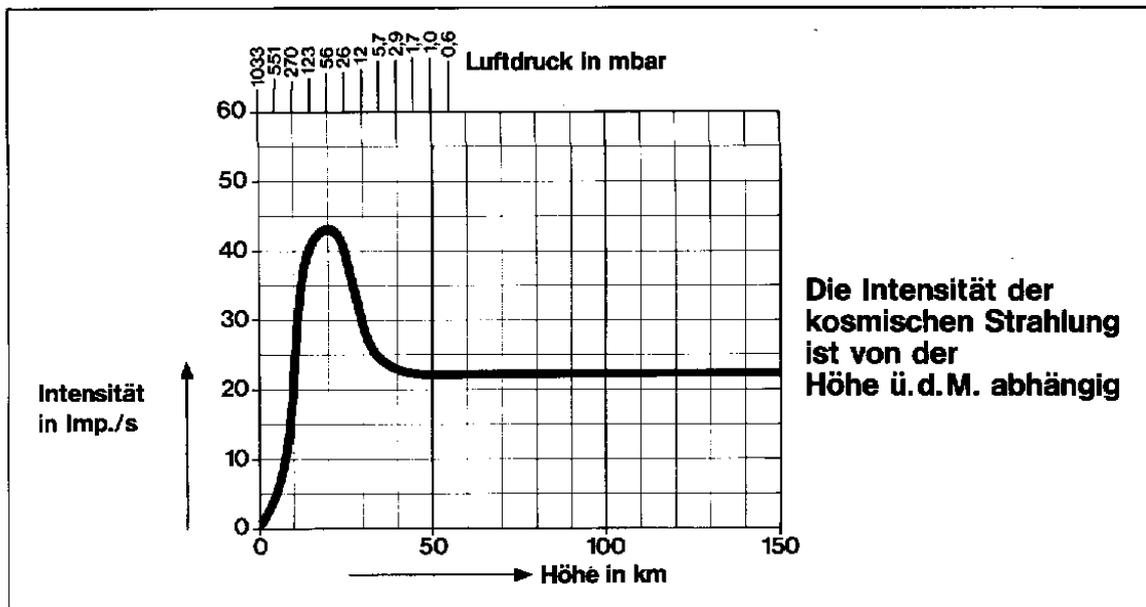


Die natürliche Strahlenbelastung

Kosmische Strahlung

- Aus dem All trifft uns elektromagnetische, jedoch auch energiereiche Teilchenstrahlung.
- Diese wurde erstmals 1949 durch einen Geigerzähler in einer Rakete gemessen.
- Den qualitativen Verlauf in gezählten Impulsen/sec. zeigt die folgende Grafik:



Der Anstieg der Strahlungsintensität in einer Höhe von rd. 40 km – 20 km Höhe erklärt sich durch Kollisionen der eintreffenden Primärstrahlung mit verdichteten Luftatomen (Kerne), wodurch durch verschiedene Kernprozesse zusätzliche Strahlung entstehen kann.

In einer gewissen Höhe übertrifft jedoch die Absorption und der Rückgang an eintreffenden Primärstrahlen diesen Multiplikationseffekt, und es kommt zum Abfallen der Strahlung beim Durchlaufen der Atmosphäre. Natürlich ist es illusorisch, dass diese bis auf Bodennähe auf 0 zurückgeht, wie die Grafik simuliert. Die Versuche haben auch ein anderes Ergebnis gezeigt.

Zusammensetzung der kosmischen Primärstrahlung

- Protonen 93 %
- Heliumkerne 6,3 %
- schwere Kerne (< 0,7 %)

Die Zusammensetzung der kosmischen Primärstrahlung erlaubt dabei interessante Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Kosmos. So stimmen die Zusammensetzungen weitgehend überein. Lediglich bei den Elementen Bor, Beryllium und Lithium zeigt sich eine zu große Häufigkeit in der kosmischen Strahlung. Als Ursache werden hier Sekundärprozesse im interstellaren Raum vermutet.

Auch sind die interstellaren Teilchen wesentlich energiereicher als die Strahlung aus irdischen Kernprozessen. Diese erreichen Energien bis 10 MeV, während die kosmischen Strahlen bis auf $4 \cdot 10^{21}$ eV kommen.

Man vermutet hier die nachträgliche Beschleunigung durch interstellare Magnetfelder.

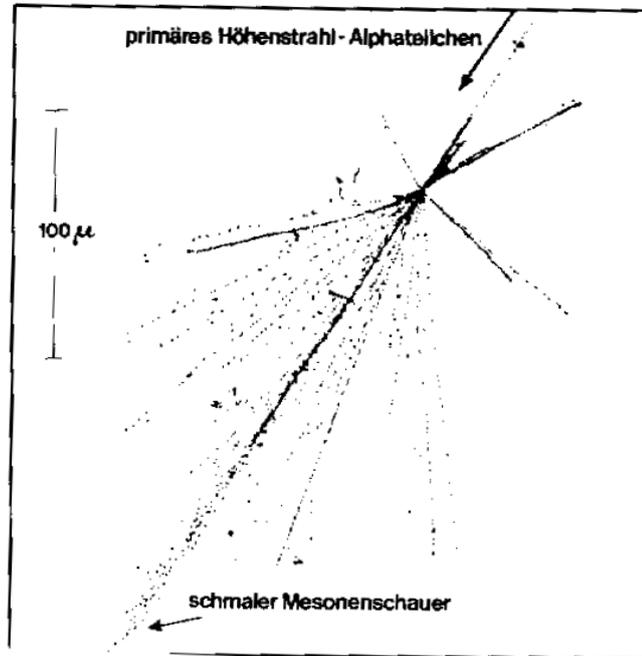
Diese energiereichen Teilchen zertrümmern teilweise die Kerne, auf die sie in der Atmosphäre

treffen.

In Sekundärreaktionen können die energiereichen Bruchstücke weitere Kerne zertrümmern. Dabei kommt es zu Teilchenkaskaden, in denen bis zu 10^{11} Teilchen vermutet werden.

Auch die Umwandlung eines Teils der Primärenergie, die beim Stoß frei wird, in Elementarteilchen kommt vor.

