszeitpunkt ab. Es wird ausgehend von Beobachtungen im Rahmen von hochdosierten Strahlenexpositionen schwangerer Frauen und von Versuchen bei Labortieren angenommen, dass für die Auslösung dieser Wirkungen eine Dosischwelle von etwa 100 mSv besteht. Bei der Schätzung des Risikos von Niedrigstrahlung müssen diese Wirkungen also nicht berücksichtigt werden.

### 3.6. Veränderungen des Geschlechterverhältnisses bei der Geburt

In einem kürzlich erschienen Artikel [34] wurde ein Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Anzahl Knaben zur Anzahl Mädchen bei der Geburt (Geschlechterverhältnis) und einer Strahlenexposition vermutet. Die Autoren stellten eine relative Erhöhung der Anzahl Knaben nach der Exposition der Bevölkerung der nördlichen Hemisphäre mit radioaktiven Niederschlägen aufgrund von Atomtests in der Atmosphäre in den 60er-Jahren fest. Eine vergleichbare Erhöhung beobachteten sie auch in der Bevölkerung Europas nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl, sowie in der Wohnbevölkerung in der Umgebung von Kernkraftwerken in der Schweiz und Deutschland. In ihrer Stellungnahme zu dieser Studie äussert sich die ICRP sehr skeptisch gegenüber den Aussagen der Autoren, sowohl was die Existenz des Effekts als auch was dessen mögliche Ursache betrifft. Sie kommt zum Schluss, dass es keinerlei Beweis dafür gibt, dass das Geschlechterverhältnis durch ionisierende Strahlung beeinflusst wird [35].

## 4. Aktuelle Schweizer Studien

### 4.1. CANUPIS-Studie

#### *Hintergrund*

Die in Deutschland unter der Schirmherrschaft des Bundesamts für Strahlenschutz durchgeführte KiKK-Studie (Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken) veröffentlichte 2007 Ergebnisse, die eine statistisch signifikante Erhöhung von Leukämiefällen bei Kindern zeigten, die weniger als 5 Kilometer von einem Kernkraftwerk lebten. In ihren Schlussfolgerungen blieben die Autoren bei der Interpretation dieses Befundes vorsichtig: "Diese Studie kann keine Aussage darüber machen, durch welche biologischen Risikofaktoren diese Beziehung zu erklären ist". Zuvor waren bereits zahlreiche Studien zu diesem Thema durchgeführt worden, die oft unter methodologischen Schwächen litten und widersprüchliche Ergebnisse lieferten. Die KiKK-Studie, die über eine gute methodologische Basis verfügt, sorgte in der Bevölkerung für Besorgnis und brachte die Forderung auf den Tisch, das Strahlenrisiko in der Umgebung der Kernkraftwerke genauer zu untersuchen. Obwohl die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt in der Nähe von Kernkraftwerken in der Schweiz nachweist, dass die Emissionsgrenzwerte dieser Anlagen eingehalten werden und daher sichergestellt ist, dass für die Bevölkerung kein nachweisbares Strahlenrisiko besteht, haben das Bundesamt für Gesundheit und die Krebsliga Schweiz (KLS) gemeinsam das Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Bern (ISPM) damit beauftragt, die Situation in der Schweiz zu untersuchen. Die Studie mit dem Namen CANUPIS (Childhood Cancer and Nuclear Power Plants in Switzerland) wurde in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Kinderkrebsregister und der Schweizerischen Pädiatrischen Onkologie Gruppe (SPOG) durchgeführt.

#### *Organisation und Finanzierung*

Die Studie wurde im Herbst 2008 unter der Führung des ISPM lanciert. Eine Begleitgruppe, bestehend aus renommierten internationalen Expertinnen und Experten, wurde damit beauftragt, die Studie zu beobachten und die wissenschaftliche Qualität und ihre Unabhängigkeit sicherzustellen. Die Finanzierung wurde zu gleichen Teilen vom BAG und von der KLS sichergestellt. Die Elektrizitätserzeuger Axpo und BKW haben den Teil des BAG mitfinanziert, ohne jedoch einen Einfluss auf die Bedingungen, die Durchführung und die Auswertung der Studie ausüben zu können.

#### *Studienprofil*

Die CANUPIS-Studie ist im Gegensatz zur Fall-Kontrollstudie KiKK eine Kohortenstudie, die auf Befragungen basiert. Die Befragung betraf alle zwischen 1985 und 2009 in der Schweiz geborenen Kinder von 0 bis 15 Jahren. Die Leukämierate von Kindern, die weniger als 5 km, zwischen 5 und 10 km bzw. zwischen 10 und 15 km von einem Kernkraftwerk entfernt geboren waren, wurde mittels

relativem Risiko (RR) verglichen mit Kindern ausserhalb des Umkreises von 15 km. Die Gesamtzahl der Kinder mit einem Krebsleiden lag bei 2925 Fällen, von denen 953 von Leukämie betroffen waren. Es wurde der Wohnort der Kinder zum Zeitpunkt der Geburt und zum Zeitpunkt der Diagnose und damit ihre jeweilige Distanz zu einem Kernkraftwerk erfasst. Zahlreiche Störfaktoren wurden bei der Evaluation berücksichtigt und ihr Einfluss auf die Ergebnisse der Studie konnte ausgeschlossen werden. Zu diesen Störfaktoren gehörten in erster Linie die natürliche Strahlung, die Nähe zu Hochspannungsleitungen und Verkehrsachsen, die Belastung mit landwirtschaftlichen Pestiziden und der sozioökonomische Status.

#### *Ergebnisse und Diskussion*

Für alle Alterskategorien und bei allen Entfernungen von den KKW, wurden zum Zeitpunkt der Geburt oder der Diagnose, keine signifikanten Effekte gefunden, obwohl ein Trend für Kinder unter 5 Jahren, die im Umkreis von 5 km von einem Kernkraftwerk leben, zu beobachten ist. Ein Zusammenhang mit der Entfernung zum Kernkraftwerk wurde daher nicht hervorgehoben. Die Berücksichtigung von Störfaktoren und Sensitivitätsanalysen bestätigten diese Ergebnisse.

Gemäss dem in der Fachzeitschrift *International Journal of Epidemiology* veröffentlichten Artikel stützt sich die Studie auf qualitativ hochstehendes epidemiologisches Material, das vom Schweizer Kinderkrebsregister und der Schweizerischen Pädiatrischen Onkologie Gruppe zur Verfügung gestellt wurde, und auf einen methodologisch soliden Ansatz. Der wichtigste Schwachpunkt ist die fehlende statistische Aussagekraft. Auf diesen Aspekt wies der Präsident der KSR in seinem Vorwort zum Tätigkeitsbericht 2008 hin: «Dabei wurde von der Kommission empfohlen, im Voraus zu überprüfen, ob eine statistisch gesicherte Aussage allein mit den Schweizer Daten oder erst zusammen mit den Daten anderer Nachbarländer erreicht werden kann.» Es musste also nicht nur mit nicht-signifikanten Ergebnissen gerechnet werden, sondern auch mit relativ breiten Konfidenzintervallen zu diesen Ergebnissen. Trotzdem war es sinnvoll, diese Studie durchzuführen, denn der eigentliche Anlass war die Besorgnis über die Ergebnisse der KiKK, die für das Leukämierisiko bei Kindern unter 5 Jahren, die in einer Entfernung von weniger als 5 km von einem Kernkraftwerk wohnten, eine statistisch signifikante Erhöhung um einen Faktor 2 ergeben hatte.

#### *Schlussfolgerungen*

Die CANUPIS-Studie deutet nicht auf eine Erhöhung der Häufigkeit von Tumoren und Leukämie bei Kindern in der Nähe von Kernkraftwerken in der Schweiz im Vergleich zu weiter entfernt wohnenden Kindern. Dieses Ergebnis entspricht den Resultaten der Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und den Schätzungen der Risiken auf der Grundlage des internationalen Konsenses im Strahlenschutz. CANUPIS gehört damit zu den in Anhang B des UNSCEAR-Berichts 2013 aufgeführten Studien, die zur Schlussfolgerung beigetragen haben, dass weltweit kein erhöhtes Leukämierisiko bei Kindern unter 15 Jahren in der Nähe von Kernkraftwerken besteht. Die KSR weist in ihrer Stellungnahme [36] darauf hin, «dass sich das Ausbleiben eines Effekts bei Studien dieses Typs nie nachweisen lässt, ungeachtet der Grösse der berücksichtigten Bevölkerung». Tatsächlich ist ein fehlender Nachweis eines Risikos kein Nachweis, dass kein Risiko besteht. Wenn allerdings ein Risiko besteht, dürfte es sehr niedrig sein, weil es von der Studie nicht nachgewiesen wird. CANUPIS untersucht ausserdem ausschliesslich die Folgen eines normalen Betriebs der Kernkraftwerke und befasst sich weder mit den Risiken bei Betriebsstörungen noch mit deren Folgen, die katastrophal sein können, wie dies die Reaktorunfälle von Tschernobyl und Fukushima gezeigt haben.

