

Zeitschrift: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz = Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse = Radioattività dell'ambiente e dosi d'irradiazione in Svizzera

Herausgeber: Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz

Band: - (1996)

Rubrik: Überblick über die Umweltradioaktivität und die Strahlendosen in der Schweiz 1996 = Synthèse de la radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse pour 1996 = Riassunto della radioattività dell'ambiente e delle dosi d'irradiazione in Svizzera nel 1996

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

A

Überblick

Sommaire

Riassunto

A

Überblick über die Umweltradioaktivität und die Strahlendosen in der Schweiz 1996

A.1

Synthèse de la radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse pour 1996

A.10

Riassunto della radioattività dell'ambiente e delle dosi d'irradiazione in Svizzera nel 1996

A.20

A

Überblick über die Umweltradioaktivität und die Strahlendosen in der Schweiz 1996

H. Surbeck und Ch. Murith

Sektion Überwachung der Radioaktivität (SUER)
Bundesamt für Gesundheit, Ch. du Musée 3, 1700 FRIBOURG

Einleitung

In diesem Teil des Jahresberichtes werden die Resultate der Messungen der Umweltradioaktivität in der Schweiz und die daraus berechnete Strahlendosis für die Bevölkerung zusammengefasst. Die Daten wurden den Berichten im Teil B entnommen. Ueber die in Klammern angegebenen Kapitel- oder Seitenzahlen sind weitere Angaben dazu zu finden. Falls Daten aus früheren Jahresberichten "Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz" übernommen wurden, ist das Berichtsjahr in der Klammer angegeben.

Da sich dieser Bericht mit der Umweltradioaktivität befasst, sind Daten zur medizinischen Anwendung ionisierender Strahlung und zur beruflichen Strahlenexposition nicht enthalten.

Der Überblick beginnt mit den 1996 in der Schweiz gemessenen Radionukliden, unterteilt nach dem Milieu in dem sie gesucht wurden. Ein zweiter Teil fasst die Messungen der externen Strahlung (Ortsdosisleistung) zusammen. Im dritten Teil wird versucht, aus diesen Daten Strahlendosen für die Schweizer Bevölkerung abzuschätzen.

Die lückenlose Ueberwachung (örtlich und zeitlich) der Radionuklid-Konzentrationen und Dosisleistungen ist nicht möglich. Eine gezielte Wahl der Probenahmeorte, Zeit- und Messpunkte kann aber unlieb-

same Ueberraschungen verhindern. Das setzt ein gutes Verständnis der Herkunft und des Transports der Radionuklide voraus. Daher muss eine Ueberwachung der Umweltradioaktivität neben den Routine-Messungen auch Forschungsprogramme über Herkunft und Transportvorgänge enthalten. Beispiele für solche interdisziplinäre Untersuchungen sind in diesem Bericht erfreulich zahlreich [4.2, 4.3, 4.4, 7.1, 7.2, 7.3, 8.5, 9.2].

Die Abschätzung der Strahlendosen für die Bevölkerung berücksichtigt im allgemeinen nur den Teil der Bevölkerung, der sich innerhalb der Norm bewegt. Extrem hoher Konsum gewisser Lebensmittel, oder der häufige Aufenthalt an Orten mit höherer Belastung (z.B. in Höhlen oder im Gebirge) werden kaum berücksichtigt.

Mit einer Ausnahme [2.2] wird in diesem Bericht nicht erwähnt, was die berechneten, durchwegs kleinen Strahlendosen eigentlich bewirken könnten. Er begnügt sich damit zu zeigen, dass auch 1996 mit Ausnahme der Radonkonzentration in einigen Häusern die gesetzlichen Limiten nicht überschritten wurden.

1. Natürliche und künstliche Radionuklide in der Umwelt

Luft

In der Luft sind ausser ^{85}Kr und ^3H (Tritium) kaum noch künstliche Radionuklide nachweisbar. Das gilt auch für die unmittelbare Umgebung der Schweizer Kernkraftwerke und der nuklearen Forschungsanlagen [4.1, 8].

Das ^{85}Kr (ca. 1Bq/m^3) stammt aus Anlagen zur Aufarbeitung von Kernbrennstoff und verteilt sich von Frankreich, England und Russland weltweit [7.1.8]. Dagen sehr lokal, in der Nähe eines Tritium verarbeitenden Betriebes, wurden wie schon in früheren Jahren ca. 10Bq/m^3 ^3H (als HTO) festgestellt [9.3.2]. Das ist zwar gut messbar, beträgt aber nicht einmal 1% des zulässigen Wertes.

Bedeutender als diese Spuren künstlicher Radionuklide in der Aussenluft sind die zum Teil recht hohen Konzentrationen des natürlichen Radons in der Innenluft. Die Schwankungsbreite ist sehr gross. In den bis 1996 in der Schweiz ausgemessenen 15'000 Häusern liegt der Mittelwert bei 60Bq/m^3 . In etwas weniger als 10% der Wohnräume wird der Richtwert von 400Bq/m^3 und in etwa 2% der Grenzwert von 1000Bq/m^3 überschritten [2.4]. Sanierungen, die vor allem darauf abzielen, dem Radon den Eintritt vom Boden ins Haus zu erschweren, sind im Gange.

Niederschläge

In den Niederschlägen dominiert die ^3H (Tritium) Aktivität. Der landesweite Grundpegel von etwa 1Bq/l stammt sehr wahrscheinlich von der industriellen Verwendung von Tritium und von Anlagen zur Aufarbeitung von Kernbrennstoff. Die natürliche Produktion und der Rest von den Atombomben-Tests in den 60er Jahren reichen dafür nicht aus [7.1]. Regional sind diesem Grundpegel bis etwa 10Bq/l aus Kernanlagen und Indu-

strieetrieben überlagert [4.1.6, 7.1]. Lokal kann die Verarbeitung von Tritium, oder die Verbrennung von tritiumhaltigen Abfällen zu Werten bis einigen kBq/l führen [4.1.7, 4.2.5, 9.3.4]. 1kBq/l entspricht etwa 10% der Limite für die Einleitung von Tritium in öffentlich zugängliche Gewässer. Falls die Niederschläge direkt als Trinkwasser genutzt werden, würde 1kBq/l gerade dem Toleranzwert nach der Fremd- und Inhaltsstoff-Verordnung entsprechen.

Andere künstliche Radionuklide, wie z.Bp. ^{137}Cs konnten nur selten nachgewiesen werden, bis max. einige 10mBq/l [4.1.4]. Zum Vergleich liegen die Konzentrationen des (vorwiegend) natürlichen ^7Be bei etwa 1Bq/l [4.1.5].

Boden

In den 1996 genommenen Bodenproben sind wie schon früher deutliche regionale Unterschiede zu sehen. Bei den natürlichen Radionukliden aus den Uran- und Thoriumreihen sind dafür geologische Unterschiede verantwortlich, beim ebenfalls natürlichen ^{40}K auch Düngemittel. ^{40}K : 200 bis 600Bq/kg , ^{232}Th -Reihe: 15 bis 40Bq/kg , ^{238}U -Reihe 25 bis 60Bq/kg [3.1.2 und 5.1.8]. Die Werte beziehen sich auf das Trockengewicht.

Bei den künstlichen Radionukliden erscheinen die regionalen Unterschiede durch die Ueberlagerung von zwei Depositionsmustern plausibel. Die Ablagerungen aus den oberirdischen Kernwaffen-Explosionen in den 60er Jahren dauerten über mehrere Jahre an und führten zu einem Depositionsmuster, das etwa den mittleren jährlichen Niederschlagsmengen folgt: in den Bergen (incl. Jura) mehr ^{137}Cs , ^{90}Sr und Pu als im Mittelland [7.3.4], möglicherweise auch etwas mehr in den Stark-Niederschlagsgebieten des Tessins und der Bündner Südtäler. Leider gibt es nur wenige Messungen an Bodenproben aus diesen Gebieten vor 1986. Die ^{90}Sr - und Pu-Werte für zwei Tessiner Standorte sprechen aber dafür [7.2, 7.3.4]. Die Ab-

gerung des ^{137}Cs aus Tschernobyl 1986 dauerte dagegen nur kurz (Stunden bis Tage). Sie führte daher zu einer wesentlich heterogeneren Verteilung, entsprechend den Niederschlägen während dieser kurzen Periode und war nur von Spuren von ^{90}Sr begleitet [6.3.3]. Neben dem Tessin und den Bündner Südtälern waren davon auch der Jura und ein Teil der Nordostschweiz betroffen. Die Summe beider Ablagerungen zeigt sich für die verschiedenen Nuklide in einer Bodenaktivität, bezogen auf das Trockengewicht von: ^{137}Cs , 10 bis 350 Bq/kg, ^{90}Sr , 1 bis 6 Bq/kg, ^{239}Pu , 0.2 bis 1.4 Bq/kg [3.1.2, 5.1.8, 7.2.3, 8.3.3]. Der grösste Teil der Aktivität dieser künstlichen Radionuklide befindet sich immer noch in den obersten 20 cm des Bodens [3.1.3], im Beispiel eines Waldbodens im Tessin sogar nur in den ersten 10 cm [4.4.5]. Bei extrem günstiger Anreicherung können diese Aktivitäten aber noch wesentlich höher sein, ein Bodenprofil zeigte bis 11 Bq/kg ^{239}Pu in den obersten 2 cm [7.3].

Mit einer Ausnahme konnte kein Einfluss des Betriebs der Schweizer Kernkraftwerke auf die Radionuklidkonzentration im Boden festgestellt werden. Die Ausnahme betrifft Spuren von ^{134}Cs , ^{137}Cs und ^{60}Co , jeweils einige Bq/kg, in der Nähe des Kernkraftwerkes Mühleberg [8.3.4]. Sie stammen von einer Abgabe aus dem Jahre 1986.

Pflanzen, Lebensmittel allgemein

In den meisten Gras- und Lebensmittelproben dominierte auch 1996 das natürliche ^{40}K gegenüber den Spuren künstlicher Radionuklide. Ausser beim ^{14}C konnten diese Spuren nicht auf den Betrieb der Schweizer Kernkraftwerke oder nuklearer Forschungsanlagen zurückgeführt werden. Sie wurden vorwiegend aus dem Boden aufgenommen, der nach wie vor mit den Ablagerungen nach dem Unfall in Tschernobyl und während der oberirdischen Kernwaffen-Versuche belastet ist. Die regionale Verteilung der Aktivitäten im Gras und in Lebensmitteln entspricht

daher wie im Boden dem Muster dieser Ablagerungen [5.1.2, 5.1.8]. Ausserhalb des Tessins und der Bündner Südtäler liegen die ^{137}Cs Werte zwischen 0.5 und 15 Bq/kg Trockensubstanz im Gras und unterhalb 1 Bq/l in der Milch. Im Tessin und in den Bündner Südtälern wurden dagegen Werte bis 85 Bq/kg Trockensubstanz im Gras und bis 19 Bq/l in der Milch gefunden. Beim ^{90}Sr liegen die Werte für die ganze Schweiz zwischen 0.4 und 0.8 Bq/kg für das Getreide, im Gras zwischen 0.5 und 28 Bq/kg Trockensubstanz, in der Milch zwischen 0.02 und 0.5 Bq/l [5.1.8, 7.2]. Die höchsten Werte für das ^{90}Sr finden sich im allgemeinen in den Bergen, in einigen Fällen aber auch im Tessin [7.2.4, 7.2.5]. Das stützt die oben geäusserte Vermutung, dass neben den Bergen auch Starkniederschlagsgebiete südlich der Alpen während der Ablagerungen in den 60er Jahren stärker betroffen waren als das Mittelland.

In einer der Milchproben aus dem Tessin wurde mit 19 Bq/l ^{137}Cs der Toleranzwert von 10 Bq/l überschritten, der Grenzwert, selbst derjenige für Säuglings-Anfangsnahrung von 400 Bq/l aber bei weitem nicht erreicht. Beim ^{90}Sr in der Milch wurde der Toleranzwert von 1 Bq/l in keinem Fall überschritten (zur Bedeutung der Toleranz- und Grenzwerte für Lebensmittel siehe [1.2]).

Nach wie vor deutlich erhöht sind die ^{137}Cs Konzentrationen in (importierten) Wildfleisch-Proben und in einigen Wildpilz-Arten. Während in den Wildfleisch-Proben seit 1994 keine Überschreitung des Toleranzwertes (600 Bq/kg) mehr festgestellt wurde, hat sich die Situation bei den Wildpilzen kaum verändert. Es ist immer noch keine Abnahme der Aktivität zu beobachten [5.1.5], obwohl z.B. an Farnen im Tessin 1996 ein wesentlich kleinerer Transferfaktor Boden-Pflanze als 1995 festgestellt wurde [4.4.6]. 1996 enthielten 1 von 10 Zigeunerpilz-Probe von der Alpennordseite und 7 von 10 Maronenhöhrling-Proben aus dem Tessin mehr als der 600 Bq/kg ^{137}Cs (Toleranzwert).

Mit Ganzkörpermessungen [6.1, 6.2] oder für das ^{90}Sr durch die Analyse von Milchzähnen und Knochen [6.3] lässt sich bestimmen, was mit den Nahrungsmitteln tatsächlich in den Körper aufgenommen wurde. Ganzkörpermessungen an je einer Schulklasse aus Genf und aus Basel zeigten 1996 folgende ^{137}Cs Aktivitäten (pro Person): Mittel < 10 bzw. 18 Bq mit Spitzen bis 64 Bq. Zum Vergleich liegt die totale Aktivität des natürlichen ^{40}K bei ca. 4000 Bq [6.1.2]. In Milchzähnen und Knochen wurden ca. 20 Bq $^{90}\text{Sr/kg}$ Ca gefunden [6.3.2].