Der Nachweis derartiger Teilchenkaskaden erfolgt mittels mikrofotografischer Auflösung einer Kollision zwischen Silberbromid auf Film mit kosmischer Primärstrahlung:



Die auf der Erdoberfläche auftreffende Sekundärstrahlung setzt sich zusammen aus:

- Nukleonenkomponenten
 - Protonen und Neutronen
- Elektronen/ Photonenkomponenten
 - Elektronen, Positronen, Photonen
- Mesonenkomponenten
 - Mesonen unterschiedlicher Masse und Ladung
- Neutrinoström
 - Neutrinos und Antineutrinos.

Die Sekundärstrahlen können sich auch an andere Luftmoleküle anlagern und dadurch Radionuklide erzeugen, z.B.



Die Elektronen-Photonen-Komponente wird auch als „weiche“ Komponente bezeichnet. Sie kann durch 15 cm Blei vollständig abgeschirmt werden und wird auch in der Atmosphäre zum Großteil absorbiert.

Mesonen dagegen gehören zur sogenannten harten Komponente. Sie entstehen weitgehend beim Zusammenstoß der kosmischen Primärteilchen mit Atomkernen in der Luft.

Durch eine 1 m dicke Bleiplatte kann man die Intensität der Mesonenstrahlung gerade auf die Hälfte reduzieren.

Bei Beta und Beta+ - Zerfällen werden Neutrinos frei. Diese reagieren so schwach mit Materie, dass von 1 Mio Neutrinos, die die Erdkugel durchfliegen, nur eines absorbiert wird.

Ein wesentlicher Teil der Primärstrahlung scheint aus den Sternensystemen zu kommen, ein anderer Teil aus der Sonne unseres Sonnensystems.

Letzterer Anteil, der sog. Sonnenwind, unterliegt sehr starken zeitlichen Schwankungen.

Die Teilchen der kosmischen Primärstrahlung werden im Erdmagnetfeld abgelenkt. Dabei kommt es zu einem Intensitätsminimum am geomagnetischen Äquator. Die Verteilung gilt auch als Beweis, dass in der kosmischen Primärstrahlung geladene Teilchen vorhanden sein müssen, die zu den Polen hin abgelenkt werden.

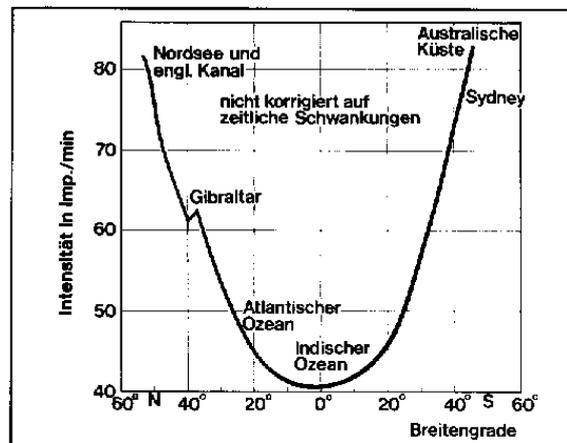


Abb. 26: Der geometrische Breiteneffekt der kosmischen Strahlung, gemessen während einer Schiffsreise von Hamburg nach Sydney. (Zeitliche Schwankungen nicht berücksichtigt.)

Die terrestrische Strahlung

Natürliche Radionuklide

Bei der Entstehung der Erde vor rd. 5 Mrd. Jahren gab es noch wesentlich mehr Radionuklide, die bis heute größtenteils zerfallen sind.

Die wichtigsten heute noch vorhandenen „fossilen“ Radionuklide haben deshalb sehr lange Halbwertszeiten, so

U- 238 mit 4,5 Mrd. Jahren Halbwertszeit,

Th- 232 mit 14 Mrd. Jahren,

K- 40 mit 1,3 Mrd. Jahren.

Man kann die natürlichen Radionuklide in 3 Klassen unterteilen

- natürliche Nuklide ohne Umwandlungsreihen,
- natürliche Nuklide mit Umwandlungsreihen (Uran-, Radium-, Uran-Actinium-, Neptunium- und Thorium-Reihe),
- Radionuklide, die durch die kosmische Strahlung ständig neu gebildet werden.

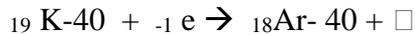
Radioaktive Urnuklide ohne Zerfallsreihen

- Diese besitzen extrem lange Halbwertszeiten.
- Sie werden auch als primordiale Elemente bezeichnet.

Das interessanteste Beispiel hier ist wohl Kalium- 40. Kalium 40 wird durch die Membran-Kaliumpumpen an den Zellen im Energiehaushalt in relativ konstanter Menge im menschlichen