## **4.2. Studie zur Krebsinduktion durch natürliche Strahlung**

### *Hintergrund*

Auf der Grundlage der Daten, die im Rahmen der CANUPIS-Studie zusammengetragen wurden, insbesondere zur Geolokalisierung der Kinder mit Krebserkrankungen, hat das ISPM eine vom BAG mitfinanzierte Studie lanciert, mit der untersucht werden soll, in welchem Masse die natürliche Strahlung in der Schweiz zum Krebsrisiko bei Kindern beiträgt.

*Studienprofil*

Es wurde dieselbe Methodologie zur epidemiologischen Erhebung wie bei der CANUPIS-Studie verwendet. Der Risikofaktor ist jedoch nicht die Distanz zum Kernkraftwerk sondern die Ortsdosisleistung aufgrund von Gammastrahlung aus dem Boden und kosmischer Strahlung. Es wurden 1782 Krebsfälle erfasst, darunter 530 Leukämie-Fälle.

*Ergebnisse und Diskussion*

Die Ergebnisse zeigen ein signifikant erhöhtes Risiko für alle Krebserkrankungen. Die Berücksichtigung von Störfaktoren bestätigte die Ergebnisse. Wie die CANUPIS-Studie stützt sich auch diese Studie auf qualitativ hoch stehendes epidemiologisches Material und beruht auf einer sehr soliden methodologischen Grundlage. Sie weist jedoch zwei Schwächen auf, aufgrund derer die Ergebnisse relativiert werden müssen. Die erste Schwäche besteht in der Zuordnung der Dosis ausgehend von einer geografischen Analyse und nicht auf einer individuellen Basis. Ausserdem werden die anderen Expositionswege der Personen nicht berücksichtigt, wie die Inhalation von Radon oder medizinische Strahlenanwendungen. Dies sind bedeutende Beiträge zur Strahlenbelastung der Bevölkerung im Vergleich zur externen natürlichen Exposition. Die zweite Schwäche betrifft die Problematik der Kausalität. Die Autoren der Studie sind in diesem Punkt relativ vorsichtig, indem sie festhalten, dass ein ursächlicher Zusammenhang mit ionisierender Strahlung plausibel ist. Wie die KSR festhält, beruht die statistische Signifikanz im Wesentlichen auf 29 Fällen von Krebs bei Kindern, die in der Höhe wohnten. Dies legt die Vermutung nahe, dass andere Faktoren für die beobachtete Wirkung verantwortlich sein könnten.

*Schlussfolgerungen*

Die Studie weist eine sehr schwach signifikante Erhöhung des Risikos für die Gesamtheit der Krebserkrankungen, für Leukämie und für Hirntumore nach. Wie die KSR in ihrer Stellungnahme festhält [37] sind die festgestellten Risiken mit allen bisher erschienenen Studien vereinbar, weil diese mit grossen Unsicherheiten verbunden sind. Die ermittelten Risiken sind allerdings deutlich höher als jene der LSS. Selbst wenn diese Art Studie die Frage der Strahlenwirkungen bei schwachen aber chronischen Expositionen nicht abschliessend beantworten kann, ist die Studie doch interessant, weil sie in diesem Bereich eine neue Richtung einschlägt. In zukünftigen Studien sollte versucht werden, die gesamte Geschichte der Wohnorte zu berücksichtigen, um die Evaluation des Risikos im Zusammenhang mit der natürlichen Strahlenexposition von Kindern zu verbessern.

**4.3. Studie zur interventionellen Radiologie***Hintergrund*

Die interventionelle Radiologie hat sich in den letzten Jahrzehnten stark entwickelt. Seit den 2010er-Jahren wurden verschiedene Studien veröffentlicht, die auf ein erhöhtes Kataraktrisiko von Kardiologen hinweisen, die interventionelle Radiologie anwenden, was zu einer Sensibilisierung des Personals geführt hat. Auch auf eine mögliche Erhöhung des Risikos von Hirntumoren bei Kardiologen, die interventionelle Radiologie anwenden, wurde in verschiedenen wissenschaftlichen Publikationen hingewiesen. Ende 2012 initiierte und finanzierte das BAG deshalb eine Studie, die einerseits die Dosen untersuchte, denen die medizinischen Fachpersonen bei der Anwendung der interventionellen Kardiologie ausgesetzt sind, und die andererseits das Risiko einer Induktion von Katarakt und Hirntumoren schätzte.

*Organisation der Studie*

Für den dosimetrischen Teil der Studie wurde das Institut für Strahlenphysik (IRA) des Universitätsspitals Lausanne beauftragt und für die Schätzung des Risikos der Induktion von Katarakt und Hirntumoren das Center for research in environmental epidemiology (CREAL) in Barcelona.

### *Ergebnisse und Diskussion*

Die Messkampagne zu den Dosen, denen Kardiologen in klinischen Situationen ausgesetzt sind, wurde in drei Zentren in der Westschweiz durchgeführt. Die Messungen zeigten unter anderem, dass die Dosen durch die individuelle Technik der Kardiologen und den Einsatz von Schutzmitteln (Schutzwand, Bleischürze) begrenzt werden können. Die an Phantomen durchgeführten Messungen ergaben eine ausgeprägte Asymmetrie der Exposition zwischen der linken und rechten Seite der Kardiologen. Ausserdem konnte das Verhältnis zwischen der Gehirn- und der Augendosis berechnet werden. Zur Schätzung des Risikos einer Kataraktinduktion wurde ein stochastisches Modell mit linearer Extrapolation des Risikofaktors bei 1Sv hin zu niedrigen Dosen eingesetzt. Zur Risikoabschätzung der Hirntumorinduktion wurden die in der LSS festgestellten Risikofaktoren, die je nach Tumortyp variieren, verwendet. Das anteilmässige Risiko (im Vergleich zum normalen Risiko) über das ganze Leben wurde abgeleitet (LFR, Lifetime Fractional Risk). Es wurde ein Informatikwerkzeug entwickelt, mit dem ein Kardiologe die erhaltene Dosis und das damit verbundene Risiko der Entwicklung eines Katarakts bzw. eines Hirntumors berechnen kann [38].

### *Schlussfolgerungen*

Die Studie bestätigt, dass medizinisches Fachpersonal, das interventionelle Radiologie anwendet, in besonderem Masse ionisierender Strahlung ausgesetzt ist. Die von CREAL entwickelte Software vermittelt den Betroffenen eine Idee von den Risiken, die mit ihrer Belastung im Rahmen der radiologischen Tätigkeit verbunden sind.

## **4.4. Weitere Studien**

### *Studie zum Krebsrisiko bei Kindern aufgrund der Radonexposition zu Hause*

In seiner 2013 veröffentlichten Studie hat das Schweizerische Tropen- und Public-Health-Institut (Swiss TPH) die Beziehung zwischen Krebserkrankungen von Kindern und der Radonbelastung in der Schweiz untersucht [39]. Die Studie stützt sich auf Daten aus Erhebungen und umfasst 1,3 Millionen Kinder unter 16 Jahren und etwa 1000 Krebsfälle. Für die Radonexposition wurden Daten der vom BAG betriebenen zentralen Radondatenbank verwendet. Die Analyse ergibt also keinen Zusammenhang zwischen dem Krebsrisiko und der Radonexposition zu Hause. Die Studie stützt sich auf epidemiologisches Datenmaterial hoher Qualität und beruht auf einer sehr soliden methodologischen Grundlage. Dass die Dosis auf der Grundlage des geografischen Orts geschätzt und nicht individuell gemessen wurde, macht die Studie anfällig gegenüber einer Verzerrung und Störfaktoren.

### *Studie zum radonbedingten Risiko von Hautkrebs bei Erwachsenen*

Von derselben Forschungsgruppe wurde eine epidemiologische Studie veröffentlicht, welche die Beziehung zwischen einer UV-Strahlen- und Radonexposition und der Inzidenz von Hautkrebs in der Schweizer Bevölkerung untersucht [40]. Sie beruht auf den Daten der SNC (Swiss National Cohort), einer nationalen Plattform für Longitudinalstudien, welche die Erhebungsdaten mit den Daten zu Geburt, Mortalität und Emigration verknüpft. Die Sammlung umfasst Daten zu 5,2 Millionen Erwachsenen (Durchschnittsalter 48 Jahre) und etwa 3000 Todesfälle wegen Hautkrebs, darunter 1900 Melanome. Die Analyse belegt also einen signifikanten Zusammenhang zwischen Hautkrebs bei Erwachsenen und der Radonbelastung. Wie in der oben erwähnten Studie zu Krebserkrankungen bei Kindern, beruht auch diese Arbeit auf einem soliden Ansatz, obwohl auch hier die Dosis aufgrund des geografischen Standorts bestimmt wurde und nicht durch eine individuelle Schätzung, wodurch ein beträchtliches Risiko von Verzerrungen und Störfaktoren besteht. Der Nachweis eines Zusammenhangs ist deshalb wenig aussagekräftig.