Mit dem Grundwasser, dem Regenwasser oder direkt aus der Luft aufgenommenes Tritium zeigte sich deutlich in Gemüse- und Milchproben aus der Nähe eines Tritium verarbeitenden Betriebes [9.2.2]. Im Zellwasser, das etwa 90% des Gewichtes des frischen Gemüses ausmacht, wurden im Mittel 100 Bq/l ^3H gefunden, mit Spitzen bis 680 Bq/l. In der Milch liegen die Werte bei 30 Bq/l, mit Extremwerten bis 300 Bq/l. Sowohl für das Gemüse als auch für die Milch wurde damit der Toleranzwert von 1000 Bq/l nicht überschritten.

Durch Assimilation kann ^{14}C vom CO_2 in der Luft in die Pflanzen aufgenommen werden. Das natürlicherweise vorhandene ^{14}C , zusammen mit den Überresten des bei den oberirdischen Kernwaffen-Versuchen in den 60er Jahren produzierten ^{14}C führt in unseren pflanzlichen Lebensmitteln heute zu Aktivitäten von etwa 35 Bq/kg Frischgewicht (davon ca. 30 Bq/kg natürlichen Ursprungs) [7.1.3]. In der Nähe des Kernkraftwerkes Leibstadt wurden in Baumblättern 1996 Werte gefunden, die bis 15% über diesem Referenzwert liegen. Beim stillgelegten Forschungsreaktor Saphir des Paul-Scherrer-Institutes beträgt die Erhöhung noch etwa 6%.

In der Stadt Basel werden in der neuen Sondermüll-Verbrennungsanlage unter anderem ^{14}C haltige Abfälle aus der chemischen Forschung verbrannt. Das

zeigt sich an Proben von Baumblättern aus der Umgebung als eine Erhöhung gegenüber dem Referenzwert um bis zu 48%. Das entspricht etwa 55 Bq/kg und liegt damit deutlich unter dem Toleranzwert von 200 Bq/kg.

Aquatische Systeme

In den Oberflächengewässern wurden 1996 nur Spuren von ^{60}Co , ^{134}Cs und ^{137}Cs gefunden, meist unterhalb von 20 mBq/l [4.2.6]. Werte bis 43 mBq/l ^{137}Cs zeigten sich nur in Proben aus dem Luganersee, was auf eine Rücklösung der in den Sedimenten gespeicherten Aktivität hinweist [4.4.3].

Entsprechend den Tritium-Konzentrationen im Regen liegen die ^3H Werte im Flusswasser bei einigen Bq/l mit Spitzen bis einige 10 Bq/l [4.2.6, 7.2.18]. Eine Ausnahme bildet das Abwasser aus der Kläranlage von La Chaux-de-Fonds. Hier führte die Einleitung aus der Rauchgas-Waschanlage der Kerichtverbrennungs-Anlage auch 1996 zu Spitzen bis 5000 Bq/l [4.2.5].

Messungen an Fischen lieferten keinen Hinweis auf Inkorporation von künstlichen Radionukliden [4.2.6].

Proben aus Sedimentfallen in den Stauseen Niederried (unterhalb Kernkraftwerk Mühleberg), Klingnau (unterhalb Kernkraftwerk Beznau) und Augst (unterhalb Kernkraftwerk Leibstadt) enthielten einige 10 Bq/kg ^{60}Co , ^{134}Cs und ^{137}Cs , was aber mindestens eine Größenordnung weniger ist, als das ebenfalls bestimmte natürliche ^{40}K [4.2.3].

Die Aktivität der in den Sedimentfallen aufgefangen Partikeln ist ein Mass für die aktuell transportierte Fracht. Aus Proben von Sedimenten vom Grund der Flüsse und Seen lassen sich zusätzlich die Ablagerungen aus früheren Jahren rekonstruieren [4.4.2, 7.3, 8.5.4]. Neben Spuren von ^{60}Co (18 Bq/kg) in der Aare unterhalb des Kernkraftwerkes Mühleberg [8.5.5] ist vor

allem das aus dem Unfall in Tschernobyl stammende ^{137}Cs zu sehen.

Die Abgaben des CERN sind in der Rhone unterhalb Genf nicht feststellbar [8.5.5]. Messungen an Sedimenten und Wasserpflanzen in einem Bach in der Nähe des CERN zeigten aber dennoch einige Bq/kg Trockensubstanz an ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co und ^{60}Co [8.5.6]. Obwohl von der Aktivität her unbedeutend, haben diese Werte einiges Aufsehen verursacht. Sie wurden zuerst von einer privaten Organisation (CRII RAD) und erst nachträglich von den offiziellen Stellen gemessen.

Für Trinkwasser gilt in der Schweiz eine Limite von 1 Bq/l für die Summe der Aktivitäts-Konzentrationen der natürlichen Alpha-Strahler aus den Uran- und Thorium-Reihen (nach unserer Interpretation ohne ^{222}Rn). Da die üblichen radiochemischen Methoden für die kantonalen Laboratorien unerschwinglich sind, wurden vereinfachte Methoden zur Bestimmung von Uran und Radium entwickelt [4.3].

2. Externe Strahlung

Der überwiegende Teil der externen Strahlung stammt aus natürlichen Quellen im Boden und im Baumaterial und von der kosmischen Strahlung. Entsprechend den regional stark verschiedenen Gehalten an ^{40}K und den Nukliden der Uran- und Thoriumreihen im Boden ist auch die durch den Boden bedingte Dosisleistung regional sehr unterschiedlich [3.1.2]. Die kosmische Strahlung nimmt mit der Höhe stark zu. Auf 300 m.ü.M. beträgt sie etwa 40 nSv/h, auf 2000 m 80 nSv/h und erreicht auf der Reiseflughöhe von 10'000 m 5000 nSv/h. Die nach wie vor vorhandene Strahlung von den Ablagerungen von 1986 (Tschernobyl) und aus den 60er Jahren (oberrheinische Kernwaffen-Versuche) machen im allgemeinen nur einige Prozent der gesamten externen Strahlung aus, im Tessin allerdings bis zu 30% [3.1.4].

Im Freien liegt die Dosisleistung in der Schweiz im Mittel bei 100 nSv/h, mit Werten die von 40 nSv/h bis zu 230 nSv/h reichen [3.3.3]. Im Hausinnern werden die kosmische Strahlung und die Strahlung vom Boden zum Teil durch die Gebäudehülle abgeschirmt. Natürliche Radionuklide im Baumaterial führen aber zu einer zusätzlichen Strahlung, die diese Abschirmung meist mehr als kompensiert. Bei einem Wertebereich von 50 nSv/h bis 260 nSv/h liegt der Mittelwert im Hausinnern dadurch mit 110 nSv/h etwa 10% höher als im Freien.

Die im Teil "Boden" bereits erwähnte Altlast in der Umgebung des Kernkraftwerkes Mühleberg führt zu maximal 3 nSv/h in 1 m Höhe über dem Boden.

Bei den Messungen mit einem Strahlungsdetektor an Bord eines Helikopters (Aeroradiometrie) waren die vom Zerfall des ^{16}N stammende Strahlung aus dem Kernkraftwerk Leibstadt (KKL), und die Strahlung von den Lagern für radioaktive Abfälle im Paul Scherrer Institut (PSI) gut sichtbar [3.4.5]. Die über dem KKL in 90 m Höhe gemessenen 2000 nSv/h sind aber für die Bevölkerung ohne Bedeutung, da die Strahlungsquelle in der Nähe des Bodens seitlich gut abgeschirmt ist.

An wenigen Stellen direkt am Zaun der Kernkraftwerke, des PSI und des CERN wurden bis einige 100 nSv/h gemessen [8.2.2, 8.3.2, 8.4.10]. In der leichter zugänglichen näheren Umgebung ist aber kaum ein Beitrag dieser Anlagen zur Dosisleistung zu bemerken.

3. Berechnete Strahlendosen für die Bevölkerung

Beitrag natürlicher Radionuklide und der kosmischen Strahlung

Der grösste Beitrag stammt vom Radon in Wohnräumen. Der Mittelwert von ca. 60 Bq/m³ [1993,B.2.3] führt zu 1'000 µSv/a. In 50% der Wohnräume liegt die Konzentration unter 73 Bq/m³, entsprechend einer Jahresdosis von 1200 µSv, in 10% über dem Richtwert von 400 Bq/m³ (6'800 µSv/a) und in 2% über dem Grenzwert von 1000 Bq/m³ (17'000 µSv/a). Diese Werte wurden für eine Aufenthaltsdauer von 7000 h pro Jahr berechnet (im Mittel 19 h/Tag). Bei 2000 h pro Jahr an einem Arbeitsplatz mit 60 Bq/m³ kommen noch 400 µSv/a dazu. Das ebenfalls natürliche Thoron, für das es in der Schweiz allerdings keine Messwerte gibt, erhöht die Dosiswerte noch um etwa 10% [1993, B.2.3]. Damit ergibt sich im Mittel eine jährliche Dosis durch das Radon und Thoron von etwa 1'600 µSv. In 2% der Wohnräume liegt aber die Dosis mehr als einen Faktor 10 über diesem Mittel und ist in 10% der Räume immerhin noch gut 5 mal höher als der Mittelwert [2.4]. Für Freunde von Höhlen :1 Tag Aufenthalt in einer Höhle mit 5000 Bq/m³ führt zu einer Dosis von etwa 400 µSv.

Mit der Nahrung aufgenommene natürliche Radionuklide führen zu einer mittleren Jahresdosis von etwa 360 µSv [5.1.6], wobei das ⁴⁰K mit 200 µSv den grössten Beitrag liefert [5.1.6, 6.1.2]. Die Schwankungsbreite ist nicht bekannt, das Minimum dürfte aber etwas über 200 µSv liegen, da die ⁴⁰K Konzentration im Körper weitgehend konstant ist. Der Konsum von einem Liter pro Tag eines Mineralwassers, das 1.3 Bq/l ²²⁶Ra enthält, würde zu einer zusätzlichen Dosis von etwa 100 µSv/a führen. Ein solches Mineralwasser

war bis 1995 in der Schweiz im Handel [1995,B.3.8].

Der Beitrag der natürlichen Radionuklide im Boden zur externen Strahlung ist etwas schwer abzuschätzen. Die üblichen Dosis-Messungen zeigen nur die Summe aller Komponenten (natürlich + künstlich + kosmisch) [3.2.4, 3.3.3,8.3.2, 8.4.10]. Der aus in-situ Gamma-Spektroskopie-Messungen berechnete Anteil der natürlichen Radionuklide liegt zwischen 40 und etwa 90 nSv/h [3.1.4], d.h. bei dauerndem Aufenthalt im Freien zwischen 350 und 800 µSv/a.

Noch schwieriger ist es, den Beitrag natürlicher Radionuklide im Baumaterial zur externen Strahlung abzuschätzen. Nur mit gamma-spektroskopischen Messungen innerhalb eines Hauses lassen sich natürliche und künstliche Komponenten auseinanderhalten. Solche Messungen gibt es in der Schweiz noch kaum.

Die kosmische Strahlung führt auf 300 m.ü.M. zu einer Jahresdosis von etwa 350 µSv/a und auf 2000 m.ü.M. zu etwa 700 µSv/a, bei dauerndem Aufenthalt im Freien. Ein 10 stündiger Flug auf 10'000 m Höhe ergibt eine zusätzliche Dosis von etwa 50 µSv.

Im Kapitel 3.3 findet sich eine Zusammenstellung zahlreicher Dosisleistungsmessungen in der ganzen Schweiz. Unter der Annahme, dass an den gewählten Messorten der Anteil durch künstliche Radionuklide klein war (%) zeigen die Figuren in [3.3.3] die Häufigkeitsverteilung der natürlichen Strahlung im Freien und im Hausinnern. Als Mittelwert für die Schweiz wird daraus eine Dosis von (820 ± 20) µSv/a berechnet.

Gesamthaft beträgt die Jahresdosis aus natürlichen Quellen im Mittel für die Schweizer Bevölkerung etwa 2800 μSv (Nahrung 400, ext. Strahlung 800, Radon 1600). Die Schwankungsbreite ist sehr gross :

Quelle	Mittelwert [$\mu\text{Sv/a}$]	Minimum [$\mu\text{Sv/a}$]	Maximum [$\mu\text{Sv/a}$]
Nahrung	400	200	500
ext.Stahlung	800	500	2'000
Radon	1'600	300	> 6'800 (in 10% der Wohnräume) > 17'000 (in 2% der Wohnräume)

Beitrag künstlicher Radionuklide

Die durch ^{85}Kr in der Luft verursachte Dosis liegt nur bei einigen $\mu\text{Sv/a}$ [7.1.8], obwohl das ^{85}Kr das künstliche Nuklid mit der höchsten, in der ganzen Schweiz vorhandenen Aktivität ist. Sehr lokal, in unmittelbarer Nähe eines Industriebetriebes, führt das Tritium in der Luft zu höchstens 10 $\mu\text{Sv/a}$ [9.2.3]. Würde an dieser Stelle das Regenwasser als Trinkwasser benützt (1000 Bq/l, 2 l/Tag) hätte das eine Jahresdosis von 12 μSv zur Folge.