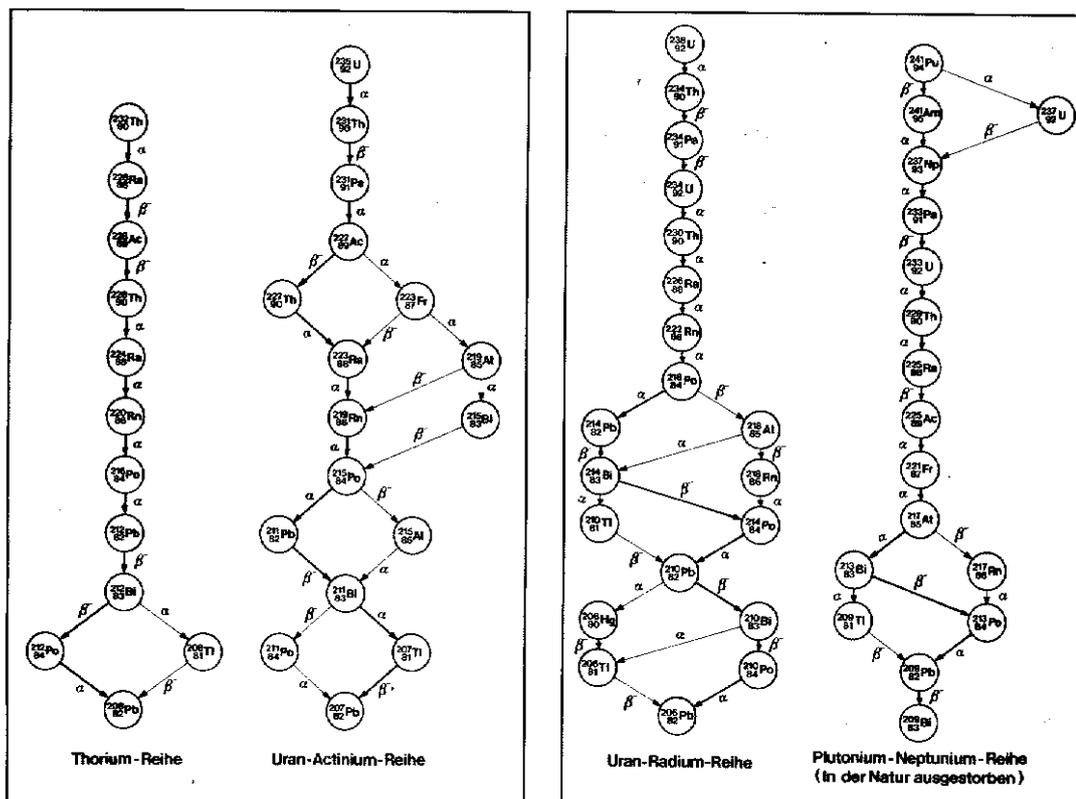
Körper eingelagert.

Bei Kalium 40 tritt $\square+$ - Strahlung oder ein Elektroneneinfang oder K- Einfang auf. Dabei fängt der Kern aus der innersten Schale der Elektronenhülle ein Elektron ein, wodurch sich ein Proton in ein Neutron umwandelt. Bei dem Prozess wird ein $\square-$ Quant emittiert:



Extremstes Beispiel unter den Urnukliden ist Blei- 204 mit einer Halbwertszeit von $1,4 \cdot 10^{17}$ a.

Die natürlichen Zerfallsreihen



Die Neptunium – Reihe lässt man bei Neptunium–237 oder beim Plutonium–241 beginnen, da die übrigen Glieder dieser Reihe bereits weitgehend ausgestorben sind.

Das langlebigste Element in dieser Reihe ist das Np-237 mit einer Halbwertszeit von dennoch lediglich 2,14 Mio. Jahren. Erst durch die künstliche Herstellung der Transurane begann diese Zerfallsreihe wieder zu existieren.

Von den anderen Zerfallsreihen kennt man

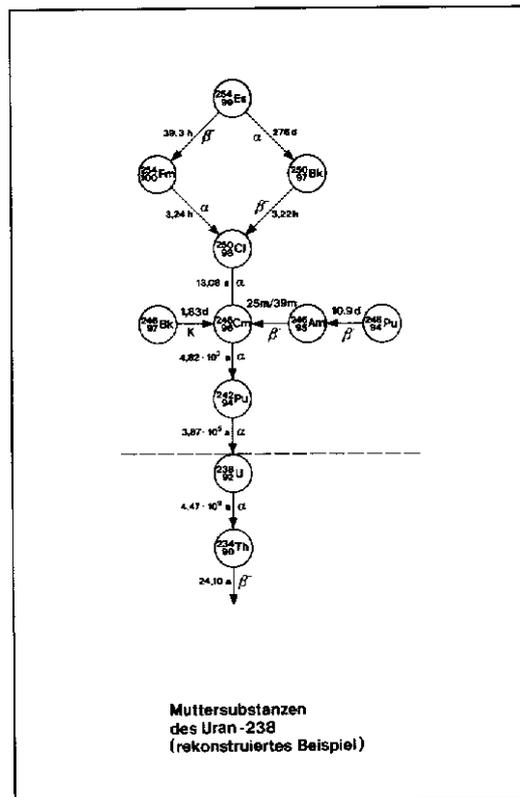
- Thorium Reihe : Beginn Th – 232 , Ende Pb – 208
- Uran- Actinium Reihe: Beginn U – 235, Ende Pb – 207
- Uran- Radium- Reihe: Beginn: U- 238 , Ende Pb- 206

Bei den Verzweigungen wird die häufigere Zerfallsart durch einen dicken Pfeil angegeben.

Bei den Zerfallsreihen tritt Radon auf, welches sich von den übrigen radioaktiven Substanzen löst, auch durch Gesteine diffundiert, insbesondere aus solchen heraus.

Muttersubstanzen des Uran- 238.

Diese sind heute ebenfalls weitgehend ausgestorben. Man kann lediglich ein Beispiel für derartige Muttersubstanzen rekonstruieren:



Durch kosmische Strahlung erzeugte Radionuklide

- Viele Radionuklide haben sehr kurze Halbwertszeiten und werden durch die kosmische Strahlung ständig neu „produziert“.
- Beispiele:
 - C14 (Beta- Strahler, 5736 a Halbwertszeit)
 - Tritium (${}^7_7\text{N-14} + {}^0_0\text{n-1} \rightarrow {}^1_1\text{H-3} + {}^6_6\text{C-12}$ oder ${}^8_8\text{O-16} + {}^0_0\text{n-1} \rightarrow {}^1_1\text{H-3} + {}^7_7\text{N-14}$). Tritium ist ein Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 12,346 a.

Daneben existieren eine ganze Reihe anderer natürlicher Radionuklide.

Natürliche Radionuklide im Boden

Die Untersuchungen sind bisher am deutlichsten mit den Elementen der Uran- Radium Reihe und der Thorium- Reihe abgelaufen. Auch mit K-40 hat man sich bereits intensiv beschäftigt. Diese Elemente sind hinsichtlich ihrer Intensität und biologischen Strahlenwirkung am bedeutendsten für den Menschen.