## 5. Schätzung des Risikos für den Strahlenschutz

### *Hintergrund*

Das Ziel des Vorgehens ist es, die Schätzung des Risikos auf der Grundlage der Ergebnisse der epidemiologischen Studien zu strukturieren und zu formalisieren. Um die bestehenden Wissenslücken zu füllen, sind zahlreiche Extrapolationen und Interpretationen erforderlich. Dieses Vorgehen stützt sich soweit möglich auf die Kenntnisse über die Mechanismen der Wirkung von Strahlen auf biologischer Ebene. Verwendet wird dabei Wissen aus der Radiobiologie und Epidemiologie. Die nachfolgende Darstellung gründet im Wesentlichen auf den neuesten Empfehlungen der ICRP in der Publikation 103.

### *Extrapolation der Risiken auf den Niedrigdosisbereich*

Mit epidemiologischen Studien kann das mit Strahlung verbundene Risiko bei Dosen über 100 mSv geschätzt werden. Für das Risiko bei niedrigen Dosen ist jedoch eine Extrapolationsmethode erforderlich. Das von der ICRP angewendete lineare Modell ohne Schwellenwert (linear no threshold, LNT), das eine lineare Beziehung zwischen Risiko und Dosis annimmt, ohne dass die Dosis einen Schwellenwert überschreiten muss, beruht auf radiobiologischen Annahmen (Unabhängigkeit der betroffenen Zellen, Wahrscheinlichkeit fehlerhafter Reparatur bei primären Schäden).

Dieses Modell wird kontrovers diskutiert [41]. Einige Untersuchungen kommen zum Schluss, dass die lineare Extrapolation des Risikos von hohen zu tiefen Dosen das Risiko überschätzt und sprechen sich für einen Schwellenwert aus, unter dem die Strahlung harmlos ist oder sich sogar positiv auf die Gesundheit auswirkt. (Hormesis). In anderen wird darauf hingewiesen, dass die in jüngster Zeit beobachteten Effekte, wie die genomische Instabilität und der Bystander-Effekt, unterschätzt werden und dass tiefe Strahlendosen schädlicher sein könnten, als vom LNT-Modell nahegelegt. In ihrer Stellungnahme von 2014 hat die KSR die Argumente für und gegen das LNT-Modell untersucht. Sie kommt zum Schluss, dass im Hinblick auf das Vorsorgeprinzip das LNT-Modell das beste Instrument für den Umgang mit Risiken im Zusammenhang mit einer Strahlenexposition bleibt.

### *Festlegung des Dosiskoeffizienten für Wirkungen bei niedrigen Dosen und Ortsdosisleistungen*

Die ICRP schlägt eine Schätzung des nominellen Risikokoeffizienten (die Erhöhung des Risikos pro Einheit Dosiserhöhung). Ausgehend vom Risikokoeffizienten bei einer hohen Dosis über 100 mSv, der hauptsächlich aus den Daten der LSS abgeleitet wurde, schlägt die ICRP eine Reduktion vor, welche die hohe Kapazität der Zelle zur Reparatur von Schäden bei niedrigen Dosen und niedrigen Ortsdosisleistungen berücksichtigt. Dieser Reduktionsfaktor (Dose and Doserate Reduction Factor, DDREF) wird von der ICRP auf den Wert 2 geschätzt. Die Ergebnisse der aktuellen Publikation zur INWORKS-Studie stellen die Gültigkeit dieses Ansatzes jedoch in Frage und sprechen gegen eine Anwendung des DDREF [42].

### *Übertragung des Risikos von einer Bevölkerungsgruppe auf eine andere*

Die in der LSS-Studie geschätzten Risikofaktoren betreffen die japanische Bevölkerung. Da die natürliche Inzidenz von Krebserkrankungen je nach Bevölkerung unterschiedlich ist, muss für die Übertragung der bei der japanischen Bevölkerung berechneten Risikofaktoren auf eine andere Bevölkerung entweder von einem konstanten relativen Risiko oder von einem konstanten absoluten Risiko zwischen den beiden Bevölkerungen ausgegangen werden. Es werden differenzierte Modelle angewendet, welche die Dynamik der Krebsentwicklung berücksichtigen.

### *Wirkungen verschiedener Strahlungen*

Die biologischen Wirkungen von Strahlen hängen von der Art der Strahlung ab. In den meisten Fällen, in denen wir aufgrund epidemiologischer Studien über Risikofaktoren verfügen, handelt sich um Gammastrahlung. Die relative biologische Wirksamkeit der anderen Strahlungen (Alpha-, Beta-, Neutronenstrahlung), die auf der Basis von strahlenbiologischen Versuchen ermittelt wurde, fließt direkt in die Berechnung der effektiven Dosis ein.

### *Relative Empfindlichkeit der verschiedenen Organe*

Die ICRP bezeichnet vierzehn Organe, die hinsichtlich des Strahlenrisikos besonders relevant sind. Zur Bestimmung der effektiven Dosis wird der relative Beitrag dieser Organe herangezogen, der sich aus der Empfindlichkeit der Organe ergibt.

### *Effektive Dosis und nominelle Risikokoeffizienten*

Die repräsentative Grösse für das Strahlenrisiko ist die effektive Dosis, die in Sievert (Sv) gemessen wird. Sie wird errechnet aus der Exposition der verschiedenen Organe, wobei einerseits die biologische Wirksamkeit der beteiligten Strahlung und andererseits die relative Empfindlichkeit der Organe berücksichtigt werden. Es wurden nominelle Risikokoeffizienten für das Risiko von Krebserkrankungen und von Erbschäden für die gesamte Bevölkerung und für beruflich strahlenexponierten Personen bestimmt (Tabelle 1).

Tabelle 1. Risikokoeffizienten

	Bevölkerung	beruflich strahlenexp. Personen
Risiko pro Sv für Krebs	5,5 %	4,1 %
Risiko pro Sv für erbliche Effekte	0,2 %	0,1 %

Diese Koeffizienten sind die Grundlage für die Festlegung von Dosisgrenzwerten im Rahmen des Strahlenschutzes, nämlich ein Dosisgrenzwert von 1 mSv pro Jahr für die Bevölkerung und von 20 mSv pro Jahr für beruflich strahlenexponierte Personen.

### *Schutz der Umwelt*

In ihren 1990 herausgegebenen Empfehlungen [43] hält die ICRP fest, dass die Kriterien für die Überwachung der Umwelt, die den Schutz des Menschen gewährleisten, gleichzeitig auch sicherstellen, dass die anderen Arten nicht gefährdet werden. Seit den 2000er-Jahren hat es sich wegen dem wieder auflebenden Interesse am Schutz der Umwelt als notwendig erwiesen, dass spezifischere Ratgeber und Richtlinien erstellt werden. Die Strahlenschutzakteure sehen sich in zunehmendem Masse mit der Forderung konfrontiert, direkt und explizit nachzuweisen, dass die Umwelt bei der Anwendung ionisierender Strahlen ausreichend geschützt ist. In diesem Kontext hat die CIPR entschieden, einen transparenten Rahmen für die nationale und internationale Gesetzgebung zur Verfügung zu stellen, mit dem Risiken von Strahlung für andere Lebewesen als den Menschen geprüft und bewältigt werden können. Die Ziele des Schutzes der Umwelt vor Strahlung bestehen darin, schädliche Wirkungen zu verhindern oder ihre Häufigkeit so stark zu reduzieren, dass sie einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Erhalt der Biodiversität, den Artenschutz, den Schutz des Zustands natürlicher Habitate und die Gesundheit von Lebensgemeinschaften und Ökosystemen haben. Die für das Erreichen dieser Ziele zu untersuchenden biologischen Wirkungen sind nicht dieselben wie für den Menschen. Sie betreffen eher die Mortalität, die Morbidität und die Reduktion der Fortpflanzungsfähigkeit und nicht einzelne Individuen sondern biologische Gruppen (in einem bestimmten Gebiet lebende Tier- und Pflanzenarten). Auf der Grundlage einer Literaturübersicht zu den biologischen Wirkungen hat die ICRP im Hinblick auf diese drei Parameter und auf Chromosomenschäden spezifische Dosen für verschiedene Arten festgelegt, die zu berücksichtigen sind [44]. Der UNSCEAR-Bericht 2008 enthält ausserdem einen Anhang zu diesem Thema [45].

