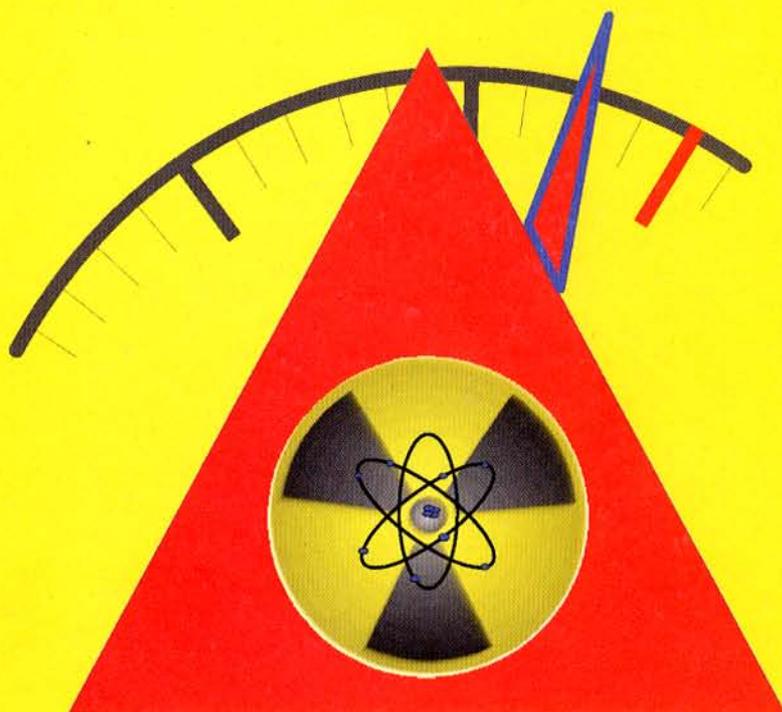


Radioaktivität in Baden-Württemberg

Jahresbericht 1998 – 2001



Radioaktivität in Baden-Württemberg

Jahresbericht 1998 – 2001



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 2003

Impressum

Herausgeber	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 76157 Karlsruhe • Postfach 210752 http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de
ISSN	1436-2783 (Bd. 7, 2003)
Bearbeitung	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilung 3 - Industrie und Gewerbe, Kreislaufwirtschaft
Druck	Druckerei Ernst Grässer, Humboldtstr. 1, 76131 Karlsruhe
Umwelthinweis	gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier
Bezug über	Verlagsauslieferung der LfU bei JVA Mannheim - Druckerei Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim Telefax: 0621/398-370

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

1 Radioaktivität

- ▶ Eigenschaften und Begriffe
- ▶ Natürliche Radioaktivität
- ▶ Künstliche Radioaktivität
- ▶ Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin
- ▶ Anwendung radioaktiver Stoffe in Technik und Forschung

2 Überwachung der Radioaktivität

- ▶ Allgemeine Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt
- ▶ Anlagenbezogene Überwachung der Radioaktivität

3 Ergebnisse der allgemeinen Überwachung der Radioaktivität

- ▶ Äußere Strahlung
- ▶ Luft
- ▶ Niederschlag
- ▶ Wasser
- ▶ Boden
- ▶ Bewuchs
- ▶ Nahrungsmittel
- ▶ Abfall und Reststoffe

4 Ergebnisse der anlagenbezogenen Überwachung der Radioaktivität

- ▶ Emissionsüberwachung
- ▶ Anlagen in Baden-Württemberg
- ▶ Abgaben mit der Abluft
- ▶ Abgaben mit dem Abwasser
- ▶ Grenznahe ausländische Anlagen
- ▶ Abgaben mit der Abluft
- ▶ Abgaben mit dem Abwasser
- ▶ Immissionsüberwachung
- ▶ Ortsdosis
- ▶ Luft
- ▶ Niederschlag
- ▶ Wasser
- ▶ Boden
- ▶ Bewuchs
- ▶ Nahrungsmittel

5 Strahlenexposition

Anhang

- ▶ Informationen
- ▶ Größen und Einheiten
- ▶ Erläuterungen von Begriffen

Datennachweis

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht „Radioaktivität in Baden-Württemberg“ informiert über die radiologische Situation in Baden-Württemberg in den Jahren 1998 bis 2001. Er berücksichtigt darüber hinaus auch Daten (Zeitreihen) aus den davor liegenden Jahren, die z.T. bis 1980 zurückreichen.

Neben einem allgemeinen Überblick über Strahlung und Radioaktivität informiert der Bericht über die Abgaben radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen, über die Überwachung auf Radioaktivität in der Umgebung dieser Einrichtungen sowie in der Umwelt allgemein. Außerdem werden die Ergebnisse der automatischen Messeinrichtungen der Kernreaktorfernüberwachung und des Radioaktivitätsmessnetzes Baden-Württemberg dargestellt. Zwei kurze Abschnitte informieren daneben über die allgemeine Strahlenexposition und über die Anwendung von Strahlenquellen in Medizin, Technik und Forschung.

Die Nutzung der Kernenergie und der Umgang mit radioaktiven Stoffen unterliegen einer intensiven staatlichen Aufsicht. Überwacht wird neben den kerntechnischen Einrichtungen auch die Umwelt im Allgemeinen. Damit wird sowohl dem Schutzzweck des Atomgesetzes, nämlich „Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen“, als auch der Forderung des Strahlenschutzvorsorgegesetzes, „die Radioaktivität auch in der allgemeinen Umwelt zu überwachen“, Rechnung getragen.

Alle kerntechnischen Anlagen geben – technisch nicht vermeidbar – mit der Fortluft und dem Abwasser radioaktive Stoffe an die Umgebung ab. Diese Emissionen unterliegen einer umfassenden Kontrolle und Bilanzierung sowohl durch die Betreiber der Einrichtungen als auch durch die staatlichen Behörden. Die Umgebung der kerntechnischen Anlagen an den Standorten Obrigheim, Philippsburg und Neckarwestheim, sowie die kerntechnischen Einrichtungen im Forschungszentrum Karlsruhe und in Heidelberg wird deshalb durch die Landesanstalt für Umweltschutz ständig auf den Eintrag von künstlichen Radionukliden überwacht. In die Überwachungsprogramme sind auch die baden-württembergischen Umgebungen der grenznahen Kernkraftwerke Fessenheim in Frankreich und Leibstadt in der Schweiz aufgenommen. In den Jahren 1998 bis 2001 wurden die zugelassenen Abgaben an radioaktiven Stoffen mit dem Abwasser und mit der Fortluft weder erreicht noch überschritten. In der Fortluft wurden die zugelassenen Abgaben an radioaktiven Edelgasen, Aerosolen, Radioiod, Tritium und Kohlenstoff-14 sogar weit unterschritten. Das gleiche gilt auch für die grenznahen ausländischen Kernenergieanlagen in Frankreich und der Schweiz.

Im Rahmen der allgemeinen Überwachung auf Radioaktivität nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz und der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen nach dem Atomgesetz werden jährlich programmgemäß insgesamt ca 1200 Proben genommen und etwa 2800 Einzelbestimmungen durchgeführt. Ferner werden in den Überwachungsbereichen im Umfeld der kerntechnischen Anlagen ca 400 Thermolumineszenzdosimeter zur Ermittlung der Ortsdosis ausgelegt. Bei den empfindlichen Radioaktivitätsmessungen an den Proben aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen waren auch in den Jahren 1998 bis 2001 in vielen Fällen Spuren künstlicher Radionuklide nachweisbar. Ihre Herkunft ist jedoch überwiegend auf die früheren Kernwaffentests und auf den Reaktorunfall in Tschernobyl zurückzuführen. Die Folgen dieses Unfalls sind auch heute, 16 Jahre danach, in Form einzelner Radionuklide (hauptsächlich Cäsium-137) in vielen Umweltmedien und in bestimmten Teilen der Nahrungskette nachweisbar.

In einigen wenigen Proben aus der Umgebung der kerntechnischen Anlagen, vor allem aus dem Bereich Wasser, wurden auch geringe Spuren radioaktiver Spalt- und Korrosionsprodukte gefunden, die auf den Betrieb dieser Anlagen zurückzuführen sind. Die gefundenen Werte lagen im Rahmen dessen, was aufgrund der Abgabewerte zu erwarten war. Unzulässige Ableitungen können mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

Neben der Vielzahl der Einzeluntersuchungen im Rahmen der Umgebungsüberwachung werden die kerntechnischen Anlagen in Baden-Württemberg und in Grenznähe zusätzlich durch ein vollautomatisches Kernreaktorfernüberwachungssystem kontrolliert. Dieses System liefert den Behörden kontinuierlich Daten über den Betrieb der Anlagen und über die Strahlenpegel in der Umgebung. In den Jahren 1998 bis 2001 wurden bei den über 100 Immissionsmessstellen der Kernreaktorfernüberwachung keine erhöhten Messwerte festgestellt, die auf ein radiologisches Ereignis innerhalb der kerntechnischen Anlagen zurückzuführen gewesen wären.

Die Radioaerosol- und Strahlenpegelmessstationen des Radioaktivitätsmessnetzes des Landes Baden-Württemberg gewährleisten zusammen mit den Stationen des Kernreaktorfernüberwachungssystems rund um die Uhr und landesweit einen Überblick über die radiologische Situation in Baden-Württemberg. Die mit diesen Messeinrichtungen gewonnenen Radioaktivitäts- und Dosisleistungswerte lagen während des gesamten Zeitraums in Bereichen, die im Land allgemein üblich sind.

Die Messungen zahlreicher Nahrungsmittel aus Baden-Württemberg zeigten, dass die Belastung der Nahrung mit künstlichen Radionukliden sehr gering ist. Die Hauptnahrungsmittel sind praktisch frei von künstlicher Radioaktivität. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Nachweismethoden lassen sich insbesondere Cäsium-137, das aus dem Reaktorunfall von Tschernobyl stammt, und Strontium-90 aus ehemaligen Kernwaffentests noch in Spuren in der Nahrung feststellen. Allerdings ist Cäsium-137 bei der überwiegenden Zahl der Proben mittlerweile nicht mehr nachweisbar. Wie zu erwarten, sind weiterhin regionale Unterschiede erkennbar. Insbesondere in Oberschwaben machten sich die Auswirkungen in Wild und wildwachsenden Pflanzen noch deutlich bemerkbar. So wurden auch in den Jahren 1998 bis 2001 wieder in Rehfleisch- und Fischproben aus Teilen Oberschwabens erhöhte Gehalte von Cäsium-137 gemessen, die bei Rehen zum Teil den Importrichtwert des Rates der Europäischen Gemeinschaften von 600 Bq/kg überschritten. Bei den untersuchten Früchten zeigten wieder verschiedene Proben von Heidelbeeren erhöhte Cäsium-137-Konzentrationen. Hohe Werte wurden wie in den Jahren zuvor auch bei einer Reihe von Pilzen erreicht, wobei Maronenhühnerlinge besonders herausragten.

Ein wesentlicher Beitrag zur natürlichen Strahlenbelastung wird durch das überall in der Luft vorkommende Edelgas Radon geliefert. Die mittlere Radonkonzentration beträgt im Freien 23 Bq/m³ und an wenigen Orten bis zu 40 Bq/m³. Im Inneren von Häusern wurden in Baden-Württemberg im Mittel ca 40 Bq/m³ Radon festgestellt. Damit ist die Radonkonzentration im Inneren von Häusern im Schnitt doppelt so hoch wie im Freien. Aus dieser Konzentration resultiert eine mittlere effektive Dosis von etwa 1,1 mSv pro Jahr. Dies ist gut die Hälfte der Strahlenbelastung des Menschen durch die natürlich vorkommende Radioaktivität.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Strahlenexposition des Menschen in Baden-Württemberg auch im Zeitraum 1998 bis 2001 zu einem großen Teil durch die Wirkung von natürlichen Radionukliden bestimmt war. Die mittlere effektive Dosis hieraus betrug im Jahr 2001 ca. 2,1 mSv. Zusammen mit der Strahlenbelastung aus medizinischen Anwendungen, im Mittel ca. 2,0 mSv, ergaben diese beiden Anteile nahezu die gesamte tatsächliche Strahlenbelastung. Im Vergleich dazu waren die Auswirkungen des Unfalls von Tschernobyl mit einer mittleren effektiven Dosis von weniger als 0,015 mSv/Jahr die Nachwirkungen der Kernwaffentests sowie die radiologischen Auswirkungen aus dem Betrieb kerntechnischer Anlagen unbedeutend.

1 Radioaktivität

Eigenschaften und Begriffe

Jede Materie besteht aus Atomen, die sich ihrerseits aus dem Atomkern und den ihn umhüllenden Elektronen zusammensetzen. Die meisten auf der Erde vorkommenden Atomkerne sind stabil. Einige Kernarten sind instabil. Sie zerfallen nach gewissen Zeiten. Ihre Kerne wandeln sich dabei in andere Kerne um. Bei diesem Vorgang wird in der Regel energiereiche Strahlung ausgesandt. Wegen dieser Strahlung nennt man instabile Atomkerne auch **Radionuklide**, das heißt, Strahlung aussendende Kerne. Instabile Atomkerne geben bei ihrem Zerfall Strahlung von sich aus ab. Sie verhalten sich somit radioaktiv. Den Vorgang nennt man deshalb **radioaktiven Zerfall**. Die physikalische Größe, mit der die Zerfallsraten, das sind die pro Sekunde zerfallenden Atomkerne, beschrieben werden, heißt **Radioaktivität** oder kurz auch Aktivität. Radioaktivität ist immer eine stoffgebundene Eigenschaft. Sie wurde vor 100 Jahren von Henri Becquerel als natürliche Eigenschaft an Uranverbindungen entdeckt. Die Maßeinheit für die Radioaktivität wird zu seinen Ehren mit „**Becquerel**“ bezeichnet. Ein Becquerel, abgekürzt: „Bq“, entspricht einem Zerfall (Umwandlung) eines Atomkernes pro Sekunde.

Der radioaktive Zerfall unterliegt trotz der Spontaneität jeder einzelnen Kernumwandlung im statistischen Mittel festen zeitlichen Änderungsgesetzen. Die charakterisierende Größe ist die **Halbwertszeit**, also die Zeit, nach der die Hälfte der ursprünglichen Menge des radioaktiven Materials (d.h. die Hälfte der radioaktiven Atome) durch Zerfall umgewandelt ist. Sie ist unterschiedlich und spezifisch für jedes Radionuklid und reicht von Mikrosekunden bis zu Milliarden von Jahren.

Neben der Halbwertszeit ist auch die freigesetzte Strahlung ein charakteristisches Merkmal einer radioaktiven Substanz. Trifft die beim radioaktiven Zerfall entstandene energiereiche Strahlung auf Materie, so verändert sie deren inneres Gefüge. Es werden zum Beispiel Elektronen abgespalten und umgelagert. Die Strahlung wirkt ionisierend. Man nennt sie deshalb auch **ionisierende Strahlung**.

Man unterscheidet bei den ionisierenden Strahlen aus Radionukliden als wichtigste Arten:

- **Alphastrahlung**,
das ist eine schwere Teilchenstrahlung aus Heliumkernen (ein Heliumkern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen),
- **Betastrahlung**,
das ist eine leichte Teilchenstrahlung aus Elektronen oder Positronen,
- **Gammastrahlung**,
das ist elektromagnetische Strahlung.

Entsteht die ionisierende elektromagnetische Strahlung nicht beim radioaktiven Zerfall sondern künstlich durch Energieeinsatz, nennt man sie nicht Gamma- sondern Röntgenstrahlung.

Die Energieabgaben und damit auch das Durchdringungsvermögen bzw. die Schwächung dieser Strahlungen beim Durchgang durch Materie sind sehr unterschiedlich, was auch zu ihrer Erkennung herangezogen werden kann. Alphastrahlung, als schwere Teilchenstrahlung, ionisiert die durchdrungene Materie auf kurzer Wegstrecke sehr dicht, während Betastrahlen und erst recht Gammastrahlen weitaus weniger dicht ionisieren. Die Teilchenstrahlungen Alpha- und Betastrahlen haben begrenzte Reichweiten. Sie liegen für Alphastrahlen bei einigen Zentimetern in der Luft und bei Bruchteilen von Millimetern in Gewebe. Die Reichweite für Betastrahlen kann je nach Energie bei einigen Metern in der Luft bzw. einigen Zentimetern im Gewebe betragen. Für Gamma- und Röntgenstrahlung gibt es keine exakt begrenzten Reichweiten, sondern nur stark energie-, material- sowie schichtdickenabhängige Schwächungsfaktoren. Man definiert hier sogenannte Halbwertsschichtdicken, also Materialstärken, welche die Intensitäten der Gamma- bzw. Röntgenstrahlen jeweils auf die Hälfte herabsetzen. Die Halbwertsschichten für Luft betragen etwa 100 m bei einer Gamma- oder Röntgenstrahlung von 1 MeV bzw. etwa 35 m bei 0,1 MeV. Die entsprechenden Halbwertsschichten für Wasser oder Gewebe liegen bei etwa 15 cm bzw. 5 cm. Abbildung 1.1 gibt einen schematischen Überblick.

Strahlenarten und ihre Eigenschaften

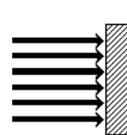
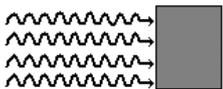
Strahlenart	maximale Reichweite	
	in Luft	in Gewebe
Alpha-Strahlen  Heliumkern	 bis 12 cm	bis 0,15 mm
Beta-Strahlen  Elektron	 bis 15 m	bis 2 cm
Gamma-Strahlen 	35 - 100 m Schwächung auf die Hälfte	5 - 15 cm

Abbildung 1.1

Obwohl der Mensch nicht in der Lage ist, ionisierende Strahlen und damit die Radioaktivität direkt wahrzunehmen, erlaubt die moderne Messtechnik den Nachweis solcher Strahlung mit außerordentlich hoher Empfindlichkeit.

Entscheidend für den Menschen und damit auch für den Strahlenschutz ist die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlungen im menschlichen Organismus. Die Wirkung, die eine aufgenommene Strahlung erzeugt, wird als **Dosis** bezeichnet. Jede der drei Strahlungsarten führt zur Aufnahme von Energie im biologischen Gewebe, die zur Schädigung von Zellen oder Erbgut führen kann. Zur Beschreibung dieser aufgenommenen Energie, bezogen auf die Masse des biologischen Gewebes, dient primär die physikalische Größe "Energiedosis" (Energie pro Masse) mit der Einheit Gray (Gy). 1 Gray bedeutet 1 Joule/kg.

Die biologische Wirkung einer Strahlenart beruht aber nicht nur auf der absorbierten Energie, sondern vor allem auch auf deren räumlicher Verteilung. Je kleiner der Bereich ist, in dem eine bestimmte Menge Energie wirkt, desto größer ist die Schädigung in diesem Bereich und damit die biologische Wirkung der Strahlung. Dies führte zur Einführung der sogenannten **Körperdosis** mit der Einheit "**Sievert**". 1 Sievert (Sv) bedeutet ebenfalls 1 Joule/kg, jedoch biologisch bewertet. Die Körperdosis ist gleich der Energiedosis, multipliziert mit einem Bewertungsfaktor. Dieser Faktor ist unter anderem abhängig von der Strahlenart. Er beträgt - gleichartige Strahlungsverhältnisse vorausgesetzt - für Alphastrahlung 20 und für Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlung jeweils eins. Der für Alphastrahlung 20 mal höhere Wert spiegelt die Besonderheit wider, dass Alphastrahlen ihre Energie in sehr viel kleineren Bereichen des Gewebes abgeben als Beta- oder Gammastrahlen. Alphastrahlende Radionuklide sind daher besonders schädlich für das Gewebe, wenn sie einmal in den Körper gelangt sind und dort verbleiben. Hingegen ist äußere Alphastrahlung fast bedeutungslos, da sie ihre gesamte Energie in einem kleinen Bereich abgibt und deshalb nur die wenig empfindliche Hornschicht der Haut des Menschen trifft und sie nicht durchdringen kann.

Aus Körperdosen, mit denen einzelne Organe belastet werden, kann rechnerisch über bestimmte Wichtungsfaktoren für Organe bzw. Körperteile auch eine "effektive Körperdosis" ermittelt werden. Während es über die Auswirkungen von höheren Körperdosen (ab ca. 500 mSv) gesicherte Erkenntnisse gibt, wird über die Wirkungen niedriger Körperdosen noch wissenschaftlich diskutiert. In der Praxis des Strahlenschutzes geht man davon aus, dass auch eine geringe Dosis im Prinzip zu einer Schädigung führen kann.

Obwohl mit der Körperdosis ein Maß für die Wirkung ionisierender Strahlung gegeben ist, spielt noch eine weitere Einflussgröße eine wichtige Rolle, nämlich die Zeit, in der eine Dosis verabreicht wird. Aufgrund von Reparaturmechanismen in den Zellen des menschlichen Körpers fällt die Schädigung um so geringer aus, je größer der Zeitraum ist, in dem man eine bestimmte Dosis erhält, je geringer also die **Dosisleistung**, d.h. die Dosis je Zeiteinheit, ist.

Von den aus der Umwelt auf den Menschen von außen einwirkenden Strahlenarten durchdringt die Gammastrahlung den menschlichen Körper am stärksten. Die durch äußere Strahlung verursachte Dosis stammt deshalb fast vollständig von dieser Strahlung. Bei der Überwachung der äußeren Strahlung wird daher in der Regel auch nur die Gammadosis ermittelt. Die dabei gewonnenen Werte beschreiben die von der Gammastrahlung an einem bestimmten Ort verursachte Dosis, die **Gammaortsdosis**. Die pro Zeiteinheit ermittelte Dosis wird als **Gammaortsdosisleistung** bezeichnet. In den folgenden Kapiteln wird als Maß für die Wirkung der äußeren Strahlung die Gammaortsdosisleistung angegeben. Die Angaben erfolgen in der Regel in Mikro- oder Nanosievert pro Stunde ($\mu\text{Sv/h}$ oder nSv/h).

Zur Verdeutlichung der wichtigsten radiologischen Zusammenhänge sind in Abbildung 1.2 die Begriffe Radioaktivität (als Strahlenquelle oder Ursache), Strahlung (als Folge) und Dosis (als Wirkung auf die bestrahlte Materie) noch einmal einander gegenüber gestellt.

Radiologische Zusammenhänge

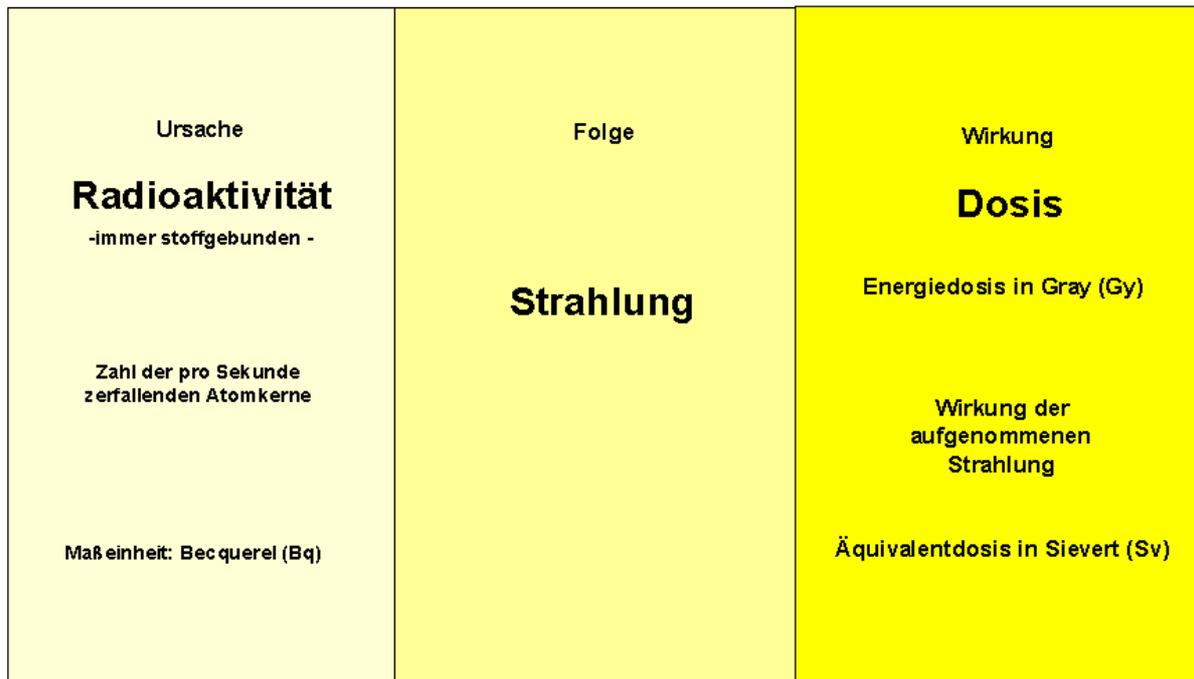


Abbildung 1.2

Natürliche Radioaktivität

Von den auf der Erde vorkommenden natürlichen Radionukliden haben einige Halbwertszeiten in der Größenordnung des Erdalters, wie z. B. Uran-238, Thorium-232, Kalium-40. Dabei sind z. B. Uran-238 und Thorium-232 Ausgangsnuklide von Zerfallsreihen, die zahlreiche weitere natürliche Radionuklide enthalten. Von diesen Radionukliden gelangen das radioaktive Edelgas Radon (Radon-222 bzw. Radon-220) und seine Zerfallsprodukte über die Bodenluft in die Atmosphäre.

Das Radon/Thoron und seine Zerfallsprodukte

Das radioaktive Edelgas Radon ($Rn-222$) wird durch den Zerfall des überall im Erdboden natürlich vorhandenen $Ra-226$ dort ständig neu gebildet und teilweise durch Bodenporen in die Bodenluft freigesetzt. Während der hinreichend langen Lebensdauer des Radons (Halbwertszeit 3,8 Tage) kann es im Boden an die Oberfläche diffundieren und in die Luft austreten. Beim Zerfall des Radons entstehen weitere Radionuklide (Radonzerfallsprodukte, oft auch Radonfolgeprodukte genannt), die allerdings Schwermetalle und keine Gase sind. Für den Strahlenschutz sind im Wesentlichen die vier kurzlebigen Zerfallsprodukte $Po-218$, $Po-214$, $Pb-214$ und $Bi-214$ von Bedeutung, in einigen Fällen zudem das $Pb-210/Po-210$.