Wie stark der Gehalt an natürlichen Radionukliden im Boden schwanken kann, zeigt die folgende Tabelle:

Bodenart	Herkunft	Spez. Aktivität in $3,7 \cdot 10^1$ Bq/kg ³⁶⁾		
		Ra-226	Th-232	K-40 ³⁷⁾
Fränkischer Schiefer	Hof	0,8	1,5	27
Quarzporphyr	DDR	1,6	2,6	41
Kalkstein	Pfalz	<0,2	0,3	<1
Granit	Italien	1,0	1,7	25
Basalt	Hessen	0,8	0,6	12
Basalt	Pfalz	1,2	1,3	6
Basalt	Prag	1,5	0,9	12
Bauxit	Weipa	<0,5	12	27
Rohphosphat	Marokko	48	0,6	19
Rheinsand	Speyer	0,5	0,3	11
Bimsstein	Neuwieder Becken	2,0	1,9	28

Allgemein kann man sagen, dass die Radioaktivität von Granit über Lehm zu Kalksand und Basalt abnimmt. Allerdings gilt dies für Mittelwerte. Die Schwankungen zwischen Proben gleichen Materials an verschiedenen Stellen können deutlicher sein als die Schwankungen zwischen verschiedenen Bodenarten. Durch die Bezeichnung der Gesteinsart ist nämlich die chemische Zusammensetzung nicht genau festgelegt.

Auch ist die Bodenradioaktivität durch Witterung und Erosion langzeitigen Schwankungen unterworfen. Klimatische Einflüsse beeinflussen vor allem die Konzentration von Radon in Bodennähe, was zu extremen Schwankungen führen kann.

So diffundiert Radon bei Gesteinsporosität oder gar plötzlich bei Auftreten von Bodenrissen in obere Erdschichten oder sogar bodennahe Luftschichten und verbleibt dort, bis meteorologische Einflüsse (Regen/ Wind) das Radon und seine Zerfallsprodukte in andere Gebiete befördern oder es zerfallen ist.

Einflüsse sind hier

Bodenporosität, Bodenfeuchtigkeit, Bodentemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Temperaturgradient, Windrichtung und Windstärke.

Auch die vom Menschen verwendeten Baustoffe enthalten Radioaktivität.

Baustoff	Radioaktivitäts- gehalt
Naturgips, Holz, Kunststoff	sehr niedrig
Kalkstein, Sandstein	niedrig
Ziegel, Beton	mittel
natürliches Gestein, technisch erzeugter Gips	höher
Schlackenstein, Bimsstein	sehr hoch

Düngung

- Der durch Düngung auftretende Anteil an Radioaktivität ist nicht gering. Durch die rd. 2 Mio. Tonnen Mineraldünger (1981), die in Deutschland jährlich auf die Felder gelangen, wird eine Aktivität „mitgedüngt“ von
 - 50 Ci Uran
 - 40 Ci Radium
 - 500 Ci Kalium 40 (auch in Pottasche enthalten)

Dies führt zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung von 1 bis 3 mrem/a oder 0,01 bis 0,03 mSv/a (J.Martin, Radioaktivität und Strahlung im Alltag, Siemens Zeitschrift 5/81, Kraftwerk Union AG).

Natürliche Radionuklide in der Luft

Hier spielt fast alleine die Konzentration an Radon eine Rolle.

Innerhalb von Gebäuden ist, oftmals durch schlechtes Lüften bedingt, die Konzentration von Radon am höchsten. Radon 222 diffundiert wohl zu rd. 15 %, Rn 220 zu 4 % in den Luftraum. Rn 222 hat eine Halbwertszeit von 3,8 d, Rn 220 dagegen nur von rd. 55,6 sec.

Innerhalb von Gebäuden kommt es alleine durch Radon zu einer zusätzlichen Belastung von bis zu 14,8 Bq / m³.

Natürliche Radionuklide im Wasser

Ähnlich wie bei Luft sind hier nur die durch Ingestion und Inhalation aufgenommenen Anteile der Strahlenpartikel von Relevanz.

Im Wasser finden sich dabei

- gelöstes K- 40 (vor allem im Meerwasser),
- gelöste Radionuklide in Grundwasser und Oberflächenwasser unterschiedlichster Herkunft,
- metallische Zerfallsprodukte von Radon, die sich in der Luft an Aerosolteilchen anlagern,
- Radionuklide durch kosmische Strahlung werden durch die Niederschläge „ausgewaschen“
- Abgabe radioaktiver Nuklide durch die Verfeuerung von fossilen Brennstoffen (Uran, Thorium und Folgeprodukte. C-14 ist schon vollständig zerfallen!)

Über die Aktivität der verschiedenen Isotope in verschiedenen Wasserführungen gibt folgende Tabelle Aufschluss:

Wasser- vorkommen	Konzentration an natürlichen Radionukliden in $3,7 \cdot 10^{-2}$ Bq/l						
	H-3	Ra-226	Rn-222 und kurzlebige Folgeprodukte	K-40	U-238	Pb-210	Po-210
Meer	0,5–1,5	0,04–0,16	0,02–0,9	330	1	0,05	–
Flüsse Seen	1–10	<0,01–2	10–50	1–50	0,015 –1	0,1–5	–
Grund- wasser	1–10	<0,1–10	10^2 – 10^4	0,1–10	0,03 –5	0,05	0,01 –0,06
Regen	10–20	–	10^3 – 10^5	0,1–2	–	0,2–5	0,1–1
Trink- wasser	5	0,1	10–100	5	0,05	0,02	0,01

Die höchste Konzentration von bis zu 100 nCi findet sich im Regen, aber auch entsprechend in manchen Quellen. Derartige Quellen werden mit umstrittener Begründung häufig als radioaktive Heilquellen verwendet (z.B. Badgastein).

Natürliche Radionuklide in Nahrungsmitteln

Die natürlichen Radionuklide sind, wie gesagt, in Boden, Luft und Wasser unserer Biosphäre enthalten. Dem entsprechend tauchen sie auch in den Nahrungsmitteln auf.

Die meisten Elemente sind nicht von physiologischer Bedeutung. Sie werden nur als „Verunreinigungen“ aufgenommen.

Dies gilt jedoch nicht für die Elemente H-3, C-14, K-40, was daran liegt, dass ein Organismus nicht zwischen den aktiven und den inaktiven Isotopen eines Elements unterscheiden kann.