Mit der Nahrung aufgenommene künstliche Radionuklide führen im Mittel in der Schweiz, bei durchschnittlichen Ernährungsgewohnheiten, zu etwa 6 $\mu\text{Sv/a}$ [5.1.6]. ^{137}Cs trägt ca. 3 $\mu\text{Sv/a}$ dazu bei, ^{90}Sr ca. 2 $\mu\text{Sv/a}$. Die Streuung ist schlecht bekannt, aber sicher sehr gross. Die aus Ganzkörpermessungen an Schulklassen aus Genf und Basel berechnete Dosis durch das ^{137}Cs liegt zum Beispiel deutlich unter 1 $\mu\text{Sv/a}$ [6.1.2]. Dagegen könnte die Belastung für kleine Gruppen der Bevölkerung bis zu 100 $\mu\text{Sv/a}$ betragen. Dieser Wert ergibt sich, wenn täglich 1 l Milch mit der höchsten 1996 gefunden ^{137}Cs Konzentration (20 Bq/l) getrunken wird. Ein wöchentlicher Konsum von 200g Wildpilzen mit 600 Bq/kg ^{137}Cs (Toleranzwert) würde zu einer Jahresdosis von 90 μSv führen.

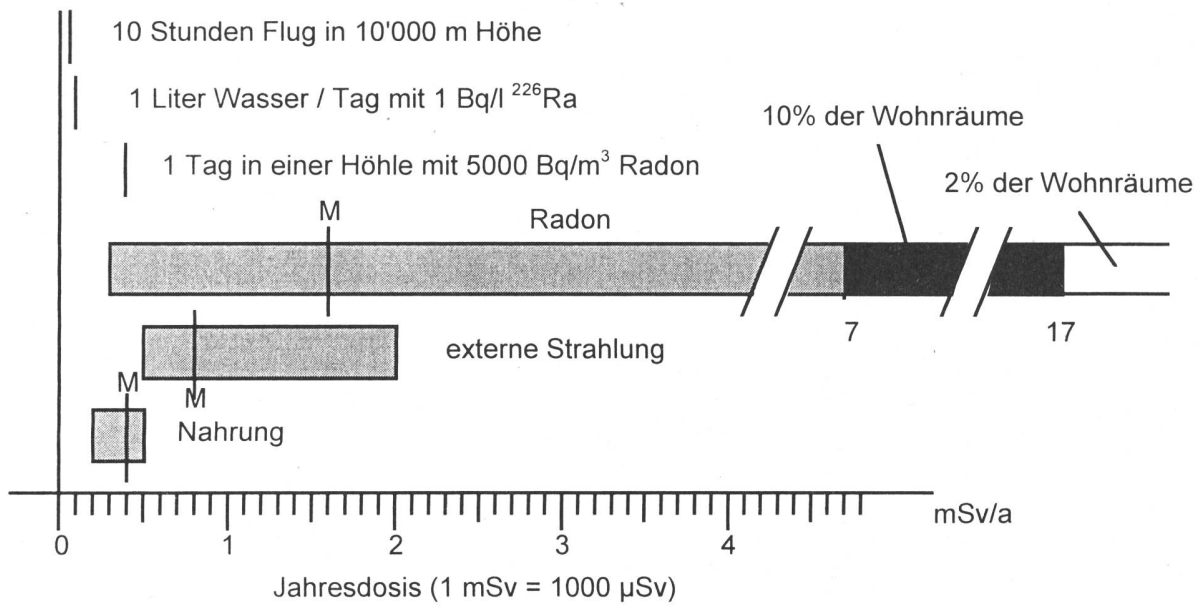
Falls jemand Gemüse am höchstbelasteten Ort in der Nähe der Sondermüll-Verbrennungs-Anlage in Basel anpflanzt

und davon jeden Tag 200 g isst, hätte das aber höchstens 2 $\mu\text{Sv/a}$ zur Folge (durch ^{14}C [7.1.7]). Noch kleiner ist der Beitrag aus den, zwar messbaren, ^{14}C Emissionen des Kernkraftwerkes Leibstadt oder des PSI. Ohne grossen Einfluss auf die Jahresdosis (1 bis 2 μSv) ist auch der Tritium-Gehalt in Milch und Gemüse aus der Nähe des bereits erwähnten Betriebes, der Tritium verarbeitet.

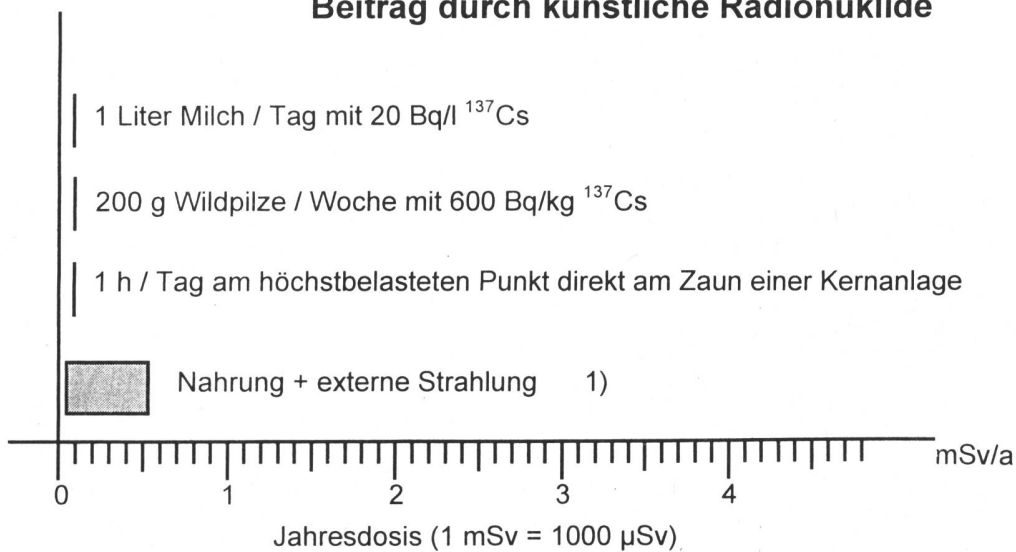
Der tatsächliche Beitrag der künstlichen Radionuklide zur jährlichen Dosis durch externe Strahlung ist schlecht bekannt. Unter der unrealistischen Annahme, dass man sich dauernd im Freien aufhält, wären das zwischen 10 und 500 $\mu\text{Sv/a}$ [3.1.4]. Die grosse Streuung ist ein Abbild der regional stark unterschiedlichen Ablagerung des ^{137}Cs nach dem Unfall in Tschernobyl. Die Schweizer Kernkraftwerke, das PSI und das CERN tragen dazu kaum etwas bei [8.1.1, 8.4.13]. Sollte allerdings jemand auf die Idee kommen, sich 1 h pro Tag am höchstbelasteten Punkt direkt am Zaun des Kernkraftwerkes Leibstadt aufzuhalten, müsste er mit einer zusätzlichen Dosis von 100 $\mu\text{Sv/a}$ rechnen [8.3.2].

Gesamthaft dürfte der Dosisbeitrag der künstlichen Radionuklide für den grössten Teil der Schweizer Bevölkerung zwischen 10 und 500 $\mu\text{Sv/a}$ liegen. Für kleine Gruppen könnte das bis zu 100 $\mu\text{Sv/a}$ mehr sein.

Beitrag durch natürliche Radionuklide und kosmische Strahlung



Beitrag durch künstliche Radionuklide



Mittelwerte und Streubereiche der jährlichen Strahlendosen durch natürliche und künstliche Quellen für die Schweizer Bevölkerung. Daten für 1996. M = Mittelwert. 1) : Beitrag der Schweizer Kernkraftwerke, der Forschungsinstitute und der Industrie < 15 $\mu\text{Sv/a}$.

Einheiten und Vorschriften

Radioaktivität ist eine Eigenschaft instabiler Atomkerne, sich ohne äussere Einwirkung umzuwandeln (radioaktiver Zerfall) und dabei eine charakteristische (ionisierende) Strahlung in Form von Alpha- oder Beta-Teilchen sowie von Gamma-Quanten auszusenden. Natürliche radioaktive Stoffe kommen in der Umwelt seit jeher vor; künstliche wurden bei Kernwaffenexplosionen freigesetzt, können aber auch aus Kernanlagen, sowie Betrieben und Spitälern, die Radionuklide verarbeiten, stammen.

Die **Radioaktivität** einer Substanz wird in Becquerel (Bq) angegeben. 1 Bq entspricht einem radioaktiven Zerfall pro Sekunde. 10^{-3} , 10^{-6} , 10^{-9} bzw. 10^{-12} Becquerel werden mBq, μ Bq, nBq bzw. pBq (milli-, micro-, nano- bzw. pico-) geschrieben. Entsprechend werden 10^3 , 10^6 , 10^9 bzw. 10^{12} als kBq, MBq, GBq bzw. TBq (kilo-, Mega-, Giga- bzw. Tera-) geschrieben. Früher wurde vor allem die Einheit Curie (Ci) verwendet ($1 \text{ nCi} = 37 \text{ Bq}$ bzw. oder $1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$).

Die **Strahlendosen** der Bevölkerung werden als effektive Dosis in milli-Sievert (mSv), oder micro-Sievert (μ Sv) angegeben. Dies ist die Summe der (Äquivalent-) Dosen aller bestrahlten Organe des Körpers, gewichtet mit ihrer jeweiligen Strahlenempfindlichkeit. Sie gilt als Bewertungsgrösse für die biologische Wirkung der Strahlung auf den ganzen Menschen. Sie ist unabhängig von Art und Herkunft der Strahlung.

Gemäss **Strahlenschutzverordnung** (StSV) dürfen die Dosen für die Bevölkerung durch zivilisationsbedingte Radioaktivität und Strahlung in der Umwelt, jedoch ohne Radon und medizinische Anwendungen, 1 mSv pro Jahr nicht übersteigen. Für Luft und Wasser im öffentlich zugänglichen Bereich legt die Verordnung Immissionsgrenzwerte fest, deren Ausschöpfen bei Dauerbelastung über Trinkwasser und Atemluft zu je rund 0.2 mSv pro Jahr führen würde. Für die Direktstrahlung gilt ein Grenzwert von 5 mSv pro Jahr im öffentlich zugänglichen Bereich, bzw. 1 mSv pro Jahr in Wohn-, Aufenthalts- und Arbeitsräumen. Toleranz- und Grenzwerte für Radionuklide in Lebensmitteln werden in der Verordnung über Fremd- und Inhaltsstoffe (FIV) publiziert. Für den Strahlenschutz relevant ist der Grenzwert, während der Toleranzwert ein reines Qualitätskriterium, aber noch kein Strahlenrisiko, darstellt. Radioaktive Stoffe dürfen nur kontrolliert an die Umwelt abgegeben werden, wobei von der Bewilligungsbehörde Abgabelimits festgelegt werden. Diese sind beispielsweise bei den Kernanlagen so gewählt, dass keine Person in der Nahumgebung eine zusätzliche Dosis von mehr als 0.2 mSv pro Jahr erhalten kann. Für Radongas gilt ein Grenzwert für Wohn- und Aufenthaltsräume von 1000 Bq/m^3 . Bei Überschreiten dieser Grenzwerte sind die Gebäude zu sanieren. Bei Neu- oder Umbauten soll ein Richtwert von 400 Bq/m^3 nicht überschritten werden.

A

Synthèse de la radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse pour 1996

H. Surbeck et Ch. Murith

Section de surveillance de la radioactivité (SUER)
Office fédéral de la santé publique, Ch. du Musée 3, 1700 FRIBOURG

Introduction

Ce chapitre présente une synthèse des résultats des mesures de la radioactivité de l'environnement en Suisse et des doses qui en résultent pour la population. Les données sont tirées de la partie B du rapport. Le lecteur trouvera une information plus détaillée aux chapitres ou pages indiquées entre parenthèses. Pour les données extraites de rapports antérieurs sur "la radioactivité de l'environnement et les doses de rayonnements en Suisse", l'année correspondante figure en parenthèses.

Comme ce rapport concerne la radioactivité de l'environnement, il n'englobe ni les données sur l'utilisation médicale des rayonnements ionisants, ni celles relatives à l'exposition professionnelle aux rayonnements.

La synthèse porte tout d'abord sur les radionucléides mesurés en Suisse en 1996, classés selon les compartiments dans lesquels ils ont été examinés. Un second chapitre résume les mesures de l'exposition externe (débit de dose ambiante). La troisième partie se consacre à l'estimation des doses de rayonnements pour la population suisse sur la base de ces données.

La surveillance sans faille (dans l'espace et dans le temps) des concentrations et des débits de dose des différents radionucléides n'est pas réaliste. Un choix ciblé des points de prélèvement des périodes et des points de mesure peut cependant prévenir de mauvaises surprises. Cela présuppose une bonne compréhension de la provenance et du transport des radionucléides. C'est pourquoi une surveillance de la radioactivité de l'environnement doit en complément des mesures de routine aussi englober des programmes de recherche sur l'origine et les phénomènes de transport. Des exemples de telles études interdisciplinaires sont heureusement nombreuses dans ce rapport [4.2, 4.3, 4.4, 7.1, 7.2, 7.3, 8.5, 9.2].

L'estimation des doses de rayonnements pour la population tient compte en général de personnes qui répondent à des normes couramment admises. La consommation extrême de certains aliments ou le séjour prolongé en des endroits plus défavorables (p.ex. cavernes ou montagnes) n'entrent pratiquement pas en considération.