Werden die Zerfallsprodukte in der Luft gebildet, so lagern sie sich überwiegend an Aerosole (Durchmesser von $0,01 \mu m$ bis $10 \mu m$) an. Nur ein geringer Teil bleibt als sogenannter unangelagerter Anteil in der Luft. Die sich im Freien ergebende spezifische Aktivität von Radon hängt von vielen Parametern ab, z.B. vom Radiumgehalt im Boden (in Deutschland im Bereich von ca. $10 Bq/kg$ bis $200 Bq/kg$), der Bodenbeschaffenheit und den meteorologischen Bedingungen. In Deutschland liegt der Mittelwert der spezifischen Radonaktivität in der bodennahen Luft bei etwa $10 Bq/m^3$, wobei örtlich und zeitlich starke Schwankungen auftreten können. Das aus dem Erdreich austretende Radon kann sich insbesondere in Häusern oder anderen Gebäuden, aber auch in Höhlen oder Bergwerken, anreichern und dort zu erheblich höheren spezifischen Radon- und Radonzerfallsproduktaktivitäten führen als in der Aussenluft. Nach Erhebungsmessungen in Deutschland beträgt der Mittelwert der spezifischen Radonaktivität in Häusern etwa $50 Bq/m^3$, wobei die Schwankungsbreite von einigen Bq/m^3 bis zu einigen $1000 Bq/m^3$ reicht. In der Regel ist die spezifische Aktivität der Zerfallsprodukte in der Luft geringer als die des Radons, da nur das Radon aus dem Boden ins Freie oder in einen Raum eindringt und die Zerfallsprodukte dort über den Zerfall des Radons erst gebildet werden müssen und sich außerdem an Boden oder Wänden abscheiden können. Radon kann auch in Baustoffen gebildet werden, die natürliches Radium enthalten. Das Edelgas Radon kann aus diesen Materialien in die Räume austreten und damit die spezifische Radonaktivität erhöhen. Eine Übersicht über die spezifischen Radonaktivitäten in der Bodenluft gibt die Übersichtskarte der Universität Bonn in Abbildung 1.3. Auch im Quell- und Brunnenwasser ist Radon enthalten (ca $1 Bq/l$ bis $1000 Bq/l$) und kann von dort in die Luft austreten.

Die Radonkonzentration in der Bodenluft in Deutschland
zur regionalen Klassifikation des geogenen Radonpotenzials

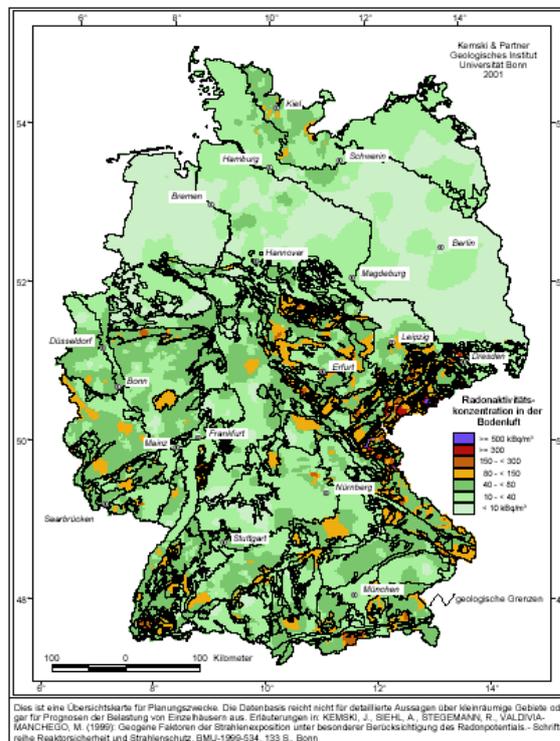


Abbildung 1.3

Tab. 1.1 Natürlich vorkommende Radionuklide

Radionuklid	Strahlungs-arten*	Halbwertszeit	Herkunft/Vorkom-men
Wasserstoff-3 (Tritium)	β	12,3 Jahre	kosmogen
Beryllium-7	γ	53 Tage	kosmogen
Kohlenstoff-14	β	5730 Jahre	kosmogen
Natrium-22	β, γ	2,6 Jahre	kosmogen
Kalium-40	β, γ	1,27 Milliarden Jahre	Erdkruste
Blei-210	α, β, γ	22,3 Jahre	Uran-Reihe, Erdboden
Blei-212	α, β, γ	10,6 Stunden	Thorium-Reihe, Erdboden, Luft
Blei-214	α, β, γ	26,8 Minuten	Uran-Reihe, Erdboden, Luft
Wismut-214	α, β, γ	19,8 Minuten	Uran-Reihe, Erdboden, Luft
Radon-220 (Thoron)	α, β, γ	55 Sek.	Thorium-Reihe, Erdboden, Luft
Radon-222 (Radon)	α, β, γ	3,82 Tage	Uran-Reihe, Erdboden, Luft
Radium-226	α, β, γ	1600 Jahre	Uran-Reihe, Erdboden
Thorium-232	α, β, γ	14 Milliarden Jahre	Erdkruste
Uran-235	α, β, γ	0,7 Milliarden Jahre	Erdkruste
Uran-238	α, β, γ	4,5 Milliarden Jahre	Erdkruste
* α : Alphastrahlung β : Betastrahlung γ : Gammastrahlung		Anmerkung zu Spalte 2: Bei den angegebenen Nukliden ist auch die Art der Strahlung der Folgeprodukte angegeben.	

Der Mensch atmet das Radon und die beim Zerfall des Radons entstehenden weiteren Radionuklide (Radonzerfallsprodukte), die sich in der Luft befinden, ein. Während das Edelgas Radon fast vollständig wieder ausgeatmet wird, verbleiben ca 10-20 % der Radonzerfallsprodukte im Atemtrakt des Menschen. Sie zerfallen dort unter Emission von Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung und führen zu einer Exposition des Lungengewebes. Dies kann langfristig Lungenkrebs verursachen. Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte ist heute nach dem Rauchen der zweitgrößte Risikofaktor für Lungenkrebs. Die Strahlung der Zerfallsprodukte und in geringerem Umfang auch die des Radons führen im Mittel bei den Menschen in Deutschland zu einer effektiven Dosis von ca. 1,4 mSv pro Jahr (Dosis durch Thoron und seine Zerfallsprodukte ca. 0,16 mSv pro Jahr) und tragen damit den grössten Anteil zur effektiven Dosis bei, die jeder Mensch durch die in der natürlichen Umwelt vorhandenen radioaktiven Stoffe und die ionisierende Strahlung in der Umwelt im Mittel erhält (siehe auch Abbildung 5.1). Je nach der spezifischen Radonaktivität in den Bereichen, in denen sich eine Person aufhält, können diese Werte im Einzelfall ganz erheblich schwanken.

Mittlere effektive Jahresdosis durch ionisierende Strahlung im Jahr 2001 (gemittelt über die Bevölkerung Deutschlands)

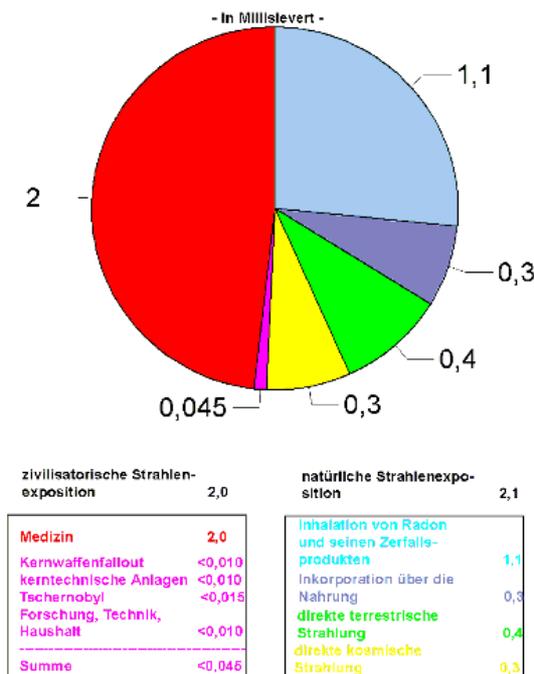


Abbildung 5.1

Obwohl die spezifische Aktivität der Radonzerfallsprodukte in der Luft für die Strahlenexposition der Menschen wichtiger als die spezifische Radonaktivität ist, beschränkt man sich jedoch oft auf die technisch einfachere Bestimmung der spezifischen Radonaktivität. Auch Richt- und Grenzwerte werden überwiegend auf die spezifische Radonaktivität bezogen. Die Messung der spezifischen Radonaktivität in Gebäuden oder an Arbeitsstätten wird von einigen Messstellen und Sachverständigen angeboten.

Zusätzlich werden durch die Wechselwirkung der aus dem Weltall kommenden kosmischen Strahlung mit der umgebenden Luftschicht radioaktive Nuklide wie Kohlenstoff-14, Beryllium-7 und Tritium (H-3) ständig neu erzeugt. Da diese Radionuklide durch die Einwirkung der kosmischen Strahlung (auch Höhenstrahlung genannt) entstanden sind, bezeichnet man ihre Herkunft als „kosmogen“.

Durch die Aufnahme solcher Radionuklide mit der Atemluft oder der Nahrung kommt es neben der äußeren Strahlenbelastung auch zu einer merklichen inneren Strahlenbelastung des Menschen. Die wichtigsten natürlichen Radionuklide sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. Außer den vier erstgenannten sind diese Radionuklide mehr oder weniger verteilt vor allem in den Böden und Gesteinen der Erdkruste und damit auch in den anorganischen Baumaterialien und Zuschlagstoffen vorhanden.

Künstliche Radioaktivität

Künstlich vom Menschen erzeugte Radionuklide sind zu Hunderten bekannt und unterliegen samt ihren Strahlungen denselben Gesetzmäßigkeiten wie die natürlich vorkommenden Radionuklide. Praktische Bedeutung für die Belastung von Mensch und Umwelt haben jedoch nur einige wenige Nuklide, die entweder große Halbwertszeiten besitzen oder wegen ihres physiologischen Verhaltens stärker radiotoxisch sind. Einige wichtige künstlich erzeugte Radionuklide sind in Tabelle 1.2 zusammengestellt. Ein Teil der natürlich vorkommenden Radionuklide, z. B. Tritium und Kohlenstoff-14 wird heute auch durch menschliche Tätigkeiten in größerer Menge künstlich erzeugt.

Kurz nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl standen die kurzlebigen Radionuklide, insbesondere das Radionuklid Iod-131, im Mittelpunkt des Interesses von Öffentlichkeit und Fachleuten. In der Folgezeit blieben als einzig bedeutsame "Tschernobyl"-Nuklide die längerlebigen Radionuklide Cäsium-134 und vor allem Cäsium-137 übrig, die fast in jedem am Stoffkreislauf beteiligten Umweltmedium in unterschiedlichen Konzentrationen bzw. spezifischen Aktivitäten zu finden sind. Daneben sind auch die Auswirkungen der früheren oberirdischen Kernwaffentestexplosionen aus den 50er Jahren und Anfang der 60er Jahre noch schwach nachweisbar. Hieraus stammen ein Teil des heute in der Umwelt vorhandenen Cäsium-137 sowie die Hauptmenge des vorhandenen Strontium-90.

Die Emissionen aus dem Normalbetrieb von Kernkraftwerken sind demgegenüber so gering, dass die Bewertung des radiologischen Risikos dieser Kernenergienutzung fast ausschließlich von der Bewertung des Störfallrisikos abhängt.

Tab. 1.2 Künstliche Radionuklide

Radionuklid	Art der Strahlung*	Halbwertszeit	Ursprung bzw. Anwendung
Wasserstoff-3 (Tritium)	β	12,3 Jahre	Kernwaffenfallout, Leuchtfarben, Kerntechnik
Kohlenstoff-14	β	5730 Jahre	Kerntechnik, Medizin
Kobalt-60	β, γ	5,3 Jahre	Kerntechnik, Medizin
Technetium-99 m	γ	6,0 Stunden	Medizin
Strontium-90	β	28,5 Jahre	Kernwaffenfallout, Kerntechnik, Medizin
Iod-125	γ	60 Tage	Medizin
Iod-131	β, γ	8 Tage	Kerntechnik, Medizin
Cäsium-134	β, γ	2 Jahre	Kerntechnik (Tschernobyl)
Promethium-147	β	2,6 Jahre	Leuchtfarben
Cäsium-137	β, γ	30 Jahre	Kernwaffenfallout, Kerntechnik (Tschernobyl), Medizin
Iridium-192	β, γ	74 Tage	Prüftechnik, Medizin
Plutonium-238	α, γ	87,7 Jahre	Kerntechnik, Isotopenbatterien
Plutonium-239	α, γ	24110 Jahre	Kerntechnik, Kernwaffentechnik
Americium-241	α, γ	433 Jahre	Kerntechnik, Brandmelder, Prüftechnik

*
 α : Alphastrahlung
 β : Betastrahlung
 γ : Gammastrahlung

Die Anwendung künstlicher Radionuklide in Medizin, Forschung und Industrie ist inzwischen weit verbreitet. Die Gesamtanzahl von Verwendern radioaktiver Stoffe mit Genehmigungserfordernis betrug Ende 2001 in Baden-Württemberg 1798. Gemäß der Strahlenschutzverordnung ist für den Umgang mit radioaktiven Stoffen ab einem gewissen Umfang eine behördliche Genehmigung erforderlich. Hierbei werden entsprechende Anforderungen an den Verwender (z.B. Fachkunde, Zuverlässigkeit), die örtlichen Verhältnisse und die Art und Weise des Umgangs gestellt. Die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen und der Genehmigungsaufgaben werden von den Staatlichen Gewerbeaufsichtsämtern kontrolliert.

Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin

Neben der Handhabung im kerntechnischen Bereich werden radioaktive Stoffe auch zu biochemischen und medizinischen Untersuchungszwecken und zur medizinischen Therapie eingesetzt. In der Nuklearmedizin werden Substanzen verwendet, die aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften am Stoffwechsel bestimmter Organe des menschlichen Körpers teilnehmen (Radiopharmaka). Diese Substanzen werden in der Diagnostik bevorzugt mit γ -Strahlern mit kurzer Halbwertszeit (z.B. Tc-99m, Halbwertszeit 6 Stunden) markiert, bevor sie dem Menschen appliziert werden. Die emittierten γ -Strahlen werden mit geeigneten Detektoren außerhalb des Menschen gemessen. Auf diese Weise können z.B. Durchblutungsstörungen des Herzmuskels erkannt und die Funktion der Nieren oder der Schilddrüse überprüft werden.

In der therapeutischen Nuklearmedizin wird die Strahlenwirkung auf Zellen ausgenutzt. Das kranke Gewebe soll am Wachstum gehindert und zum Absterben gebracht werden. Hierzu kommen vor allem β -Strahler, vereinzelt auch α -Strahler zum Einsatz. Das am häufigsten in der Therapie eingesetzte Radioisotop I-131 wird bei bestimmten Erkrankungen der Schilddrüse eingesetzt. Nahezu alles Iod sammelt sich durch den spezifischen Schilddrüsenstoffwechsel dort an. Die Strahlenwirkung bleibt wegen der geringen Reichweite der β -Strahlen im Gewebe auf die erkrankte Körperregion beschränkt, das umliegende Gewebe wird geschont.

Während im Bereich der Diagnostik neben den Krankenhäusern auch niedergelassene Nuklearmediziner tätig sind, ist die Strahlentherapie weitestgehend den Krankenhäusern vorbehalten. Man will damit sowohl eine Strahlenbelastung der Angehörigen von Patienten vermeiden als auch die radioaktiven Ausscheidungen der Patienten im Krankenhaus sammeln. Dazu haben die Therapiezentren Abklinganlagen, in denen das radioaktive Iod weitestgehend zerfällt. Bei Unterschreitung bestimmter Konzentrationsgrenzwerte darf das gesammelte Abwasser in die öffentliche Kanalisation abgegeben werden.

Eine Emissionsüberwachung der übrigen Radiotherapie- und Diagnostiknuklide ist kaum möglich, da die Untersuchungen und vereinzelt Therapien ambulant erfolgen und die Patienten unmittelbar danach wieder nach Hause dürfen. Erst dort werden die Radionuklide teilweise ausgeschieden und gelangen unmittelbar in die Kanalisation. Die Aktivität wird also an vielen Stellen in die Umwelt eingetragen, man spricht deshalb von diffusen Quellen. Ableitungen aus Abklinganlagen müssen dem zuständigen Gewerbeaufsichtsamt regelmäßig gemeldet werden. Zusätzlich müssen die nuklearmedizinischen Einrichtungen ihren zuständigen Gewerbeaufsichtsämtern melden, wieviel Aktivität sie erworben und schließlich appliziert haben. Für eine Abschätzung der Emissionen aus dem nuklearmedizinischen Bereich wurden diese Daten durch die Landesanstalt für Umweltschutz für das gesamte Land Baden-Württemberg zusammengetragen und ausgewertet. Mit Hilfe eines praxisorientierten Rechenmodells wurden aus den bezogenen Aktivitäten die in die baden-württembergischen Gewässer emittierten Aktivitäten abgeschätzt.

In diesem Modell werden verschiedene Aspekte des Emissionspfades durch experimentell abgesicherte nuklidspezifische Übergangsfaktoren (aus der Literatur entnommen) berücksichtigt:

- Verhältnis applizierter zu bezogener Aktivität (empirisch ermittelt)
- Patientenausscheidungsfaktor (berücksichtigt physikalischen Zerfall und Verweildauer im menschlichen Körper)
- Abklingfaktor (bei evtl. vorhandener Abklinganlage)
- Fließdauer zur Kläranlage, Verweilzeit in Kläranlage
- Rückhaltefaktor (in der Kläranlage)

Als Emissionsorte für die Ableitungen in Gewässer wurden diejenigen Standorte der nuklearmedizinischen Einrichtungen in Baden-Württemberg festgelegt, wo die Aktivität appliziert worden ist. Die geographische Lage der einzelnen Emissionsorte ist in der Landkarte (Abbildung 1.4) eingezeichnet. Zur besseren Übersicht wurden die Emissionsorte den Wassereinzugsgebieten der großen Flüsse Rhein, Neckar, Donau und Main zugeordnet.



**Emissionsorte der Ableitung
von in der Nuklearmedizin
eingesetzter Radioisotopen**

Abbildung 1.4

Nachfolgend wird stets der zeitliche Verlauf der Emissionen von den einzelnen Radionukliden beschrieben, der gleiche Verlauf liegt auch bei den bezogenen Aktivitäten vor. Diese Aktivitäten sind allerdings höher. Für F-18 wird wegen einer geringen Halbwertszeit von 109,7 Minuten davon ausgegangen, dass es bereits zerfallen ist, bevor es in die Gewässer gelangen kann.

Es wurden nur Daten aus Baden-Württemberg berücksichtigt. Daten aus anderen Bundesländern oder Nachbarstaaten fließen in die Betrachtungen nicht ein. So liegt z.B. das Gewässereinzugsgebiet des Mains auch in Hessen und Bayern, der Rhein entwässert große Gebiete der Schweiz und Frankreichs.

Die Abbildung 1.5 zeigt die emittierte Aktivität der zur Diagnostik verwendeten Radionuklide von 1997 bis 2000 im Gewässereinzugsgebiet Rhein. In der Regel sind die jährlichen Emissionen im Durchschnitt gleich geblieben, mit Ausnahme von Co-58, das eine starke Erhöhung erfahren hat. Diese Erhöhung könnte auf einen neuen Emittenten schließen lassen. Die Anwendung von F-18 wurde in den letzten Jahren deutlich gesteigert. Zu der Gruppe der häufig verwendeten Radionuklide zählen auch Tc-99m, I-123 und Tl-201.

Diagnostiknuklide Gewässereinzugsgebiet Rhein

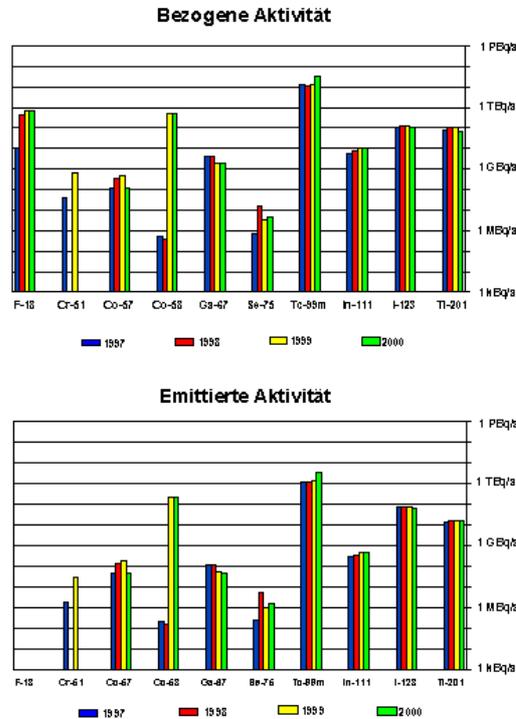


Abbildung 1.5

Die Abbildung 1.6 stellt die Abschätzung der Emission von Therapienukliden im Gewässereinzugsgebiet Rhein dar. Die jährlichen Emissionen sind für die einzelnen Radionuklide tendenziell gleich bleibend. P-32 bildet dabei mit einer starken Erhöhung im Jahr 2000 allerdings eine Ausnahme. Die aktivitätsmäßig für die Gewässer bedeutsamsten Radionuklide in diesem Gebiet sind I-131, Y-90 und Re-186.

Therapienuklide Gewässereinzugsgebiet Rhein

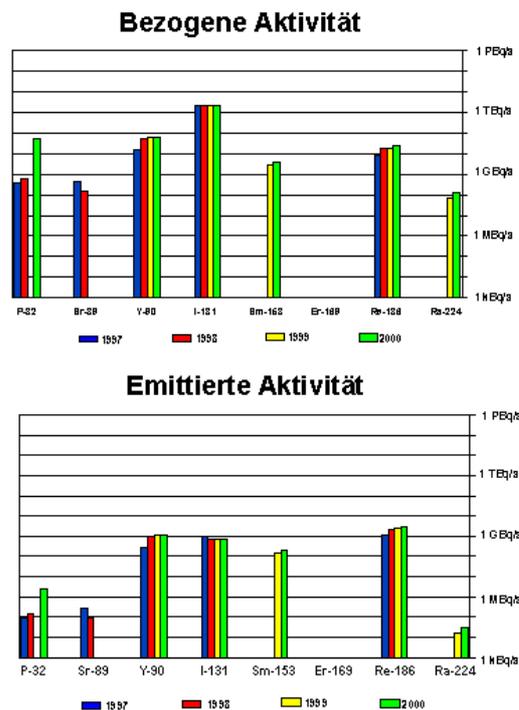


Abbildung 1.6

Die Abbildung 1.7 zeigt die Emissionen von Diagnostiknuklidern im Gewässereinzugsgebiet Neckar. Die Trends für die Jahresabgaben der einzelnen Nuklide verlaufen uneinheitlich. Während bei F-18, Cr-51, Co-58, In-111 und I-123 die Emissionsraten steigen, bleiben sie bei Ga-67, Tc-99m und Tl-201 im Durchschnitt gleich. Die Emissionen von Co-57 gingen jedoch zurück. Auch hier dominiert das Radionuklid Tc-99m bei der Gewässerbelastung.

Diagnostiknuklide Gewässereinzugsgebiet Neckar

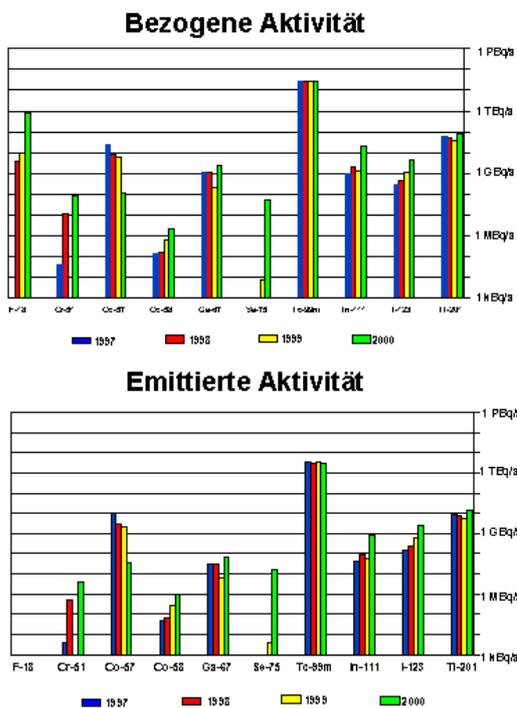


Abbildung 1.7

Die Abbildung 1.8 zeigt die Emissionsraten von Therapienuklidern im Gewässereinzugsgebiet Neckar. Die jährlichen Emissionen sind fast durchgängig konstant geblieben in den letzten Jahren, eine Ausnahme bildet wiederum P-32. Die Hauptnuklide sind Y-90, I-131 und Re-186.

Therapienuklide Gewässereinzugsgebiet Neckar

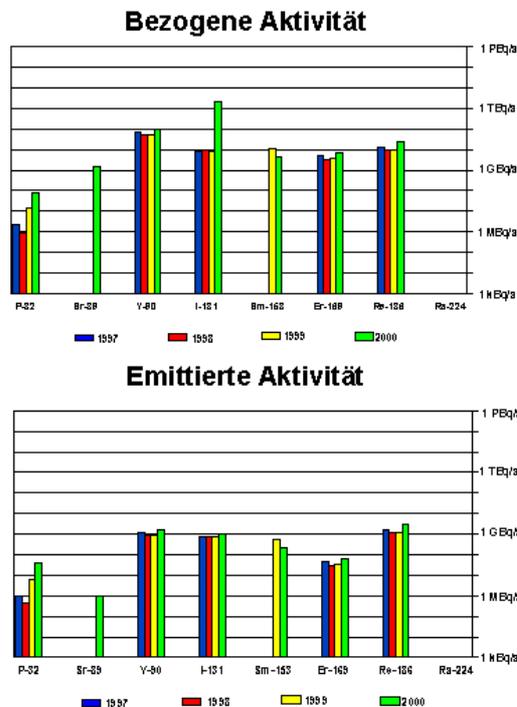


Abbildung 1.8

Über die Emission von Diagnostiknuklid im Gewässereinzugsgebiet Donau liegen aus Baden-Württemberg nur die Daten vom Jahr 2000 vor, sie sind in Abbildung 1.9 abgebildet. Daher kann kein Trend aufgezeigt werden. Die emittierte Aktivität von Tc-99m liegt um eine Größenordnung niedriger als bei den vergleichbaren Werten vom Rhein oder Neckar. Der Grund liegt darin, dass hier weniger Emittenten aus Baden-Württemberg vorhanden sind.