Den wesentlichen Anteil der Radioaktivität in Nahrungsmitteln macht auch K-40 aus. Während die Aktivität von K-40 pro kg Nahrungsmittel rd. 37 Bq ausmachen, liegt dieser Wert bei rd. 0,37 Bq bei H-3 und 0,037 Bq bei Ra-226, Th- 228, Pb-210 oder C-14 (grob abgeschätzt nach ganzen Zahlen in Ci). Allerdings schwankt die Aktivität der einzelnen Isotope auch stark zwischen den Nahrungsmitteln. So liegt der Anteil von Ra-226 in Margarine bei 0,0037 Bq/kg, bei Paranüssen dagegen bei bis zu 130 Bq/ kg. Der Anteil von Pb-210 bei Bärenfleisch beträgt 0,085 Bq/kg, bei Rentierleber dagegen bis zu 45 Bq/kg.

Die Wirkung der einzelnen Komponenten wiederum ist stark abhängig von der Art des Organs, das die Radionuklide einlagert.

Gründe für die starken Konzentrationsschwankungen

- Die Organismen, aus denen die Nahrungsmittel gewonnen werden, verfügen über stark unterschiedliche physiologische Mechanismen und speichern deshalb unterschiedlich viel Radionuklide in ihren Zellen.
- Die Konzentration der Radionuklide schwankt zwischen den Lebensräumen der einzelnen Organismen.
- Viele Isotope sind physiologisch wichtigen Elementen sehr ähnlich (Sr und Ra ähneln sehr stark dem Calcium). Bei einer intensiven Aufnahme von Kalzium (beispielsweise während der Wachstumsphase) wird dementsprechend auch vermehrt Strontium oder Radium in die Knochen eingebaut. Daher kommt auch die starke Radiumaktivität beim Paranussbaum, der verstärkt Barium einbaut, das dem Radium chemisch sehr ähnlich ist.
- Langsam wachsende Pflanzen wie Moose und Flechten filtern verstärkt Radionuklide wie Pb-210 und Po-210 aus dem Boden und der Luft und lagern diese verstärkt ein. So speichert

die Rentierleber einen so hohen Wert an Pb-210, da die Flechten in den arktischen Gebieten, von denen sich die Rentiere ernähren, die angesprochenen Filtereigenschaften besitzen.

Die Eigenstrahlung des menschlichen Körpers

Wie bei den Organismen im allgemeinen, lagert auch der Mensch Radionuklide ein, die in Speicherorganen eingebaut werden. Natürlich sind die Isotope, die nicht gespeichert werden, bis zum Prozess der Ausscheidung ebenso wirksam und tragen zur Eigenstrahlung des Organismus bei.

Im menschlichen Körper beträgt die Aktivität an K-40 rd. 37000 Bq, rd. 3,7 Bq werden durch Ra-226 beigesteuert (ähnliche Verhältnisse wie bei anderen Organismen).

Für die Isotope im menschlichen Körper kommt es zu zwei überlagerten Effekten:

- einmal der natürliche Zerfall -> HWZ bis zum Zerfall der Hälfte an Nukliden = physikalische Halbwertszeit (T_p),
- zusätzlich die Dauer bis zum Ausscheiden des Produkts -> HWZ bis zur Ausscheidung der Hälfte an Nukliden = biologische Halbwertszeit (T_b).

Die effektive Halbwertszeit berechnet sich nach $1/T_{\text{eff}} = 1/T_p + 1/T_b$

$$\rightarrow T_{\text{eff}} = T_p * T_b / (T_p + T_b).$$

Die effektive Halbwertszeit ist der entscheidende Faktor für die Strahlenwirkung der in den Organismus aufgenommenen Radionuklide. Meist sind die biologischen Halbwertszeiten deutlich kleiner als die physikalischen. In diesem Fall ist die effektive Halbwertszeit in etwa gleich der biologischen (etwas geringer).

Die Wirksamkeit der Strahlen wird mit dem Begriff Radiotoxizität subsumiert. Der Begriff Radiotoxizität sollte die Toxizität der ionisierenden Strahlen des inkorporierten Radionuklids und seiner Folgeprodukte beinhalten. So hat eine sehr hohe Radiotoxizität das Ra-226 als α -Strahler, welcher in den Knochen abgelagert wird.

Die Deutsche Strahlenschutzverordnung legt demgemäß sogenannte Freigrenzen fest. Innerhalb dieser ist der Umgang mit dem betreffenden Radionuklid nicht genehmigungspflichtig.

Diese liegen bei Ra-226 nur bei 3700 Bq, bei U-238 sind dagegen 3700000 Bq „frei“.

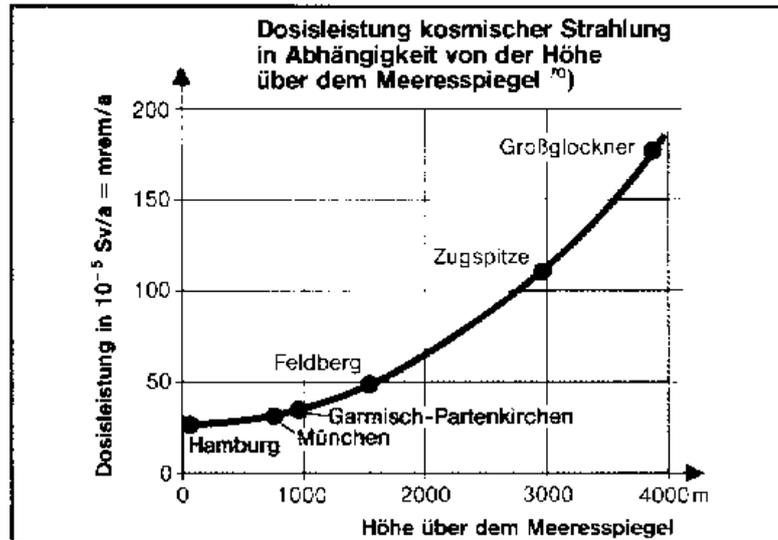
Folgende Tabelle liefert noch einmal eine übersichtliche Zusammenstellung zum Thema Eigenstrahlung des menschlichen Körpers:

Biologische Faktoren ⁶⁴⁾	Angaben für Ra-226	Weitere Hinweise
1. Mittlere tägliche Aufnahme	$1-2 \cdot [3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq}]$ $\approx 1-2 \cdot 10^{-12} \text{ g}^{65)}$	Vom Uran wird im Mittel pro Tag etwa $1 \mu\text{g} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ g}$ aufgenommen ⁶⁶⁾
2. Resorption des Radionuklids durch den Organismus	Radium verhält sich als Erdalkalimetall biochemisch ähnlich wie z. B. das Element Kalzium	Vom aufgenommenen Uran werden im Magen-Darm-Kanal 1-10% resorbiert, das übrige Uran wird wieder ausgeschieden ⁶⁶⁾
3. Hauptablagerungsstätte für das Radionuklid (Speicherorgan)	85% des resorbierten Ra-226 werden in Knochen gespeichert ⁶⁵⁾	Am meisten speichernde Organe für andere Radionuklide: H-3: Gesamter Körper C-14: Fett ⁶⁷⁾ Po-210: Nieren, Leber U-235, U-238: Nieren, Skelett ⁶⁸⁾
4. Strahlenempfindlichkeit und Bedeutung des Speicherorgans für den gesamten Organismus	Hohe Empfindlichkeit, da im Knochenmark die roten Blutkörperchen gebildet werden (hohe Zellteilungsraten)	Definition des kritischen Organs: Dasjenige Organ, dessen Strahlenschädigung durch ein bestimmtes Radionuklid den größten Schaden für den menschlichen Körper hervorruft
5. Zeit, in der die Hälfte eines abgelagerten Radionuklids wieder ausgeschieden wird (Biologische Halbwertszeit)	$1,64 \cdot 10^4 \text{ d} = 44,9 \text{ a}$	Die biologische Halbwertszeit hängt vom Organ und seinem Zustand ab Biologische HWZ für einige Radionuklide: H-3: 12 d (Ganzkörper) C-14: 12 d (Ganzkörper) 40 d (Knochen) P-32: 257 d (Ganzkörper) 1155 d (Knochen) Th-232: $5,4 \cdot 10^4 \text{ d}$ (Ganzkörper) $7,3 \cdot 10^4 \text{ d}$ (Knochen)

Die Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenwirkung auf den Menschen

- Die Primär- und Sekundärkomponente der kosmischen Strahlung ist natürlich sehr stark von der Höhe des Standorts der betroffenen Person abhängig.

Die Höhenabhängigkeit der kosmischen Strahlung wird durch folgende Grafik wiedergegeben:



Für Flugzeugbesatzungen kommt bei 500 Flugstunden pro Jahr eine zusätzliche Belastung von bis zu 0,005 Sv/a hinzu. Dies entspricht der 15-fachen Strahlenbelastung auf Meereshöhe (nur durch die 500 Flugstunden!). Somit zählen Flugzeugbesatzungen, insbesondere bei Flügen bis auf 20 km Höhe, zu beruflich strahlenexponierten Personen. Für den Raumflug gelten natürlich noch ganz andere Werte.

Die Belastung in belebter Natur, Baumaterialien, Luft, Wasser, Erde zählt zur terrestrischen Strahlung.

Ab der Erdoberfläche hat die Alphastrahlung eine Reichweite von 8,5 cm. Die Intensität der Betastrahlung nimmt durch Absorption ebenfalls rasch ab. Auch die Absorption durch Kleidung und die Unempfindlichkeit der oberen Hautschichten bedingt, dass für die biologische Wirksamkeit, abgesehen von inhalierten oder ingestierten Radionukliden, nur die Gammastrahlung relevant ist.

Die Werte für die terrestrische Strahlenexposition schwanken dabei extrem stark. Eine Übersicht für Freiland und Wohnungen liefern die folgenden Tabellen:

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

Das Mineral Monazit in den entsprechenden Gebieten der brasilianischen Atlantikküste und in Indien ist ein Phosphat seltener Erden, welches auch das radioaktive Thorium und dessen Folgeprodukte enthält. Bisher konnte jedoch kein nachteiliger Einfluss der hohen Belastung durch natürliche terrestrische Strahlung auf Pflanzen, Tiere und Menschen nachgewiesen werden.

Gegend	Bevölkerung in Millionen	Mittlere Dosisleistung in 10^{-5} Sv/a = mrem/a	Höchste Dosisleistung in 10^{-5} Sv/a = mrem/a
Gebiete mit normaler Strahlung	2500	120	-
Granitbezirk/Frankreich	7	300	400
Monazitbezirk/Indien	0,1	1300	4000
Monazitbezirk/Brasilien	0,05	500	12000

Die innere Strahleneinwirkung

Nach Inhalation oder Ingestion der natürlichen radioaktiven Substanzen erfolgt eine innere Strahlenbelastung. Im Gegensatz zu der äußeren Ganzkörperbestrahlung äußert sich die innere Strahlenbelastung nur in bestimmten Körperteilen. Nur K-40 und C-14 sind im Körper so gleich verteilt, dass man von einer Ganzkörperbestrahlung reden kann. Den wesentlichen Anteil der inneren Strahlenbelastung bekommen die Lungen durch die Inhalation von Rn-222 und Rn-220 mit Folgeprodukten ab. In den Bronchien übersteigt dieser Wert durch Radon alleine beispielsweise die Belastung der Keimdrüsen insgesamt um den Faktor 10.

Eine Übersicht liefert die folgende Tabelle:

[10^{-5} Sv/a = mrem/a]	Keimdrüsen	Knochen	Lungen
ÄUSSERE STRAHLENBELASTUNG			
Kosmische Strahlung in Meereshöhe	30	30	30
Terrestrische Strahlung	55	55	55
INNERE STRAHLENBELASTUNG			
Kalium - 40	20	15	20
Kohlenstoff - 14	1,5	1,5	1,5
Radium - 226 (1/3 Folgeprodukte)	0,2	10	0,2
Thorium - 228	0,3	10	0,3
Blei - 210, Polonium - 210	3	40	3
Inhalation von Radon + Folgeprodukten	1	1	100 Alveolen 1000 Bronchien
	ca. 110	ca. 160	ca. 1200

Dabei kann sich die Radonbelastung der Bronchien und Lungenalveolen noch deutlich erhöhen durch den Aufenthalt in geschlossenen Räumen. In diesem Fall ist mit einer Äquivalentdosis von 25 mSv in einem Jahr zu rechnen.