A une exception près [2.2], ce rapport ne mentionne pas l'effet possible des faibles doses calculées. Il se limite à confirmer qu'en 1996 aussi, exception faite de la concentration de radon dans quelques habitations, les prescriptions réglementaires n'ont pas été dépassées.

1. Radionucléides naturels et artificiels dans l'environnement

Air

A part le ^{85}Kr et le ^3H (tritium), il n'y a guère d'autres radionucléides artificiels décelables dans l'air. Cette constatation est également valable pour le voisinage immédiat des centrales nucléaires suisses et des instituts de recherche nucléaire [4.1, 8].

Le ^{85}Kr (env. 1 Bq/m^3) provient d'installations de retraitement du combustible et se répartit à l'échelle mondiale depuis la France, l'Angleterre et la Russie [7.1.8]. A l'opposé très localement, dans le voisinage d'une entreprise traitant du tritium, on enregistre comme les années précédentes env. 10 Bq/m^3 ^3H (sous forme HTO) [9.3.2]. Ce niveau est aisément mesurable, mais constitue à peine 1% de la valeur admissible.

En comparaison de ces traces de radionucléides artificiels en plein air, les concentrations naturelles partiellement élevées du radon dans l'air intérieur apparaissent plus importantes. La variabilité de ces concentrations est considérable. Les 15000 maisons examinées en Suisse jusqu'à 1996 indiquent une valeur moyenne voisine de 60 Bq/m^3 . On constate un dépassement de la valeur directrice de 400 Bq/m^3 dans moins de 10% des maisons, respectivement un dépassement de la valeur limite de 1000 Bq/m^3 dans environ 2% d'entre elles [2.4]. Des assainissements visant surtout à défavoriser l'entrée du radon par le sol vers l'intérieur de l'habitat sont en cours.

Précipitations

L'activité ^3H (tritium) domine dans les précipitations suisses. Sur l'ensemble du territoire, le niveau de base d'environ 1 Bq/l provient vraisemblablement de l'utilisation industrielle du tritium et des installations de retraitement du combus-

tible. La part de la production naturelle et de celle qui subsiste des essais nucléaires des années 60 ne suffit pas à restituer ce niveau de base [7.1]. Dans certaines régions ce fond est augmenté d'environ jusqu'à 10 Bq/l incombant aux installations nucléaires et aux entreprises industrielles [4.1.6, 7.1]. On peut trouver des valeurs locales atteignant plusieurs kBq/l en raison du traitement de tritium ou de l'incinération de déchets tritiés [4.1.7, 4.2.5, 9.3.4]. 1 kBq/l correspond à près de 10% de la limite pour la conduite de tritium dans les eaux accessibles au public. En admettant que les précipitations soient directement utilisées comme eau potable, 1 kBq/l représenterait exactement la valeur de tolérance selon l'ordonnance sur les substances étrangères et les composants (OSEC).

D'autres radionucléides artificiels, comme p.ex. le ^{137}Cs n'ont pu être mis que rarement en évidence, avec des valeurs maximales de quelques 10 mBq/l [4.1.4]. En comparaison les concentrations de ^7Be avant tout d'origine naturelle sont voisines de 1 Bq/l [4.1.5].

Sol

Les échantillons de sol prélevés en 1996 confirment les variations régionales marquées, constatées déjà les années précédentes. Pour les radionucléides naturels des séries de l'uranium et du thorium, ce sont les différences géologiques qui expliquent les écarts, tandis que pour le ^{40}K , s'ajoute en plus l'influence des engrais. Les domaines respectifs des valeurs rapportés à la matière sèche sont: ^{40}K : 200 à 600 Bq/kg , série ^{232}Th : 15 à 40 Bq/kg , série ^{238}U : 25 à 60 Bq/kg [3.1.2 et 5.1.8].

Pour les radionucléides artificiels, les variations régionales répondent de façon plausible à la superposition des deux modèles suivants de déposition. Les dépôts issus des explosions nucléaires atmosphériques dans les années 60, qui

se sont étalés sur plusieurs années dont l'image suit globalement celle des précipitations annuelles moyennes; on enregistre par conséquent plus de ^{137}Cs , ^{90}Sr et Pu sur les reliefs montagneux (Jura compris), que sur le Plateau suisse [7.3.4]. Les dépôts sembleraient également plus élevés dans les régions de fortes précipitations du Tessin et des vallées du sud des Grisons. Malheureusement les mesures d'échantillons de sol de ces régions sont peu nombreuses avant 1986. Mais les valeurs ^{90}Sr et Pu enregistrées en deux endroits du Tessin [7.2, 7.3.4] confirment par exemple cette tendance. Les dépôts de ^{137}Cs provenant de Tchernobyl en 1986, qui ont par contre eu lieu sur une courte période (quelques heures à quelques jours), se sont traduits par une distribution bien plus hétérogène liée aux précipitations au moment du passage du nuage radioactif. En outre, le ^{90}Sr n'était présent qu'à l'état de traces [6.3.3]. Les régions les plus touchées furent le Tessin et les vallées du sud des Grisons ainsi que le Jura et partiellement le nord est de la Suisse. Globalement ces deux contaminations présentent actuellement une activité dans le sol, qui s'établit comme suit rapportée au poids sec: ^{137}Cs , 10 à 350 Bq/kg, ^{90}Sr , 1 à 6 Bq/kg, ^{239}Pu , 0.2 à 1.4 Bq/kg [3.1.2, 5.1.8, 7.2.3, 8.3.3]. La majeure partie de l'activité de ces radionucléides réside encore dans les 20 premiers cm du sol [3.1.3] et même dans les 10 premiers cm pour l'exemple d'un sol forestier du Tessin [4.4.5]. Ces activités peuvent d'ailleurs être nettement supérieures dans des cas extrêmement favorables à un enrichissement, comme le montre un profil de sol avec jusqu'à 11 Bq/kg ^{239}Pu dans la couche superficielle 0-2 cm [7.3].

Aucune influence de l'exploitation des centrales nucléaires suisses n'a été constatée au niveau de la concentration des radionucléides dans le sol, à une exception près. Il s'agit des traces de ^{134}Cs , ^{137}Cs et ^{60}Co de quelques Bq/kg qui témoignent dans le voisinage proche de

Mühleberg d'un ancien rejet de 1986 [8.3.4].

Végétaux et denrées alimentaires

Dans la plupart des échantillons d'herbe et d'aliments prélevés en 1996, le ^{40}K naturel domine par rapport aux traces de radionucléides artificiels. Excepté pour le ^{14}C , ces traces ne peuvent être attribuées à l'exploitation des centrales nucléaires suisses ou des installations de recherche nucléaire. Elles ont été principalement assimilées à partir du sol, qui reste contaminé par les dépôts de Tchernobyl et des essais nucléaires atmosphériques. La distribution régionale des activités dans l'herbe et les aliments reflète ainsi comme dans le sol l'image de ces dépôts [5.1.2, 5.1.8]. En dehors du Tessin et des vallées du sud des Grisons, les valeurs ^{137}Cs s'échelonnent de 0.5 à 15 Bq/kg dans l'herbe sèche et sont inférieures à 1 Bq/l dans le lait. Par contre au Tessin et dans les vallées du sud des Grisons, des valeurs jusqu'à 85 Bq/kg d'herbe sèche et 18 Bq/l de lait ont été enregistrées. Pour le ^{90}Sr , les valeurs indiquent sur l'ensemble de la Suisse 0.4 à 0.8 Bq/kg dans les céréales, 0.5 à 28 Bq/kg dans l'herbe séchée et 0.02 à 0.5 Bq/l dans le lait [5.1.8, 7.2]. Les valeurs maximales ^{90}Sr se constatent généralement en montagne et parfois également au Tessin [7.2.4, 7.2.5]. Cela confirme l'hypothèse mentionnée précédemment, selon laquelle les retombées des essais nucléaires se sont en plus des régions montagneuses davantage répercutées sur des régions à fortes précipitations du sud des Alpes que sur le Plateau suisse.

Un échantillon de lait du Tessin a signalé 19 Bq/l ^{137}Cs . Cette concentration est certes supérieure à la valeur de tolérance de 10 Bq/l, mais se situe nettement en dessous de la valeur limite applicable aux aliments pour nourrissons de 400 Bq/l. Pour le ^{90}Sr dans le lait, la valeur de tolérance de 1 Bq/l n'a été dépassée dans aucun échantillon. La signification des valeurs de tolérance et des valeurs limites

pour les denrées alimentaires est précisée sous [1.2].

Comme les années précédentes, les concentrations ^{137}Cs sont nettement accrues dans des échantillons de gibier (importé) et dans certaines espèces de champignons sauvages. Si l'on n'observe plus depuis 1994 de dépassement de la valeur de tolérance (600 Bq/kg) dans les échantillons de gibier, la situation n'a guère évoluée pour les champignons sauvages. Ils ne montrent aucun recul significatif de l'activité [5.1.5], bien que p.ex. dans des fougères du Tessin, l'on ait constaté un facteur de transfert sol-plante considérablement plus faible en 1996 par rapport à 1995 [4.4.6]. En 1996, 1 des 10 échantillons de pholiotas ridés du nord des Alpes et 7 des 10 échantillons de bolets bords du Tessin contenaient plus de 600 Bq/kg ^{137}Cs (valeur de tolérance).

La part des radionucléides réellement assimilée par le corps humain, suite à l'ingestion de denrées contaminées se laisse déterminer à partir des mesures du corps entier [6.1, 6.2] ou pour le ^{90}Sr sur la base des analyses des dents de lait et des vertèbres [6.3]. Les mesures du corps entier effectuées sur une classe d'élèves de Genève et de Bâle ont indiqué les activités individuelles suivantes pour le ^{137}Cs en 1996: en moyenne < 10 Bq resp. 18 Bq avec des valeurs extrêmes jusqu'à 64 Bq [6.1.2]. Dans les dents de lait et les vertèbres, on a recensé env. 20 Bq ^{90}Sr /kg Ca [6.3.2].

L'influence d'une entreprise traitant du tritium [9.2.2] est clairement perceptible dans les échantillons de légumes et de lait, suite au transfert du tritium à partir des eaux souterraines et des eaux de pluie ou de son transfert direct depuis l'air. Dans l'eau cellulaire, qui représente environ 90% du poids des légumes frais, on a enregistré en moyenne 100 Bq/l ^3H avec des pointes jusqu'à 680 Bq/l. Dans le lait les valeurs se situent autour de 30 Bq/l, avec des extrêmes jusqu'à 300 Bq/l. Ainsi la valeur de tolérance de 1000 Bq/l

n'a jamais été dépassée pour les légumes comme pour le lait.

Le ^{14}C peut être assimilé dans les plantes à partir du CO_2 dans l'air. Le ^{14}C d'origine naturelle et celui qui subsiste des essais nucléaires atmosphériques des années 60 occasionnent actuellement dans nos plantes alimentaires des activités voisines de 35 Bq/kg de matière fraîche (dont env. 30% d'origine naturelle) [7.1.3]. Dans le voisinage de la centrale nucléaire de Leibstadt, des valeurs jusqu'à 15% plus élevées que cette valeur de référence ont été observées dans des feuillages prélevés en 1996. Auprès du réacteur de recherche Saphir de l'Institut Paul-Scherrer, hors d'activité, l'augmentation représente encore près de 6%. Dans la ville de Bâle, le nouvel incinérateur de déchets élimine entre autres des déchets provenant de la recherche en chimie. Cela se traduit par une augmentation du ^{14}C dans les échantillons des feuillages du voisinage jusqu'à 48% supérieure à la valeur de référence. L'activité correspondante d'environ 55 Bq/kg se situe néanmoins nettement en dessous de la valeur de tolérance de 200 Bq/kg.

Systèmes aquatiques

Dans les eaux superficielles analysées en 1996, seules des traces de ^{60}Co , ^{134}Cs et ^{137}Cs ont été décelées, le plus fréquemment inférieures à 20 mBq/l [4.2.6]. Des valeurs jusqu'à 43 mBq/l ^{137}Cs ont été trouvées exclusivement dans le lac de Lugano indiquant une resuspension de l'activité accumulée dans les sédiments [4.4.3].

Conformément aux concentrations tritium des précipitations, les valeurs ^3H des eaux de rivière sont voisines de quelques Bq/l avec des pointes jusqu'à 10 Bq/l [4.2.6, 7.2.18]. L'eau usée de la station d'épuration de la Chaux-de-Fonds constitue une exception. La conduite du lavage des fumées à la station d'incinération des ordures a engendré aussi en 1996 des

valeurs extrêmes jusqu'à 5000 Bq/l [4.2.5].

Les poissons examinés n'ont par contre indiqué aucune incorporation de nucléides artificiels [4.2.6].

Les échantillons provenant des trappes à sédiment des barrages de Niederried (en aval de la centrale nucléaire de Mühleberg), de Klingnau (en aval de la centrale nucléaire de Beznau) et de Augst (en aval de la centrale nucléaire de Leibstadt) ont signalé des traces de quelques 10 Bq/kg ^{60}Co , ^{134}Cs et ^{137}Cs , qui sont au moins un ordre de grandeur inférieures au ^{40}K naturel détecté simultanément [4.2.3].