Diagnostiknuklide Gewässereinzugsgebiet Donau

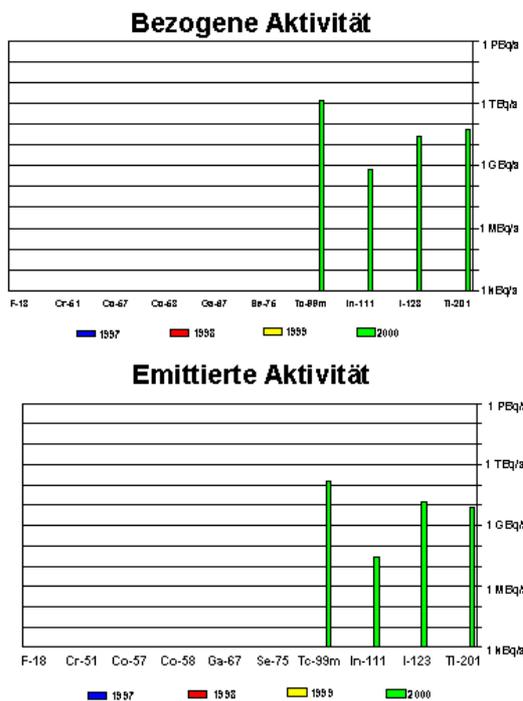


Abbildung 1.9

Ebenso verhält es sich im selben Gebiet mit den Therapienuklid. Nur I-131 ist durchgängig erfasst. Die Emissionen von I-131 sind tendenziell steigend (vgl. Abbildung 1.10).

Therapienuklide Gewässereinzugsgebiet Donau

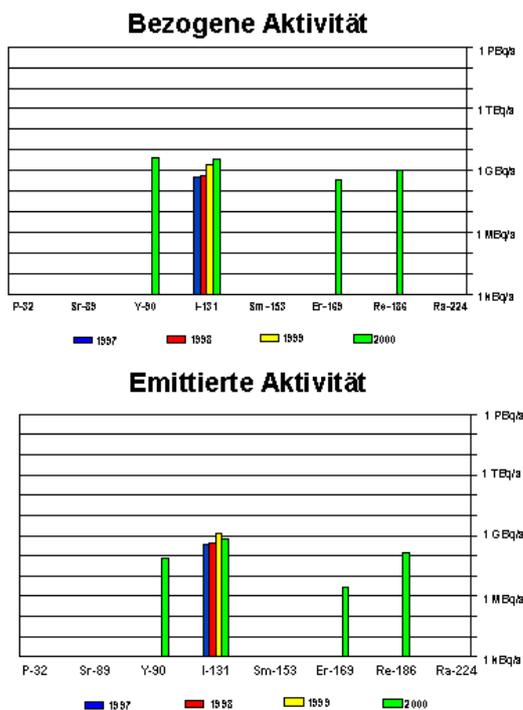


Abbildung 1.10

In der Abbildung 1.11 sind die jährlichen Emissionen von Diagnostiknuklidern im Gewässereinzugsgebiet Main dargestellt. Sie sind tendenziell gleich bleibend, nur bei Co-58 nimmt die emittierte Aktivität über die Jahre ab. Die Nuklide mit den höchsten Emissionen sind Tc-99m und Tl-201.

Diagnostiknuklide Gewässereinzugsgebiet Main

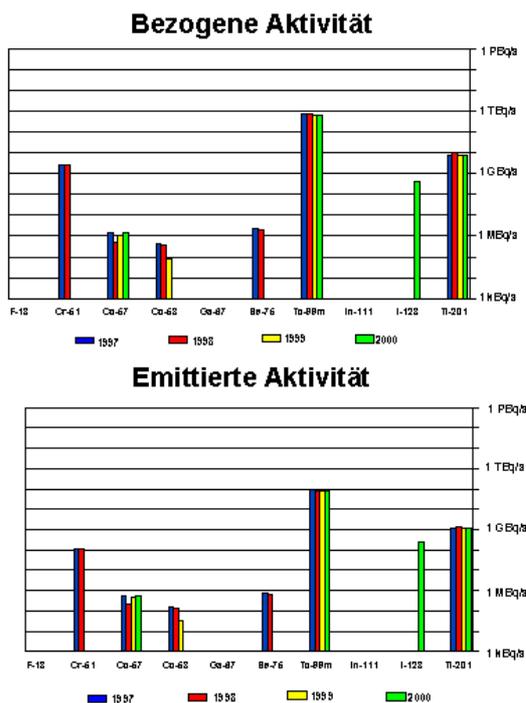


Abbildung 1.11

Im Gewässereinzugsgebiet Main gibt es aus Baden-Württemberg bei der Gruppe der Therapienuklide nur Emissionen von Y-90 und I-131 (vgl. Abbildung 1.12). Während bei Y-90 die Emissionen tendenziell eher konstant sind, steigt im Jahr 2000 die Emission von I-131 an. Die emittierte Aktivität von I-131 bleibt aber trotzdem um eine Größenordnung unterhalb der vergleichbaren Werte von Rhein oder Neckar.

Therapienuklide Gewässereinzugsgebiet Main

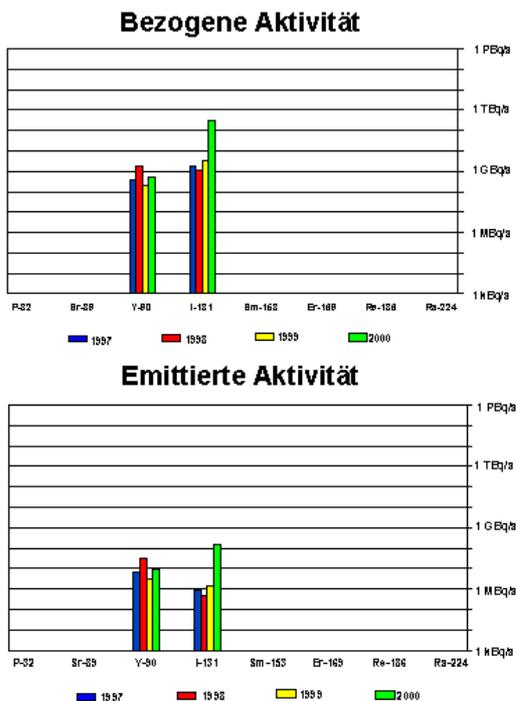


Abbildung 1.12

Aus den Abbildungen lässt sich erkennen, dass die emittierte Aktivität von Tc-99m bezogen auf das jeweilige Gewässereinzugsgebiet größenordnungsmäßig bei ca 1 TBq/a liegt, bei Tl-201 um 1 GBq/a und bei I-131 um 10 GBq/a.

Nuklid	Halbwertszeit	Verwendungszweck	Bezogene Aktivität [GBq] im Jahr			
			1997	1998	1999	2000
F-18	1,8 h	Diagnostik	10,1	431	746	1.520
Cr-51	27,8 d	Diagnostik	2,58	2,69	0,637	0,0869
Co-57	267 d	Diagnostik	25,2	7,91	6,12	0,238
Co-58	71 d	Diagnostik	0,00103	0,000898	538	538
Ga-67	3,25 d	Diagnostik	5,12	5,53	2,06	4,32
Se-75	120 d	Diagnostik	0,00324	0,0178	0,00316	0,0583
Mo-99 / Tc-99m	66 h / 6 h	Diagnostik	40.800	39.300	40.900	58.900
In-111	2,8 d	Diagnostik	7,07	9,74	11,9	30,9
I-123	13,3 h	Diagnostik	114	123	120	139
Tl-201	73 h	Diagnostik	148	172	158	212
P-32	14,3 d	Therapie	0,372	0,556	0,0135	0,134
Sr-89	50,5 d	Therapie	0,452	0,148	-----	1,55
Y-90	2,7 d	Therapie	87	110	111	167
I-131	8,05 d	Therapie	2.140	2.230	2.050	4.530
Sm-153	46,75 d	Therapie	-----	-----	13,5	8,51
Er-169	9,5 d	Therapie	4,98	3,29	3,97	7,67
Re-186	3,7 d	Therapie	21,4	25,7	27,0	46,1
Ra-224	3,7 d	Therapie	-----	-----	0,07	0,13

Tabelle 1.3: Zusammenstellung von in Baden-Württemberg für medizinische Anwendungen jährlich bezogenen radioaktiven Stoffen und Nuklidaktivitäten

Als **Immission** findet man die oben genannten Radionuklide in der Regel in Klärschlämmen aus Kläranlagen in der Nähe von nuklearmedizinischen Zentren und in Messproben aus Verbrennungsanlagen. Zu den häufig gefundenen Nukliden zählt I-131, aber auch Tl-201, das in der Diagnostik eingesetzt wird. Etwas seltener werden auch Se-75 und In-111 in solchen Proben nachgewiesen.

Nach der aktuellen Strahlenschutzverordnung muss die zuständige Behörde sicherstellen, dass die zulässigen Dosisgrenzwerte eingehalten werden, die sich durch die Vorbelastung der Gewässer und aus den Einleitungen der betreffenden Anlagen ergeben. Der Nachweis der oben genannten Nuklide in der Umwelt macht deutlich, dass auch die Emissionen aus den nicht-kerntechnischen Anlagen erfasst und abgeschätzt werden müssen.

Der gesamte Verbrauch von radioaktiven Stoffen in der baden-württembergischen Nuklearmedizin wird in Tabelle 1.3 aufgeführt. Die erworbenen Aktivitäten von Diagnostiknukliden schwanken uneinheitlich und bleiben in etwa gleich. Eine Ausnahme bildet ¹⁸F, es nimmt im Zeitraum von 1997 bis 2000 stark zu. Dieses Nuklid wird bei der Positronen-Emissions-Tomographie eingesetzt, deren Bedeutung zunimmt; diese Untersuchungsmethode ist infolge des Einsatzes kurzlebiger Radionuklide gegenüber anderen vergleichbaren Verfahren dosissparender. Im Jahr 2000 wurde allerdings weiterhin wie auch in den Jahren zuvor Tc-99m am häufigsten eingesetzt. Auf Tc-99m entfallen dabei etwa 96% der gesamten erworbenen Aktivitäten in der Diagnostik.

In der Therapie ist eine Zunahme der erworbenen Aktivität zu verzeichnen. Dabei entfallen auf I-131 als dem am häufigsten eingesetzten Radionuklid etwa 95% der Aktivität aller im Jahr 2000 eingesetzten Therapienuklidaktivitäten.

In der Strahlentherapie werden neben der Applikation von radioaktiven Stoffen auch Bestrahlungen der Patienten von aussen durchgeführt, in der Regel durch moderne Beschleunigeranlagen oder Gammabestrahlungseinrichtungen.

Element / Nuklid	Halbwertszeit	primäre Anwendung	Untersuchtes Organ
Sauerstoff O-15	2 Minuten	Diagnostik	PET (siehe Text)
Stickstoff N-13	10 Minuten		
Kohlenstoff C-11	20 Minuten		
Technetium Tc-99m	6,0 Stunden	Diagnostik	Szintigraphie: Skelett, Knochenmark, Schilddrüse, Lunge
Thallium Tl-201	73 Stunden	Diagnostik	Herz
Iod I-123	13,2 Stunden	Diagnostik	Schilddrüse
Iod I-131	8,0 Tage	Therapie	Schilddrüse
Yttrium Y-90	2,5 Tage	Therapie	Gelenke, Knochen
Rhenium Re-186	3,7 Tage	Therapie	Gelenke
Phosphor P-32	14,3 Tage	Therapie	Lymphknoten

Tabelle 1.4: Beispiele für die Anwendung einiger künstlicher Radionuklide in der Nuklearmedizin

Eine der modernsten Anlagen zur medizinischen Diagnostik ist die Positron-Emissionstomographie (PET). Sie bedient sich der Eigenschaft bestimmter Betastrahler beim Zerfall Positronen auszusenden. Diese zerstrahlen im Gewebe unmittelbar am Entstehungsort mit Elektronen zu jeweils einem Paar von Gammaquanten diskreter Energie (511 keV), die gleichzeitig im Winkel von 180° zueinander emittiert werden. Diese Eigenschaften führen dazu, dass mittels eines Positronen-Emissionstomographen („Positronenkamera“) eine verbesserte Sensivität, Auflösung und Quantifizierbarkeit erreicht wird. Die klinisch interessanten PET-Nuklide wie z.B. Kohlenstoff-11, Stickstoff-13, Sauerstoff-15 und Fluor-18 sind extrem kurzlebig. Dies erfordert daher eine Herstellung direkt am Gebrauchsort (Klinik) mittels eines Zyklotrons.

In der analytischen Routinediagnostik dienen nuklearmedizinische Verfahren zum quantitativen Nachweis von Hormonen- und anderen Substanzkonzentrationen in Blut oder Urin. Bei den sog. Radioimmunoassays und verwandter Verfahren werden Substanznachweise im Bereich von Nanogramm (milliardstel Gramm) bis Pikogramm (billionstel Gramm) möglich. Diese liegen weit unterhalb der Nachweismöglichkeiten herkömmlicher chemischer oder biologischer Verfahren. Verwendete Nuklide sind z.B. Radioiod (I-125), Kohlenstoff-14, oder Tritium (H-3). Eine Beispielübersicht zeigt Tabelle 1.4.

Anwendung radioaktiver Stoffe in Technik und Forschung

Die Anwendung radioaktiver Strahler im **technischen Bereich**, in der **gewerblichen Wirtschaft**, hat sich inzwischen auch vielfältig entwickelt. Einige Beispiele machen dies deutlich.

So eignen sich etwa bestimmte radioaktive Nuklide zur Messung von Schichtdicken, Foliendicken oder Massenbelegungen. Man macht sich dabei beispielsweise zunutze, dass die Schwächung der Strahlung stark von der Dicke des durchstrahlten Materials abhängt. Aus der gemessenen Schwächung kann dann direkt auf die Materialdicke geschlossen werden. Je nach Anwendungsfall unterscheiden sich die Geräteausführungen und auch die eingesetzten Nuklide. Häufig verwendet werden hier Betastrahler. Ein Schichtdickenmessgerät mit umschlossenem Strontium-90-Betastrahler kann z. B. eine Aktivität von 185 MBq enthalten. Auch hier sorgt eine sichere und dichte Umhüllung dafür, dass zwar die Strahlung die Probe und den Detektor erreicht, die radioaktive Substanz jedoch nicht entweichen kann. Solche umschlossenen radioaktiven Strahler unterliegen regelmäßigen Dichtheitsprüfungen.

Anwendung	Nuklid	typische Aktivität
Ionisationsrauchmelder in Brandmeldesystemen	Am-241	einige kBq
Messung von Schichtdicken, Foliendicken, Massenbelegungen u. ä.	Sr-90 Tl-204	einige 100 MBq einige MBq
Füllhöhenmessungen, Grenzstandsüberwachung	Co-60 Cs-137	einige 100 MBq
Gaschromatographie (ECD)	Ni-63 Am-241	einige 100 MBq
Feuchtemessung	Am-241	einige GBq
Leuchtzifferblätter	H-3 (Pm-147, Ra-226)	einige GBq, je nach Leuchtstärke
Zerstörungsfreie Materialprüfung (Durchstrahlung)	Ir-192	einige TBq
Sterilisation von Bedarfsgegenständen	Co-60	70 – 100 TBq

Tabelle1.5: Einige Beispiele für die Anwendung radioaktiver Strahler im technischen Bereich

Die Eigenschaft, dass ionisierende Strahlung in Materie geschwächt oder absorbiert wird, nutzt man auch in Füllstandsmessgeräten, welche z. B. die automatische Befüllung von Flaschen überwachen, Füllhöhen in Behältern registrieren (Grenzstandsmessung), oder die automatisierte Abfüllung von Schüttgütern steuern. Hier kommen z. B. die Nuklide Kobalt-60, Cäsium-137 aber auch Americium-241 zur Anwendung. Sehr häufig werden Strahlungsionisationsdetektoren in der Gaschromatographie im Bereich der Analytik eingesetzt. Die verwendeten Strahler sind jedoch in das Gerät eingebaut und nicht ohne weiteres zugänglich. (Beispiel: „Electron-Capture-Detector“ (ECD) mit 550 MBq Nickel-63). Radioaktive Substanzen werden auch in Ionisationsrauchmeldern von Brandmeldeanlagen eingesetzt. Pro Rauchmelder ist die eingesetzte Aktivität jedoch kleiner als das 10-fache der Freigrenze (kBq), angestrebt werden künftig Meldereinsätze unterhalb der Freigrenze. Hierfür wird inzwischen vor allem Americium-241 verwendet.

Eine Kombination aus Americium-241 und Beryllium-7 kann zur Feuchtemessung in festen Stoffen genutzt werden (z. B. in Betonwerken). Dabei dient Americium als Alpha-Strahlenquelle, die über eine Wechselwirkung mit Beryllium Neutronen erzeugt. Über die Rückstreuung dieser Neutronen an Wasser kann auf den Feuchteanteil geschlossen werden. Zur Herstellung von permanent leuchtenden Zifferblättern in Uhren oder Messgeräten werden schon seit langem radioaktive Substanzen eingesetzt. Während man in früheren Zeiten Radium (Ra-226) und später auch Promethium (Pm-147) nutzte, wird heute bei den wenigen verbleibenden Verwendern in Baden-Württemberg nur noch Tritium (H-3) verwendet. Das radioaktive Inventar eines Ziffernblattes variiert dabei je nach gewünschter Leuchtstärke. Auch zur zerstörungsfreien Materialprüfung vor Ort, z. B. bei der Prüfung von Schweißnähten, Röhren, Kampfmitteln aus dem zweiten Weltkrieg u.a. werden relativ hochaktive umschlossene Quellen verwendet. Hier handelt es sich vor allem um das Nuklid Iridium-192. Ionisierende Gammastrahlung wird zudem zur Sterilisation von medizinischen Einmalprodukten eingesetzt, um ein sehr hohes Niveau von Keimfreiheit zu erreichen.

Auch in der **Forschung** findet in vielen Gebieten ein Umgang mit radioaktiven Substanzen statt. Im Rahmen dieser Übersicht kann allerdings nicht auf die oft ganz speziellen Anwendungen in Biochemie, Pharmakologie, Medizin, Physik, Materialforschung etc. eingegangen werden.

Als weitere Quellen ionisierender Strahlung sind noch **Beschleuniger** als technische Anlagen zu nennen, welche gerade auch in Baden-Württemberg in Forschung, Medizin und Technik eine Rolle spielen. In ihnen werden geladene Teilchen durch elektromagnetische Felder beschleunigt. Die energiereichen Teilchen, oder die entstehende ionisierende Strahlung können dann für verschiedene Anwendungen genutzt werden. In der Medizin werden Beschleuniger in der Strahlentherapie verwendet, oder sie können zur Herstellung kurzlebiger Nuklide dienen. Mittels Beschleuniger können auch sehr gezielt bestimmte Stoffteilchen in Materialien eingebracht werden (sog. Ionenimplanter). Weitere Anwendungen liegen in der Materialforschung, Mikrostrukturtechnik und in der Kernphysik. In Baden-Württemberg werden derzeit bei 55 Anwendern aus Medizin, Forschung und Technik Beschleuniger verschiedener Bauart betrieben.

2 Überwachung der Radioaktivität

In Erfüllung des Schutzzweckes des Atomgesetzes, "Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen", und des Schutzzieles des Strahlenschutzvorsorgegesetzes, "zum Schutze der Bevölkerung die Radioaktivität in der Umwelt zu überwachen", wurde in Baden-Württemberg ein komplexes System zur Überwachung der Radioaktivität aufgebaut.

Schwerpunkte der Überwachung sind die kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen. Es wird jedoch auch flächendeckend das ganze Land erfasst. Die Daten laufen bei der Landesanstalt für Umweltschutz zusammen, werden dort ausgewertet und ermöglichen einen Gesamtüberblick über die radiologische Situation im Land.

Das Überwachungssystem kontrolliert sowohl die Abgaben der Anlagen (Emissionen) als auch die Einträge in die Umweltbereiche (Immissionen). Es besteht aus folgenden Komponenten:

- Allgemeine Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz
 - Integriertes Mess- und Informationssystem des Bundes und der Länder (IMIS)
 - Radioaktivitätsmessnetze des Bundes und des Landes
 - Radiologische Forschungsvorhaben
- Anlagenbezogene Überwachung der Radioaktivität nach dem Atomrecht
 - Emissionsüberwachung
 - Kernreaktorfernüberwachung (Emissionen und Immissionen)
 - Umgebungsüberwachung (Immissionen)

Dabei werden automatisch rund um die Uhr arbeitende Messeinrichtungen betrieben und eine Vielzahl von Einzelproben im Labor untersucht. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Überwachungssystems näher erläutert.

Allgemeine Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt

Integriertes Mess- und Informationssystem (IMIS)

Um die radioaktiven Auswirkungen von Kernwaffentests der Großmächte feststellen zu können, war in der Bundesrepublik Deutschland schon vor 40 Jahren ein Überwachungssystem für Radioaktivität aufgebaut worden. Dieses Messsystem erwies sich allerdings anlässlich des Unfalls in Tschernobyl mit seinen großräumigen und vielfältigen Auswirkungen als nicht ausreichend. Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit schuf deshalb auf der Basis des 1986 erlassenen Strahlenschutzvorsorgegesetzes in Zusammenarbeit mit den Ländern das sogenannte „Integrierte Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Umweltradioaktivität“ (IMIS). Danach werden die Messaufgaben wie folgt aufgeteilt:

- a) Dem Bund obliegt die großräumige Ermittlung
 - der Gammaortsdosisleistung
 - der Radioaktivität in Luft und Niederschlägen
 - der Radioaktivität in Bundeswasserstraßen und in Nord- und Ostsee
- b) Die Länder ermitteln die Radioaktivität insbesondere
 - in Lebensmitteln, Tabakerzeugnissen und Bedarfsgegenständen sowie Arzneimitteln und deren Ausgangsstoffen
 - in Futtermitteln
 - im Trinkwasser, Grundwasser und in oberirdischen Gewässern außer Bundeswasserstraßen
 - in Abwässern, im Klärschlamm, in Reststoffen und Abfällen
 - im Boden und in Pflanzen (z. B. Gras, Laub)
 - in Düngemitteln.

Auf der Grundlage dieser Aufgabenzuweisung wurde für Baden-Württemberg ein umfangreiches Messprogramm aufgestellt, das entsprechende Untersuchungen über das ganze Land und die Jahreszeiten verteilt gewährleistet. Eine große Zahl von weiteren Messungen führt das Land darüber hinaus in Eigeninitiative durch, um eine bestmögliche Übersicht über die Radioaktivitätsgehalte aller Umweltmedien zu erhalten.

Insgesamt sind an den Untersuchungen drei bzw. zwei Landesmessstellen beteiligt. Lebensmittel, Tabakerzeugnisse, Bedarfsgegenstände und Arzneimittel sowie Trinkwasser werden von den Chemischen- und Veterinäruntersuchungsämtern Freiburg und Stuttgart analysiert, Futtermittel, Böden und Düngemittel wurden bis Anfang 1999 von der Staatlichen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg, danach ebenfalls von den Chemischen und Veterinäruntersuchungsämtern, alle übrigen Medien von der Landesanstalt für Umweltschutz. Darüber hinaus überwacht die Landesanstalt für Umweltschutz den Boden an 50 Orten im Land regelmäßig mittels in-situ-Gammaspektrometrie auf Ablagerung radioaktiver Stoffe, dabei wird mit einer mobilen Messeinrichtung im Freien ein Gammaskpektrum aufgenommen, welches Auskunft über Oberflächenkontaminationen und Belastungen der oberen Bodenschichten in der näheren Umgebung (ca. 50 m) des Messpunktes liefert.

Alle Messergebnisse dieser Messstellen werden bei der Landesanstalt für Umweltschutz als zuständiger Datenzentrale des Landes für das Integrierte Mess- und Informationssystem gesammelt und zur Zentralstelle des Bundes weitergeleitet. Insgesamt werden im Bereich des IMIS in Baden-Württemberg jährlich über 1 500 Einzelmessungen durchgeführt.

Darüber hinaus hatte das Land nach dem Tschernobylunfall zur Untersuchung der ablaufenden radioökologischen Prozesse radioökologische Forschungsvorhaben vergeben. Die Schwerpunkte der Vorhaben lagen in Oberschwaben, der einzigen Region in Baden-Württemberg, in der die Radioaktivität aufgrund des Reaktorunglücks von Tschernobyl noch signifikant erhöht ist. Durch die Untersuchungen der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten und die Messungen der Freien Messstelle Bad Wurzach wurden dabei in Oberschwaben regional verdichtete Messergebnisse über die Radioaktivität von Pilzen, Wild und Fischen gewonnen.

Radioaktivitäts- und Strahlenpegelmessnetze

Der Bund misst mit dem sogenannten ODL-Messnetz (OrtsDosisLeistung) des Bundesamtes für Strahlenschutz bundesweit an ca. 2000 Orten recht engmaschig die Gammaortsdosisleistung. Etwa 200 dieser Orte liegen in Baden-Württemberg. Die luftgetragene Radioaktivität wird vom Bund großräumiger erfasst. Er ermittelt im Rahmen des IMIS mit dem Messnetz des Deutschen Wetterdienstes an 39 Stellen in Deutschland die spezifische Aktivität der Luft nuklidspezifisch. Vier dieser Stationen stehen in Baden-Württemberg (in Stuttgart, Ulm, Freiburg und Konstanz). Ferner erfasst der Bund zusätzlich mit dem Messnetz des Umweltbundesamtes an 11 Stellen, davon mit zwei Messstationen in Baden-Württemberg (in Mannheim und auf dem Schauinsland), die spezifische Gesamtbeta- und Iod-131-Aktivität in der Luft.

Da die Bedürfnisse des Landes von den Messnetzen des Bundes noch nicht ausreichend befriedigt werden konnten, hat Baden-Württemberg nach dem Unfall von Tschernobyl zur Überwachung der Radioaktivität und als Frühwarnsystem ein eigenes flächendeckendes Radioaktivitätsmessnetz aufgebaut. Es gliedert sich in Komponenten für Radioaerosol- und für Strahlenpegelmessungen, die technisch und räumlich voneinander unabhängig sind und getrennte Messaufgaben haben. Insgesamt werden 43 Messstationen betrieben.

Das von der LfU betriebene Radioaerosolmessnetz überwacht mit 8 vorzugsweise über die Randzonen des Landes verteilten Messstationen ständig die Luft auf Radioiod und radioaktive Aerosole. Hierzu wird in den Messstationen kontinuierlich Aussenluft über Filter gesaugt. Auf den Glasfaser-Feinfiltern schlagen sich die in der Luft enthaltenen Partikel nieder. Im nachgeschalteten Kohlefilter wird zudem elementares Iod adsorbiert. Die so festgehaltenen Stoffe werden automatisch auf

die Art und die Menge der darin enthaltenen Radionuklide gammaspektrometrisch untersucht. Mobile Radioaerosolmessstationen können nach Bedarf kurzfristig das Messnetz gezielt erweitern.