Natürliche Strahlenbelastung als Bezugssystem

Als mittlere Dosisleistung der natürlichen Strahleneinwirkung wird zur Zeit ein Wert von $110 \cdot 10^{-5}$ Sv/a angegeben. Durch die stark unterschiedliche Bestrahlung der einzelnen Organe muss neben der Dosisleistung auch das Organ mit angegeben werden, auf das sich die Angabe bezieht.

Besonders wichtig ist verständlicherweise die Gonadendosis (Keimdrüsendosis), da hier stochastische Mutationen zu schweren genetischen Defekten führen können. Die Dosisleistung für die Knochen ist besonders relevant durch die blutbildenden Aufgaben des Knochenmarks und die damit verbundenen Gefahren von Blutkrebs.

Die Lungen werden angegeben als Beispiel der höchsten Belastung eines Einzelorgans. Bis heute sind die Auswirkungen der Schwankungen in der natürlichen Radioaktivität nicht erfasst.

Auch in den Monazitbezirken von Indien und Brasilien existieren keine statistisch höheren Krebsraten, bzw. es sind noch keine gesicherten statistischen Ergebnisse vorhanden.

Allerdings zieht man die natürliche Strahlenbelastung oft als Bezugsquelle für zivilisatorische Strahlenbelastungen heran. Bei keinem Umweltproblem sind damit so ungenaue Rahmenbedingungen abgesteckt wie beim Radioaktivitätsrisiko.

Im Vergleich zu den genannten Werten aus dem Buch von Martin Volkmer („Die natürliche Strahlenbelastung“, Hamburg 1986), die ausführlich dargelegt wurden und von einer mittleren natürlichen Strahlenbelastung von 1,1 mSv/a sprechen, finden sich an anderer Stelle abweichende Angaben. Wenngleich darauf hingewiesen wurde, dass die angegebenen Werte deutlich schwanken können, sollen Sie doch der Vollständigkeit halber ebenfalls dargelegt werden. Hingewiesen wurde bereits auf die massiven Schwankungen der terrestrischen Strahlung, die zu einer Belastung von bis zu 10 mSv/a führen können. Langer Aufenthalt in

schlecht gelüfteten Räumen kann die Belastung durch Radon bis auf 25 mSv/a erhöhen. Als Mittelwert über eine breite Streubreite für die effektive Äquivalentdosisleistung die folgenden Werte angenommen:

Medizinische Diagnose und Behandlungen: 2,0 mSv/a

Quellen sind in erster Linie Röntgengeräte, bildgebende Verfahren wie Computer- und Positronenemissionstomografie und auch Elektronenbeschleuniger. Für Strahlenbelastungen, die man bei medizinischen Diagnosen und Behandlungen als Patient erfährt, gibt es keine Grenzwerte. Beispiele für die in solchen Zusammenhängen erworbene effektive Äquivalentdosis sind

- Thorax- Röntgenaufnahme: 0,2 mSv,
- Mammografie: 0,6 mSv,
- Thorax- Computertomografie: 20 mSv.

Radon- Zerfallsprodukte: 1,4 mSv / a

Die Belastung durch Radon- Zerfallsprodukte (also Rn-222 aus dem Erdinneren und dessen Zerfallsprodukte) ist, wie ausführlich dargelegt wurde, sehr stark ortsabhängig.

Terrestrische Strahlung: 0,4 mSv/ a

Die terrestrische Strahlung stammt von den im Erdinneren vorhandenen, langlebigen Isotopen. Davon sind die wichtigsten, wie bereits angesprochen: K-40, Th-232 und U-238.

Kosmische Strahlung: 0,3 mSv/ a

Die kosmische Strahlung wird weitgehend, jedoch nicht vollständig, durch die Atmosphäre abgeschirmt. In einem Flugzeug in 10 km Höhe beträgt, wie bereits angesprochen, die Belastung bis zu 10 μ Sv/h. Mit erhöhter Belastung ist entsprechend auch bei Aufenthalten im Hochgebirge zu rechnen.

Radioaktive Isotope im Körper: 0,3 mSv / a

Mit der Nahrung aufgenommen werden Tritium und C-14. Außerdem wird jeder Mensch durchschnittlich mit 4,4 kBq alleine von K-40 belastet.

Kernwaffenversuche, Tschernobyl- Reaktorunfall, Kerntechnik und alle weiteren Einflüsse: <0,1 mSv/ a

Wie man sieht, sind die künstlichen Strahleneinflüsse in unserer Region vernachlässigbar. Dies kann sich jedoch regional durch Freisetzung von lokalisierter Strahlung dramatisch ändern, wie der Reaktorunfall Tschernobyl im Jahre 1986 zeigte. Zudem ist der Wert heute gültig, und zwar deshalb, weil die durch oberirdische Kernwaffenversuche in den 1950er bis 1980er Jahren emittierten Spaltprodukte bis heute weitgehend abgeklungen sind. In erster Linie rührt die Strahlenbelastung aus der zivilen und militärischen Nutzung der Kernenergie von Cs-137 und anderen Spaltprodukten her.

Summe

- Es ergibt sich also eine natürliche Strahlenbelastung von 2,4 mSv/a.
- Zusätzlich ist mit einer zivilisationsbedingten Belastung von bis zu 2,1 mSv/a zu rechnen.
- Insgesamt also kann man als durchschnittliche Belastung eine Äquivalentdosisleistung von 4,5 mSv/a annehmen.