## **6. Beurteilung des Kenntnisstands und der Umsetzung des Wissens**

### **6.1. Kenntnisstand betreffend Wirkmechanismen auf biologischer Ebene**

Allein aufgrund des Wissens über die Wirkmechanismen auf biologischer Ebene lassen sich die mit Strahlung verbundenen Risiken nicht einschätzen. Dieses Wissen ermöglicht jedoch die Interpretation und Extrapolation der Ergebnisse epidemiologischer Studien. Das Verständnis des Grundmechanismus der Wirkung von Strahlen auf Zellebene scheint gut etabliert zu sein. Zahlreiche Aspekte sind jedoch noch genauer abzuklären, namentlich die Verursachung von DNA-Schäden und die entsprechenden Reparaturmechanismen, die einzelnen Schritte von der bestrahlten Zelle bis zur Entwicklung eines Tumors und die Richtigkeit der in Kapitel 2.1 zur Krebsinduktion aufgeführten spezifischen Wirkungen. Die aufgeworfenen Probleme betreffen oft Wissen über zelluläre Mechanismen unabhängig von den Strahlenwirkungen. Die Anwendung neuer Forschungsmethoden in der Biologie im Zusammenhang mit der Radiobiologie (Expression spezifischer Gene, Synthese bestimmter Proteine, Interaktionen auf Zellebene, Phänomene auf Gewebeebene, Ansatz der Systembiologie) sollten interessante Fortschritte ermöglichen.

### **6.2. Kenntnisstand betreffend Strahlenrisiken aufgrund epidemiologischer Studien**

Die Abschätzung der Strahlenrisiken auf der Grundlage epidemiologischer Studien ist gut etabliert. Die LSS ermöglicht eine Schätzung der Risiken von Krebserkrankungen bei einer einmaligen hoch dosierten Exposition für verschiedene Orte und für die beiden Geschlechter sowie eine Schätzung der Abhängigkeit dieser Risiken vom Alter zum Zeitpunkt der Exposition und vom erreichten Alter. Die meisten anderen Studien stützen die LNT-Hypothese, namentlich die Studien zu den Kohorten der Beschäftigten in der Kernenergiebranche (INWORKS), welche für die Annahme sprechen, dass sich diese Risiken durch Interpolation auf geringere Dosen und Dosisleistungen übertragen lassen. Wie nützlich die Ergebnisse einer epidemiologischen Studie sind, wird durch ihre statistische Aussagekraft und ihre methodologische Qualität bestimmt, aufgrund derer Verzerrungen vermieden und Störfaktoren ausgeklammert werden können. Angesichts des grossen Aufwands für eine epidemiologische Studie, die diese Anforderungen erfüllt, ist die Qualität stärker zu gewichten als die Quantität der Studien. Die Bemühungen in den nächsten Jahren sollten sich auf die Fortführung der laufenden grossen Studien konzentrieren, insbesondere im Hinblick auf die Bestätigung der Schätzungen zu den langfristigen Risiken einer Exposition, auf die Entwicklung prospektiver Studien zu den strahlenexponierten medizinischen Fachpersonen und auf punktuelle Studien, die einen besonderen Aspekt der strahlenbedingten Risiken klären, beispielsweise die Untersuchung der Äquivalenz externer und interner Strahlenbelastung oder der Vergleich der Wirkungen der unterschiedlichen Strahlungen. Eine mögliche Entwicklung in den kommenden Jahren ist auch die Abstimmung zwischen epidemiologischer und biologischer Forschung, zum Beispiel die Umsetzung epidemiologischer Studien, die zelluläre Parameter berücksichtigen.

### **6.3. Kenntnisstand betreffend Schätzung der Risiken im Strahlenschutz**

Die Modellierung der Risiken für die Bedürfnisse des Strahlenschutzes stützt sich auf eine solide Basis und nutzt das in epidemiologischen Studien gewonnene Wissen optimal, indem die biologischen

Mechanismen berücksichtigt werden. Eine radikale Verbesserung dieser Modellierung aufgrund aktueller epidemiologischer und biologischer Erkenntnisse ist schwer vorstellbar.

Der kritische Punkt bleibt die Extrapolation auf den Niedrigdosisbereich. Gemäss dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist das LNT-Modell dazu eindeutig am besten geeignet.

Der Ansatz, ein generisches Modell zu den Risiken zu verwenden (Entwicklung der effektiven Dosis), das vom Alter und Geschlecht unabhängig ist, lässt sich mit den grossen Unsicherheiten aufgrund der Risikofaktoren rechtfertigen. Für die individuelle Beurteilung des Risikos ist die Berücksichtigung von Geschlecht und Alter jedoch wichtig. Insbesondere im Falle einer Inkorporation muss zur Schätzung des Risikos die Aufteilung des Risikos auf die verschiedenen Organe berücksichtigt werden. Hier befinden wir uns allerdings ausgehend von unseren gegenwärtig verfügbaren Kenntnissen an den Grenzen einer sinnvollen Modellierung.

Ein Punkt bleibt bei der Schätzung des Risikos weiterhin ungeklärt: die Wirkungen auf das Herz-Kreislauf-System. Es ist schwierig abzuschätzen, ob diese Wirkungen zu berücksichtigen sind, weil kein biologischer Wirkmechanismus bekannt ist. Gemäss aktuellen Schätzungen müsste der Strahlenrisikofaktor etwa verdoppelt werden.

## **7. Zukünftige Beteiligung der Schweiz**

### **7.1. Bereich Radiobiologie**

Das Institut für Medizinische Radiobiologie IMR der Universität Zürich und des Paul Scherrer Instituts (Vormals Strahlenbiologisches Institut der Universität Zürich) betrieb in der Vergangenheit Grundlagenforschung im Bereich der Strahlenbiologie. Dieses Institut wurde 1996 geschlossen. Parallel dazu wurden an den Abteilungen für Strahlentherapie der medizinischen Fakultäten verschiedener Universitäten Forschungsgruppen ins Leben gerufen. Diese Forschungsgruppen befassen sich aber eher mit klinischen Aspekten (Mechanismen der Behandlung von Tumorerkrankungen) und nicht direkt mit den Wirkungen von Niedrigstrahlung. In der gegenwärtigen Situation ist die Schweiz deshalb nicht in der Lage, aktiv zur Forschung im Bereich der biologischen Auswirkungen von Strahlung im Niedrigdosisbereich beizutragen. Es ist jedoch wichtig, die Kompetenzen zu erhalten, mit denen die aktuellen Arbeiten auf internationaler Ebene mitverfolgt werden können, beispielsweise durch die Mitarbeit in Organisationen, welche die Weiterentwicklung des Strahlenschutzes fördern, namentlich im UNSCEAR und in der ICRP, sowie in der auf europäischer Ebene tätigen Koordinationsgruppe der Forschung im Bereich Radiobiologie (MELODI).

### **7.2. Bereich Epidemiologie**

Die Ergebnisse der aktuellen in der Schweiz durchgeführten epidemiologischen Studien (siehe Kapitel 4) sind zweifellos interessant und beruhigten die in der Umgebung von Kernkraftwerken lebende Bevölkerung. Die statistische Aussagekraft dieser Studien war allerdings beschränkt. Die Entwicklung epidemiologischer Studien auf nationaler Ebene ist schwierig, weil für eine ausreichende statistische Aussagekraft eine grosse Zahl von Studienteilnehmenden erforderlich ist. Aus diesem Grund sollte sich die Schweiz eher auf die Teilnahme an internationalen Studien ausrichten. Seit 2013 engagiert sich das BAG im Rahmen einer Kommission der französischen Behörde für nukleare Sicherheit (ASN) an der Nachverfolgung von Leukämiefällen. Die aktive Mitarbeit an internationalen Gruppen, die neue Studien lancieren, wie das Strahlenschutzforschungsprogramm CONCERT (European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research), ist ebenfalls von grossem Interesse für die Schweiz und ermöglicht einen effizienten Rückfluss von Informationen. In diesem Rahmen beteiligt sich das BAG an der Finanzierung von Projekten, in die Schweizer Universitätsspitäler eingebunden sind.

### **7.3. Bereich der Risikoschätzung für den Strahlenschutz**

Die Beteiligung der Schweiz an der internationalen Diskussion ist wichtig, damit ihre Kenntnisse im Bereich der radiologischen Risiken und des Strahlenschutzes im Allgemeinen auf dem neuesten Stand bleibt. Auf diesem Wissen beruht das internationale Strahlenschutzsystem der ICRP, das auf nationaler Ebene herangezogen wird. Diese Zusammenarbeit erfolgt hauptsächlich im Rahmen des internationalen Dispositivs zur Einschätzung der wissenschaftlichen Aspekte der Beurteilung von Wirkungen ionisierender Strahlung.

Die Schweiz trägt deshalb aktiv zu der vom UNSCEAR organisierten Erfassung von Expositionen bei und seit 2016 gehört ein Vertreter des BAG zur deutschen Delegation in diesem Ausschuss.