Das von der UMEG mbH betriebene Strahlenpegelmessnetz misst an 35 Stellen im Land kontinuierlich die Ortsdosisleistung sowie den Beta-/ Gamma-Strahlenpegel (Impulsrate) mit Hilfe von Zählrohren. Des weiteren werden in den Messstationen Luftfilter bestaubt und Regenwässer gesammelt und einige davon anschließend im Labor der Landesanstalt für Umweltschutz stichprobenartig ausgemessen.

Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die landesweite Verteilung der Stationen des Radioaerosol- und Strahlenpegelmessnetzes, des Kernreaktorfernüberwachungssystems des Landes, des ODL-Messnetzes des Bundes sowie der Radioaerosolmessstationen des Deutschen Wetterdienstes und des Umweltbundesamtes in Baden-Württemberg.

Radioaktivitätsmessnetze in Baden Württemberg

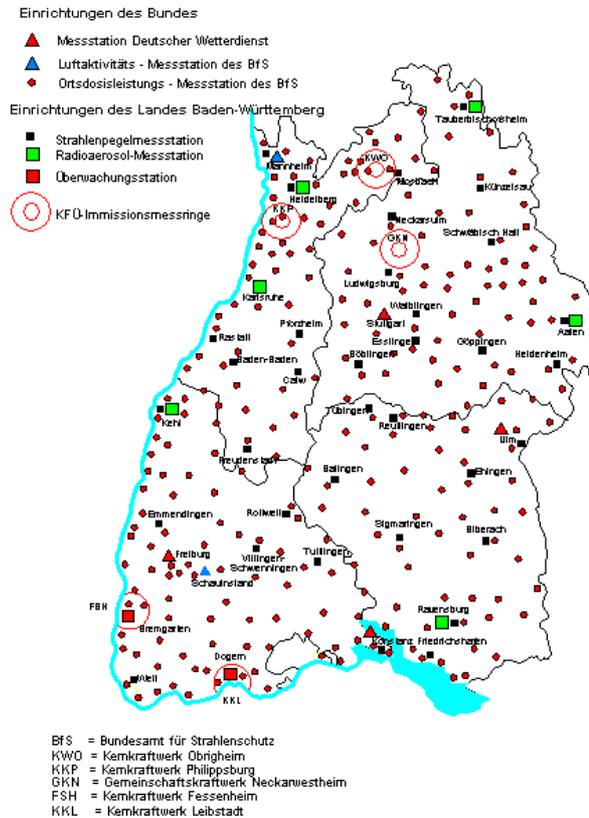


Abbildung 2.1

Anlagenbezogene Überwachung der Radioaktivität

Grundlagen für die anlagenbezogene Überwachung der Radioaktivität sind das Atomgesetz und die darauf aufbauende Strahlenschutzverordnung. In dieser sind für Einzelpersonen und Personengruppen Grenzwerte für Körperdosen festgesetzt, die im Allgemeinen mit den international gültigen Grenzwerten übereinstimmen. Die Strahlenschutzverordnung schreibt insbesondere vor, dass die Ableitung radioaktiver Stoffe aus einer Anlage über Abluft und Abwasser bei Personen der Allgemeinbevölkerung höchstens zu einer effektiven Körperdosis für den gesamten Körper von jeweils 0,3 mSv pro Jahr führen darf (zum Vergleich beträgt der Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen 20 mSv pro Jahr). Die Durchführung der daraus resultierenden Überwachung ist in der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen geregelt.

Emissionsüberwachung

An vielen Orten im Lande werden radioaktive Stoffe in der Industrie, der Medizin und der wissenschaftlichen Forschung genutzt. Überwachungspflichtige Emittenten von Bedeutung sind allerdings nur die kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen sowie die nuklearmedizinischen Zentren. Aber auch hier ist noch weiter zu differenzieren. Die beiden kleinen Schul- und Unterrichtsreaktoren mit der elektrischen Leistung einer Taschenlampe emittieren praktisch nichts. Die nuklearmedizinischen Zentren geben fast ausschließlich kurzlebige Radionuklide an die Umwelt ab. Von denen ist im Wesentlichen Iod-131 über das Abwasser messtechnisch nachweisbar. Es hat aber keine nennenswerte radioökologische Auswirkung.

Der eindeutige Schwerpunkt der Emissions- und Immissionsüberwachung liegt jedoch bei den Kernkraftwerken des Landes, d. h. den Anlagen in Obrigheim, Philippsburg und Neckarwestheim sowie bei den kerntechnischen Einrichtungen des Forschungszentrums Karlsruhe. Deren Emissionen werden entsprechend der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen ständig überwacht. Es wird hierbei sowohl die Abgabe radioaktiver Stoffe in die Luft als auch in das Wasser kontrolliert. Ferner überprüft das Bundesamt für Strahlenschutz die Eigenüberwachung der Betreiber systematisch durch Kontrollmessungen.

Kernreaktorfernüberwachung

Die Kernkraftwerke in Baden-Württemberg werden zusätzlich mit Hilfe der Kernreaktorfernüberwachung (KFÜ) rund um die Uhr vollautomatisch überwacht. Es erfasst ständig sicherheitsbedeutsame Betriebsdaten der Anlagen, die radioaktiven Emissionen mit Abluft und Abwasser, meteorologische Größen sowie die Strahlendosisleistungen in der Umgebung. Diese Daten werden laufend zur Landesanstalt für Umweltschutz als Zentrale sowie zum Umweltministerium als atomrechtlicher Aufsichtsbehörde übertragen.

Das Kernreaktorfernüberwachungssystem stellt eine Gegenkontrolle zur Emissions- und Immissionsüberwachung dar. Der Hauptzweck des Systems ist aber eine unmittelbare und sofortige Kontrolle derjenigen Einflussgrößen, die für die Sicherheit der Anlage und den Strahlenschutz von Bedeutung sind. Es ist ein Instrument der atomrechtlichen Aufsicht und ermöglicht eine ständige, betreiberunabhängige Kontrolle. Insbesondere können Abweichungen vom Normalbetrieb, Störungen und Störfälle schnell erkannt werden.

Die Gammaortsdosisleistung in einem Bereich bis zu 10 km Entfernung wird durch Messsysteme überwacht, die in eigenen Messstationen oder in öffentlichen

Gebäuden untergebracht sind. In der Umgebung der baden-württembergischen Kernkraftwerke Obrigheim, Neckarwestheim und Philippsburg gibt es jeweils etwa 30 derartige Messstationen. Auch die grenznahen ausländischen Anlagen Fessenheim (Frankreich) und Leibstadt (Schweiz) sind mit jeweils etwa einem Dutzend Messstationen auf deutscher Seite in die immissionsseitige Überwachung durch das baden-württembergische Kernreaktorfernüberwachungssystem einbezogen. Da bei diesen Anlagen die direkte Abfrage von Betriebsdaten und Emissionen mit Abluft und Abwasser durch das Fernüberwachungssystem nicht möglich ist, wurde in unmittelbarer Nähe, bei Bremgarten und bei Dogern, jeweils eine Überwachungsmessstation errichtet, die auch auf künstliche Radioaktivität in der bodennahen Luft fortlaufend messen (Abbildung 2.1). Die beiden Überwachungsstationen entsprechen technisch den bereits erwähnten 6 Radioaerosolmessstationen des Aerosolmessnetzes, enthalten aber zusätzlich noch Geräte zur Meteorologie und zur Gamma-Strahlenpegelmessung.

Umgebungsüberwachung

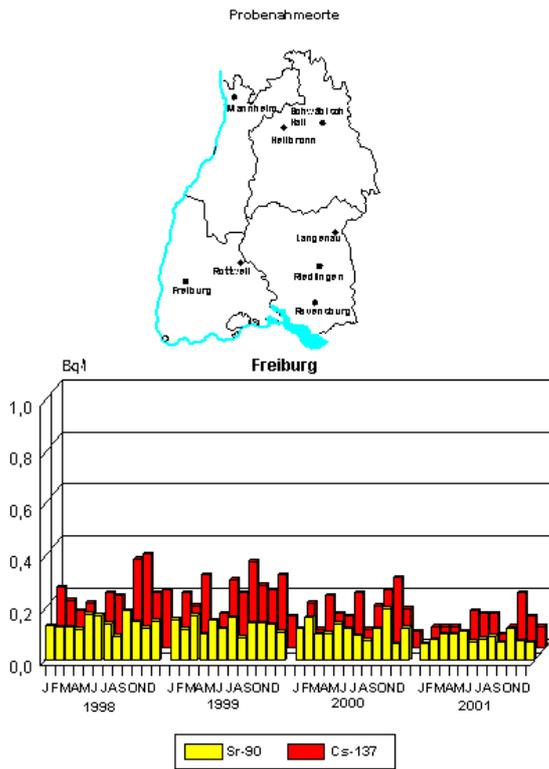
Die immissionsseitige Umgebungsüberwachung der Kernkraftwerke des Landes und des Forschungszentrums Karlsruhe erfolgt ebenfalls entsprechend der bundeseinheitlichen Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung. Mit hochempfindlichen Verfahren werden die Luft, Oberflächen-, Grund- und Trinkwasser, Sedimente, Wasserpflanzen, Fische, Boden und Bewuchs sowie Nahrungsmittel pflanzlichen und tierischen Ursprungs regelmäßig und systematisch unter Beachtung der radioökologischen Zusammenhänge auf Radioaktivität untersucht. Ferner werden die Gamma- und Neutronendosen in der Umgebung der kerntechnischen Anlagen gemessen.

Die Umgebungsüberwachung stellt eine Gegenkontrolle zur Emissionsüberwachung dar und gibt andererseits einen unmittelbaren Aufschluss über die Auswirkungen der Emissionen auf die Umgebung. Im Rahmen der Umgebungsüberwachung werden bei den kerntechnischen Anlagen in Baden-Württemberg zwei voneinander unabhängige Messprogramme durchgeführt, eines vom Betreiber der Anlage, das andere von der Landesanstalt für Umweltschutz.

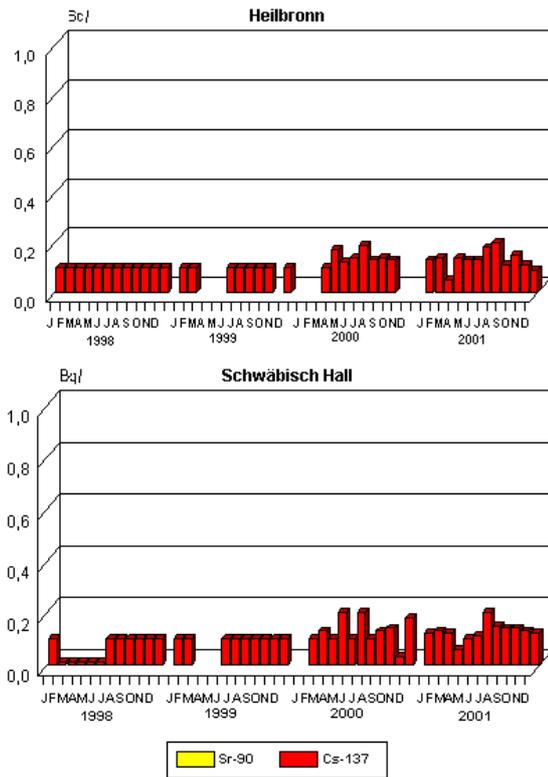
Das Messprogramm des Betreibers ist im allgemeinen stärker auf die Überwachung der Primärmedien Luft und Wasser bis hin zur Ablagerung auf Boden, Bewuchs und Sediment ausgerichtet, das Programm der Landesanstalt für Umweltschutz orientiert sich mehr an der Nutzung der Umgebung durch die Bevölkerung und den dort erzeugten Nahrungsmitteln. Daneben muss das Messprogramm der Landesanstalt für Umweltschutz durch überlappende Messungen auch eine Kontrolle der Messungen des Betreibers gewährleisten. In der baden-württembergischen Umgebung der grenznahen ausländischen Anlagen Fessenheim (Frankreich) und Leibstadt (Schweiz) wird - abgesehen von wenigen Vergleichsproben - vom Prinzip des doppelten Messprogramms abgewichen. Dort misst allein die Landesanstalt für Umweltschutz. Das Messprogramm ist daher erweitert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Radioaktivitätsüberwachungssystem des Landes bereits die Emissionen der wesentlichen Emittenten genau erfasst und das gesamte Land flächendeckend in allen Umweltbereichen messtechnisch sehr empfindlich kontrolliert. In den Landesteilen mit noch signifikanten Tschernobyl-Auswirkungen wird durch zusätzliche Messprogramme eine intensive Beobachtung gewährleistet und an den Standorten der wesentlichen Emittenten erfolgt eine Verdichtung der Überwachung. Durch den Einsatz der automatischen Systeme ist eine schnelle Information und Alarmierung sichergestellt. Die Zusammenführung aller Daten bei der Landesanstalt für Umweltschutz ermöglicht einen vollständigen Überblick über die radiologische Situation im Land.

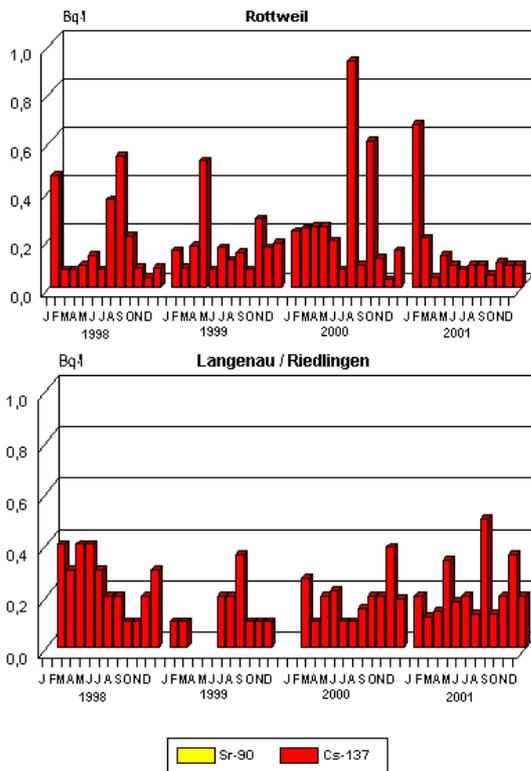
Künstliche Radionuklide in Milch 1998 - 2001



Künstliche Radionuklide in Milch 1998 - 2001



Künstliche Radionuklide in Milch 1998 - 2001



Künstliche Radionuklide in Milch 1998 - 2001

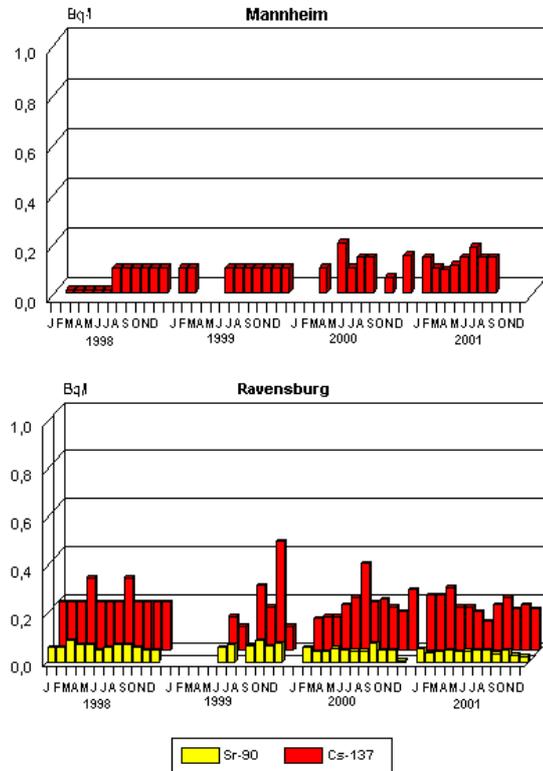


Abbildung 3.2

Man erkennt, dass die Dosisleistung leichten Schwankungen unterliegt. Diese werden durch natürliche Effekte, wie z. B. meteorologisch bedingte Schwankungen der bodennahen spezifischen Aktivitäten der Folgeprodukte der Radonisotope hervorgerufen. Die Unterschiede zwischen den an einzelnen Messstationen gemessenen Werten sind hauptsächlich durch die verschiedenen geologischen Verhältnisse am jeweiligen Messort bedingt. Der Beitrag künstlicher Radionuklide zu den ermittelten Ortsdosen ist im Allgemeinen überall in Baden-Württemberg gering bis vernachlässigbar.

Allerdings wurden auch immer wieder lokale Einzelereignisse festgestellt, die auf Gamma-Strahlung künstlicher Radionuklide zurückzuführen sind. So wurden am 30.11.1998 von der Messstation Waldshut DRK-Station signifikant erhöhte Gamma-Ortsdosisleistungswerte gemessen (Abbildung 3.3a). Benachbarte Messstationen, sowohl von der baden-württembergischen Kernreaktorfernüberwachung (KFÜ), als auch vom schweizerischen Messnetz zur automatischen

Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke (MADUK) zeigten zur selben Zeit keine entsprechenden Erhöhungen. Ebenso gibt es keinerlei Hinweise oder Kenntnisse auf eine Emission aus dem Kernkraftwerk Leibstadt. Daher sind, wenn man davon ausgeht, dass keine technische Störung vorliegt, als lokale Ursachen entweder ein Transport mit radioaktivem Material aus dem Bereich Medizin oder Technik oder eine Schweißnahtprüfung denkbar. Allerdings müssten diese in unmittelbarer Nähe zur Messstation stattgefunden haben. Da den zuständigen Behörden keine Meldungen über Transporte oder Schweißnahtprüfungen vorliegen, die zur Strahlenpegelerhöhung passen, ist eine endgültige Erklärung dieser Erhöhung nicht möglich.

Ausgewählte Tagesverläufe der Ortsdosisleistung 1998/99

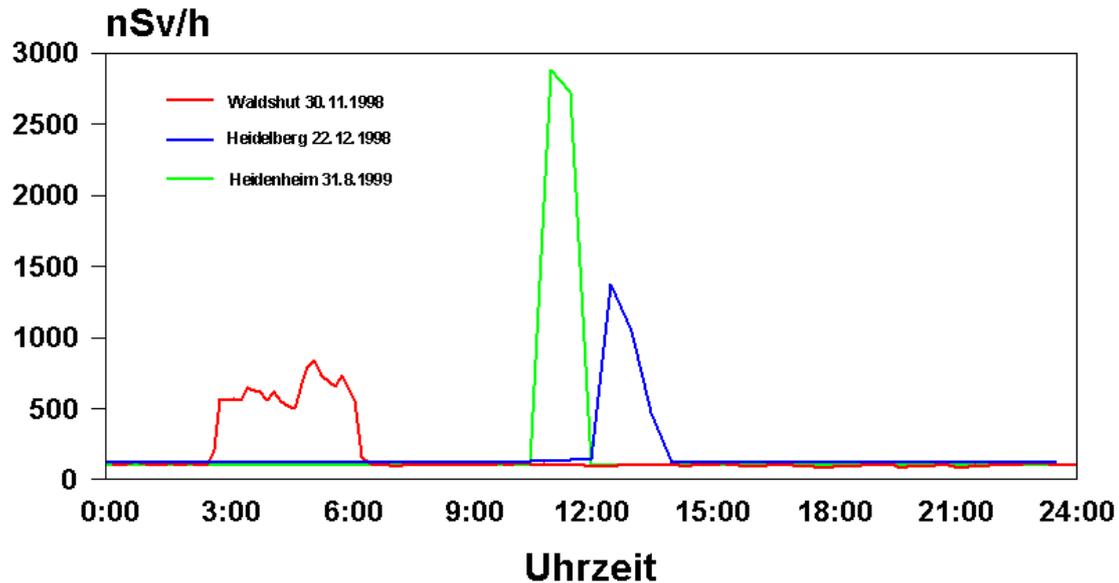


Abbildung 3.3a

Am 22.12.1998 wurden bei der Messstation Heidelberg signifikant erhöhte Gamma-Ortsdosisleistungswerte gemessen (Abbildung 3.3a). Die daneben befindliche Radioaerosol-Messstation, welche die bodennahe Luft auf gammastrahlende Radioaerosole untersucht, zeigte innerhalb des entsprechenden Zeitraums keine künstlichen Radionuklide, so dass als Ursache eine Freisetzung von künstlicher Radioaktivität in die bodennahe Luft auszuschließen ist. Die Messstation befindet sich unmittelbar neben einer öffentlichen Straße und somit ist ein Zusammenhang mit einem Transport von radioaktivem Material denkbar; den Behörden liegen keinerlei Meldungen vor, welche im Zusammenhang mit einer denkbaren Lieferung an die in der Nähe befindliche Institutionen stehen könnten. Auch waren für den Zeitraum keine Schweißnahtprüfungen in unmittelbarer Nähe zur Messstation den zuständigen Behörden gemeldet. Schließt man eine technische Störung aus, so ist eine eindeutige Erklärung der Erhöhung nicht möglich.

Am 31.8.1999 wurden bei der Messstation Heidenheim signifikant erhöhte Gamma-Ortsdosisleistungswerte gemessen (Abbildung 3.3a). Eine Nachprüfung ergab, dass in der Nähe der Messstation an diesem Tag Schweißnahtprüfungen durchgeführt worden sind. Die hierfür eingesetzte Strahlenquelle führte bei der Messstation zu erhöhten Werten.

Vom 7. bis 9.5.1999 wurden zeitweise von der Messstation Waldshut signifikant erhöhte Gamma-Ortsdosisleistungswerte gemessen (Abbildung 3.3b). Die örtliche Feuerwehr führte aus diesem Grund im Bereich der Messstation Kontrollmessungen durch, konnte diese Erhöhungen aber nicht bestätigen. Benachbarte Messstationen der baden-württembergischen KfÜ zeigten in denselben Zeiträumen ebenfalls keine entsprechenden Erhöhungen. Ebenso gibt es keinerlei Hinweise oder Kenntnisse auf eine Emission aus dem Kernkraftwerk Leibstadt oder sonstigen lokalen Ursachen wie z.B. Transport mit radioaktivem Material aus dem Bereich Medizin oder Technik oder eine Schweißnahtprüfung in unmittelbarer Nähe. Daher muss von einer technischen Störung des dortigen Messgerätes ausgegangen werden. Die gesamte Messeinrichtung vor Ort wurde unmittelbar danach komplett ausgetauscht. Seitdem sind jkeine derartigen Erhöhungen mehr aufgetreten.

Tagesverlauf der Ortsdosisleistung Waldshut 7.-10.Mai 1999

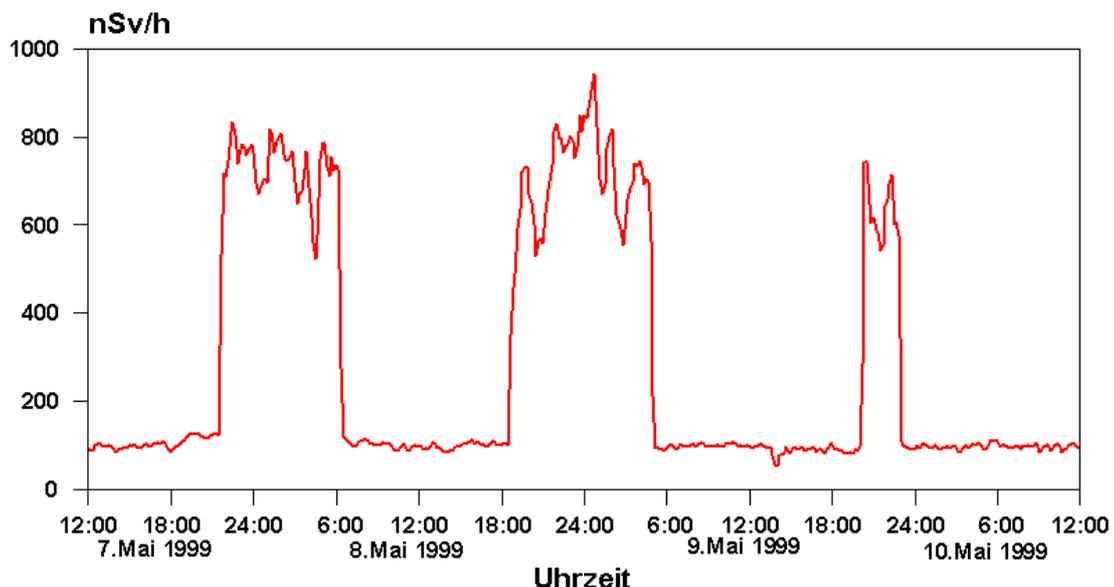


Abbildung 3.3b

Luft

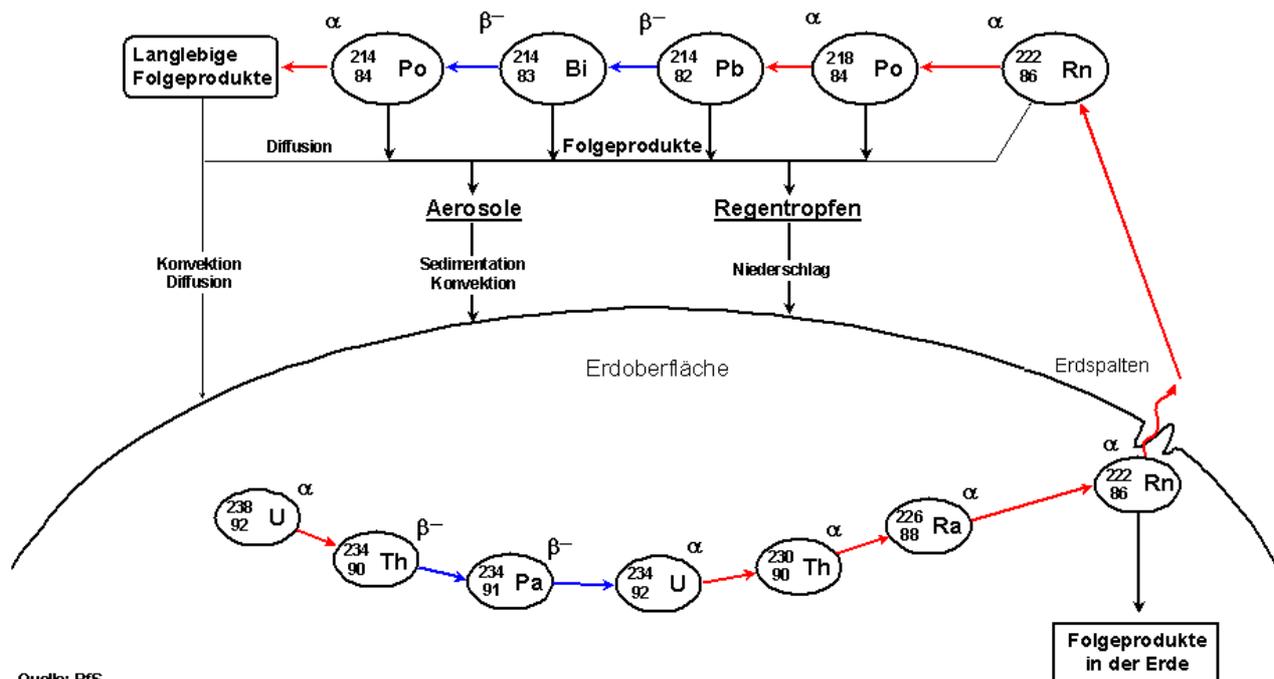
Ein erwachsener Mensch atmet stündlich etwa 12 Liter Luft pro Kilogramm seines Körpergewichts ein. Mit dieser Luft gelangen nicht nur der lebensnotwendige Sauerstoff in die Lungen, sondern auch alle Schadstoffe, die der Luft beigemischt sind.