L'activité des particules piégées dans les trappes à sédiment est une mesure de la fraction transportée. Les échantillons de sédiments prélevés dans le lit des rivières et des lacs permettent en outre de reconstituer les dépôts des années antérieures [4.4.2, 7.3, 8.5.4]. En plus des traces de ^{60}Co (18 Bq/kg) dans l'Aar en aval de la centrale nucléaire de Mühleberg [8.5.5], on enregistre essentiellement le ^{137}Cs issu de l'accident de Tchernobyl.

Les rejets du CERN ne sont pas décelables dans le Rhône en aval de Genève [8.5.5]. Néanmoins des mesures effectuées sur des sédiments et des végétaux aquatiques dans un cours d'eau limitrophe du CERN ont indiqué quelques Bq/kg de matière sèche au niveau du ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co et ^{60}Co [8.5.6]. Bien que ces valeurs soient insignifiantes du point de vue de l'activité, elles n'en ont pas moins suscité quelques remous. Elles ont été mesurées dans un premier temps par une institution privée (CRII RAD) avant d'être confirmées par les organismes officiels.

Pour l'eau potable, une limite de 1 Bq/l est en vigueur en Suisse pour la somme des concentrations causées par les émetteurs alpha d'origine naturelle émanant des séries de l'uranium et du thorium (selon notre interprétation sans tenir compte du

^{222}Rn). Comme les méthodes habituelles de radiochimie sont trop coûteuses pour les laboratoires cantonaux, des méthodes simplifiées ont été développées pour la détermination de l'uranium et du radium [4.3].

2. Irradiation externe

La contribution prépondérante de l'irradiation externe provient des sources naturelles présentes dans le sol et les matériaux de construction ainsi que du rayonnement cosmique. A l'image des teneurs en ^{40}K et en nucléides des séries de l'uranium et du thorium régionalement très variables dans le sol, le débit de dose qui en résulte diffère considérablement selon les régions [3.1.2]. Le rayonnement cosmique croît significativement avec l'altitude. A 300 m au-dessus du niveau de la mer il équivaut à près de 40 nSv/h, à 2000 m à 80 nSv/h et atteint 5000 nSv/h à des altitudes de vol de 10000 m. Le rayonnement attribuable aux dépôts subsistants de 1986 (Tchernobyl) et des années 60 (essais nucléaires atmosphériques) ne représente en général que quelques pourcent de l'irradiation externe globale, sauf au Tessin, où il peut constituer en 1996 jusqu'à 30% [3.1.4].

Le débit de dose ambiante en plein air est en moyenne voisin en Suisse de 100 nSv/h, avec des valeurs qui s'échelonnent de 40 nSv/h jusqu'à 230 nSv/h [3.3.3]. A l'intérieur des maisons, la composante cosmique et celle du rayonnement terrestre sont partiellement atténuées par la structure du bâtiment. Cependant cette réduction est généralement compensée au-delà de sa valeur par le rayonnement additionnel des radionucléides naturels présents dans les matériaux de construction. C'est pourquoi l'irradiation externe à l'intérieur des maisons, qui montre un domaine de 50 nSv/h à 260 nSv/h, est en moyenne avec 110 nSv/h supérieure de l'ordre de 10% à celle en plein air.

La composante déjà mentionnée sous le paragraphe "sol" dans le voisinage de Mühelberg a progressivement diminué depuis 1986 et représente au maximum actuellement 3 nSv/h, 1 m au-dessus du sol.

Les mesures avec un détecteur de rayonnements embarqué à bord d'un hélicoptère (aéroradiométrie) ont mis en évidence le rayonnement produit par la désintégration du ^{16}N à la centrale nucléaire de Leibstadt (KKL) ainsi que la radiation liée à l'entreposage de déchets radioactifs à l'Institut Paul Scherrer (PSI), [3.4.5]. Les 2000 nSv/h mesurés 90 m à la verticale de la centrale nucléaire de Leibstadt ne représentent aucun risque pour la population, en raison de l'efficacité du blindage latéral de la source de rayonnement à proximité du sol.

Des valeurs de quelques 100 nSv/h ont été enregistrées en certains endroits directement à la clôture des centrales nucléaires, du PSI et du CERN [8.2.2, 8.3.2, 8.4.10]. Toutefois une contribution de ces installations au débit de dose ambiante ne se remarque pratiquement pas dans leur voisinage proche facilement accessible au public.

3. Doses des rayonnements calculées pour la population

Contribution des radionucléides naturels et du rayonnement cosmique

"La contribution majeure provient du radon dans les habitations. La moyenne d'environ 60 Bq/m³ [1993, B.2.3] entraîne 1000 µSv/an. Dans 50% des pièces de séjour la concentration est inférieure à 73 Bq/m³, correspondant à une dose annuelle de 1200 µSv, dans 10% elle dépasse la valeur directrice de 400 Bq/m³ (6800 µSv/an) et dans 2% des séjours elle est supérieure à la valeur limite de 1000 Bq/m³ (17'000 µSv/an). Ces valeurs ont été calculées pour un séjour de 7000 h par an (en moyenne 19 h/jour). A cela

s'ajoute encore 400 µSv/an accumulés sur la place de travail à raison de 2000 h par an avec 60 Bq/m³. Ces valeurs de dose sont encore augmentées d'environ 10% [1993, B.2.3], si l'on tient compte du thoron, également naturel, pour lequel aucune valeur de mesure n'est cependant disponible en Suisse. On obtient par conséquent en moyenne une dose annuelle due au radon et au thoron de l'ordre de 1'600 µSv. Dans 2% des locaux d'habitation, la dose est cependant plus de 10 fois supérieure à cette moyenne et dans 10% des pièces quand même bien 5 fois supérieure à la valeur moyenne [2.4]. Pour les amis des cavernes: 1 jour dans une grotte avec 5000 Bq/m³ se traduit par une dose d'environ 400 µSv.

Les radionucléides naturels ingérés à travers l'alimentation conduisent à une dose annuelle moyenne d'environ 360 µSv [5.1.6], dominée par le ^{40}K avec 200 µSv [5.1.6, 6.1.2]. Le domaine de variabilité est inconnu, mais le minimum devrait juste dépasser 200 µSv en raison de la concentration pratiquement invariable du ^{40}K dans le corps. La consommation de 1 litre par jour d'une eau minérale contenant 1.3 Bq/l ^{226}Ra entraînerait une dose additionnelle d'environ 100 µSv/an. Une telle eau minérale était commercialisée en Suisse jusqu'en 1995 [1995, B.3.8].

La contribution des radionucléides naturels présents dans le sol à l'irradiation externe n'est pas facile à estimer. Les mesures habituelles de dose indiquent uniquement la somme de toutes les composantes (naturelle (terrestre + cosmique) + artificielle) [3.2.4, 3.3.3, 8.3.2, 8.4.10]. La part des radionucléides naturels calculée sur la base des mesures de spectrométrie gamma in situ est comprise entre 40 nSv/h et environ 90 nSv/h [3.1.4]; pour un séjour permanent en plein air cela correspondrait à une dose annuelle comprise entre 350 et 800 µSv.

Il est encore plus délicat d'évaluer la contribution à l'irradiation externe des

Il est encore plus délicat d'évaluer la contribution à l'irradiation externe des radionucléides naturels présents dans les matériaux de construction. Seules des mesures de spectrométrie gamma permettent de distinguer les différentes composantes naturelles et artificielles à l'intérieur d'une maison. De telles mesures sont encore peu développées en Suisse.

Le rayonnement cosmique entraîne 300 m au-dessus du niveau de la mer une dose annuelle voisine de 350 μSv et à une altitude de 2000 m environ 700 μSv pour un séjour permanent correspondant. Un

vol de 10 h à une altitude de 10'000 m occasionne une dose supplémentaire de l'ordre de 50 μSv .

Le chapitre 3.3 rend compte des nombreuses mesures du débit de dose sur l'ensemble de la Suisse. Sous l'hypothèse que la part des radionucléides artificiels était faible (%) dans les endroits sélectionnés, les figures du chapitre 3.3.3 montrent la distribution statistique de l'irradiation naturelle en plein air et à l'intérieur d'habitations. On peut en déduire par le calcul, une dose moyenne pour la Suisse de (820 ± 20) μSv .

Globalement la dose annuelle attribuable aux sources naturelles équivaut en moyenne pour la population suisse à près de 2800 μSv (alimentation 400, radiation externe 800, radon 1600). Le domaine de variabilité est considérable:

Source	Moyenne [$\mu\text{Sv}/\text{an}$]	Minimum [$\mu\text{Sv}/\text{an}$]	Maximum [$\mu\text{Sv}/\text{an}$]
Alimentation	400	200	500
Radiation externe	800	500	2'000
Radon	1'600	300	> 6'800 (dans 10% des séjours) > 17'000 (dans 2% des séjours)

Contribution des radionucléides artificiels

La dose occasionnée dans l'air par le ^{85}Kr correspond seulement à quelques $\mu\text{Sv}/\text{an}$ [7.1.8], bien que le ^{85}Kr soit le nucléide artificiel présentant l'activité la plus élevée sur l'ensemble de la Suisse. Très localement, dans le voisinage immédiat d'une entreprise industrielle, le tritium dans l'air entraîne au plus jusqu'à 10 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ [9.2.3]. En admettant qu'à cet endroit l'eau de pluie soit utilisée comme eau potable (1000 Bq/l, 2 l/jour), il en résulterait une dose annuelle de 12 μSv .

Les radionucléides artificiels ingérés avec la nourriture conduisent en moyenne en

Suisse, pour des habitudes alimentaires moyennes, à environ 6 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ [5.1.6]. Le ^{137}Cs contribue à près de 3 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, le ^{90}Sr à env. 2 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. La variabilité est mal connue, mais certainement très importante. La dose calculée à partir des mesures du corps entier effectuées sur des écoliers de Genève et Bâle se situe par exemple pour le ^{137}Cs nettement en dessous de 1 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ [6.1.2]. Par contre, des groupes restreints de la population pourraient être soumis à jusqu'à 100 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette valeur résulte d'une consommation quotidienne de 1 l de lait, qui présenterait la concentration ^{137}Cs maximale (20 Bq/l) mesurée en 1996. Une alimentation hebdomadaire avec 200 g de champignons sauvages contenant 600

Bq/kg ^{137}Cs (valeur de tolérance) engendrerait une dose annuelle de 90 μSv .

Si une personne plantait des légumes à l'endroit le plus défavorable dans le voisinage de l'incinérateur de déchets de Bâle et en consommait quotidiennement 200g, elle recevrait cependant au maximum 2 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ (par le ^{14}C [7.1.7]). La contribution des émissions ^{14}C de la centrale nucléaire de Leibstadt ou du PSI quoique mesurable est encore plus faible. La teneur tritium dans le lait et les légumes à proximité de l'entreprise déjà mentionnée qui traite le tritium, se révèle également sans grande influence sur la dose annuelle (1 à 2 μSv).

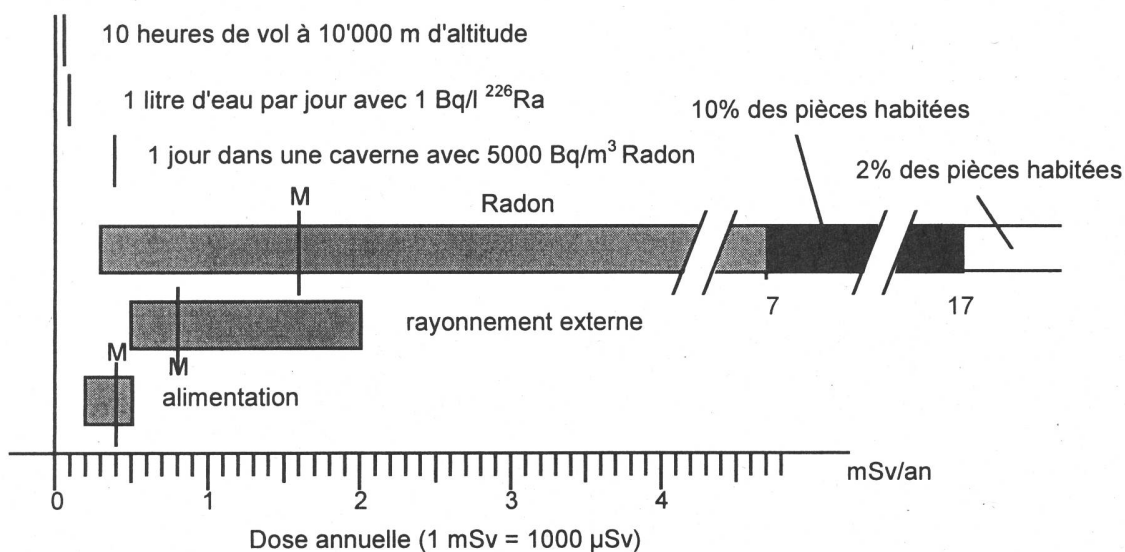
La contribution réelle des radionucléides artificiels à la dose annuelle par exposition externe est mal connue. Sous l'hypothèse peu réaliste d'un séjour permanent en plein air, on obtiendrait une contribution entre 10 et 500 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ [3.1.4]. La grande

variabilité témoigne de l'hétérogénéité régionale marquée des dépôts du ^{137}Cs suite à l'accident de Tchernobyl. Les centrales nucléaires suisses, le PSI et le CERN ne se répercutent pratiquement pas sur l'exposition externe [8.1.1, 8.4.13]. S'il venait pourtant à l'idée d'une personne de séjourner 1 h par jour dans l'endroit le plus défavorable à la clôture de la centrale nucléaire de Leibstadt, elle devrait compter avec une dose additionnelle de 100 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ [8.3.2].