Die ICRP ist das internationale Organ, welches die Strategie des Strahlenschutzes ausarbeitet. Der Leiter des Instituts für Strahlenphysik des Universitätsspitals Lausanne und Präsident der KSR ist persönlich Mitglied der Kommission 4 der ICRP, die für die Anwendung der ICRP-Empfehlungen verantwortlich ist. Diese Beteiligung ist sehr wertvoll, da sie einen raschen und effizienten Informationsaustausch zwischen der Schweiz und der ICRP ermöglicht. Es sollten Überlegungen dazu angestellt werden, wie diese Zusammenarbeit in Zukunft weitergeführt werden kann.

Im Bereich der Bestimmungen, in dem sich die Forschung und die strategische Überlegungen zum Strahlenschutz konkretisieren, ist die IAEO auf internationaler Ebene damit betraut, Normen und Leitfaden der Guten Praxis auszuarbeiten. Die Schweiz nimmt aktiv an Ad-hoc-Arbeitsgruppen dieser Organisation teil und beteiligt sich an den Beratungen im Zusammenhang mit neuen Normen. Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) ist die offizielle Verbindung zur IAEO. Diese Zusammenarbeit ist wichtig, um eine minimale Kompatibilität der nationalen Gesetzgebungen im Bereich Strahlenschutz zu gewährleisten.

Im Gesundheitsbereich stellt das BAG, das 2014 zum Kooperationszentrum ernannt wurde, die Verbindung zur WHO sicher. Diese Tätigkeit des BAG orientiert sich an der entsprechenden Strategie in diesem Bereich des internationalen Gesundheitswesens.

## 8. Schlussfolgerungen

Die Grundmechanismen der Wirkung von Strahlen auf biologischer Ebene sind relativ gut bekannt. Einige Wirkungen im Niedrigdosisbereich sind noch nicht ausreichend aufgeklärt, um in die Strategie des Strahlenschutzes einbezogen zu werden. Die Forschungsbemühungen in diesem Bereich müssen fortgesetzt werden.

Aus epidemiologischen Studien lassen sich wichtige Informationen gewinnen, die für die Schätzung des Strahlenrisikos unerlässlich sind. In diesem Zusammenhang ist es wichtig folgende Kohorten (Überlebende nach den Atombombenabwürfen über Hiroshima und Nagasaki, Beschäftigte in der Kernenergiebranche, Bevölkerung in der Nähe von Reaktorunfällen, Patienten mit hoher Strahlenexposition im Rahmen radiologischer Untersuchungen) weiter zu beobachten. Vor der Lancierung neuer Studien müssen diese sehr kritisch hinsichtlich ihrer statistischen Aussagekraft und ihrer methodologischen Qualität geprüft werden. Unter diesem Gesichtspunkt haben länderübergreifende Studien bessere Chancen, aussagekräftige Erkenntnisse zu liefern, als Studien eines kleinen Landes wie die Schweiz.

Die Schätzung des Strahlenrisikos im Hinblick auf den Strahlenschutz beruht einerseits auf dem Wissen über die Wirkungen von Strahlen auf biologischer Ebene und andererseits auf den Ergebnissen epidemiologischer Studien. Auf diese Weise lässt sich eine realistische Schätzung des Risikos vornehmen, die sich trotz bestimmter Wissenslücken auf ein lineares Modell ohne Schwellenwert (LNT) stützt, wie es im gegenwärtig gültigen Strahlenschutzsystem in der Schweiz angenommen wird. Somit gibt es keine Schwellendosis, unter der die Unschädlichkeit einer Exposition, wie gering auch immer, nachgewiesen ist. Die Belege für mögliche positive Effekte (Hormesis) tiefer Strahlendosen oder andererseits ihrer grösseren Schädlichkeit als es das LNT-Modell nahelegt sind gegenwärtig unzureichend.

Die Berücksichtigung der kürzlich beobachteten Effekte, wie die genomische Instabilität und der Bystander-Effekt bei der Krebsauslösung, wie auch die Wirkung der Strahlung bei Herzkreislauferkrankungen stellen für die Abschätzung des Strahlenrisikos eine Herausforderung für die kommenden Jahre dar.

Die direkte Beteiligung der Schweiz im Bereich der Radiobiologie und Strahlenepidemiologie ist relativ begrenzt. Sie verfügt seit Jahren nicht mehr über ein spezialisiertes Institut für Strahlenbiologie, das direkt zu den Forschungsbemühungen zur Aufklärung der Wirkmechanismen von Strahlung auf biologischer Ebene beitragen könnte. Andererseits müssen epidemiologische Studien umfangreiche Kohorten von Personen umfassen, die bedeutenden Strahlendosen ausgesetzt waren, und solche Kohorten sind in der Schweiz im Allgemeinen nicht verfügbar. Wesentliche Vorteile in der Schweiz sind dagegen die Verfügbarkeit von Werkzeugen wie das Schweizer Kinderkrebsregister sowie von Informationen beispielsweise über den Wohnort zum Zeitpunkt der Geburt, die in anderen Ländern kaum in Erfahrung zu bringen sind.

Der indirekte Beitrag der Schweiz zur Vervollständigung des Wissens über die Risiken von Niedrigstrahlung konzentriert sich auf zwei Achsen: einerseits auf die Unterstützung internationaler Organisationen, die sich mit der Erarbeitung des Wissens, der Koordination von Programmen und strategischen Überlegungen im Zusammenhang mit Strahlenrisiken befassen, sowie auf die Mitarbeit in diesen Organisationen, andererseits auf die punktuelle Unterstützung von Forschungsarbeiten in der Radiobiologie und die Beteiligung an länderübergreifenden epidemiologischen Studien.

Dieser Beitrag der Schweiz spielt eine wichtige Rolle bei der Erhaltung der Kompetenzen im Bereich der Risiken von Strahlung für Gesundheit und Umwelt, namentlich im Hinblick auf die Lagerung radioaktiver Abfälle.

## 9. Abkürzungen

IAEO: Internationale Atomenergie-Organisation  
 ICRP: Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection)  
 KSR: Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz  
 ISPM: Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Bern  
 KLS: Krebsliga Schweiz  
 BAG: Bundesamt für Gesundheit  
 WHO: Weltgesundheitsorganisation  
 UNSCEAR: Wissenschaftlicher Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung  
 PSI: Paul Scherrer Institut  
 CANUPIS: Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland  
 UNO: Vereinte Nationen  
 DNA: Desoxyribonukleinsäure  
 DSB: Doppelstrangbruch  
 ERR: zusätzliches relatives Risiko (Excess Relative Risk)  
 EAR: zusätzliches absolutes Risiko (Excess Absolute Risk)  
 LNT: Linear No Threshold  
 LSS: Life Span Study  
 RERF: Radiation Effects Research Foundation  
 IRA, CHUV: Institut für Strahlenphysik des Universitätsspitals Lausanne  
 CONCERT: European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research  
 ENSI: Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat

## 10. Bibliographie

1. Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique. ICRP Publication 103. Pergamon Press, Oxford, UK. [http://www.icrp.org/docs/P103\\_French.pdf](http://www.icrp.org/docs/P103_French.pdf)
2. Principes fondamentaux de sûreté, collection Normes de sûreté n° SF-1, AIEA, Vienne (2007). [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1273\\_F\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1273_F_web.pdf)
3. WHO Expert Group report « Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes: Report of the UN Chernobyl Forum Health Expert Group, Editors Burton Bennett, Michael Repacholi and Zhanat Carr, World Health Organization, Geneva, 2006. [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/43447/1/9241594179\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/43447/1/9241594179_eng.pdf)
4. Évaluation des risques pour la santé de l'accident nucléaire survenu après le grand tremblement de terre et le tsunami qui ont touché l'est du Japon en 2011. [http://www.who.int/phe/publications/fukushima\\_risk\\_assessment\\_2013/fr/](http://www.who.int/phe/publications/fukushima_risk_assessment_2013/fr/)
5. Rapport UNSCEAR 2001, Annexe: Hereditary effects of radiation. Nations Unies, New York, NY. [http://www.unscear.org/docs/publications/2001/UNSCEAR\\_2001\\_Annex.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2001/UNSCEAR_2001_Annex.pdf)
6. Biological Mechanisms of Radiation Actions at low Doses - A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. UNSCEAR 2012, Nations unies, New York, NY. [http://www.unscear.org/docs/publications/2012/UNSCEAR\\_WP\\_2012.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2012/UNSCEAR_WP_2012.pdf)
7. Rapport UNSCEAR 2006, Annexe A: Epidemiological studies of radiation and cancer. Nations unies, New York, NY. [http://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR\\_2006\\_Annex-A-CORR.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR_2006_Annex-A-CORR.pdf)
8. Rapport UNSCEAR 2017 (to be published), Epidemiological studies of cancer risk due to low dose-rate radiation from environmental sources.
9. E. J. Grant et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009, Radiation Research 187, 000–000 (2017).