Unter den Gasen und Aerosolen unserer Atemluft befinden sich stets auch solche, die radioaktiv sind. Vor allem handelt es sich um die natürlich vorkommenden radioaktiven Isotope des Edelgases Radon, nämlich Radon-222 (kurz: Radon) und Radon-220 (Thoron), sowie insbesondere ihre radioaktiven Folgeprodukte, die zu einer Strahlenbelastung der Lungen führen. Die Jahresmittelwerte der spezifischen Radonaktivität der bodennahen Luft liegen für die einzelnen Bundesländer im Bereich zwischen 8 und 30 Bq/m³. Für Baden-Württemberg liegt die mittlere spezifische Radonaktivität im Freien bei 23 Bq/m³. In einzelnen Gebieten werden aufgrund erhöhter Radiumgehalte des Bodens Werte bis 40 Bq/m³ erreicht. Innerhalb von Gebäuden herrschen vor allem in Kellern höhere spezifische Aktivitäten. Erhöhte Radongehalte ergeben sich aber auch in anderen Innenbereichen wegen der teilweise hohen Radiumgehalte in einzelnen Bau- und Zuschlagstoffen. Systematische Untersuchungen der Luft im Inneren von Häusern ergab für Wohnungen der Bundesrepublik Deutschland einen Mittelwert von 50 Bq/m³ Radon. In Baden-Württemberg liegt die mittlere Belastung bei etwa 40 Bq/m³. Die durch Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten resultierende mittlere effektive Körperdosis beträgt ca. 1,4 Millisievert im Jahr (siehe auch Abbildung 5.1).

Radon ist wie alle Edelgase chemisch inaktiv. Es verbreitet sich durch Diffusion in Bodenkapillaren, Gesteinsspalten und Hohlräumen. Auf diesen Wegen gelangt ein Teil des Gases an die Oberfläche und vermischt sich mit der freien Luft. Hier kann es über weite Entfernungen transportiert werden.

Die Menge des gebildeten Radons ist abhängig von der spezifischen Ausgangsaktivität seines Mutternuklids Radium im Boden. Andererseits hat auch die Porosität des Bodens bzw. Gesteins einen Einfluss auf die Quellstärke des in die Luft austretenden Radonanteils. Trockenheit des Bodens begünstigt die Freisetzung, während ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt (z.B. nach einem Regen) den Radonaustritt stark behindert. Radon ist in Wasser teilweise löslich. Im Sommer, vor allem nach Erwärmung des Erdreichs durch direkte Sonneneinstrahlung, kann die Radon-Diffusion beschleunigt ablaufen. Auch der Einfluss von Luftdruckschwankungen ist erkennbar: fallender atmosphärischer Luftdruck lässt aufgrund eines Druckausgleichs Radon vermehrt aus dem Erdreich ins Freie ausströmen. Im Winter, wenn der Erdboden gefroren oder vollständig mit Schnee bedeckt ist, kann so gut wie kein Radon mehr austreten. Durch diese vorübergehende "Versiegelung" werden erhöhte Mengen von Radon im Erdreich festgehalten. Mit dem anschließenden Tauwetter wird dann regelmäßig aufgestautes Radon innerhalb kurzer Zeit in die Luft freigesetzt. Aufgrund der geschilderten Zusammenhänge ist verständlich, dass die spezifische Radonaktivität und somit auch die seiner Folgeprodukte starken örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegt. Abbildung 3.4 zeigt die Entstehung, Transport und Ablagerung von Radon und seinen Folgeprodukten schematisch zusammengefasst.

Entstehung des Radon-222 und seiner Folgeprodukte in bodennaher Luft



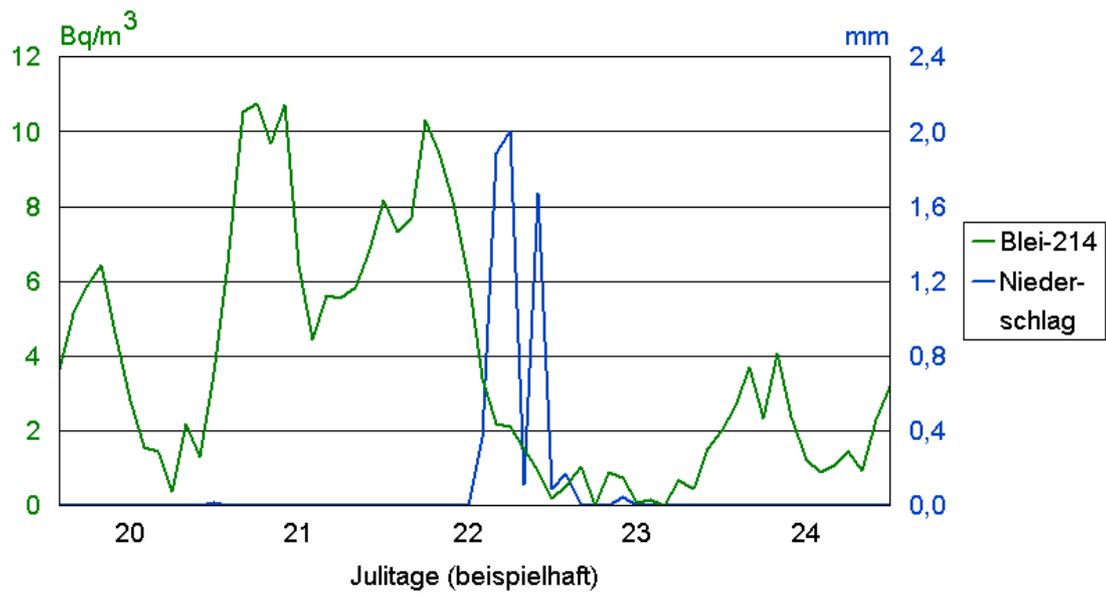
Quelle: BFS

Abbildung 3.4

In den acht Radioaerosolmessstationen des Landes werden hauptsächlich die Radonfolgeprodukte gemessen, welche sich im Gegensatz zum Edelgas Radon an Aerosole anlagern und somit in den Filtern dieser Stationen gesammelt werden. Die spezifische Aktivität der Folgeprodukte hängt stark von der spezifischen Aktivität des Radon-222 ab. Neben den Schwankungen aufgrund der Radon-222 Abgaben des Bodens ist für diese Folgeprodukte noch der „Auswaschungseffekt“ von Aerosolen bei starken Niederschlägen von Bedeutung. Abbildung 3.5 zeigt dies anhand der bodennahen spezifischen Aktivitäten des Radonfolgeproduktes Blei-214 und der Niederschlagsmengen für einige Sommertage an der Station Kehl. Wie man deutlich erkennen kann, ist die spezifische Aktivität dieses Radonfolgeproduktes wegen der Niederschläge am 22. Juli deutlich niedriger.

Niederschlagsmenge und spezifische Blei-214 - Aktivität in der Luft

Radioaerosol-Messstation Kehl



Wie in Abbildung 3.6 zu erkennen ist, lagen 2001 die Tagesmittelwerte der spezifischen Aktivitäten des Blei-214 an den acht Radioaerosolmesstationen des Landes bis auf eine Ausnahme (Dogern 10. Oktober 2001: 53,6 Bq/m³) unter 40 Bq/m³.

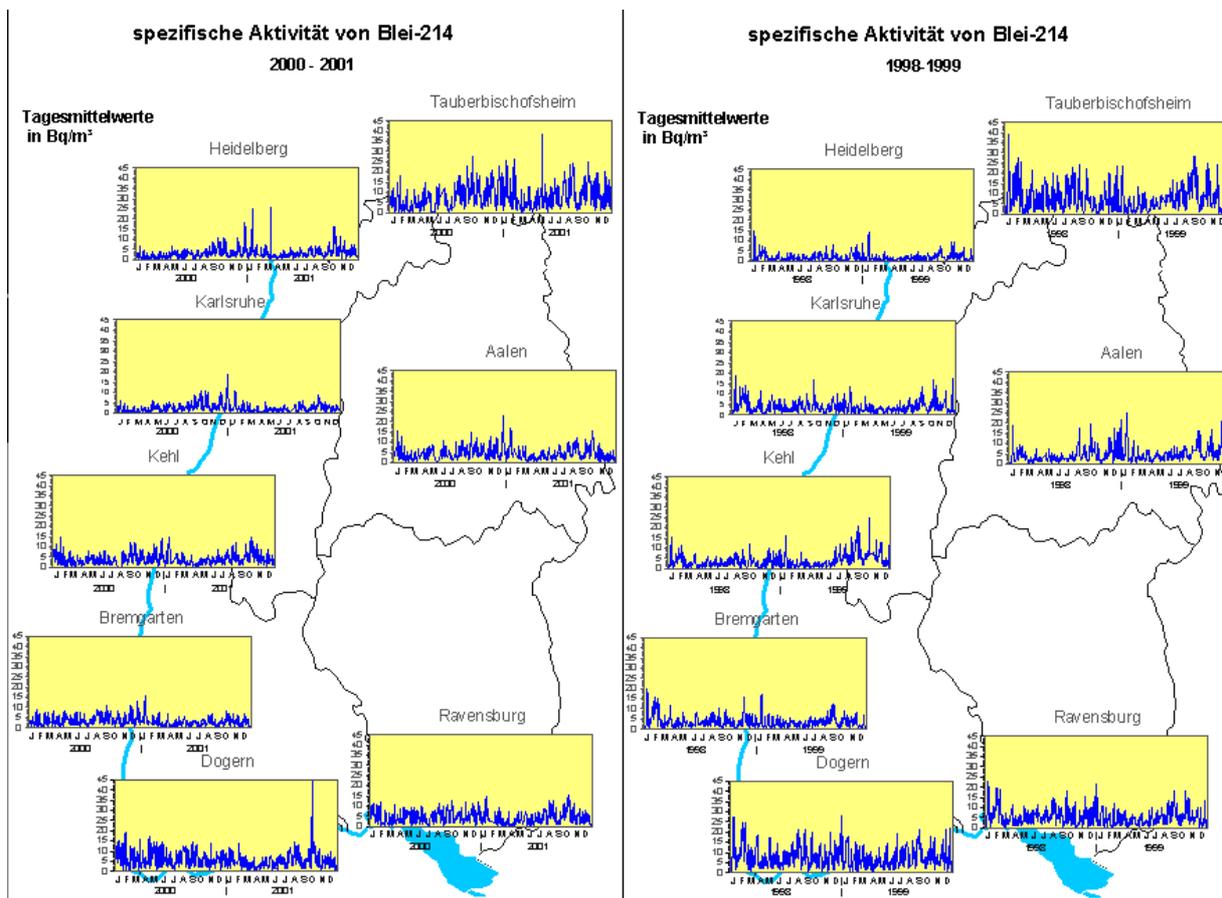


Abbildung 3.6

Neben den Radonfolgeprodukten Blei-214 und Wismut-214 werden auch die Thoronfolgeprodukte Blei-212, Wismut-212 und Thallium-208 nachgewiesen. Außerdem ist auf den Aerosolfiltern auch das natürliche Radionuklid Beryllium-7 zu finden. Es besitzt eine Halbwertszeit von 53,3 Tagen. Beryllium-7 entsteht durch Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit Luftmolekülen der Erdatmosphäre. Etwa 60 % der Beryllium-7-Aktivität befindet sich in der Stratosphäre. Es ist aber auch zu 8 % in der Biosphäre und zu 20 % im Meer zu finden. Die spezifische Aktivität von Beryllium-7 in der bodennahen Luft unterliegt saisonalen Schwankungen von ca. 2 bis 5 mBq/m³ in unseren Breiten. Die dadurch bedingte jährliche Strahlendosis der Lunge beträgt für Erwachsene ungefähr 0,02 µSv/Jahr. Neben diesen natürlichen Beiträgen ist die durch künstliche Radionuklide in der Luft verursachte Strahlenbelastung verschwindend gering und liegt weit unter 1% der Gesamtbelastung.

In Abbildung 3.7 ist ein typisches Aerosol-Gammaspektrum einer baden-württembergischen Radioaerosolmessstation dargestellt. Als einziges künstliches Radionuklid ist Cäsium-137 aus dem Tschernobyl-Fallout zu erkennen. Alle nicht beschrifteten Gamma-Linien stammen von den natürlichen Radon- und Thoronfolgeprodukten, welche als Aerosole in der Atemluft vorkommen. Auch Beryllium-7 und Kalium-40 sind natürliche Nuklide, wobei letzteres überall vorhanden ist und somit als Teil des Nulleffektes in das Messsystem einstrahlt.

Gamma-Spektrum einer Radioaerosol-Messstation

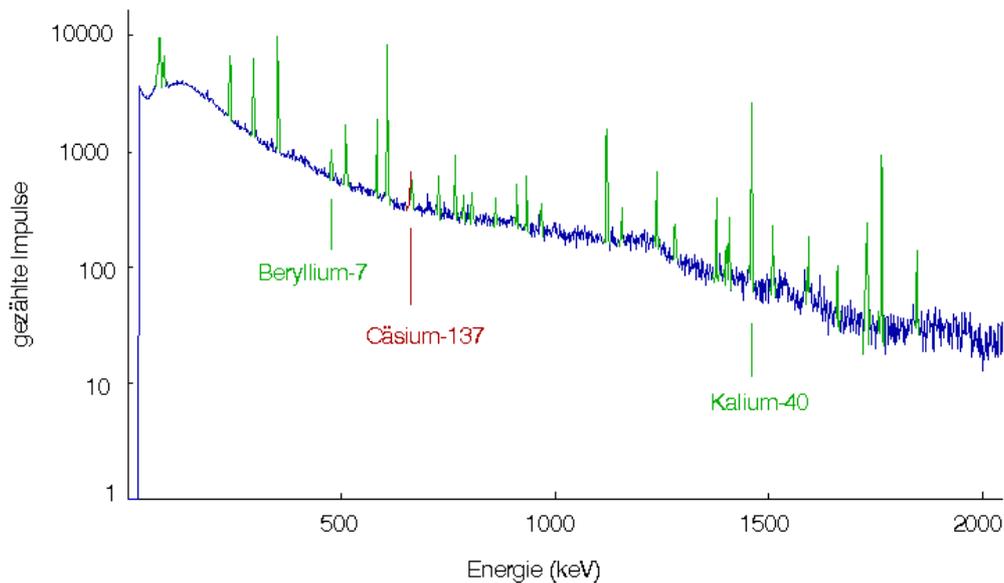


Abbildung 3.7

In der Luft kommen an künstlichen Radionukliden neben gelegentlichen Spuren von Cs-137 hauptsächlich die Edelgase Krypton-85 und Xenon-133 vor, die bei der technischen Nutzung der Kernenergie entstehen. Vor allem bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente wird das langlebige Krypton-85 (Halbwertszeit 10,9 Jahre) aus dem Brennstoff freigesetzt. Es kann sich dabei global verteilen und in der Atmosphäre anreichern, das kurzlebige Xenon-133 (Halbwertszeit 5,3 Tage) bleibt dagegen regional begrenzt. Die gemessenen spezifischen Aktivitäten von Xenon-133 liegen schon seit vielen Jahren unverändert meist unterhalb von 10 mBq/m³ (Jahresmittelwerte Freiburg, Schauinsland, Bremgarten). Das langfristig gemessene Jahresmittel der Krypton-85-Aktivität erhöhte sich dagegen in unseren Breitengraden in den vergangenen 20 Jahren von 0,6 auf teilweise über 2,0 Bq/m³ (Abbildung 3.8). Dies entspricht einem globalen Trend und zeigt, dass die Freisetzungsrate für Krypton-85 größer ist als seine Zerfallsrate. Die Stagnation Anfang der 90er Jahre war möglicherweise auf einen Rückgang der militärischen Wiederaufarbeitung zurückzuführen. Der erneute Anstieg der Kr-85-Aktivität, der auch an anderen europäischen Messstationen registriert wurde, kann zumindest teilweise durch die erhöhten Emissionen aus der französischen Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague erklärt werden. Die kurzzeitigen Schwankungen, die ein Vielfaches des durchschnittlichen jährlichen Anstiegs ausmachen können, sind auf europäische Quellen (insbesondere die Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague in Frankreich und Sellafield in Großbritannien, sowie früher auch in Karlsruhe) zurückzuführen, so auch die erhöhten Werte im März 1997.

Krypton-85 in der Luft bei Freiburg 1976-2001 Monatsmittelwerte der spezifischen Aktivität

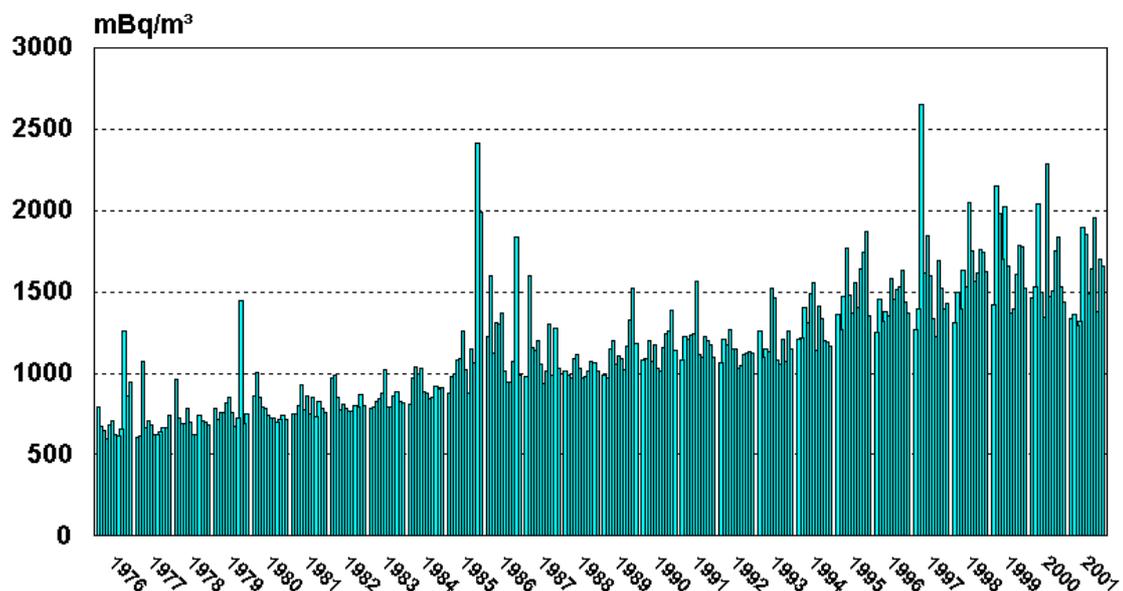


Abbildung 3.8

Radiologisch stellen weder Krypton-85 noch Xenon-133 in den beobachteten spezifischen Aktivitäten derzeit ein Problem dar.

Niederschlag

Neben Tritium findet man in Niederschlagsproben auch Cäsium-137, das zusammen mit dem Staub zu Beginn eines Regens ausgewaschen wird. Abbildung 3.9 zeigt die Monatsmittelwerte für die durch Niederschlag pro Fläche eingetragene Aktivität an Cäsium-137 (Stationen Freiburg, Konstanz, Stuttgart, Ulm des DWD). Für den Zeitraum 1998 bis 2001 lag ein erheblicher Teil der Messwerte unter der Nachweisgrenze. Die messtechnisch nachgewiesenen Einträge liegen bis auf drei Ausnahmen zwischen 0,05 und 0,10 Bq/m² und sind damit bedeutungslos.

Cäsium-137 im Niederschlag 1998 - 2001

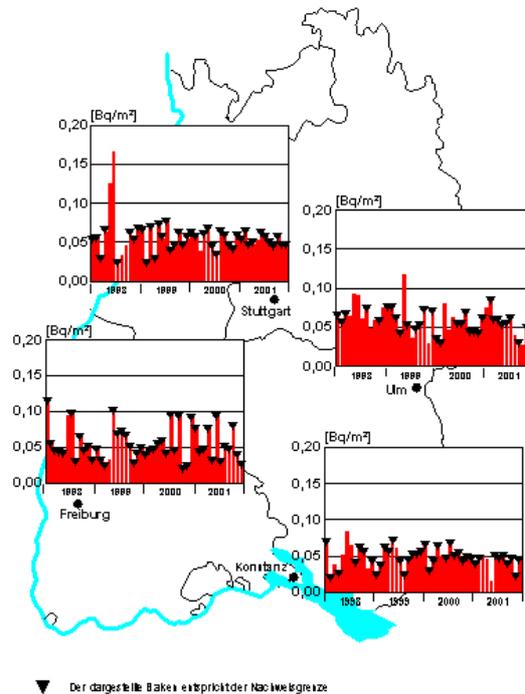


Abbildung 3.9

Einen langjährigen Überblick über den Eintrag von Radionukliden in den Boden zeigt Abbildung 3.10. Hier ist für Stuttgart die dem Boden zugeführte langlebige Aktivität durch alle Beta-Strahler (mit Ausnahme von Tritium) in Becquerel pro Quadratmeter dargestellt. Die höchsten Werte waren Anfang der 60er Jahre mit etwa 16000 Bq/m² durch die oberirdischen Kernwaffenexplosionen zu verzeichnen. Das Ereignis von Tschernobyl brachte 1986 kurzzeitig ebenfalls hohe Werte hervor. Im Jahr 2001 ist der Wert mit knapp 60 Bq/m² auf einen niedrigen Stand gesunken. Für Konstanz lagen die aktuellen Jahreseinträge bei 107 Bq/m² (2000) bzw. 83 Bq/m² (2001), für Freiburg bei 119 Bq/m² (2000) bzw. 136 Bq/m² (2001) und für Ulm bei 66 Bq/m² (2000) bzw. 85 Bq/m² (2001).

Mit Niederschlägen abgelagerte Gesamt-Beta-Aktivität Jahreseinträge in Stuttgart 1958 - 2001

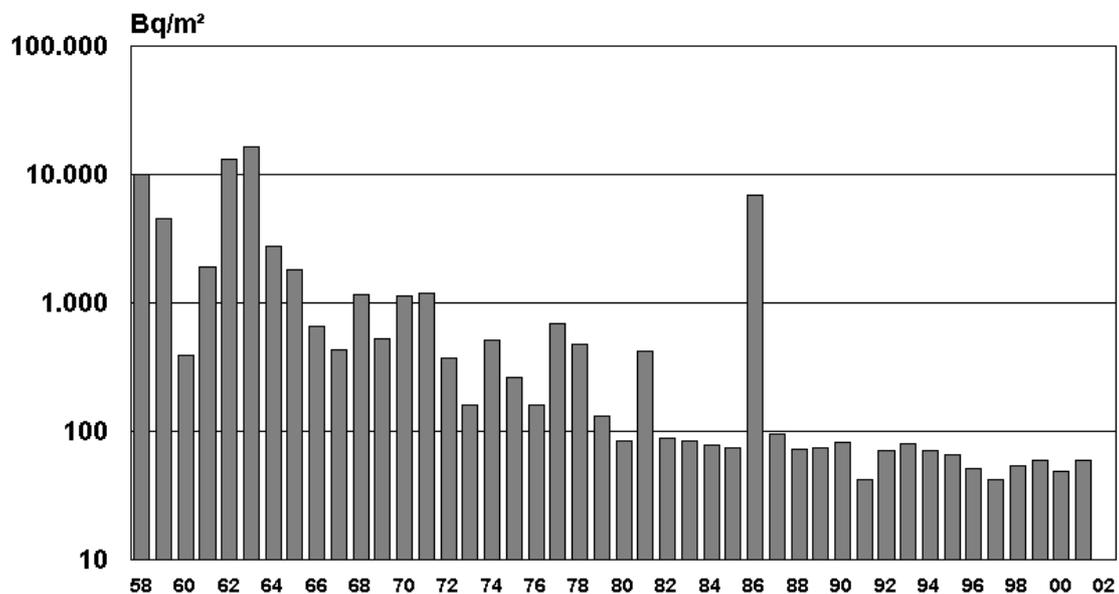


Abbildung 3.10

Wasser

Wasser sichert die Lebensgrundlagen von Menschen, Tieren und Pflanzen. Es löst Salze, transportiert Nährstoffe und stabilisiert das Erdklima. Damit ist das Wasser eines der wichtigsten Umweltmedien, weshalb ihm auch ein besonderes Augenmerk hinsichtlich seines Gehaltes an radioaktiven Stoffen gilt.

Eine wichtige Rolle spielt hierbei das in allen Wasserproben enthaltene Tritium. Sein Gehalt in oberflächennahen Wässern, die nicht durch aktuelle anthropogene Tätigkeit beeinflusst sind, liegt heute bei etwa 2 bis 5 Bq/l. Ohne menschliches Zutun läge dieser Wert bei deutlich unter 1 Bq/l. Die beobachteten erhöhten Tritiumwerte in der Umwelt sind nach wie vor überwiegend eine Folge der oberirdischen Kernwaffenversuche der frühen 60er Jahre. Durch radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit etwa 12 Jahre), zunehmende Auswaschung aus der Atmosphäre sowie Verdünnung mit dem vorhandenen Wasser ist die Tritiumbelastung in der Umwelt in den letzten 30 Jahren deutlich zurückgegangen.

Routinemäßig werden die oberirdischen Fließgewässer, sowie Trink- und Grundwässer auf ihre radioaktiven Inhaltsstoffe untersucht.