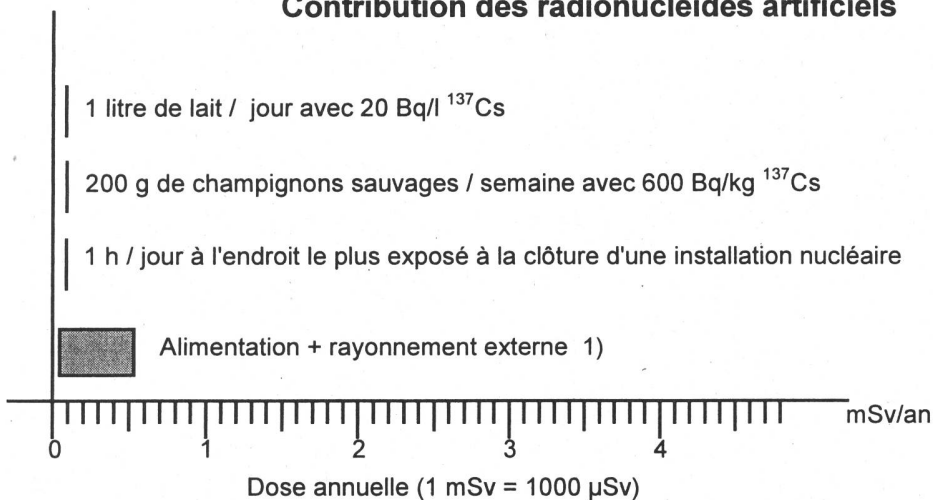
Globalement la contribution des radionucléides artificiels à la dose devrait représenter pour la majeure partie de la population suisse entre 10 et 500 $\mu\text{Sv}/\text{an}$.

Pour quelques groupes restreints, cette contribution pourrait s'avérer jusqu'à 100 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ plus élevée.

Contribution des radionucléides naturels et du rayonnement cosmique



Contribution des radionucléides artificiels



Valeurs moyennes et domaine de variabilité des doses annuelles de rayonnements occasionnées à la population suisse par des sources naturelles et artificielles. Données pour 1996. M = moyenne. 1): contribution des centrales nucléaires suisses, des instituts de recherche et de l'industrie < 15 $\mu\text{Sv/an}$.

Unités et prescriptions et surveillance

La radioactivité est une propriété des noyaux instables de se transmuter (désintégration radioactive) sans influence extérieure en émettant une radiation (ionisante) caractéristique sous la forme de particules alpha ou bêta ainsi que de photons gamma. La radioactivité naturelle fait depuis toujours partie de notre environnement. La radioactivité artificielle est libérée lors des explosions d'armes nucléaires, mais peut aussi provenir des installations nucléaires ainsi que des industries et des hôpitaux qui manipulent des radionucléides.

La radioactivité d'une substance s'exprime en becquerel (Bq). 1 Bq correspond à une désintégration par seconde. 10^{-3} , 10^{-6} , 10^{-9} resp. 10^{-12} becquerel s'écrivent mBq, μ Bq, nBq resp. pBq (milli-, micro-, nano- resp. pico-). De même 10^3 , 10^6 , 10^9 resp. 10^{12} becquerel sont notés kBq, MBq, GBq resp. TBq (kilo-, Mega-, Giga- resp. Tera-). Dans le passé, l'unité Curie (Ci) était couramment utilisée (1 nCi = 37 Bq resp. 1 Bq = 27 pCi).

Les doses de rayonnements de la population sont indiquées comme dose efficace (E) en milli-sievert (mSv). Cette grandeur représente la somme des "équivalents" de dose de tous les organes irradiés du corps, pondérée par la radiosensibilité de chacun d'entre eux. C'est la grandeur d'appréciation de l'effet biologique de la radiation sur l'être entier qui ne dépend ni du type, ni de l'origine de la radiation.

Conformément à **l'ordonnance sur la radioprotection** (ORaP), les doses à la

population liées à la radioactivité de l'environnement et à la civilisation - à l'exclusion toutefois du radon et des applications médicales - ne doivent pas dépasser 1 mSv par an. Pour l'air et l'eau du domaine public, l'ordonnance fixe des limites d'impact, dont l'épuisement pour une charge permanente de l'eau potable et de l'air entraînerait chacun 0.2 mSv par an. Le rayonnement direct ne doit pas donner lieu en dehors de l'enceinte de l'entreprise à des doses ambiantes excédant, par année, 1 mSv dans les locaux d'habitation, de séjour et de travail et 5 mSv dans tout autre endroit. Des valeurs limites et de tolérance pour les radionucléides dans les denrées alimentaires sont publiées dans l'ordonnance sur les substances étrangères et les composants (OSEC). Du point de vue de la radioprotection, la valeur limite est essentielle, tandis que la valeur de tolérance traduit simplement un critère de qualité, qui ne signifie cependant aucun risque radiologique. L'émission de substances radioactives se fait de manière contrôlée dans l'environnement, selon les limites de rejets fixées par les autorités qui délivrent l'autorisation. A titre d'exemple, les limites de rejets pour les installations nucléaires sont fixées de sorte qu'aucun riverain ne puisse recevoir une dose additionnelle supérieure à 0.2 mSv par an. Pour le gaz radon, une valeur limite de 1000 Bq par m^3 s'applique aux locaux d'habitation et aux séjours. En cas de dépassement de cette valeur limite, les bâtiments doivent être assainis. Pour les constructions nouvelles ou celles en transformation, une valeur directrice de 400 Bq/ m^3 ne doit pas être dépassée.

A

Riassunto della radioattività dell'ambiente e delle dosi d'irradiazione in Svizzera nel 1996 ¹⁾

H. Surbeck e Ch. Murith

Sezione sorveglianza della radioattività (SUER)

Ufficio federale della sanità pubblica, Ch. du Musée 3, 1700 FRIBOURG

Introduzione

In questa parte del rapporto annuale si riassumono gli esiti delle misure della radioattività ambientale in Svizzera e le dosi d'irradiazione della popolazione che ne derivano. I dati sono ripresi dai rapporti presentati nella parte B. Tra parentesi indichiamo i capitoli o le pagine dove si trovano ulteriori ragguagli. Laddove abbiamo ripreso dati da rapporti annuali passati sulla "Radioattività dell'ambiente e dosi d'irradiazione in Svizzera", indichiamo tra parentesi l'anno del rapporto in questione.

Poiché il presente rapporto concerne la radioattività dell'ambiente, non contiene dati sull'applicazione medica di radiazioni ionizzanti né sull'esposizione a irradiazione per motivi professionali.

Il riassunto inizia con i radionuclidi misurati nel 1996 in Svizzera, suddivisi a seconda dell'ambiente di ricerca. Una seconda parte riassume le misure relative all'irradiazione esterna (intensità della dose ambiente). Nella terza, infine, si cerca di stimare sulla base di questi dati la dose d'irradiazione della popolazione svizzera.

Non è possibile controllare sempre e dovunque la concentrazione dei radionuclidi e l'intensità della dose. Scegliendo accuratamente i punti di prelievo dei

campioni, nonché il momento e il luogo delle misure, si possono evitare sorprese spiacevoli. Per questo è necessario conoscere bene la provenienza e il trasporto dei radionuclidi. Accanto alle misure abituali, la sorveglianza deve perciò includere anche programmi di ricerca sulla provenienza e sull'andamento del trasporto. In questo rapporto gli esempi di tali ricerche interdisciplinari sono fortunatamente numerosi [4.2, 4.3, 4.4, 7.1, 7.2, 7.3, 8.5, 9.2].

La stima delle dosi d'irradiazione della popolazione riguarda generalmente soltanto coloro che si muovono nella norma. Non si tiene praticamente conto di chi consuma quantità estreme di determinate derrate alimentari o di chi soggiorna con frequenza in luoghi particolarmente esposti a radiazioni (ad esempio in grotte o in montagna).

Con una sola eccezione [2.2], non si dice in questo rapporto quali potrebbero essere in realtà gli effetti delle dosi d'irradiazione calcolate, tutte modeste. Ci accontentiamo di mostrare che i limiti legali non sono stati superati neppure nel 1996, eccetto per quanto riguarda la concentrazione di radon in alcune case.

¹⁾ Traduzione italiana: Claudia Forni-Degkwitz, Bülach

1. Radionuclidi naturali e artificiali nell'ambiente

Aria

Nell'aria non sono praticamente più accertabili radionuclidi artificiali all'infuori del ^{85}Kr e del ^3H (tritio). Questo vale anche per le immediate vicinanze delle centrali nucleari svizzere e degli impianti nucleari di ricerca [4.1, 8].

Il ^{85}Kr (ca. 1 Bq/m^3) proviene dagli impianti di rigenerazione del combustibile nucleare e si diffonde dalla Francia, dall'Inghilterra e dalla Russia in tutto il mondo [7.1.8]. Assai localizzati sono invece i ritrovamenti di tritio; come in passato, si tratta di ca. 10 Bq/m^3 di ^3H (in forma di HTO) nei pressi di un'azienda di lavorazione del tritio [9.3.2]. Tale quantità è ben misurabile, ma non corrisponde neppure all'1% del valore ammissibile.

Più importante di queste tracce di radionuclidi artificiali all'aperto è la concentrazione in parte considerevole del radon naturale nell'aria all'interno degli edifici. La media delle 15'000 case oggetto di misura in Svizzera dal 1996 è di 60 Bq/m^3 . Poco meno del 10% dei locali abitati supera il limite operativo di 400 Bq/m^3 , il 2% circa il limite di 1000 Bq/m^3 [2.4]. Sono in corso risanamenti, volti soprattutto a ostacolare la penetrazione del radon dal suolo nelle case.

Precipitazioni

Nelle precipitazioni predomina l'attività del ^3H (tritio). La concentrazione di base di 1 Bq/l circa, presente in tutto il paese, deriva molto probabilmente dall'applicazione industriale del tritio e dagli impianti di rigenerazione del combustibile nucleare. La produzione naturale e i residui degli esperimenti compiuti con bombe atomiche negli anni sessanta non bastano infatti a spiegarla [7.1]. Sul piano regionale si aggiungono a questa concentrazione di base fino a circa 10 Bq/l provenienti dagli

impianti nucleari e da aziende industriali [4.1.6, 7.1]. Sul piano locale, la lavorazione del tritio o la combustione di scorie contenenti tritio possono causare valori massimi di alcuni kBq/l [4.1.7, 4.2.5, 9.3.4]. 1 kBq/l corrisponde all'incirca al 10% del limite per l'immissione di tritio in acque pubblicamente accessibili. Se si impiegassero le precipitazioni direttamente come acqua potabile, 1 kBq/l corrisponderebbe di giusta misura al valore di tolleranza secondo l'Ordinanza sulle sostanze estranee e sui componenti nelle derrate alimentari.

Altri radionuclidi artificiali, ad esempio il ^{137}Cs , sono stati accertati soltanto raramente, con una concentrazione massima di alcune decine di mBq/l [4.1.4]. A titolo di confronto: la concentrazione del ^7Be , di provenienza (prevalentemente) naturale, è di circa 1 Bq/l [4.1.5].

Suolo

Come già in passato, anche tra i campioni di suolo prelevati nel 1996 si notano differenze regionali considerevoli. Per quanto riguarda i radionuclidi naturali delle catene di decadimento dell'urano e del torio, ne sono responsabili differenze geologiche, per quanto concerne il ^{40}K (anch'esso naturale) anche concimi. ^{40}K : 200 a 600 Bq/kg , catena del ^{232}Th : 15 a 40 Bq/kg , catena dell' ^{238}U : 25 a 60 Bq/kg [3.1.2 e 5.1.8]. Questi valori si riferiscono al materiale secco.

Le differenze regionali di concentrazione dei radionuclidi artificiali si spiegano con la combinazione di due sedimentazioni. Quella dei radionuclidi provenienti dalle esplosioni in superficie di armi nucleari negli anni sessanta è durata diversi anni e la sua distribuzione rispecchia all'incirca le precipitazioni annue medie: in montagna (incluso il Giura) si trova più ^{137}Cs , ^{90}Sr e Pu che nell'Altopiano [7.3.4]. La concentrazione è forse ancora più elevata nelle zone di forti precipitazioni in Ticino e nelle valli grigionesi a sud delle Alpi. Purtroppo, le misure

svolte su campioni di suolo prelevati in queste regioni prima del 1986 sono poche. I valori dello ^{90}Sr e del Pu in due punti di prelievo nel Ticino sembrano tuttavia confermare questa tesi [7.2, 7.3.4]. La sedimentazione del ^{137}Cs di Cernobil nel 1986 è invece durata soltanto poco tempo (alcune ore o alcuni giorni), causando una distribuzione assai più eterogenea corrispondente alle precipitazioni cadute in questo breve periodo e accompagnata soltanto da tracce di ^{90}Sr [6.3.3]. Accanto al Ticino e alle valli grigionesi a sud delle Alpi ne sono stati colpiti anche il Giura e parte della Svizzera nord-orientale. Sommate, queste due sedimentazioni causano nel suolo le seguenti attività dei diversi radionuclidi (concentrazione riferita alla materia secca): ^{137}Cs , 10 a 350 Bq/kg, ^{90}Sr , 1 a 6 Bq/kg, ^{239}Pu , 0.2 a 1.4 Bq/kg [3.1.2, 5.1.8, 7.2.3, 8.3.3]. La maggior parte dell'attività di questi radionuclidi artificiali si trova ancora in uno strato di 20 cm dalla superficie del terreno [3.1.3]; nel caso di un terreno boschivo ticinese, addirittura nei primi 10 cm [4.4.5]. In presenza di circostanze estremamente favorevoli all'arricchimento, l'attività può essere tuttavia assai superiore: nel profilo di un suolo si sono riscontrati fino a 11 Bq/kg ^{239}Pu nei 2 cm più vicini alla superficie [7.3].