- <http://www.bioone.org/doi/pdf/10.1667/RR14492.1>
10. K. Ozasa et al., Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Non cancer Diseases, Radiation Research 177, 229–243 (2012).  
[http://www.rerf.jp/library/rr\\_e/rr1104.pdf](http://www.rerf.jp/library/rr_e/rr1104.pdf)
  11. L. Walsh et U. Schneider, The influence of follow-up on DS02 low-dose ranges with a significant excess relative risk of all solid cancer in the Japanese A-bomb survivors, Radiat Environ Biophys (2016) 55:509–515. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00411-016-0667-0.pdf>
  12. D.B. Richardson et al., Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the UK and the United States (INWORKS), BMJ 2015.  
<http://www.bmj.com/content/351/bmj.h5359>
  13. Leuraud K et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study, Lancet, 2(7):e276-e281, 2015.  
[http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lanhae/PIIS2352-3026\(15\)00094-0.pdf](http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lanhae/PIIS2352-3026(15)00094-0.pdf)
  14. M. Sokolnikov et al., (2015) Radiation Effects on Mortality from Solid Cancers Other than Lung, Liver, and Bone Cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948–2008. PLoS ONE 10(2): e0117784.  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00411-016-0670-5.pdf>
  15. F. G. Davis et al., Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007, Radiation Research, 184(1):56-65 (2015). <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1667/RR14023.1>
  16. L Y Krestinina et al., Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007, British Journal of Cancer, 109, 2886-2893 (2013). <http://www.bioone.org/doi/10.1667/RR2932.1>
  17. Pearce M et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study, Lancet, 380:499-505 (2012).  
[http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736\(12\)60815-0.pdf](http://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736(12)60815-0.pdf)
  18. Kendall et al. A record based case control study of natural background radiation and the incidence of childhood leukemia. Leukemia, 27(1):3-9, 2013.  
[https://www.researchgate.net/publication/246044427\\_Kendall\\_GM\\_Little\\_MP\\_Wakeford\\_R\\_Bunch\\_KJ\\_Miles\\_JCH\\_Vincent\\_TJ\\_Meara\\_JR\\_Murphy\\_MFGA\\_record-based\\_case-control\\_study\\_of\\_natural\\_background\\_radiation\\_and\\_the\\_incidence\\_of\\_childhood\\_leukaemia](https://www.researchgate.net/publication/246044427_Kendall_GM_Little_MP_Wakeford_R_Bunch_KJ_Miles_JCH_Vincent_TJ_Meara_JR_Murphy_MFGA_record-based_case-control_study_of_natural_background_radiation_and_the_incidence_of_childhood_leukaemia)
  19. Spycher BD et al. Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study. EHP 123:622–628 (2015).  
<http://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/123/6/ehp.1408548.alt.pdf>
  20. Claire Demoury et al.; Residential Exposure to Natural Background Radiation and Risk of Childhood Acute Leukemia in France, 1990–2009; EHP 2017.  
<https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/125/4/EHP296.alt.pdf>
  21. Claudia Spix et al. Background gamma radiation and childhood cancer in Germany: an ecological study, Radiat Environ Biophys (2017) 56:127–138.  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00411-017-0689-2.pdf>
  22. Black D (1984) Investigation of the Possible Increased Incidence of Cancer in West Cumbria. Report of the Independent Advisory Group. Chairman: Sir Douglas Black. HMSO: London.
  23. Laurier et al., Childhood leukaemia risks: from unexplained findings near nuclear installations to recommendations for future research Journal of Radiological Protection 34: R53-R68, 2014.  
[https://www.researchgate.net/publication/263203081\\_Childhood\\_leukaemia\\_risks\\_from\\_unexplained\\_findings\\_near\\_nuclear\\_installations\\_to\\_recommendations\\_for\\_future\\_research](https://www.researchgate.net/publication/263203081_Childhood_leukaemia_risks_from_unexplained_findings_near_nuclear_installations_to_recommendations_for_future_research)
  24. Kaatsch P, Spix C, Schulze-Rath R, Schmiedel S, Blettner M. Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants. Int J Cancer, 122, 721–26 (2008).  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ijc.23330/epdf>
  25. Spycher BD et al. Childhood cancer and nuclear power plants in Switzerland: a census-based cohort study, International Journal of Epidemiology, 2011, 40:1247-1260.  
<https://www.canupis.ch/index.php?id=background>
  26. COMARE (2016). Seventeenth report. Further consideration of the incidence of cancers around the nuclear installations at Sellafield and Dounreay. HPA, Chilton.

- <https://www.gov.uk/government/publications/childhood-cancer-incidence-around-sellafield-and-dounreay>
27. Rapport 2013 du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, Annexe B : Effects of radiation exposure of children. Nations unies, New York, NY.  
[http://www.unscear.org/docs/publications/2013/UNSCEAR\\_2013\\_Annex-B.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2013/UNSCEAR_2013_Annex-B.pdf)
  28. Rajaraman P et al. Early life exposure to diagnostic radiation and ultrasound scans and risk of childhood cancer: case–control study. *BMJ*, 342:d472, 2011.  
<http://www.bmj.com/content/bmj/342/bmj.d472.full.pdf>
  29. Rapport 2006 du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, Annexe B : Epidemiological evaluation of cardiovascular disease and other non-cancer diseases following radiation exposure. Nations unies, New York, NY.  
[http://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR\\_2006\\_Annex-B.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR_2006_Annex-B.pdf)
  30. Ayako Takamori et al., Mortality Analysis of the Life Span Study (LSS) Cohort Taking into Account Multiple Causes of Death Indicated in Death Certificates  
<http://www.bioone.org/doi/10.1667/RR14314.1>
  31. M. Gillies et al., Mortality from Circulatory Diseases and other Non-Cancer Outcomes among Nuclear Workers in France, the United Kingdom and the United States (INWORKS), *Radiation Research* 188, 000–000 (2017) 0033-7587/17.  
<http://www.bioone.org/doi/pdf/10.1667/RR14608.1>
  32. T.V. Azizova et al., Risk of mortality from circulatory diseases in Mayak workers cohort following occupational radiation exposure, *J. Radiol. Prot.* 35 (2015) 517–538.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0952-4746/35/3/517/pdf>
  33. ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context  
<http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20118>
  34. Scherb H. and Voigt K. 2011. The human sex odds at birth after the atmospheric atomic bomb tests, after Chernobyl, and in the vicinity of nuclear facilities, *Environ Sci Pollut Res* 18:697–707. doi 10.1007/s11356-011-0462-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-011-0462-z>
  35. Prise de position de la CPR à propos de l'article de Scherb et Voigt concernant le lien potentiel entre la radiation et le sex-ratio, 2011.  
<https://www.bag.admin.ch/bag/fr/home/das-bag/organisation/ausserparlamentarische-kommissionen/eidgenoessische-kommission-fuer-strahlenschutz-ksr/stellungnahmen-empfehlungen-ksr.html#accordion1508669784627>
  36. Prise de position de la CPR concernant les études sur les cancers et leucémies pédiatriques au voisinage des centrales nucléaires suisses, 2012.
  37. Prise de position de la CPR concernant les récentes études épidémiologiques relatives à l'incidence de cancer chez les enfants et de leucémie chez les travailleurs, 2016.
  38. Moriña, D. et al., InterCardioRisk: a novel online tool for estimating doses of ionising radiation to occupationally-exposed medical staff and their associated health risks. *JRP*. 36 (2016) 561–578.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0952-4746/36/3/561/pdf>
  39. D. Hauri et al., Domestic Radon Exposure and Risk of Childhood Cancer: A Prospective Census-Based Cohort Study, *EHP*, 121, 1239-1244, 2013.  
[https://www.researchgate.net/publication/262044364\\_Domestic\\_Radon\\_Exposure\\_and\\_Risk\\_of\\_Childhood\\_Cancer\\_A\\_Prospective\\_Census-Based\\_Cohort\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/262044364_Domestic_Radon_Exposure_and_Risk_of_Childhood_Cancer_A_Prospective_Census-Based_Cohort_Study)
  40. D. Vienneau et al., Effects of Radon and UV Exposure on Skin Cancer Mortality in Switzerland, *EHP*, 825, 2016. [https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/2017/06/EHP825.alt\\_.pdf](https://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/2017/06/EHP825.alt_.pdf)
  41. A. Aurengo et al.. La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérigènes des faibles doses de rayonnements ionisants, Rapport d'un groupe de travail mixte de l'Académie nationale de médecine et de l'Académie des sciences, 2004.  
[http://www.irsn.fr/GT-CIPR/Documents/23-11-2004/GT-CIPR\\_23-11-2004\\_5-Fiche-Faibles-Doses.pdf](http://www.irsn.fr/GT-CIPR/Documents/23-11-2004/GT-CIPR_23-11-2004_5-Fiche-Faibles-Doses.pdf)
  42. Roy Shore, Linda Walsh, Tamara Azizova & Werner Rühm (2017)

Risk of solid cancer in low dose-rate radiation epidemiological studies and the dose-rate effectiveness factor, International Journal of Radiation Biology, 93:10, 1064-1078.