Oberflächenwasser

Bei den baden-württembergischen Fließgewässern konnten im Zeitraum 1998 bis 2001 im Wasser selbst keine gelösten künstlichen gammastrahlenden Radionuklide und damit auch kein Cs-137 nachgewiesen werden (siehe Abbildung 3.11). Allerdings transportieren Bäche und Flüsse auch mehr oder weniger feine Schwebstoffe, an denen radioaktive Stoffe angelagert werden können und die über Sedimentationsprozesse auf dem Gewässerboden als Sediment abgelagert werden.

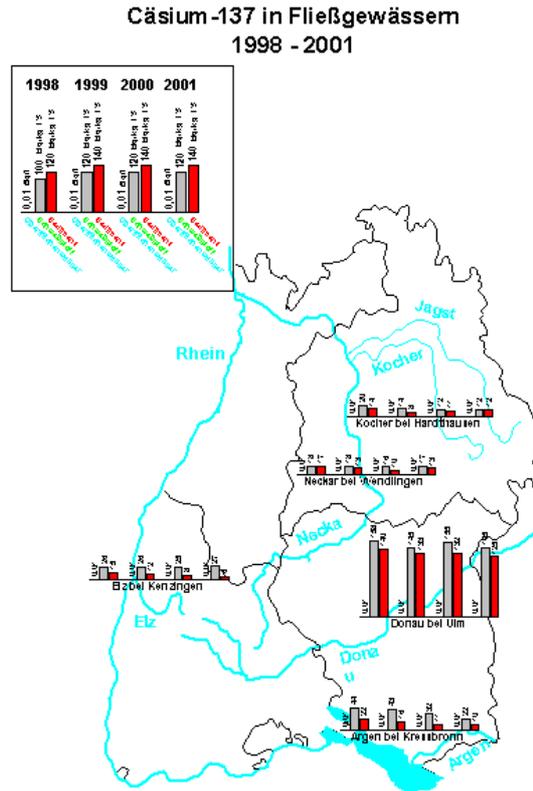


Abbildung 3.11

Sedimente, Schwebstoffe

Für viele Kleinlebewesen und Fische sind die im Wasser enthaltenen Schwebstoffe ein wichtiger Nahrungsbestandteil und auch Wasserpflanzen ziehen hieraus ihre Nährstoffe. Daher wurden für 10 baden-württembergische Fließgewässer, neben dem Wasser selbst auch Sedimente und bei 5 Flüssen zusätzlich Schwebstoffe untersucht (Abbildung 3.11). Dabei zeigt sich, dass in der Regel die Schwebstoffe eine höhere spezifische Aktivität aufweisen als das am selben Ort entnommene Sediment. Dies deutet darauf hin, dass auch heute noch durch Erosionsvorgänge höher belastetes Material aus den oberen Bodenschichten in die Gewässer gelangt und zu deren Radioaktivitätsfracht beiträgt. So ist es auch nicht verwunderlich, dass z. B. die höchsten Werte für Cäsium auch heute noch in der Donau gefunden werden, da diese ein Gebiet durchfließt, in dem höhere Belastungen der Böden auf Grund des Unfalls in Tschernobyl vorhanden sind.

Abbildung 3.12 zeigt die zeitliche Entwicklung der spezifischen Cäsium-137-Aktivität im Sediment von Rhein, Neckar und Donau für einige Probenahmestellen vornehmlich aus der Umgebungsüberwachung. Man sieht bei allen Probenahmeorten ab 1986, nach dem Tschernobyl-Unfall, einen deutlichen Anstieg der spezifischen Cäsium-137-Aktivität gegenüber 1985 um den Faktor 10 bis 1000 und einen langsamen Abfall in den Folgejahren. Heute liegen die spezifischen Aktivitäten zumeist wieder in derselben Höhe wie vor dem Unfall. Die Sedimentproben von Philippsburg werden mit einem Absetzkasten als Quartalsmischproben gesammelt. Es handelt sich hierbei um sehr feinkörniges Material, das also eine große Oberfläche aufweist. An diese kann sich daher mehr Cäsium-137 anlagern, so dass bei diesen Proben die Aktivität 1986 deutlich höher lag als bei den anderen Proben, die als Sedimentkerne ausgestochen werden und daher auch grobkörnigeres Material enthalten.

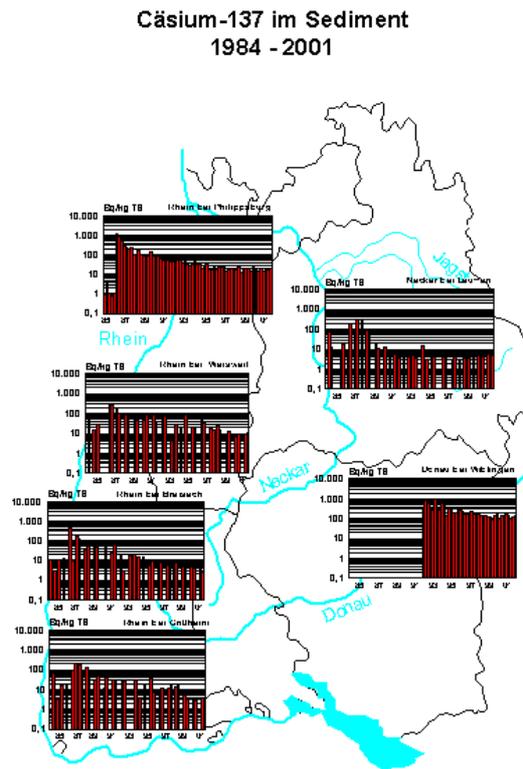
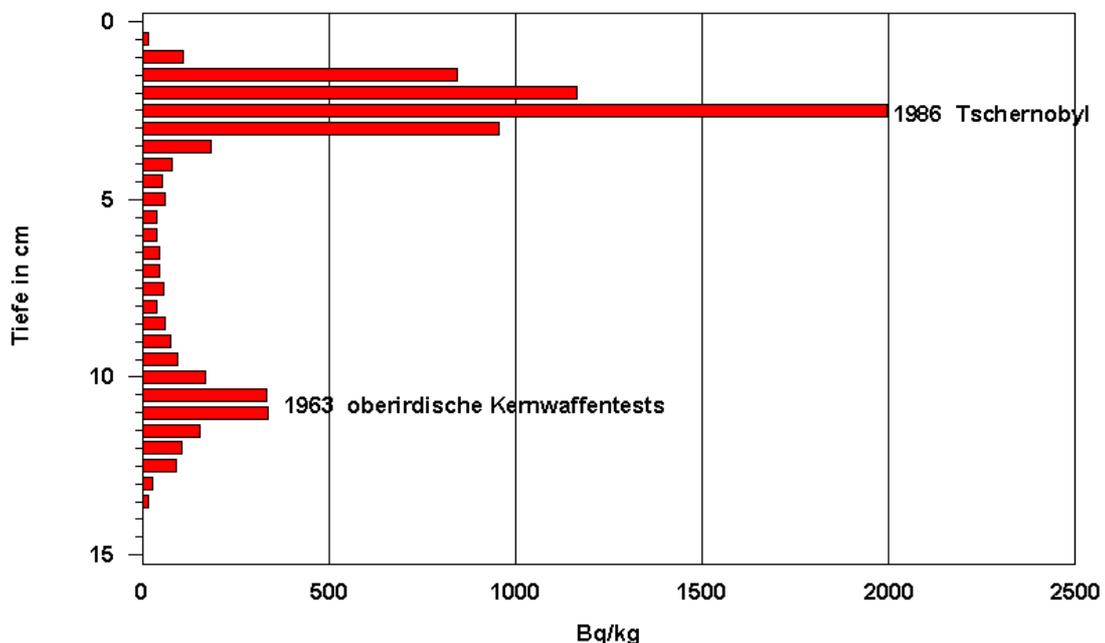


Abbildung 3.12

Die spezifische Cäsium-137-Aktivität im Sediment stammt - genau wie beim Boden - aus zwei Quellen. Dies zeigt sehr anschaulich die Tiefenverteilung der spezifischen Aktivitäten in einem Sedimentkern aus dem Bodensee (Abbildung 3.13). Der Cäsium-Eintrag aus dem Kernwaffen-Fallout der 50er und frühen 60er-Jahre befindet sich heute in einer Tiefe um etwa 12 cm. Das Cäsium aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl liegt hingegen erst wenige Zentimeter tief. Hierdurch ist es auch sehr gut möglich, diese beiden Anteile voneinander zu trennen.

Cäsium-137 im Sediment des Bodensees



Trink- und Grundwasser

In den untersuchten Trink- und Grundwässern konnten keine künstlichen gammastrahlenden radioaktiven Inhaltsstoffe oberhalb der Nachweisgrenze festgestellt werden. Darüber hinaus enthält Trink- und Grundwasser auch natürliche Radionuklide wie Radium-226 und Kalium-40.

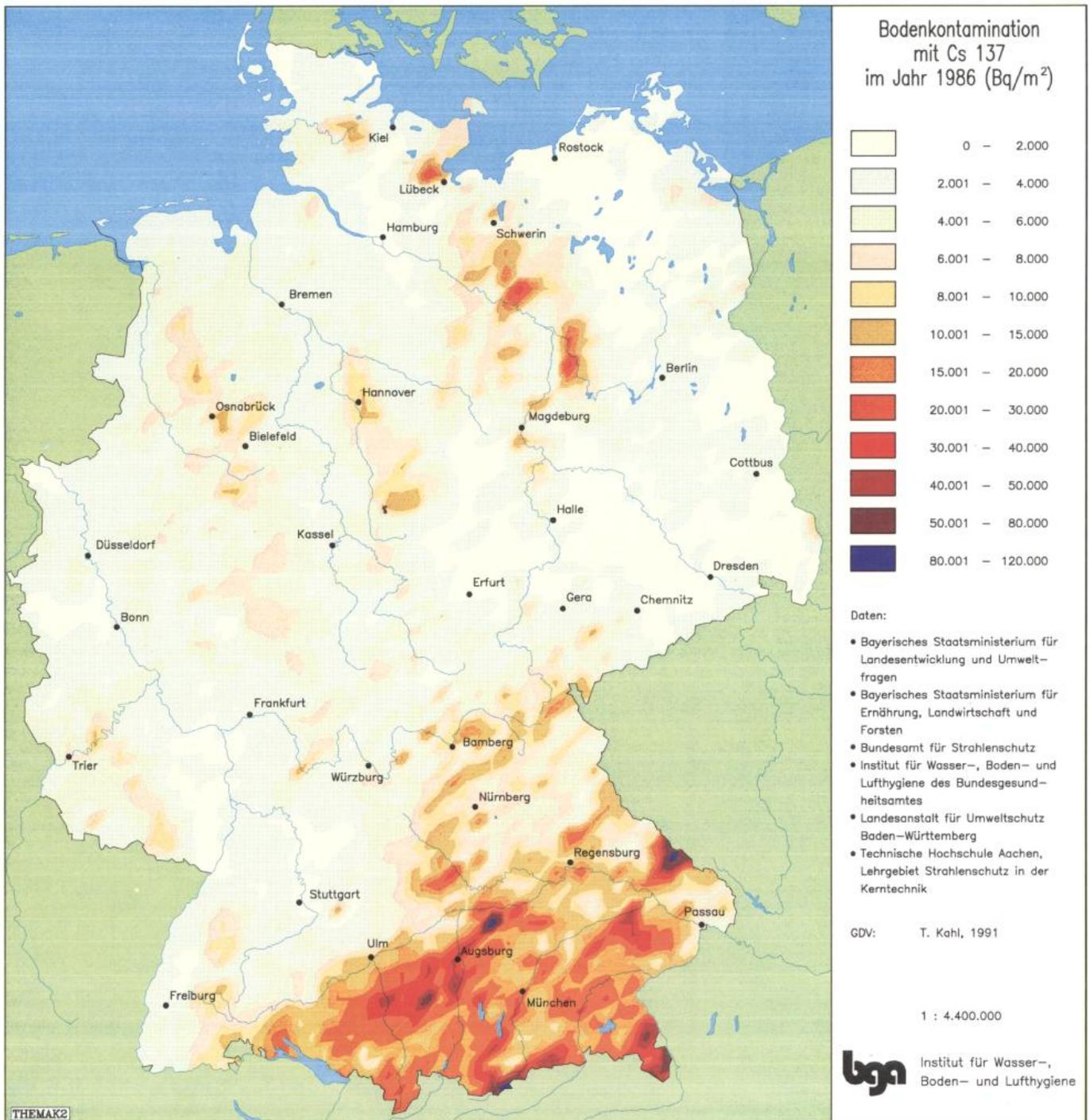
Boden

Der Boden gehört neben dem Wasser und der Luft zu den natürlichen Lebensgrundlagen. Er ist Bestandteil der ursprünglichen Landschaft und dient gleichzeitig der Landwirtschaft als Grundlage der Nahrungsmittelproduktion. Nahezu alle radioaktiven Stoffe, die heute bei den Untersuchungen von Pflanzen, Tieren und Menschen gefunden werden, waren zuvor in unseren Böden vorhanden. Überwiegend sind dies die bekannten natürlichen radioaktiven Stoffe.

Von den künstlichen Radionukliden, die heute noch nachgewiesen werden können, stammen der überwiegende Teil des Strontium-90 und ein Teil des Cäsium-137 aus dem Kernwaffen-Fallout. Insgesamt sind hierdurch seither im Mittel 5000 Bq/m² Cäsium-137 und 3000 Bq/m² Strontium-90 in die Böden Baden-Württembergs gelangt. Das übrige Cäsium-137 und das gesamte Cäsium-134 sind dagegen auf den Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahre 1986 zurückzuführen.

Das Verhältnis der durch Tschernobyl bei uns abgelagerten Radionuklide Cäsium-137 zu Cäsium-134 zu Strontium-90 betrug zum Zeitpunkt der Ablagerung kurz nach dem Unfall 1 : 0,53 : 0,01. Die auf dem Boden abgelagerte Aktivität war Ende 2001 durch den radioaktiven Zerfall für Cäsium-137 auf 71 %, für Cäsium-134 auf 0,6 % und für Strontium-90 auf 69 % des jeweiligen Ausgangswerts zurückgegangen.

Als Folge des russischen Reaktorunfalls wurden 1986 bereits umfangreiche Untersuchungen der Bodenkontaminationen durchgeführt. Es zeigte sich, dass je nach den damals herrschenden Wetterbedingungen die verschiedenen Gebiete Deutschlands unterschiedlich stark betroffen waren (Abbildung 3.14).



Insbesondere in Bayern und in den südlichen und südöstlichen Regionen Baden-Württembergs weisen noch heute die Böden im Vergleich zu den anderen Bundesländern höhere spezifische Cäsiumaktivitäten auf. Auch innerhalb von Baden-Württemberg streuen die Cäsium-Werte stark. Einen Überblick über die aktuelle Situation in den Jahren 1998 bis 2001 gibt die Abbildung 3.15, in der die spezifischen Aktivitäten für Weide- und Ackerböden dargestellt sind.

Cäsium- 137 in Böden 1998 - 2001

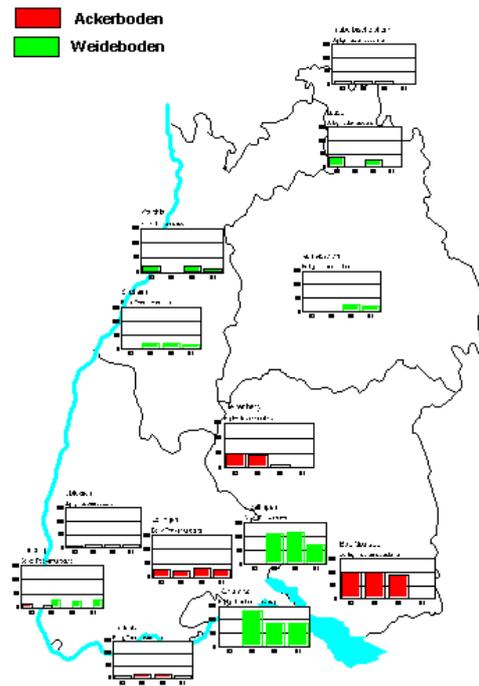


Abbildung 3.15

Das aus dem Unfall in Tschernobyl stammende Cäsium-137 befindet sich auch heute noch im Wesentlichen in den oberen 10 cm, d. h. weiterhin im Wurzelbereich der Pflanzen. Gerade in Waldböden ist aufgrund eines hohen Humusanteils das Cäsium noch gut für Waldpflanzen wie Farne, Brombeeren oder Pilze verfügbar (s. a. Abbildung 3.21).

Cäsium-137 in Pflanzen des Altdorfer Waldes 2001

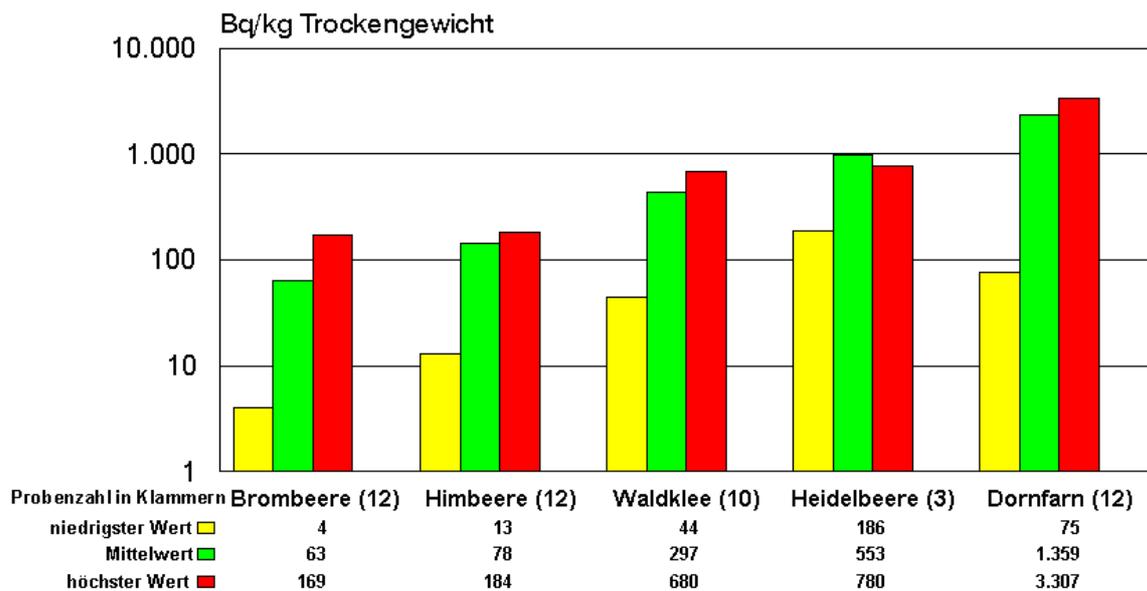


Abbildung 3.21

Es wird davon ausgegangen, dass sich das Maximum der Aktivitätstiefenverteilung im Boden nach einem Fall-out wenige Zentimeter tief an der Bodenoberfläche befindet. Tiefenprofiluntersuchungen der LfU in den Jahren 1993 und 1999/2000 haben gezeigt, dass die Aktivität von Cs-137, mit der Zeit in die Tiefe ausgewaschen wird, aber auch z.B. durch Pflanzenwurzeln wieder in höhere Schichten transportiert werden kann. Durch die Auswaschvorgänge kann sich auch das Aktivitätsmaximum in tiefere Schichten verschieben. Die Stärke des Auswaschvorgangs ist regional verschieden (Abbildung 3.16):

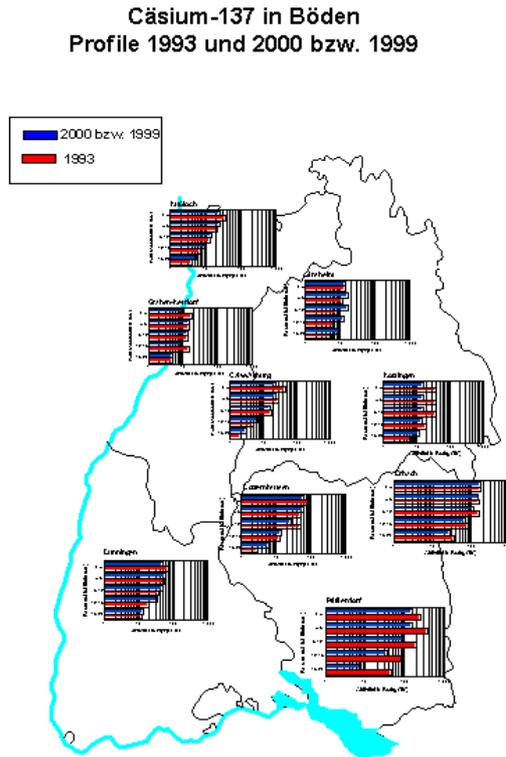


Abbildung 3.16

Es gibt Böden, bei denen das Aktivitätsmaximum in die Bodenschicht in 4-8 cm Tiefe verschoben worden ist, dies ist der Fall bei Graben-Neudorf, Sinsheim und Dunningen. Bei dem Tiefenprofil von Notzingen hat sich nahezu eine Gleichverteilung der Aktivität in den einzelnen Schichten ausgebildet, die man sonst nur bei den natürlichen Radionukliden im Boden kennt. Schließlich beobachtet man auch die Tiefenverteilung, wie man sie erwarten würde: das Maximum liegt in der oberflächennahen Schicht (0-4 cm Tiefe), dies trifft für Nussloch, Erbach, Pfullendorf und Dotternhausen zu.

Die unterschiedliche Bodenbelastung hat deutliche Auswirkungen auf das gesamte Ökosystem. Die absolute Höhe der Kontaminationen ist dabei von vielen Faktoren abhängig, wie Bearbeitungszustand der Böden, unterschiedliche Nahrungsaufnahmen der Pflanzen, Möglichkeiten der Anreicherung und vieles mehr. Es gibt Hinweise darauf, dass Cäsium besonders fest an Tonmineralien angelagert wird und damit von den Pflanzen schlecht aufgenommen werden kann. Somit erklärt sich auch, dass Pilze, Wild und Fische aus moorigen Gebieten höher belastet sind, da dort Tonmineralien nur eine untergeordnete Rolle spielen und das Cäsium leichter in die Pflanzen übergehen kann.

Bewuchs

Laub und Nadeln

Um Aussagen über das Verhalten von Cäsium-137 in der Biosphäre zu gewinnen, werden in Baden-Württemberg einmal jährlich Fichtennadeln (jüngster Jahrgang) und Buchenblätter untersucht. Im Gegensatz zu den angebauten Lebensmitteln haben diese Pflanzen den großen Vorteil, jedes Jahr am selben Standort verfügbar zu sein und auf unbearbeiteten Böden zu wachsen. Nur so ist sichergestellt, dass bei der Betrachtung von Zeitreihen über mehrere Jahre menschlicher Einfluss weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Die Abbildungen 3.17 und 3.18 zeigen die zeitliche Entwicklung der spezifischen Cäsium-137-Aktivität in diesen Indikatormedien. Als Vergleichswerte sind ebenfalls die Werte des natürlichen Radionuklides Kalium-40 eingetragen, die in der Regel höher liegen als die gefundenen Cäsium-Werte.

Cäsium-137 und Kalium-40 in Fichtennadeln 1989-2001

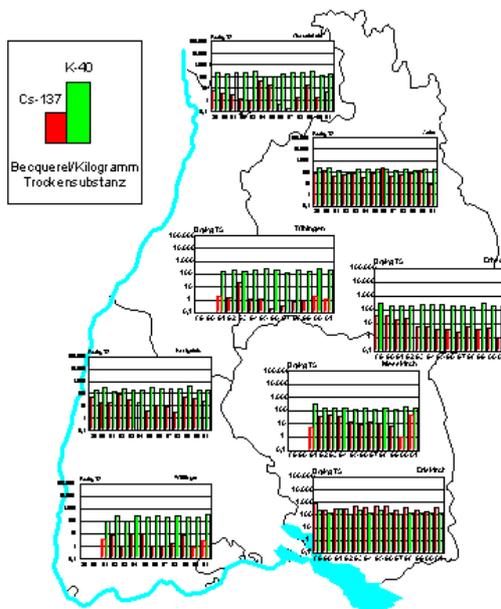


Abbildung 3.17

Cäsium-137 und Kalium-40 in Buchenlaub 1989-2001

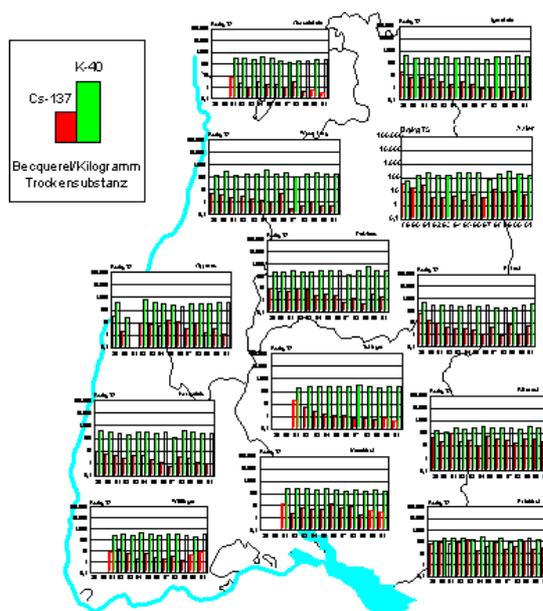


Abbildung 3.18

Die Messungen zeigen das bekannte Bild, dass im Süden und Südosten des Landes die höheren Kontaminationen vorliegen. Aufgrund von Witterungseinflüssen und pflanzenphysiologischen Effekten schwanken die spezifischen Cäsiumaktivitäten stark.

Farne

Farnkräuter nehmen die radioaktiven Cäsiumisotope besonders gut aus dem Boden auf und reichern sie in ihrem Gewebe an. Sie werden daher als Indikatorpflanzen für das Ausmaß der radioaktiven Bodenbelastung herangezogen. Außerdem dienen sie in einigen Gegenden dem Wild als Nahrung, wodurch dieses das radioaktive Cäsium in nicht unerheblichen Mengen aufnehmen kann. Auch hier werden in den südlichen und südöstlichen Landesteilen besonders hohe Cäsiumbelastungen in den Farnen gefunden. Die im Jahre 1987 hauptsächlich an Adlerfarn gewonnenen Messwerte bis maximal 37.000 Bq/kg Trockensubstanz werden allerdings heute bei weitem nicht mehr erreicht. In Abbildung 3.19 sind (aus Gründen der Übersichtlichkeit) 18 aus 26 Probenahmeorte repräsentativ ausgewählt und die zeitlichen Entwicklungen der spezifischen Aktivitäten von 1988 bis 2001 dargestellt. Wie bei Fichtennadeln und Buchenlaub unterliegen die spezifischen Aktivitäten auch bei Farnen aus pflanzenphysiologischen Gründen und aufgrund von Witterungseinflüssen starken Schwankungen von Jahr zu Jahr. Sie liegen aber wegen der besonderen Anreicherung deutlich höher. Der Gehalt an natürlichem Kalium-40 in Farnpflanzen liegt in der Regel im gesamten Land bei Werten um 500 ± 200 Bq/kg Trockensubstanz. An einigen Orten werden jedoch auch Werte von über 1.000 Bq/kg Trockensubstanz gefunden.