Zusätzliche Strahlenbelastung durch den FP- Versuch: < 0,3 µSv/ Praktikum

Dies ist im übrigen als eine Art worst- case Rechnung zu verstehen, nämlich dann, wenn man sich ohne jegliche Abschirmung in 2 m Entfernung von den in diesem FP- Versuch verwendeten radioaktiven Präparaten aufhält. In diesem Fall beträgt die absorbierte Äquivalentdosisleistung 0,001 µSv/ h. Die Umrechnung der natürlichen Strahlenbelastung entspricht 0,27 µSv/ h.

Bei einem dreiwöchigen Daueraufenthalt von 100 Stunden pro Woche ergibt sich eine FP- bedingte Zusatzdosis von 0,3 µSv. Diesen an sich geringen Wert kann man durch Abschirmung und größeren Abstand weiter verringern.

Durch Fehler in der Beachtung der Strahlenschutzmaßnahmen ist jedoch auch eine gehörige Belastung nicht auszuschließen. Betrachten wir spaßeshalber den ungünstigen Fall, dass sich eine Versuchsperson nur 10 cm von den radioaktiven Proben entfernt aufhält.

Dies führt zu einer absorbierten Äquivalentdosisleistung von 0,4 µSv/ h. Fatalerweise ist jedoch diese Äquivalentdosisleistung auf wesentlich weniger Gewebe konzentriert als bei einem Abstand von 2 m. Wird dabei besonders empfindliches Gewebe, wie die Keimdrüsen, der Strahlung ausgesetzt, so ist die Belastung durch einen deutlich höheren Qualitätsfaktor ebenfalls nach oben zu korrigieren. Derartige Strahlenexpositionen sind deshalb in jedem Fall zu vermeiden.

Fazit

Diese kurze Betrachtung zeigt bereits, wie lokalisiert Strahlungsquellen sein können und wie die Exposition einer Person in der Nähe einer Strahlungsquelle die absorbierte Äquivalentdosisleistung um Größenordnungen über den über die gesamte Umgebung gemittelten Wert übersteigen kann.

Da nicht die ereignisverursachende Strahlung selbst, sondern besonders die strahlungsverursachenden Quellen gefahrbringend sind, ist es notwendig, die Art der Quellen, ihre Verteilung und Adsorption in der umgebenden Biosphäre und ihre Tendenz zur Einlagerung in biologischen Organismen genau zu kennen.

Trotz genauer Kenntnis dieser Faktoren ist die Verteilung der Strahlung jedoch nie genau zu erfassen. Könnte man dies, so ist wiederum nicht abzuschätzen, wann sich ein stochastischer Schaden ereignet, der bereits aus einer Minimalexposition resultieren kann.

Als Beispiele sollen Opfer des nuklearen Angriffs auf Hiroshima und Beobachtungen an den Castorbehältern angeführt werden.

Jüngsten Schätzungen zu Folge kamen bei dem Kernwaffenangriff auf Hiroshima alleine 300.000 Menschen ums Leben. Davon jedoch nur 30.000 durch die Druck- und Hitzewelle, 50-100.000 Menschen starben durch die Wirkung der Primärstrahlung aufgrund der direkten Exposition einer letalen Strahlendosis, weitere etwa 200.000 Menschen starben in der Folgezeit aufgrund stochastischer Schäden. Dabei nicht eingerechnet sind unzählige Krebspatienten, die noch heute mit den Folgen des Angriffs kämpfen, oder Mutationen, die sich noch Generationen in der Geschichte der exponierten Personen finden lassen werden. Es zeigte sich jedoch, dass zahlreiche Menschen, die teilweise nur wenige hundert Meter vom Detonationszentrum entfernt waren, keiner letalen Strahlendosis ausgesetzt waren und auch keinen irreparablen stochastischen Schaden erlitten. Viele von ihnen überlebten so trotz massiver Verbrennungen durch die direkte Hitzewirkung der Kernreaktion. Andere Menschen, die mehrere Kilometer vom Zentrum entfernt waren, erlitten dagegen die genannte statistischen Schäden; auch starben viele Menschen in bis zu 10 km Entfernung an den direkten Folgen einer letalen Menge an Primärstrahlung. Schätzungen zufolge erkrankten mehr Personen, die in Detonationsrichtung geblickt hatten, als solche, die ihr Gesicht von der Detonation abwandten und sich zumindest für die Dauer einiger Minuten verbargen.

Dies ließ den bisher nicht bewiesenen Schluss zu, dass die Strahlung, die von der Detonation ausgeht, vor allem aber die Verteilung der emittierten Spaltprodukte nicht homogen und isotrop ist, sondern in hohem Maße konzentriert auftritt, während große Bereiche über längere Zeit strahlungsfrei bleiben.

Auch wurden an Castorbehältern, die zum Transport radioaktiver Spaltprodukte verwendet werden, sogenannte "Hot Spots" entdeckt. Dies sind Punkte besonders hoher Strahlenbelastung, von denen eine Strahlung ausgeht, die die durchschnittliche, fast vernachlässigbare Aktivität der Castoroberfläche im extremsten gemessenen Fall um den Faktor 100.000 überschritt. Dies kann durch eine inhomogene Verteilung der Spaltprodukte im Inneren des Behälters in Kombination mit inhomogen verteilten Materialschwächen der Behälterwand erklärt werden. Findet sich eine solche Stelle, so können dort besonders viele Strahlenteilchen entkommen, während andere Teilchen im Inneren des Behälters mehrfach rückgestreut werden können und somit die Strahlungsdichte im Vergleich zu einer freien Lagerung der radioaktiven Substanzen deutlich erhöhen können.

Ein einfacher Vergleich ist, wie die gemachten Darlegungen zeigen, völlig unzureichend, nicht zuletzt, da eine Belastung durch Strontium beispielsweise durch den Einbau ins Knochenmark viel stärker ins Gewicht fallen kann als ein Messwert in gesammelten Proben beim bloßen Vergleich mit der natürlichen Hintergrundstrahlung vermittelt.

Im Grunde muss man deshalb die anfallenden Isotope genau identifizieren und die Kenntnisse über die biologische Halbwertszeit und andere angesprochenen Faktoren wie Strahlungsart, biologische und physikalische Halbwertszeit, Anfälligkeit des Gewebes für Strahlenexposition usw. mit berücksichtigen.