[https://www.researchgate.net/publication/316244091\\_Risk\\_of\\_Solid\\_Cancer\\_in\\_Low\\_Dose-Rate\\_Radiation\\_Epidemiological\\_Studies\\_and\\_the\\_Dose-Rate\\_Effectiveness\\_Factor](https://www.researchgate.net/publication/316244091_Risk_of_Solid_Cancer_in_Low_Dose-Rate_Radiation_Epidemiological_Studies_and_the_Dose-Rate_Effectiveness_Factor)

DOI: 10.1080/09553002.2017.1319090

43. ICRP Publication 60, 1990, <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2060>
44. Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants, ICRP publication 108, Ann. ICRP 38 (4-6), 2008.  
<http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20108>
45. UNSCEAR 2008 Report, Annex E: Effects of ionizing radiation on non-human biota  
[http://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR\\_2008\\_Annex-E.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_Annex-E.pdf)

## Anhang: Überblick über epidemiologische Studien zu den Auswirkungen ionisierender Strahlung auf den Menschen

### *Quantifizierung des Risikos durch die Epidemiologie*

Es gibt zahlreiche Grössen, mit denen sich das Risiko im Rahmen epidemiologischer Studien beschreiben lässt. Zu den am häufigsten verwendeten gehören das **zusätzliche relative Risiko** (excess relative risk, ERR), d.h. das Verhältnis des durch die Exposition erhöhten Risikos zum Risiko ohne Exposition, und das **zusätzliche absolute Risiko** (excess absolute risk, EAR), d.h. die Erhöhung des Risikos durch die Exposition. Das zusätzliche relative bzw. absolute Risiko kann vom Alter zum Zeitpunkt der Strahlenexposition und von der Zeit von der Exposition bis zum Auftreten der Krebserkrankung (oder bis zum Eintreten des Todes) abhängen.

### 1. Induktion von soliden Tumoren und Leukämie

#### *LSS-Studie*

Die Nachverfolgung der Überlebenden nach den Atombombenabwürfen über Hiroshima und Nagasaki erfolgt im Rahmen der LSS (Life Span Study) durch die RERF (Radiation Effects Research Foundation). Der vorliegende Bericht stützt sich für solide Tumoren auf die neuste Evaluation betreffend Inzidenz [9] und Mortalität [10]. Im Rahmen der LSS werden etwa 100'000 Personen nachverfolgt, die externen Dosen zwischen 0 und mehr als 2 Sv ausgesetzt waren. Etwa 22'000 dieser Personen entwickelten bis Ende 2009 einen soliden malignen Tumor. Die Zahl der Fälle, die auf die Strahlenbelastung zurückgeführt werden, wird auf 1'000 geschätzt. Die Studie, welche die Inzidenz von Krebserkrankungen untersucht, zeigt eine Abhängigkeit des Risikos von der Dosis, vom Alter zum Expositionszeitpunkt, vom erreichten Alter und vom Geschlecht. Über die Gesamtheit der soliden Tumoren lässt sich für ein Alter von 30 Jahren zum Zeitpunkt der Exposition und einem erreichten Alter von 70 Jahren ein ERR von 0,47 pro Sv für beide Geschlechter zusammen feststellen, mit einem 95%-Konfidenzintervall von 0,39 bis 0,55. Das Verhältnis des EER für Frauen zu jenem für Männer liegt bei 1,8. Dieses Verhältnis lässt sich teilweise mit dem höheren natürlichen Risiko von Männern erklären. Das ERR steigt um etwa 2% pro Altersjahr zum Zeitpunkt der Exposition und um 3% pro Jahr des erreichten Alters. Der Zusammenhang zwischen der EER und der Dosis ist linear im Falle der Frauen und linear-quadratisch bei Männern. Der Grund für diesen Unterschied ist gegenwärtig nicht vollständig aufgeklärt. Bei beiden Geschlechtern steigt das EAR mit dem erreichten Alter, was sich durch das mit dem Alter steigende natürliche Risiko erklären lässt. Die minimale Dosis, bei der sich eine Wirkung feststellen lässt, schwankt je nach der Beobachtung des Kollektivs und liegt bei etwa 100 mSv [11]. Ein signifikant höheres Risiko besteht für die Mehrheit der Organe, mit Ausnahme von Rektum, Bauchspeicheldrüse, Gebärmutter, Prostata und Nieren, bei denen keine Zunahme festzustellen ist. Das grösste relative Risiko besteht für Leukämie und der Anteil der Erkrankungen dieser Art, der sich auf Strahlung zurückführen lässt, ist mit ca. 30% hoch.

#### *Berufliche Strahlenexposition*

Die aktuellste und wichtigste Studie zu den Beschäftigten in der Kernenergiebranche erfasst insgesamt 300'000 Personen in Frankreich, dem Vereinigten Königreich und den USA (INWORKS-Studie [12]). Die durchschnittliche kumulative Dosis, der die Mitglieder der Kohorte ausgesetzt waren, lag bei etwa 20 mSv und die Zahl der durch solide Tumore verursachten Todesfälle betrug 18'000, wovon etwa 1% mit Strahlenexpositionen in Zusammenhang gebracht wird. Das ERR für ein Alter von 30 Jahren zum Zeitpunkt der Exposition und für ein erreichtes Alter von 70 Jahren wird auf 0,47 pro Sv geschätzt, mit einem 90%-Konfidenzintervall zwischen 0,18 und 0,79. Dieser Wert ist mit den Ergebnissen der LSS vergleichbar. Für Leukämie ergab dieselbe Studie [13] eine lineare Dosis-Risiko-Beziehung und ein ERR von  $2,93 \text{ Sv}^{-1}$ , ein signifikanter Wert mit einem 90%-Vertrauensintervall zwischen 1,17 und 5,21, der ebenfalls mit dem Ergebnis der LSS vergleichbar ist, wenn Personen mit einem Alter zwischen 20 und 60 Jahren zum Zeitpunkt der Exposition berücksichtigt werden (ERR =  $2,63 \text{ Sv}^{-1}$ ).

Die Studie zu den Beschäftigten der kerntechnischen Anlage Majak in der ehemaligen UDSSR [14] schliesst etwa 25'000 Personen ein, die zwischen 1948 und 1982 dort arbeiteten. Diese Kohorte ist wichtig, weil sie zu den wenigen epidemiologischen Untersuchungen von hohen Plutonium-Expositionen gehört (Inkorporation von Alphastrahlern, die ihre Energie im Vergleich zu den in den anderen Studien betrachteten Strahlungen in einem sehr kleinen Volumen abgeben). Die mittlere externe Dosis liegt bei etwa 0,35 Sv. Die Beziehung zwischen ERR und Dosis ist linear und das ERR wird auf 0,16 pro Sv geschätzt, bei einem 95%-Konfidenzintervall von 0,07 bis 0,26 für solide Tumoren, ohne Berücksichtigung von Lungen-, Leber- und Knochenkrebs, die auch von der internen Exposition betroffen sind. Es lässt sich keine Abhängigkeit der Wirkung vom Geschlecht und vom Alter zum Zeitpunkt der Exposition feststellen.

Die grossen Studien zu den Kohorten von Fachleuten für medizinisch-technische Radiologie in den USA (~ 150'000 Personen) und in China (30'000 Personen) zeigen ein erhöhtes Krebsrisiko in dieser Bevölkerungsgruppe. Weil die dosimetrische Schätzung jedoch mit grossen Unsicherheiten verbunden ist, wurde bis heute kein ERR abgeleitet.

#### *Exposition der Bevölkerung nach einem nuklearen Unfall*

Die epidemiologische Studie zu den Flussanwohnern der Tetscha [15], die aufgrund der radioaktiven Belastung des Flusses durch Abgaben der kerntechnischen Anlage Majak (Russland) hauptsächlich Strontium-90 ausgesetzt sind, umfasst etwa 17'000 Personen mit einer geschätzten durchschnittlichen Magendosis von 50 mSv. Die Beziehung zwischen ERR und Dosis ist linear und das ERR für die Gesamtheit solider Tumoren wird auf 0,77 pro Sv mit einem 95%-Konfidenzintervall von 0,13 bis 1,5 geschätzt. Die Inzidenz von Leukämie in der Kohorte der rund 30'000 Anwohner der Tetscha [16] ergab ein ERR von 2,2 pro Sv mit einem 95%-Konfidenzintervall von 0,8 bis 5,4. Rund die Hälfte der 74 Leukämie-Fälle scheint durch die Strahlenexposition bedingt zu sein.

Nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl stieg die Häufigkeit von Schilddrüsenkrebs bei Kindern in den stark kontaminierten Gebieten um einen Faktor 4. Die Häufigkeit korreliert stark mit dem Kontaminationsniveau, im Allgemeinen ist jedoch keine Schätzung der individuellen Dosis verfügbar, deshalb lässt sich auch der Zusammenhang zwischen Dosis und Risiko kaum abschätzen.