Cäsium-137 und Kalium-40 in Farnen 1987-2001

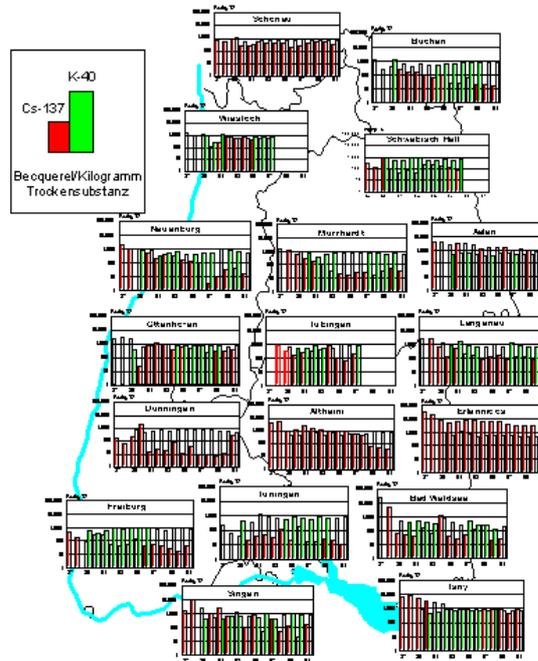


Abbildung 3.19

Gras

Gras stellt ein wichtiges Futtermittel dar. Es ist fast überall und zu jeder Jahreszeit verfügbar. Damit eignet es sich besonders gut für die Beobachtung von radiologischen Einwirkungen auf die Umwelt. Gras ist auch eine wichtige Zwischenstation auf dem Weg der Radionuklide vom Boden in die Milch. Abbildung 3.20 zeigt die Messergebnisse für Cäsium-137. Auch hier beobachtet man stärker belastete Gebiete im Süden und Südosten gegenüber niedriger belasteten Gebieten in den übrigen Landesteilen.

Cäsium-137 und Kalium-40 in Gras 1989-2001

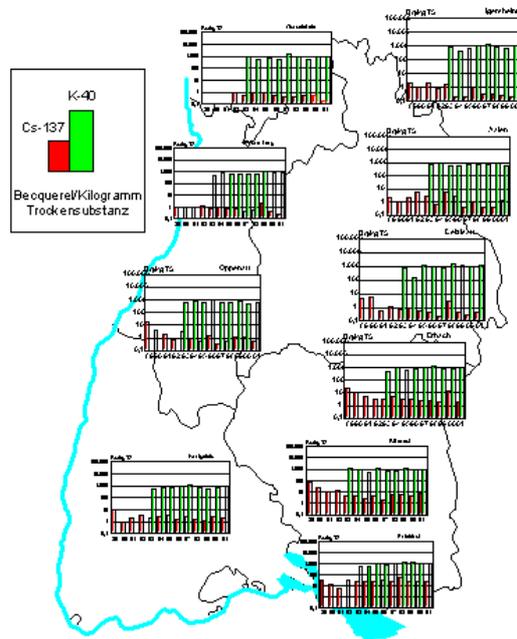


Abbildung 3.20

Hier zeigt sich erneut, welche schwerwiegenden Auswirkungen das Auswaschen einer durch den Tschernobylunfall stark mit Radioaktivität belasteten Luftmasse durch Niederschlag im Vergleich zu einer trockenen Staubablagerung hatte. Zum Vergleich sind in Abbildung 3.19 die natürlichen Kalium-40 Gehalte der letzten Jahre mit dargestellt. Die Werte liegen meist etwas unterhalb von 1000 Bq/kg Trockensubstanz.

Pflanzen in Oberschwaben

Wie unterschiedlich Cäsium-137 von verschiedenen Pflanzen angereichert wird, zeigen auch die Ergebnisse eines Forschungsprogramms der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten aus Oberschwaben - dem innerhalb von Baden-Württemberg durch den Reaktorunfall in Tschernobyl am stärksten betroffenen Gebiet.

Abbildung 3.21 zeigt einen Vergleich von fünf Pflanzenarten am selben Standort im Altdorfer Wald. Deutlich ist die artspezifische Abhängigkeit der Cäsiumaufnahme zu erkennen. Die höchsten Cäsium-Werte findet man bei Farnen, insbesondere bei Dornfarn. Eine ähnliche Reihenfolge der spezifischen Aktivität der verschiedenen Pflanzen konnte bereits in früheren Jahren auch an anderen Standorten beobachtet werden.

Nahrungsmittel

Die Gesamtnahrung der Menschen setzt sich aus den unterschiedlichsten Lebensmitteln zusammen. Diese werden im Rahmen der allgemeinen Überwachung der Radioaktivität auf ihre Gehalte an radioaktiven Stoffen untersucht. Hierfür wird eine Vielzahl an unterschiedlichen Nahrungsmitteln gemessen. Im Zeitraum 1998 bis 2001 wurden insgesamt 3097 Einzelproben auf gammastrahlende Radionuklide hin untersucht. In der Mehrzahl der Proben sind keine gammastrahlenden Radionuklide und damit auch kein Cäsium-137 nachweisbar. Ein Teil der Proben (351) wurde zusätzlich auf Sr-90 hin untersucht.

Einen Überblick über die Schwankungsbreite der spezifischen Cäsium-137- und der Strontium-90-Aktivitäten in unseren Nahrungsmitteln geben die Abbildungen 3.22 und 3.23. Insgesamt zeigt sich, dass die Belastung mit künstlichen Radionukliden so gering ist, dass sie in der überwiegenden Zahl unserer landwirtschaftlichen Produkte mit den üblichen Routinemessungen nicht mehr nachweisbar sind.

Cäsium-137 in Nahrungsmitteln 1998-2001

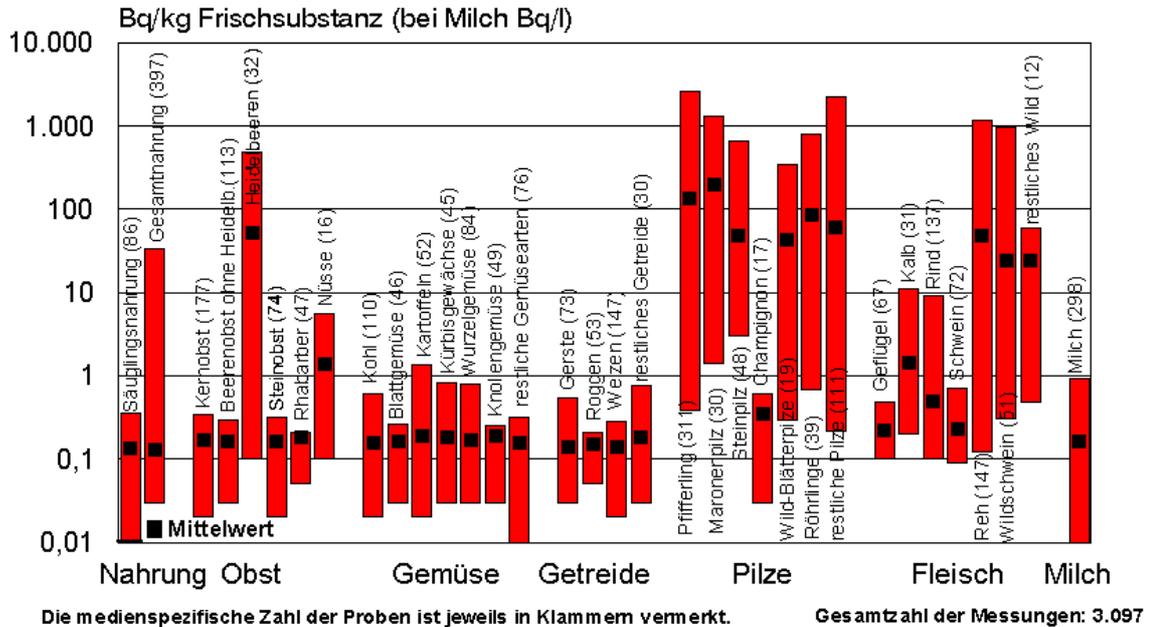


Abbildung 3.22

Strontium-90 in Nahrungsmitteln 1998 - 2001

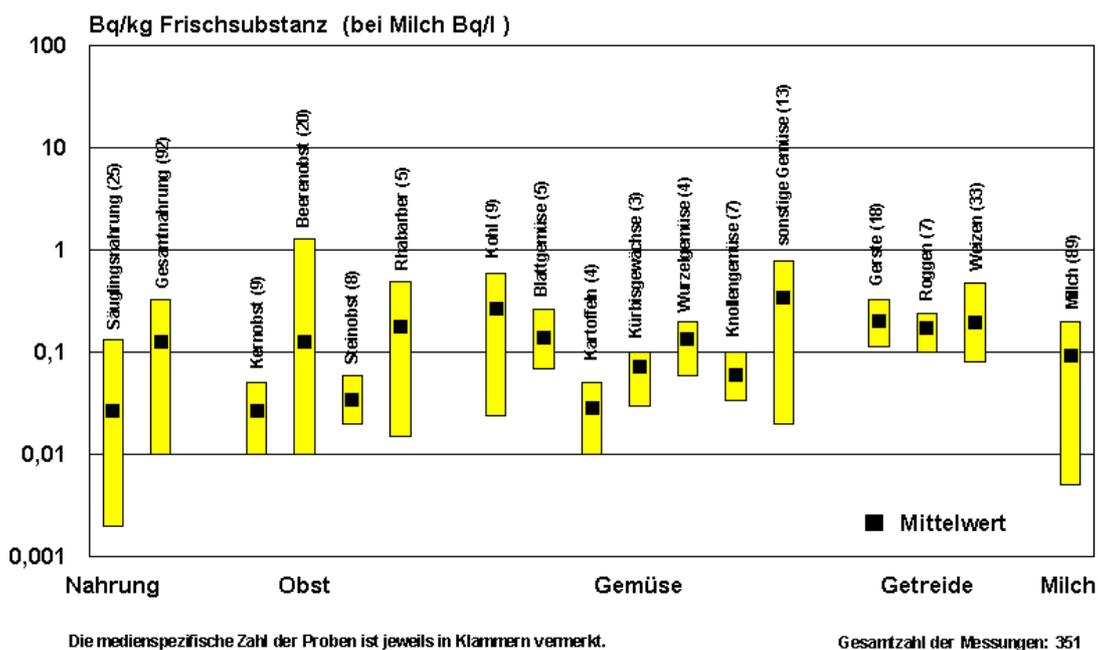


Abbildung 3.23

Für Milch, pflanzliche Nahrungsmittel, Fleisch und Fisch sowie die Gesamtnahrung werden die Messergebnisse im Folgenden ausführlich diskutiert.

Milch

In Deutschland werden im Mittel von jeder Person etwa 70 Liter Milch im Jahr getrunken. Milch ist ein besonders hochwertiges Nahrungsmittel und enthält fast alle Nährstoffe, die vor allem Kinder für ihre Entwicklung brauchen. Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl wurde daher die Milch in sehr kurzen Zeitabständen auf ihren Radioaktivitätsgehalt untersucht. Als kritisches Radionuklid galt im Mai und Juni 1986 das Iod-131, da dieses Nuklid zur Schilddrüsenbelastung von Säuglingen und Kleinkindern maßgeblich beiträgt. Seither ist dieses Iod-131 aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von etwa 8 Tagen aus unserer Umwelt längst verschwunden. Auch das Cäsium-134 mit einer Halbwertszeit von ca. 2 Jahren wurde in den letzten Jahren in keiner Probe mehr festgestellt. Stattdessen spielen nur noch die langlebigen Radionuklide Cäsium-137 und Strontium-90 (aus Kernwaffen-Tests) eine Rolle.

Über die Belastung der Milch mit Cäsium-137 seit dem Mai 1986 gibt die Abbildung 3.24 am Beispiel der Erzeugerregion Ravensburg Auskunft. Nachdem zunächst ein sehr starker Anstieg bis Ende Mai 1986 zu beobachten war, nahm die Aktivität in der Milch bis Oktober 1986 wieder stark ab. Danach war ein erneuter Anstieg im Winterhalbjahr 1986/1987 zu verzeichnen, der auf das Verfüttern von kontaminiertem Heu insbesondere aus der ersten Ernte von 1986 zurückzuführen ist. Seitdem ist es zu keinen erneuten saisonalen Schwankungen gekommen. Die Werte liegen seit 1995, mit wenigen Ausnahmen, unterhalb von 0,4 Becquerel Cäsium-137 je Liter.

Cäsium-137 in Milch aus Ravensburg 1986 - 2001

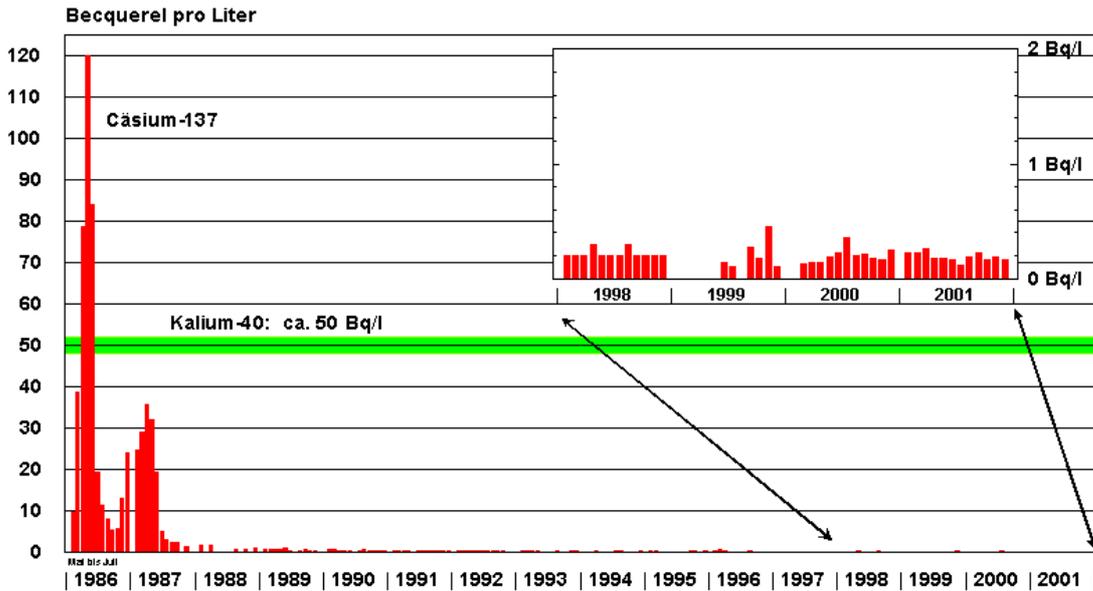


Abbildung 3.24

Wegen der Bedeutung der Milch für die menschliche Ernährung wird ausser in Ravensburg auch in weiteren sechs Erzeugerregionen des Landes monatlich die Milch untersucht. Es handelt sich dabei jeweils um eine Stichprobe der angelieferten Rohmilch, die sich aus den Lieferungen von 20 bis 30 unterschiedlichen Erzeugern zusammensetzt. Dadurch sind gewisse Schwankungen in den Messergebnissen bedingt. An zwei Orten (Freiburg und Ravensburg) wird neben den üblichen gammaspektrometrischen Untersuchungen regelmäßig der Gehalt an Strontium-90 gemessen. Die Abbildung 3.24 stellt die Messwerte von Cäsium-137 und Strontium-90 für verschiedene Orte im Zeitraum 1998 bis 2001 dar. Die unterschiedlichen Boden-/Gras-Kontaminationen führen zu regionalen Unterschieden. In den südlichen Landesteilen lag die Cäsiumbelastung in den Milchproben höher als in den nördlichen, in welchen die Nachweisgrenze von 0,1 Bq/l kaum mehr überschritten wird.

Der Gehalt der Milch an Strontium-90 aus der Region Freiburg ist im Mittel ungefähr doppelt so hoch wie der der Milch aus der Region Ravensburg. Da der Strontiumeintrag als Folge des Tschernobylunglücks nur sehr gering war, dominieren in der Milch heute noch die Folgen der oberirdischen Kernwaffenversuche. Die höheren Werte aus dem Freiburger Gebiet lassen sich durch die Tatsache erklären, dass im Schwarzwald die mittlere Jahresniederschlagsmenge zwei- bis dreimal höher ist als im übrigen Baden-Württemberg. Folglich ist dort auch mehr Strontium im Laufe der Jahre durch den Kernwaffen-Fallout in den Boden gelangt und damit über den „Weide-Kuh-Milch-Pfad“ in die Milch.

Eine Beurteilung der gefundenen spezifischen Strontium- und Cäsiumaktivitäten ist leicht möglich, wenn man diese mit dem natürlichen Gehalt an radioaktivem Kalium-40 vergleicht. Kalium-40 ist landesweit mit 40 - 50 Becquerel je Liter in der Milch vorhanden. Mit diesen Angaben kann man die effektiven Dosen ermitteln und einander gegenüberstellen. Hierzu wurde die Erzeugerregion Freiburg beispielhaft ausgewählt und angenommen, dass Erwachsene wie Kleinkinder täglich 1 Liter Milch trinken.

Radionuklidaufnahme	Kleinkind (1 Jahr)	Erwachsener
Cäsium-137 (ca. 95 Bq)	~ 2 µSv/a	~ 1 µSv/a
Strontium-90 (ca. 58 Bq)	~ 13 µSv/a	~ 2 µSv/a
Kalium-40 (ca. 18 250 Bq)	~ 1.100 µSv/a	~ 110 µSv/a

Die Cäsium- und Strontiumwerte unterliegen von Jahr zu Jahr gewissen Schwankungen, wie dies zum Beispiel auch bei Farnen, Blättern oder Gras der Fall ist. Die Gründe liegen unter anderem in den Bodeneigenschaften und den schwankenden Witterungsverhältnissen. Es ist aber sehr deutlich zu sehen, dass der überwiegende Anteil der Strahlenbelastung durch Milchverzehr auf das natürliche Radionuklid Kalium-40 zurückzuführen ist.

Fleisch

Fleisch aus der landwirtschaftlichen Produktion enthält spezifische Cäsium-137-Aktivitäten, die – bis auf Kalbfleisch - im Mittel deutlich unter 1 Bq/kg (Abbildung 3.26) liegen. Nur vereinzelt wurden Gehalte von bis zu ca 10 Bq/kg gefunden. Dies gilt sowohl für Geflügel, Schweine, Rind- und Kalbfleisch, wobei die spezifischen Aktivitäten in Rind- und Kalbfleisch etwas höher liegen als in Schweinefleisch und Geflügel. Man beachte dabei, dass häufig in den gemessenen Proben auch bei Rind und Kalb kein Cäsium nachgewiesen werden konnte. (Bei der Bildung der Mittelwerte in der Abbildung 3.26 wurden für Proben deren Cäsium-137-Gehalt unterhalb der Nachweisgrenze lag der Wert der jeweiligen Nachweisgrenze angesetzt, dadurch liegen die tatsächlichen Mittelwerte für die einzelnen Fleischsorten etwas niedriger als angegeben). Der größte gemessene Wert im Zeitraum 1998 - 2001 lag bei 10,9 Bq/kg (Kalbfleisch aus Biberach).

Cäsium-137 in Fleisch 1998 - 2001

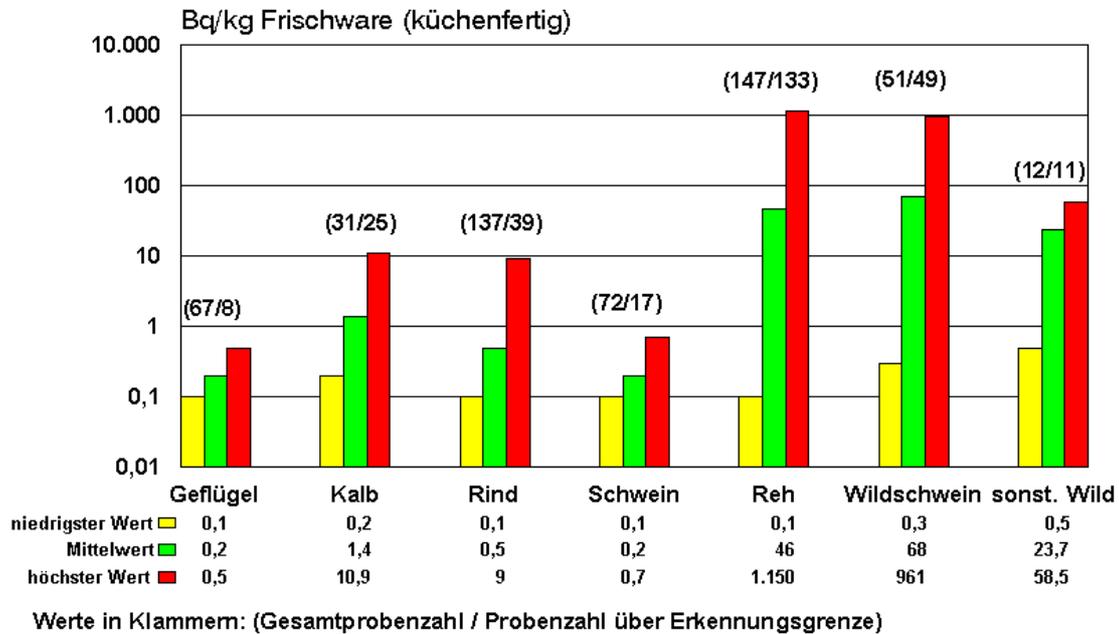


Abbildung 3.26

Im Gegensatz dazu wurden im Fleisch wildlebender Tiere zum Teil sehr viel höhere Cäsium-137-Gehalte gemessen. Die höchsten Werte wurden mit über 1000 Bq/kg in Rehwild und nahezu 1000 Bq/kg in Wildschweinen aus den Wäldern der Region Bodensee-Oberschwaben gefunden. Diese hohen Werte haben ihre Ursache in der Nahrungsaufnahme von höher belasteten Äsungspflanzen, wie z. B. einigen Pilzarten, Farnen, Heidekraut und Torfmoos. Wild mit spezifischen Cäsiumaktivitäten über dem EU-Richtwert von 600 Bq/kg gelangt entsprechend einer Abmachung der Landesregierung mit dem Landesjagdverband nicht in den Handel. Im Zeitraum 1998 bis 2001 betraf dies 2 der untersuchten 147 Rehproben und 2 der 51 untersuchten Wildschweinproben aus der am stärksten betroffenen Region in Oberschwaben.

Abbildung 3.27 zeigt den zeitlichen Verlauf der Cäsium-137-Aktivität in Rehen aus Oberschwaben. Seit 1987 wurden mehr als 6000 Rehwildproben durch die Fachhochschule Ravensburg-Weingarten gammastrahlendimetrisch untersucht. Die Proben stammten überwiegend aus den Staatlichen Forstämtern der angegebenen Region. Die Rehwildkontamination zeigt einen zeitlichen Abfall im Laufe der Jahre, dem jährlich wiederkehrende Maxima im Herbst als Folge der Äsung von hochbelasteten Pilzen überlagert sind. Die unterschiedliche Höhe dieser herbstlichen Maxima erklärt sich durch das jährlich schwankende Auftreten von Pilzen, je nach Witterungsbedingungen. Der Eindruck, dass die Rehbelastung seit 1993 eher wieder ansteigt, den Abbildung 3.27 vermitteln könnte, entsteht dadurch, dass in den letzten Jahren nicht mehr alle geschossenen Rehe untersucht werden, sondern schwerpunktmäßig Rehe aus bekanntermaßen höherbelasteten Gebieten. Dadurch resultiert eine Überbewertung dieser Gebiete und eine relative Überhöhung im Vergleich zu den Daten aus früheren Jahren.

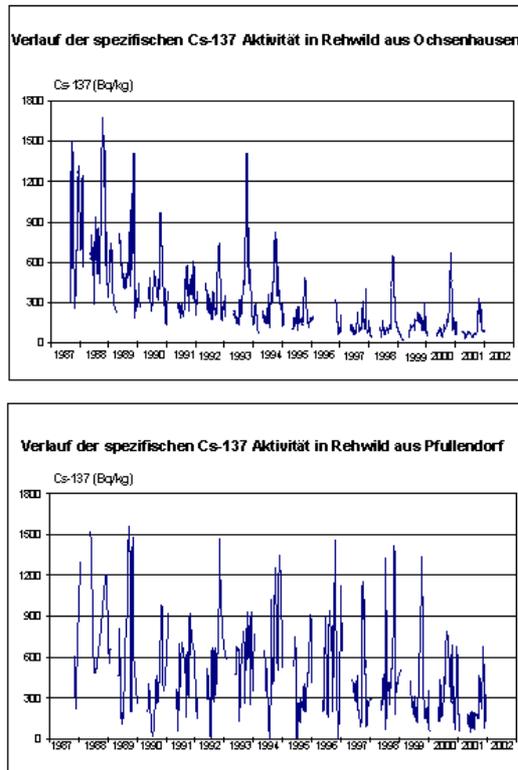


Abbildung 3.27

Für eine repräsentative Zahl von Proben aus dem Forstamtsbezirk Ochsenhausen zeigt die logarithmische Darstellung der Halbjahresmittelwerte (Abbildung 3.28) für die jeweilige erste Jahreshälfte einen kontinuierlichen, linearen Abfall der Kontamination bis ca. 1998. Die Mittelwerte der 2. Jahreshälfte liegen höher und werden stark von der herbstlichen Pilzsaison beeinflusst, was zu großen Schwankungen führen kann. Aus den Daten lässt sich eine effektive Halbwertszeit von etwa 3,4 Jahren ermitteln.