Con una sola eccezione, non si è costatato alcun influsso dell'esercizio di una centrale nucleare svizzera sulla concentrazione di radionuclidi nel suolo. L'eccezione è costituita da alcuni Bq/kg di ^{134}Cs , di ^{137}Cs e di ^{60}Co (per ognuno), nelle vicinanze della centrale nucleare di Mühleberg [8.3.4]. Queste tracce derivano da una fuoriuscita del 1986.

Piante, derrate alimentari in generale

Nella maggior parte dei prelievi di erba e derrate alimentari, anche nel 1996 il ^{40}K era predominante rispetto alle tracce di radionuclidi artificiali. Tranne per quanto riguarda il ^{14}C , non si possono ricondurre queste tracce all'esercizio delle centrali nucleari svizzere o agli impianti nucleari di

ricerca. I radionuclidi sono stati assorbiti prevalentemente dal terreno, nel quale sono tuttora presenti i sedimenti dell'infortunio di Cernobil e degli esperimenti in superficie con armi atomiche. Come per il suolo, la distribuzione regionale dell'attività nell'erba e nelle derrate alimentari rispecchia quella delle sedimentazioni [5.1.2, 5.1.8]. All'infuori del Ticino e delle valli grigionesi a sud delle Alpi, i valori del ^{137}Cs sono compresi tra 0.5 e 15 Bq/kg di materia secca nell'erba e inferiori a 1 Bq/l nel latte. Nel Ticino e nelle valli grigionesi a sud delle Alpi si sono invece riscontrati valori fino a 85 Bq/kg di materia secca nell'erba e fino a 19 Bq/l nel latte. Per quanto riguarda lo ^{90}Sr , i valori sono compresi in tutta la Svizzera tra 0.4 e 0.8 Bq/kg di cereali, tra 0.5 e 28 Bq/kg d'erba (materia secca) e tra 0.02 e 0.5 Bq/l di latte [5.1.8, 7.2]. Le concentrazioni più elevate di ^{90}Sr si trovano solitamente in montagna, ma in alcuni casi anche nel Ticino [7.2.4, 7.2.5]. Questo fatto conferma l'ipotesi formulata qui sopra che, oltre alle zone di montagna, anche le regioni con forti precipitazioni a sud delle Alpi sono state maggiormente colpite dall'Altopiano dalle sedimentazioni degli anni sessanta.

In un campione di latte del Ticino si è riscontrata un concentrazione di ^{137}Cs di 19 Bq/l, superiore al valore di tolleranza di 10 Bq/l, sebbene ancora assai inferiore al valore limite, anche a quello applicabile all'alimento iniziale per lattanti, di 400 Bq/l. Il limite di tolleranza di 1 Bq/l dello ^{90}Sr nel latte non è stato superato in nessun caso (per quanto riguarda il significato dei valori di tolleranza e valori limite applicabili alle derrate alimentari si veda il capitolo 1.2).

Sono tuttora nettamente elevate le concentrazioni di ^{137}Cs nei campioni di selvaggina (importata) e in alcune specie di funghi selvatici. Mentre nei campioni di selvaggina non si sono più costati superamenti del valore di tolleranza (600 Bq/kg) dal 1994, la situazione è rimasta pressoché invariata per quanto riguarda i funghi selvatici. Non si osserva ancora alcun calo

della radioattività [5.1.5], sebbene, ad esempio, per le felci si sia constatato in Ticino nel 1996 un fattore di trasferimento dal suolo alla pianta considerevolmente inferiore al 1995 [4.4.6]. Nel 1995, un campione di agarico rugoso (*rozites cape-rata*) su dieci prelevati a nord delle Alpi e 7 campioni di boleti dei castagni (*boletus badius*) su dieci prelevati nel Ticino presentavano una concentrazione di ^{137}Cs superiore a 600 Bq/kg (valore di tolleranza).

Misure dell'intero organismo [6.1, 6.2] e – per lo ^{90}Sr – analisi di denti di latte e vertebre [6.3] consentono di determinare la radioattività effettivamente assorbita nel corpo con le derrate alimentari. Con misure del corpo intero su due classi di studenti ginevrini e basilesi si è stabilita nel 1996 un'attività media del ^{137}Cs inferiore a 10 e, rispettivamente, 18 Bq per persona, con punte massime di 64 Bq. A titolo di confronto: l'attività complessiva del ^{40}K naturale è di circa 4000 Bq [6.1.2]. In denti di latte e ossa si sono trovati ca. 20 Bq ^{90}Sr /kg Ca [6.3.2]

I campioni di ortaggi e di latte prelevate vicino a un'azienda di lavorazione del tritio contenevano quantità bene accertabili di questo radionuclide, assorbito con l'acqua della falda freatica, l'acqua piovana o direttamente dall'aria [9.2.2]. Nel citoplasma, che costituisce circa il 90% del peso degli ortaggi freschi, si sono trovati in media 100 Bq/l ^3H , con punte massime di 680 Bq/l. Nel latte, il valore medio è di 30 Bq/l, quello estremo di 300 Bq/l. Tanto per gli ortaggi quanto per il latte, il valore di tolleranza di 1000 Bq/l non è quindi stato superato.

Le piante possono assorbire ^{14}C assimilandolo dal CO_2 dell'aria. Insieme con il ^{14}C prodotto durante gli esperimenti in superficie con armi nucleari degli anni sessanta, il ^{14}C contenuto per natura nell'aria causa attualmente un'attività di circa 35 Bq/kg di derrate alimentari vegetali fresche (di cui ca. 30 Bq/kg d'origine naturale) [7.1.3]. In foglie di alberi colte nelle vicinanze della

centrale nucleare di Leibstadt si sono trovate nel 1996 concentrazioni fino al 15% superiori a questo valore di riferimento. Presso il reattore di ricerca Saphir dell'Istituto Paul Scherrer l'aumento è ancora del 6% circa.

Nel nuovo impianto d'incenerimento dei rifiuti speciali della città di Basilea si bruciano tra altro rifiuti provenienti dalla ricerca chimica e contenenti ^{14}C . Nei campioni di foglie d'alberi prelevati presso l'impianto ne risulta un superamento del valore di riferimento che può raggiungere anche il 48%. Questo corrisponde a 55 Bq/kg, valore nettamente inferiore a quello di tolleranza di 200 Bq/kg.

Sistemi acquatici

Nelle acque di superficie si sono trovate nel 1996 soltanto tracce di ^{60}Co , ^{134}Cs e ^{137}Cs , il più delle volte inferiori a 20mBq/l [4.2.6]. Valori fino a 43 mBq/l ^{137}Cs sono stati riscontrati unicamente nel Ceresio, indice di un riscioglimento dell'attività contenuta nei sedimenti [4.4.3].

Analogamente alla concentrazione del tritio nella pioggia, il ^3H nell'acqua fiumana si aggira su valori dell'ordine di alcuni Bq/l con punte massime di alcune decine di Bq/l [4.2.6, 7.2.18]. Costituisce un'eccezione l'acqua di scolo dell'impianto di depurazione della acque di La Chaux-de-Fonds. Le immissioni dal gorgogliatore di lavaggio del gas combusto dell'impianto di incenerimento dei rifiuti vi hanno causato anche nel 1996 punte massime fino a 5000 Bq/l [4.2.5].

Le misure svolte su pesci non hanno rivelato indizi d'incorporazione di radionuclidi artificiali [4.2.6].

Campioni prelevati dalle trappole per sedimenti nei laghi artificiali di Niederried (a valle della centrale nucleare di Mühleberg), Klingnau (a valle della centrale nucleare di Beznau) e Augst (a valle della centrale nucleare di Leibstadt) contenevano alcune decine di Bq/kg di ^{60}Co , ^{134}Cs

e ^{137}Cs ; queste concentrazioni sono di almeno un ordine di grandezza inferiori a quella, pure determinata, del ^{40}K naturale [4.2.3].

L'attività contenuta nelle particelle prese nelle le trappole per sedimenti è una misura per determinare la quantità di radionuclidi attualmente trasportata. Campioni dei sedimenti sul fondo di fiumi e laghi consentono inoltre di ricostruire il processo di sedimentazione degli anni passati [4.4.2, 7.3, 8.5.4]. Accanto a tracce di ^{60}Co (18 Bq/kg) nell'Aar a valle della centrale nucleare di Mühleberg [8.5.5], si nota soprattutto il ^{137}Cs proveniente dall'incidente di Cernobil.

Le emanazioni del CERN non sono accettabili nel Rodano a valle di Ginevra [8.5.5]. In sedimenti e piante acquatiche di un ruscello nelle vicinanze del CERN si sono tuttavia misurati alcuni Bq di ^{54}Mn , ^{56}Co e ^{57}Co per kg di materia secca [8.5.6]. Sebbene si tratti di un'attività negligibile, questi valori hanno suscitato scalpore. Sono stati misurati prima da un'organizzazione privata (CRII RAD) e soltanto successivamente dalle istituzioni pubbliche.

Per le acque potabili vale in Svizzera un limite di 1 Bq/l per la somma delle concentrazioni di attività degli emettitori alfa naturali provenienti dalle catene di decadimento dell'urano e del torio (secondo la nostra interpretazione senza il ^{222}Rn). Poiché i laboratori cantonali non possono permettersi i metodi radiochimici usuali, si sono elaborati metodi semplificati per la determinazione dell'urano e del radio [4.3].

2. Radiazione esterna

Una parte preponderante della radiazione esterna proviene da fonti naturali nel suolo e nei materiali di costruzione, nonché dalla radiazione cosmica. Poiché il contenuto di ^{40}K e di nuclidi delle catene dell'urano e del torio nel suolo varia assai, anche l'intensità della dose proveniente dal suolo

differisce considerevolmente da una regione all'altra [3.1.2]. La radiazione cosmica aumenta fortemente con l'altitudine. A 300 m.s.m. è di circa 40 nSv/h, a 2000 m di 80 nSv/h e all'altezza di un aeroplano in volo (10'000 m.s.m.) raggiunge 5000 nSv/h. La radiazione tuttora proveniente dalle sedimentazioni del 1986 (Cernobil) e degli anni sessanta (esperimenti in superficie con armi nucleari) ammonta generalmente soltanto a una piccola percentuale della radiazione esterna complessiva; nel Ticino ne costituisce tuttavia fino al 30% [3.1.4].

L'intensità di dose media all'aperto in Svizzera è di 100 nSv/h, con valori che oscillano tra 40 e 230 nSv/h [3.3.3]. All'interno delle case, la radiazione cosmica e quella proveniente dal terreno sono attenuate dall'involucro dell'edificio. I radionuclidi naturali contenuti nel materiale di costruzione causano tuttavia una radiazione supplementare che supera solitamente questo effetto schermante. L'intensità di dose media in casa supera perciò quella all'aperto del 10%, salendo in media a 110 nSv/h, con valori compresi tra 50 e 260 nSv/h.

I residui di fuoriuscite avvenute in passato presso al centrale nucleare di Mühleberg che abbiamo già menzionato alla voce 'suolo' causano al massimo 3 nSv/h a 1m dalla superficie del terreno.

Con misure svolte per mezzo di uno spettrometro a bordo di un elicottero (aeroradiometria), si sono potute accertare bene le radiazioni provenienti dal decadimento del ^{16}N della centrale nucleare di Leibstadt (CNL) e quelle del deposito di scorie radioattive dell'Istituto Paul Scherrer (IPS) [3.4.5]. I 2000 nSv/h misurati 90 m sopra la CNL non sono tuttavia di rilievo per la popolazione, dato che vicino al suolo la fonte radioattiva è protetta da buoni schermi laterali.

In pochi punti adiacenti al recinto delle centrali nucleari, dell'IPS e del CERN si sono misurati valori fino ad alcune centi-

naia di nSv/h [8.2.2., 8.3.2, 8.4.10]. Nelle vicinanze più facilmente accessibili non si nota tuttavia praticamente alcun contributo di questi impianti alla dose ambiente.

3. Dosi d'irradiazione della popolazione calcolate

Contributi dei radionuclidi naturali e della radiazione cosmica

Il contributo più ingente deriva dal radon nei locali abitati. Il valore medio di ca. 60 Bq/m³ [1993, B.2.3] causa 1000 µSv/anno. Nel 50% dei locali abitati, la concentrazione è inferiore a 73 Bq/m³ corrispondenti a una dose annua di 1220 µSv, nel 10% supera il limite operativo di 400 Bq/m³ (6'800 µSv/anno) e nel 2% il limite di 1000 Bq/m³ (17'000 µSv/anno). Questi valori sono stati calcolati tenendo conto di una permanenza nei locali di 7000 ore all'anno (19 h/giorno in media). Per 2000 ore all'anno di permanenza in un posto di lavoro con 60 Bq/m³, vi si aggiungono ancora 400 µSv/anno. Il contributo del toron, anch'esso di origine naturale, per il quale non esistono tuttavia misure svolte in Svizzera, aumenta la dose del 10% circa [1993, B.2.3]. Si ottiene così una dose annua media dovuta al radon e al toron di circa 1'600 µSv. Nel 2% dei locali abitati, la dose supera tuttavia questa media di un fattore 10 e nel 10% ne comporta ancora il quintuplo [2.4]. Per gli amici delle caverne: un soggiorno di un giorno in una caverna con 5000 Bq/m³ causa una dose di circa 400 µSv.