#### *Medizinische Expositionen*

Epidemiologische Studien zur Induktion sekundärer Krebserkrankungen bei Patienten mit Strahlentherapie liefern wertvolle Hinweise zur Schätzung der Risiken von Strahlung sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Dosen. Aktuelle Studien zeigen eine Erhöhung des Krebsrisikos über das ganze Leben. Mit verschiedenen Studien mit einer begrenzten Zahl von Studienteilnehmern konnten Dosis-Risiko-Beziehungen für bestimmte Organe geschätzt werden, einschliesslich Organe, die vom Bestrahlungsort entfernt liegen und nur schwachen Dosen ausgesetzt waren. Zu den untersuchten Gruppen gehörten Patienten, die wegen anderen Krankheiten als Krebsleiden behandelt wurden (zum Beispiel Hämangiome) oder Patienten, die wiederholten röntgendiagnostischen Untersuchungen ausgesetzt waren (zum Beispiel aufgrund von Tuberkulose oder Skoliose). Im Allgemeinen liessen sich die in diesen Studien bestimmten EER-Werte mit den Werten vergleichen, die im Rahmen der LSS bestimmt wurden, waren aber mit breiten Konfidenzintervallen verbunden.

Verschiedene Studien ermöglichten die Bestimmung des ERR für die Leukämieinduktion. Sie betrafen Kohorten strahlenexponierter Patienten mit folgenden Krankheiten: Gebärmutterhalskrebs, Ringelflechte, gutartige Tumore der Gebärmutter, Hämangiome, ankylosierende Spondylitis. Die ERR-Werte liegen zwischen -0,02 und 12,4 pro Sv mit breiten, sich überschneidenden Konfidenzintervallen. Kürzlich ergab eine Studie bei jungen Personen, die mehrfach mit Computertomographen untersucht worden waren [17], eine erhöhte Häufigkeit von Hirntumoren mit einem ERR von 23 pro Sv und einem 95%-Konfidenzintervall von 10 bis 49. Bei dieser Studie besteht allerdings das Risiko, dass sie durch eine mögliche Krebs-Prädisposition der Patienten, bei denen diese Untersuchungen durchgeführt wurden, verzerrt wird.

### *Expositionen durch natürliche Strahlenquellen*

Die Strahlenexposition in Wohnräumen durch Radon und seine Zerfallsprodukte war Gegenstand von drei grossen epidemiologischen Studien, die in den USA, in Europa und China durchgeführt wurden. Die Schwierigkeit, die Lungendosen zu bestimmen, führte dazu, das Risiko als Funktion der mittleren Radonkonzentration in den betroffenen Wohnräumen auszudrücken. Das ERR für Lungenkrebs wird für Raucher und Nicht-Raucher zusammen bei einer Radon-Konzentration von 100 Bq/m<sup>3</sup> auf 16% geschätzt, mit einem 95%-Konfidenzintervall von 5 bis 31%. Mit einem rund 25 Mal höheren relativen Lungenkrebsrisiko für Raucher ist das absolute Risiko für diese Personengruppe deutlich höher.

Epidemiologische Studien zu den Auswirkungen der externen Exposition durch natürliche Strahlung in England [18] und der Schweiz [19] ergaben einen Anstieg des Leukämierisikos bei Kindern mit zunehmender Belastung. Dieser Anstieg wurde jedoch in den in Frankreich [20] und Deutschland [21] durchgeführten Studien nicht bestätigt. Diese ökologischen (geografischen) Studien werden oft durch Störfaktoren verzerrt, ebenso durch die fehlende Verfügbarkeit individueller dosimetrischer Messungen zu den einzelnen Personen der Gruppe.

Nach der Beobachtung eines gehäuften Auftretens (Cluster) von Leukämie bei Kindern in der Umgebung der Kernkraftwerke Sellafield und Dounreay im Vereinigten Königreich [22] wurden mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen weltweit zahlreiche epidemiologische Studien zur Wohnbevölkerung in der Umgebung von Kernkraftwerken durchgeführt [23]. Die in Deutschland mit 1600 Fällen und 4800 Kontrollpersonen durchgeführte Fall-Kontroll-Studie KiKK [24] zeigte eine Erhöhung der Leukämie-Inzidenz bei Kindern unter 5 Jahren, die weniger als 5 km von einem Kernkraftwerk entfernt lebten. Die durch diese Ergebnisse motivierte Schweizer Studie CANUPIS [25], die in Kapitel 4 genauer beschrieben wird, stellte fest, dass die Häufigkeit von Krebs und Leukämie bei Kindern, die in der Umgebung von Kernkraftwerken leben, im Vergleich zu Kindern in grösserer Distanz zu den Kernanlagen nicht statistisch signifikant höher ist. Dennoch lässt sich bei Kindern unter 5 Jahren, die weniger als 5 km von einem Kernkraftwerk entfernt leben ein Trend ausmachen, mit einem RR von 1,2 bei einem 95%-Konfidenzintervall von 0,60 bis 2,41, das den Wert 1 grosszügig einschliesst. Es konnte folglich kein Zusammenhang mit der Entfernung zum Kernkraftwerk festgestellt werden. Die Berücksichtigung der Störfaktoren und die Sensibilitätsanalysen bestätigten diese Ergebnisse. Im Vereinigten Königreich hat ein von der Regierung 1985 beauftragter Ausschuss (Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, COMARE) die Problematik der Leukämie-Inzidenz bei der Bevölkerung in der Umgebung von Kernkraftwerken weiter untersucht. In seinem 2016 veröffentlichten 17. Bericht [26] bestätigt er, dass die Inzidenz von Leukämie und Non-Hodgkin-Lymphomen bei Kindern, die in der Nähe der Kernkraftwerke Sellafield und Dounreay wohnten, im Zeitraum 1963 bis 1990 statistisch signifikant höher war. Dies gilt jedoch nicht für den Zeitraum 1991 bis 2006. In seinen Schlussfolgerungen hält der Ausschuss fest, dass die Strahlenexposition nicht der hauptsächliche Grund für die beobachteten Wirkungen sein könne und schlägt eine vertiefte Forschung zur Untersuchung der Möglichkeit einer infektiösen Ätiologie dieser Erkrankungen vor.

## **2. Verursachung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen**

### *LSS-Studie*

Bei den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki betrafen von den bis 1997 gezählten 14'500 Todesfällen aufgrund von anderen Leiden als Krebserkrankungen etwa 8'500 (58%) Herzkrankheiten oder Schlaganfällen. Die Analyse ergab ein ERR von 0,17 pro Sv mit einem 90%-Konfidenzintervall von 0,08 bis 0,26 für Herzkrankheiten und ein ERR von 0,12 pro Sv mit einem 95%-Konfidenzintervall von 0,02 bis 0,22 für Schlaganfälle. Die auf Strahlung zurückgeführte Anzahl Todesfälle bei den Herzkrankheiten wird damit auf 101 (2,2%) bzw. bei den Schlaganfällen auf 64 (1,6%) geschätzt [30].

### *Berufliche Strahlenexposition*

Die aktuelle Studie zu den Beschäftigten in der Kernenergiebranche (INWORKS) [31] wies eine positive Korrelation zwischen der Strahlenexposition dieser Berufspersonen und der Mortalität aufgrund von

Kreislaufkrankungen nach. Das dabei errechnete ERR beträgt 0,22 pro Sv mit einem 90%-Konfidenzintervall von 0,08 bis 0,37, ein Ergebnis, das den in der LSS beobachteten Wert bestätigt. Die kürzlich veröffentlichte Studie zur Nachverfolgung der Beschäftigten von Majak [32] weist ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Strahlenexposition und Kreislaufkrankungen nach. Hier wurde das ERR auf 0,05 geschätzt, mit einem 95%-Konfidenzintervall von 0,00 bis 0,11.

#### *Exposition der Bevölkerung nach einem nuklearen Unfall*

Im Falle der Liquidatoren von Tschernobyl liess sich ein Anstieg von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Hypertonie und Hirnleistungsstörungen beobachten, mit einem EER zwischen 0,2 und 1,2 pro Sv. Nicht berücksichtigt werden aber bei diesen Schätzungen Risikofaktoren wie Rauchen, Alkoholismus oder Gewicht.

#### *Patientenkohorten*

Verschiedene Kohorten mit Patienten, die wegen unterschiedlicher Erkrankungen (ankylosierende Spondylitis, Magengeschwür, Hodgkin-Lymphom, Brustkrebs, Bestrahlung der Ganglien des Mediastinums) behandelt wurden, wiesen nach Dosen über 1 SV ein erhöhtes Risiko gegenüber Herz-Kreislauf-Erkrankungen auf, mit einem relativen Risiko zwischen 1 und 2 (EER zwischen 0 und 1 pro Sv).