I radionuclidi naturali assorbiti con l'alimentazione producono in media una dose annua di circa 360 µSv [5.1.6]. Il contributo più grande è quello del ⁴⁰K con 200 µSv [5.1.6, 6.1.2]. Il margine di variazione non è noto, ma il minimo è probabilmente leggermente superiore a 200 µSv, dato che la concentrazione di ⁴⁰K nell'organismo è più o meno costante. Consumando

al giorno un litro di un'acqua minerale contenente 1.3 Bq/l ²²⁶Ra, la dose si accrescerebbe di circa 100 µSv/anno. Un'acqua minerale con queste caratteristiche era in vendita in Svizzera fino al 1995 [1995, B.3.8].

Il contributo alla radiazione esterna dei radionuclidi naturali presenti nel suolo è difficile da stimare. Le misure consuete delle dosi rivelano soltanto la somma di tutte le componenti (naturali, artificiali e cosmiche) [3.2.4, 3.3.3., 8.3.2, 8.4.10]. La parte dei radionuclidi naturali calcolata in base alle misure in situ con lo spettrometro gamma oscilla tra 40 e 90 nSv/h circa [3.1.4]; per chi rimanesse sempre all'aperto, questo corrisponderebbe a un valore tra 350 e 800 µSv/anno.

E' ancora più difficile stimare il contributo alla radiazione esterna dei radionuclidi naturali nei materiali di costruzione. Soltanto con misure svolte per mezzo dello spettrometro gamma al germanio all'interno di una casa si possono distinguere le componenti naturali da quelle artificiali. In Svizzera non esistono praticamente ancora misure di questo tipo.

A 300 m.s.m, la radiazione cosmica causa, in caso di permanenza continua all'aperto, una dose annuale di circa 350 µSv, a 2000 m.s.m., di circa 700 µSv. Un volo di dieci ore a quota 10'000 m risulta in una dose addizionale di circa 50 µSv.

Nel capitolo 3.3 si trova un compendio di numerose misure dell'intensità di dose in Svizzera. Supponendo che la parte dei radionuclidi artificiali nei punti di misura scelti sia stata piccola, le figure del sotto-capitolo 3.3.3 mostrano la ripartizione per frequenza delle radiazioni naturali all'aperto e in casa. Il valore medio della dose in Svizzera, calcolato sul fondamento di questi dati è di 820± 20 µSv/anno.

Complessivamente, la dose annuale media d'irradiazione della popolazione svizzera proveniente da fonti naturali ammonta a circa 2800 μSv (alimentazione 400, radiazione esterna 800, radon 1600). Il margine di variazione è molto ampio.

fonte	media [$\mu\text{Sv}/\text{anno}$]	minimo [$\mu\text{Sv}/\text{anno}$]	massimo [$\mu\text{Sv}/\text{anno}$]
alimentazione	400	200	500
radiazione esterna	800	500	2'000
radon	1'600	300	> 6'800 (nel 10% dei locali abitati) > 17'000 (nel 2% dei locali abitati)

Contributo dei radionuclidi artificiali

La dose causata dal ^{85}Kr nell'aria è soltanto di alcuni $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ [7.1.8], sebbene tra i radionuclidi artificiali che si trovano in tutta la Svizzera il ^{85}Kr presenti la maggiore attività. In un ambito assai ristretto nelle immediate vicinanze di un'azienda industriale, il tritio nell'aria causa al massimo 10 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ [9.2.3]. Se l'acqua piovana raccolta in questo luogo fosse impiegata come acqua potabile (1000 Bq/l, 2 l/giorno), ne sarebbe derivata una dose annua di 12 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

In media, radionuclidi artificiali assorbiti con l'alimentazione causano per ogni abitante della Svizzera con abitudini alimentari medie una dose di circa 6 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ [5.1.6], di cui circa 3 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ derivano dal ^{137}Cs e 2 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ dallo ^{90}Sr . Il margine di variazione è poco noto, ma certamente molto ampio. La dose dovuta al ^{137}Cs calcolata in base a misure dell'intero organismo su classi di studenti ginevrini e basilesi, ad esempio, è nettamente inferiore a 1 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ [6.1.2]. Piccoli gruppi della popolazione potrebbero invece subire dosi fino a 100 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$. Si ottiene questo valore se si beve ogni giorno un litro di latte con la massima concentrazione di ^{137}Cs riscontrata nel 1996 (20 Bq/l). Il consumo settimanale di 200 g di funghi selvatici con 600 Bq/kg di ^{137}Cs (limite di tolleranza) causerebbe una dose annuale di 90 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

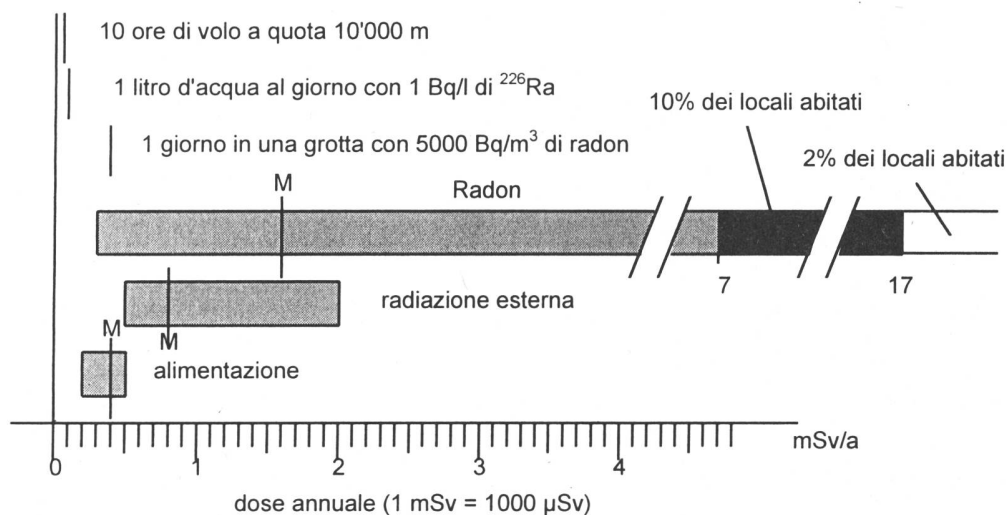
Se tuttavia qualcuno piantasse ortaggi nel punto di maggiore radioattività nei pressi dell'impianto d'incenerimento dei rifiuti speciali di Basilea e ne mangiasse ogni giorno 200 g, ne risulterebbe al massimo una dose di 2 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ (dal ^{14}C [7.1.7]). Il contributo delle emissioni di ^{14}C della centrale nucleare di Leibstadt o dell'IPS è ancora inferiore, benché queste siano accertabili. Non ha grande influsso sulla dose annuale (1 a 2 μSv) neppure il contenuto di tritio del latte e degli ortaggi nelle vicinanze dell'azienda già menzionata di lavorazione del tritio.

Il contributo effettivo dei radionuclidi artificiali alla dose annuale dovuta a radiazioni esterne è poco note. Partendo dal presupposto, poco realistico, che qualcuno rimanga tutto il tempo all'aperto, si giunge alla conclusione che questo contributo è compreso tra 10 e 500 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ [3.1.4]. L'ampio margine di variazione riflette le considerevoli differenze regionali della sedimentazione di ^{137}Cs dopo l'incidente di Cernobil. Il contributo delle centrali nucleari svizzere, dell'IPS e del CERN è infimo [81.1, 8.4.13]. Se tuttavia qualcuno si mettesse in testa di stare un'ora al giorno nel punto di massima attività, immediatamente adiacente al recinto della centrale nucleare di Leibstadt, dovrebbe tener conto di una dose addizionale di 100 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ [8.3.2].

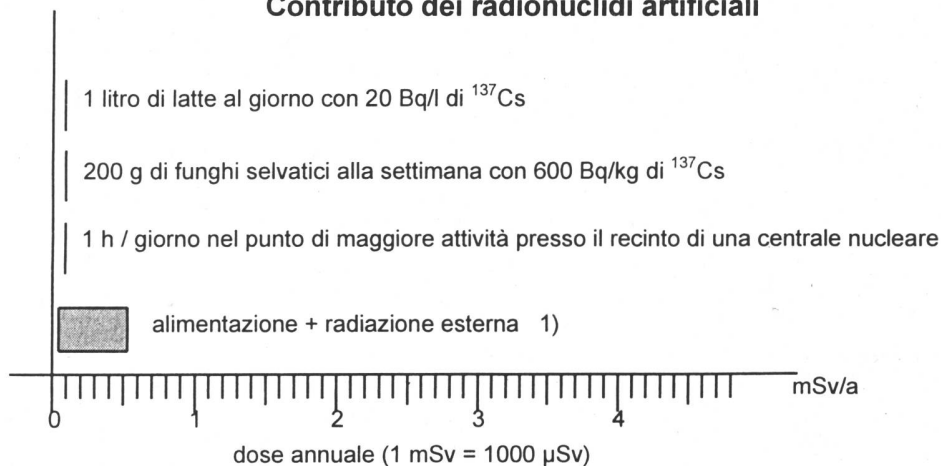
Complessivamente, il contributo dei radionuclidi artificiali alla dose d'irradiazione della maggior parte della popolazione svizzera è dunque probabilmente compreso

tra 10 e 500 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$. Per alcuni piccoli gruppi potrebbero aggiungersi fino a 100 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Contributo dei radionuclidi naturali e della radiazione cosmica



Contributo dei radionuclidi artificiali



Medie e margine di variazione delle dosi annue d'irradiazione della popolazione svizzera da fonti naturali e artificiali. Dati per il 1996. M = media. 1): contributo delle centrali nucleari svizzere, degli istituti di ricerca e dell'industria < 15 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Unità di misura e regolamentazione legale

La **radioattività** è la caratteristica dei nuclei atomici instabili, di trasformarsi senza intervento esterno (decadimento radioattivo), emettendo una radiazione (ionizzante) caratteristica in forma di particelle alfa o beta e di quanti gamma. Sostanze radioattive naturali si trovano da sempre nell'ambiente; quelle artificiali si liberano durante l'esplosione di armi nucleari o provengono da impianti nucleari, nonché aziende ed ospedali che lavorano con radionuclidi.

La **radioattività** di una sostanza si misura in Becquerel (Bq). Un Bq corrisponde ad una disintegrazione radioattiva al secondo. 10^{-3} , 10^{-6} , 10^{-9} e 10^{-12} Bq si dicono millibecquerel (mBq), microbecquerel (μ Bq), nanobecquerel (nBq) e picobecquerel (pBq). 10^3 , 10^6 , 10^9 e 10^{12} Bq si designano con i termini chilobecquerel (kBq), megabecquerel (MBq), gigabecquerel (GBq) e terabecquerel (TBq). In passato, l'unità più in uso era il Curie (Ci): $1 \text{ nCi} = 37 \text{ Bq}$, $1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$.

Le **dosi d'irradiazione** della popolazione indicate sono dette dosi efficaci e si misurano in millisievert (mSv) o microsievert (μ Sv). La dose efficace è definita come la somma delle dosi (equivalenti di dose) di tutti gli organi irradiati, ponderate secondo la sensibilità di ognuno di essi. Questa misura permette di valutare l'effetto biologico della radiazione sull'intero organismo umano indipendentemente dal tipo e dalla provenienza di quest'ultima.

Conformemente all'**Ordinanza sulla radioprotezione** (ORaP), le dosi d'irradiazione della popolazione in seguito alla radioattività legata alla civilizzazione e alle radiazioni presenti nell'ambiente (senza il radon e le applicazioni mediche) non devono superare 1 mSv all'anno. L'Ordinanza pone inoltre limiti all'immissione di sostanze radioattive nell'aria e nelle acque pubblicamente accessibili. Questi limiti sono fissati in modo tale che una persona che bevesse sempre acqua o respirasse aria appena conformi subirebbe per ognuno un'irradiazione di 0,2 mSv all'anno. Per l'irradiazione diretta, il valore limite è di 5 mSv all'anno nelle aree pubblicamente accessibili e di 1 mSv all'anno nei locali di abitazione, di soggiorno e di lavoro. Valori limite e di tolleranza per i radionuclidi nelle derrate alimentari sono pubblicati nell'Ordinanza sulle sostanze estranee e sui componenti nelle derrate alimentari (OEC). Quello che conta per la radioprotezione è il valore limite, mentre il valore di tolleranza costituisce unicamente un criterio di qualità e il suo superamento non comporta alcun rischio. L'evacuazione di sostanze radioattive nell'ambiente deve, in ogni caso, essere controllata. L'autorità cui compete il rilascio delle licenze fissa i limiti d'immissione. Per gli impianti nucleari, questi sono ad esempio scelti in modo tale che, anche nelle immediate vicinanze, nessuno subisca una dose aggiuntiva superiore 0,2 mSv all'anno. Il limite di concentrazione del radon nei locali d'abitazione e di soggiorno è fissato a 1000 Bq/m^3 . Edifici che presentano valori superiori a questo limite devono essere risanati. Gli edifici nuovi e quelli riattati non dovrebbero superare un limite operativo di 400 Bq/m^3 .