Geometrische Halbjahresmittelwerte der Kontamination von Rehwild aus Ochsenhausen 1986 - 2001

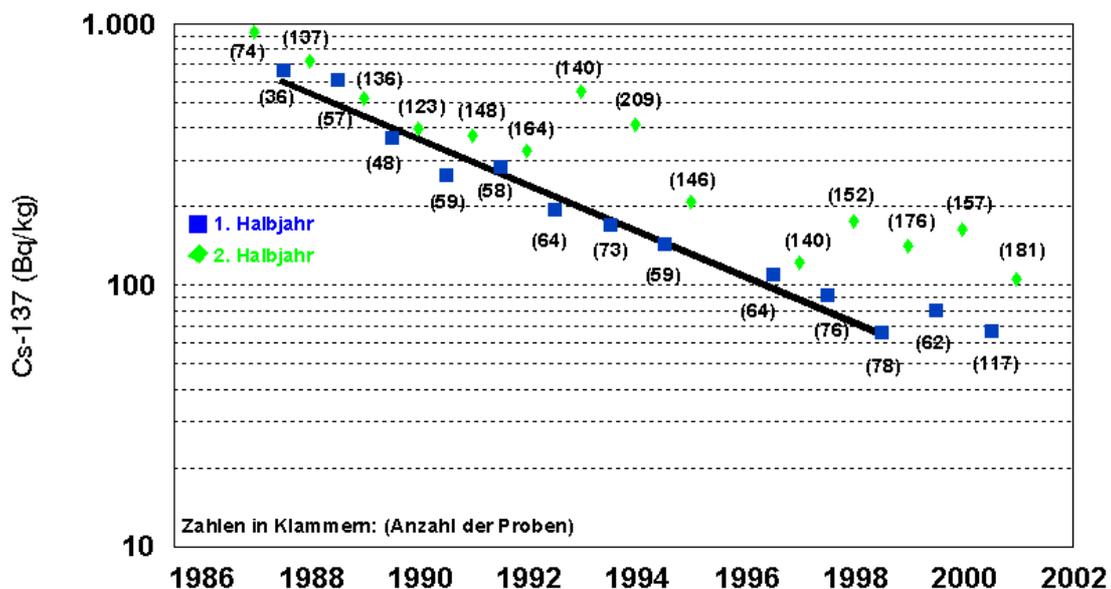


Abbildung 3.28

Dies bedeutet, dass aufgrund biologischer, ökologischer sowie physikalischer Effekte nach jeweils 3,4 Jahren die mittlere Kontamination der Rehe auf die Hälfte abgesunken ist.

Fische

Seit Jahren untersucht das Institut für Angewandte Forschung der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten Süßwasserfische aus einigen flachen und nährstoffreichen Seen Oberschwabens. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 3.29. So liegt der Cs-137-Gehalt bei Fischen aus dem Vorsee nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl immer noch relativ hoch. Die Ursache dafür liegt in der geringen Cäsium-Rückhaltefähigkeit der Moorböden dieser Gegend. Dies führt zu einem ständigen Eintrag von gelöstem Cäsium-137 über die Zuflüsse in diese Seen. Der höchste Wert des Jahres 2001 lag bei 192 Bq/kg. Die Hechte weisen im Allgemeinen eine entsprechend höhere Belastung auf als die Weißfische. Die effektive Halbwertszeit für Cs-137 bei Hechten liegt seit ca 1989 bei etwa 3,1 Jahren, bei Weißfischen bei etwa 4,2 Jahren.

Cäsium-137 in Hechten bzw. kleinen Weißfischen aus dem Vorsee

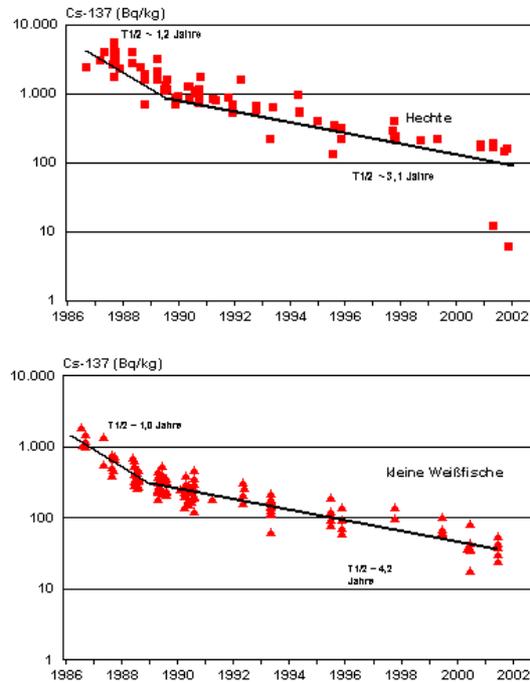


Abbildung 3.29

Pflanzliche und sonstige Nahrungsmittel

Obst, Nüsse

Auch beim Obst wird bei der überwiegenden Zahl der Arten aus dem gärtnerischen Anbau in Baden-Württemberg praktisch kein Cäsium-137 mehr nachgewiesen. Die meisten Proben lagen unterhalb der messtechnischen Erkennungsgrenze. Im Zeitraum 1998 bis 2001 wurden insgesamt 467 Proben untersucht. Außer bei Heidelbeeren und Nüssen wurden überhaupt nur bei 7 Proben Cäsium-137 nachgewiesen. Die Ergebnisse aufgeteilt nach Obstsorten sind in Abbildung 3.30 dargestellt.

Cäsium-137 in Obst 1998 - 2001

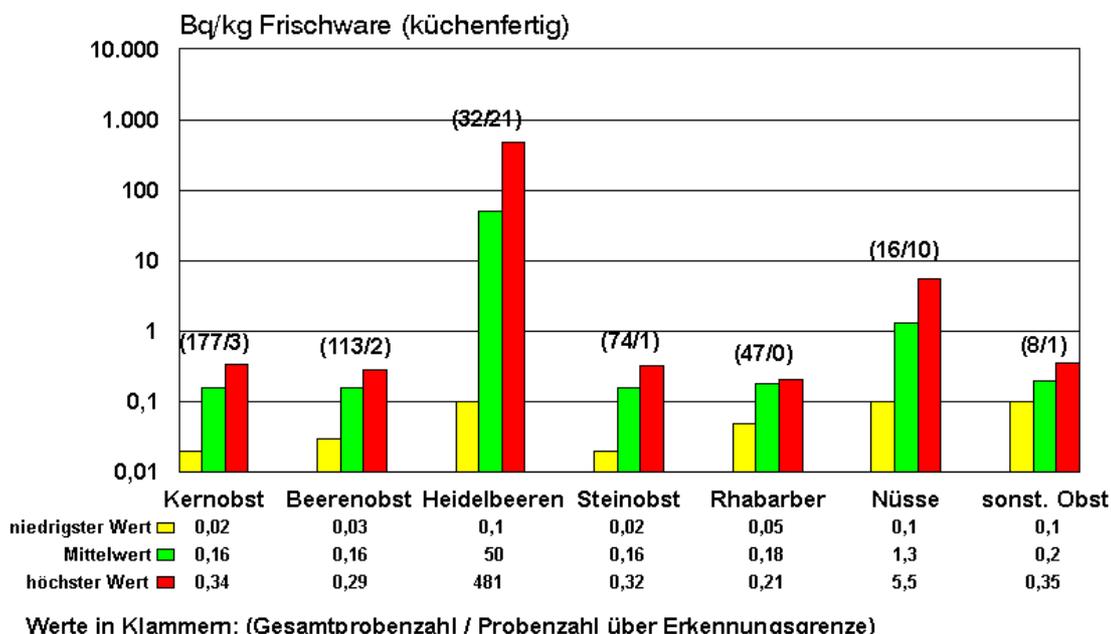


Abbildung 3.30

Analog zum Wild können auch beim Obst die wildwachsenden Beeren deutlich höhere Werte aufweisen, wie das Beispiel der Heidelbeeren zeigt. Heidelbeeren wachsen auf unbearbeiteten Böden. Sie können daher die Radionuklide, die noch nicht in tiefere Bodenschichten eingedrungen sind, besonders gut über ihre Wurzeln aufnehmen. Auch bevorzugen sie Standorte, deren Böden die Cäsiumatome nicht sehr stark binden, so dass sie leichter für die Pflanzen verfügbar sind. Relativ hohe Werte weisen auch Nüsse auf, dies liegt teilweise aber auch daran, dass Nüsse im Vergleich zu den anderen Obstsorten einen geringeren Wassergehalt aufweisen.

Neben Cs-137-Messungen wurde stichprobenweise (an 44 Proben) auch eine Sr-90-Analyse durchgeführt. Die Werte lagen durchweg bei einigen Hundertstel Bq/kg, im Maximum bei wenigen Zehnteln (0,26) Bq/kg. Ausgenommen wieder Heidelbeeren, der einzigste dort gemessene Wert lag bei 1,29 Bq/kg.

Gemüse, Getreide

Auch bei den verschiedenen Gemüsearten liegen im Zeitraum 1998 bis 2001 die Ergebnisse bei der überwiegenden Mehrzahl der 462 untersuchten Proben unterhalb der messtechnischen Erkennungsgrenze. Bei Kohlgemüse wird nur in 8 von 110 Proben die Nachweisgrenze überschritten, bei Blattgemüse in 7 von 46, bei Kartoffeln in 2 von 52, in Kürbisgewächsen in einer von 45, in Wurzelgemüse in 5 von 84, in Knollengemüse in keiner von 49 und in den restlichen Gemüsesorten in 3 von 76 Proben. Das Maximum aller Messungen wurde bei Kartoffeln aus Bad Waldsee mit 1,34 Bq/kg im Jahr 2000 gefunden.

Für die 303 Getreideproben gilt Ähnliches: in 4 von 74 Gerstenproben, 3 von 53 Roggenproben, 5 von 148 Weizenproben und 3 von 30 restlichen Getreideproben (Reis, Hafer, Dinkel) wurde die Nachweisgrenze überschritten. Das Maximum mit 0,54 Bq/kg wies eine Gerstenprobe aus Ingoldingen im Jahr 1999 auf.

Auch hier gibt es an Stichproben Sr-90-Analysen. Bei Gemüse sind dies im Zeitraum 1998 bis 2001 45 Proben unterschiedlicher Gemüsearten mit einem Maximum von 0,79 Bq/kg (Porree), bei Getreide 58 Proben verschiedener Arten mit einem Maximum von 0,48 Bq/kg (Weizen).

Pilze

Wildwachsende essbare Pilze stellen bei einigen Mitmenschen einen, wenn auch geringen, Teil der Ernährung dar. Pilze entnehmen ihre Nährstoffe den obersten Bodenschichten. Wildwachsende Pilze sind deshalb dem Angebot von oberflächlich abgelagerten Radionukliden in erhöhtem Maße ausgesetzt. Bereits seit der Zeit der oberirdischen Kernwaffenversuche ist bekannt, dass einige Pilzsornten Cäsium besonders gut anreichern. So haben Untersuchungen der Universität Bonn ergeben, dass bei Maronenpilzen die braune Huthaut Cäsium 3,4-fach und der Farbstoff selbst das Cäsium 87-fach höher anreichert als der Rest des Fruchtkörpers. Durch das Entfernen der Huthaut kann somit ein Teil der Cäsiumaktivität entfernt werden. Bei Steinpilzen fehlt dieser Farbstoff. Dies könnte mit ein Grund für die viel geringere Cäsiumanreicherung in diesem Pilz sein. Von den wildwachsenden zum Verzehr geeigneten Pilzen sind die Röhrenpilze und hier insbesondere die Maronenröhrlinge nach wie vor merklich belastet (Abbildung 3.31). Um eine Übersicht über die Cäsiumbelastung von wildwachsenden essbaren Pilzen aus Baden-Württemberg zu geben, wurden neben den Maronenröhrlingen auch für Steinpilze, Pfifferlinge, Hallimasch und sonstige Wild-Blätterpilze die mittleren Aktivitätsgehalte sowie die jeweils niedrigsten und höchsten gefundenen Werte dargestellt. Es hat sich erwartungsgemäß gezeigt, dass die Cäsiumbelastung neben den sortenspezifischen Eigenschaften auch stark von der Höhe der örtlichen Bodenkontamination und der Bodenart abhängt. So wurden die höchsten Cäsiumbelastungen in Pilzen aus der Region Oberschwaben gefunden. Abbildung 3.31 gibt einen Überblick über Pilzbelastungen aus ganz Baden-Württemberg.

Cäsium-137 in Pilzen aus Baden-Württemberg 1998 - 2001

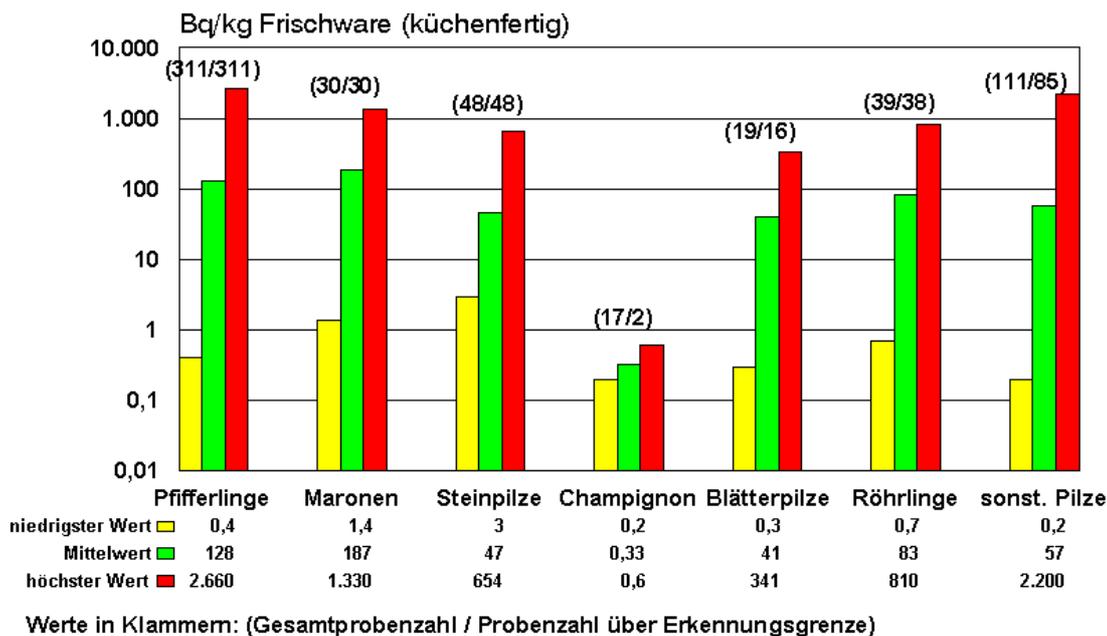


Abbildung 3.31

Abbildung 3.32 stellt daneben die regionalen Verhältnisse in Oberschwaben detailliert dar. Diese Ergebnisse stammen aus einem zusätzlichen Messprogramm der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten. Die höhere Belastung in Oberschwaben wird z. B. an dem Mittelwert von rund 750 Bq/kg für Maronentröhrlinge deutlich. Für essbare Pilze wurde 2001 der höchste Wert an Cäsium-137 bei einem Maronentröhrling mit 1795 Bq/kg gefunden. Dies ist zugleich das Maximum aller im Jahr 2001 untersuchten Pilze.

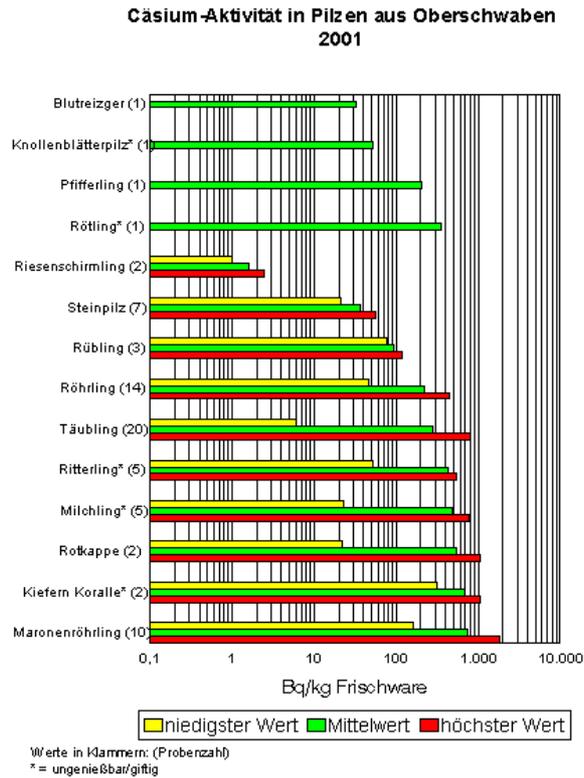


Abbildung 3.32

Abbildung 3.33 zeigt die Entwicklung der spezifischen Cs-137-Aktivität über den Zeitraum 1992 bis 2001 für Maronen, Pfifferlinge und Steinpilze. Hiernach ist nur ein geringer Trend zu erkennen, die Belastung verbleibt auf verhältnismäßig hohem Niveau.

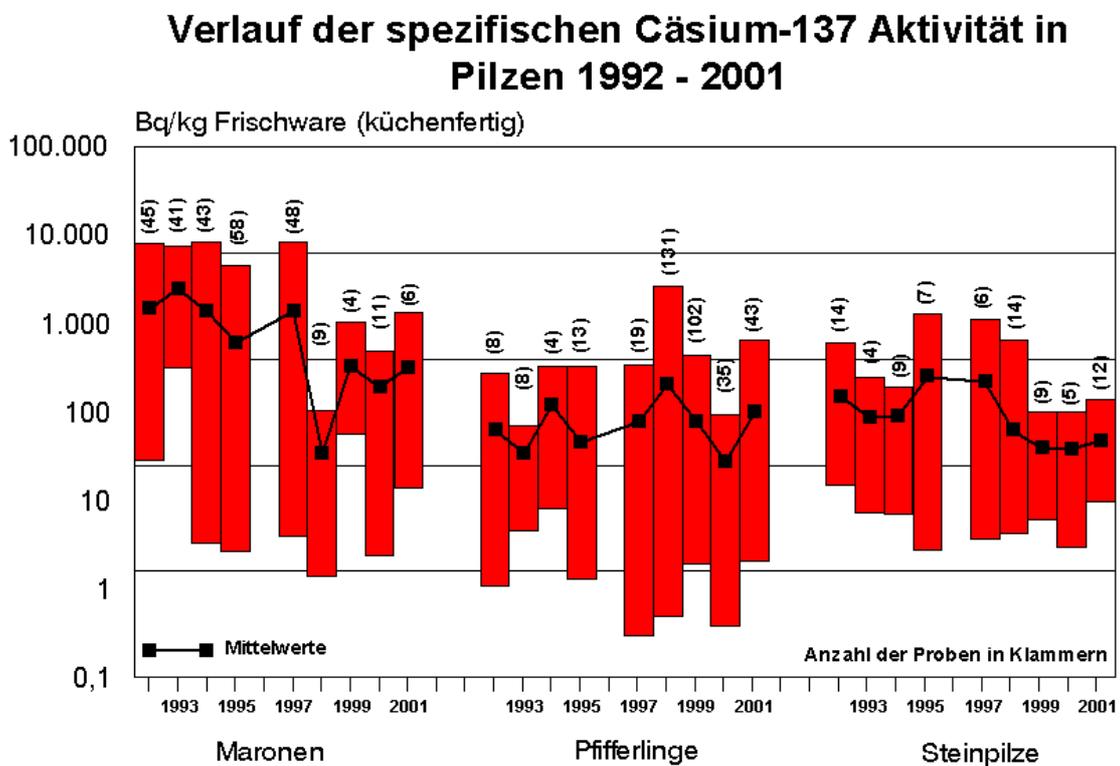


Abbildung 3.33

Aus den vorliegenden Messwerten lässt sich der Beitrag dieser Radionuklide zur Strahlenbelastung für den Zeitraum 1998 bis 2001 für den betrachteten Personenkreis (Erwachsene) berechnen. Die mittlere jährliche effektive Körperdosis ergibt sich danach für Cäsium-137 (mittlere Jahreszufuhr ca 90 Bq) zu ca 1,2 µSv, für Strontium-90 (mittlere Jahreszufuhr ca 40 Bq) zu ca 0,1 µSv. Der Beitrag des natürlichen Kalium-40 (Jahreszufuhr ca 36 kBq) führt zu etwa 220 µSv. Hier ist deutlich erkennbar, dass die künstlichen Radionuklide nur mit einem geringen Anteil zur Strahlenbelastung über die Nahrungsaufnahme beitragen.

Den langfristigen Verlauf der täglichen Cäsium-137-Zufuhr über die Gesamtnahrung seit den 60er Jahren zeigt die Abbildung 3.35 für die Bundesrepublik und die Abbildung 3.36 beispielhaft für Stuttgart (seit 1986 wird auch Cs-134 einzeln erfasst).

Tageszufuhrwerte künstlicher Radionuklide mit der Gesamtnahrung in Deutschland Jahresmittelwerte 1960-2001

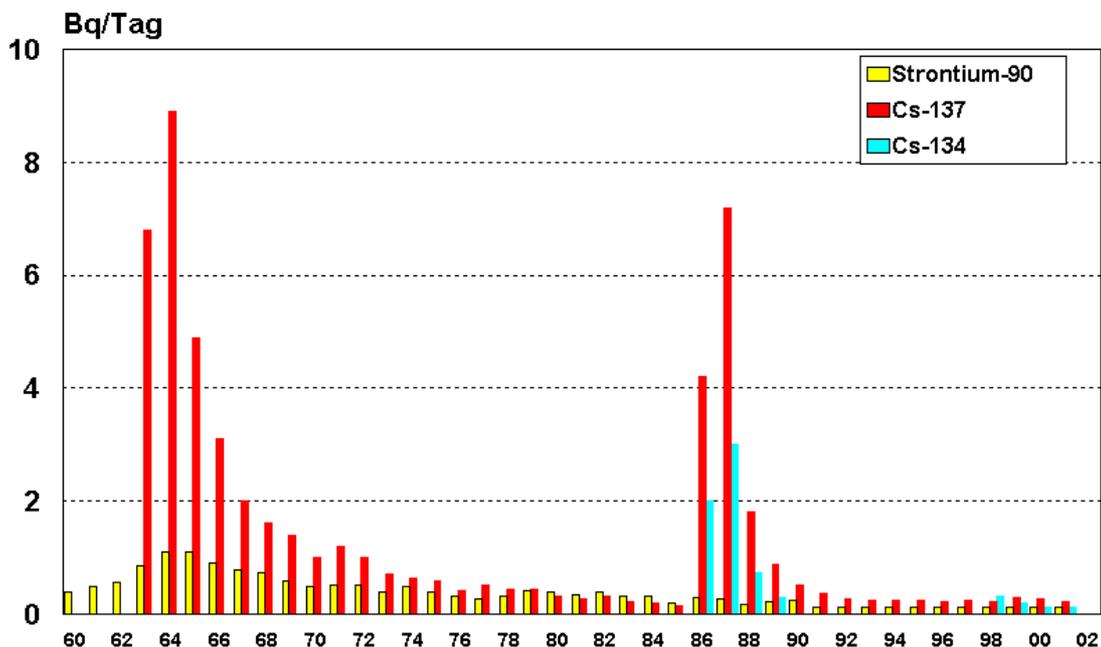


Abbildung 3.35

Tageszufuhrwerte von Cäsium-137 mit der Gesamtnahrung für Stuttgart Jahresmittelwerte 1963-2001

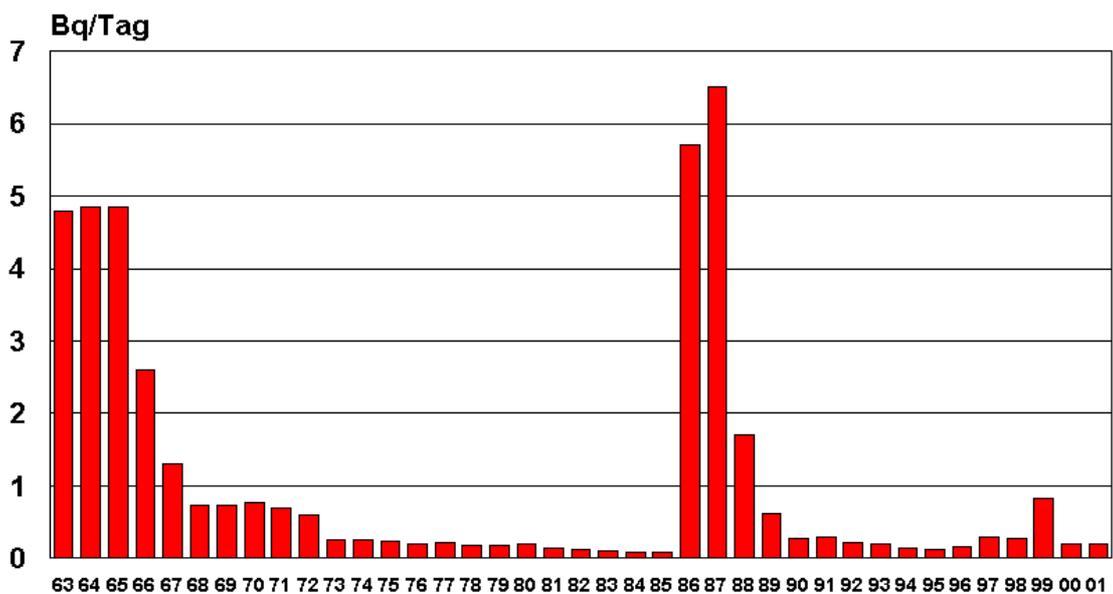


Abbildung 3.36

Sehr deutlich sind dabei die Erhöhungen durch den Kernwaffen-Fallout in den 60er Jahren und durch den Unfall in Tschernobyl zu sehen. Es ist außerdem erkenntlich, dass durch Tschernobyl die Strontium-Kontamination nur sehr geringfügig erhöht wurde. Der Gehalt an Cäsium-137 in unserer Nahrung ist seit 1986 stark zurückgegangen, hat aber in Baden-Württemberg noch nicht wieder das Niveau von 1985 erreicht. Für Stuttgart ergab sich 1997 ein Zufuhr-Wert von 0,3 Bq/Tag und 1999 ein Wert von 0,82 Bq/Tag. Die Erhöhungen werden jeweils lediglich durch einen einzelnen, etwas höher ausgefallenen Messwert (s. o.) verursacht. Die resultierende Körperaktivität zeigt Abbildung 3.37 in einem langjährigen Verlauf von 1961 bis 2001. Für das Jahr 2001 betrug die Cs-137-Aktivität zwar 0,22 Bq/kg Körpergewicht, lag aber bei Männern mit 0,27 Bq/kg erheblich über dem Durchschnitt bei Frauen (0,17 Bq/kg).

Cäsium-137 Aktivität im menschlichen Körper 1961 - 2001 im Raum Karlsruhe

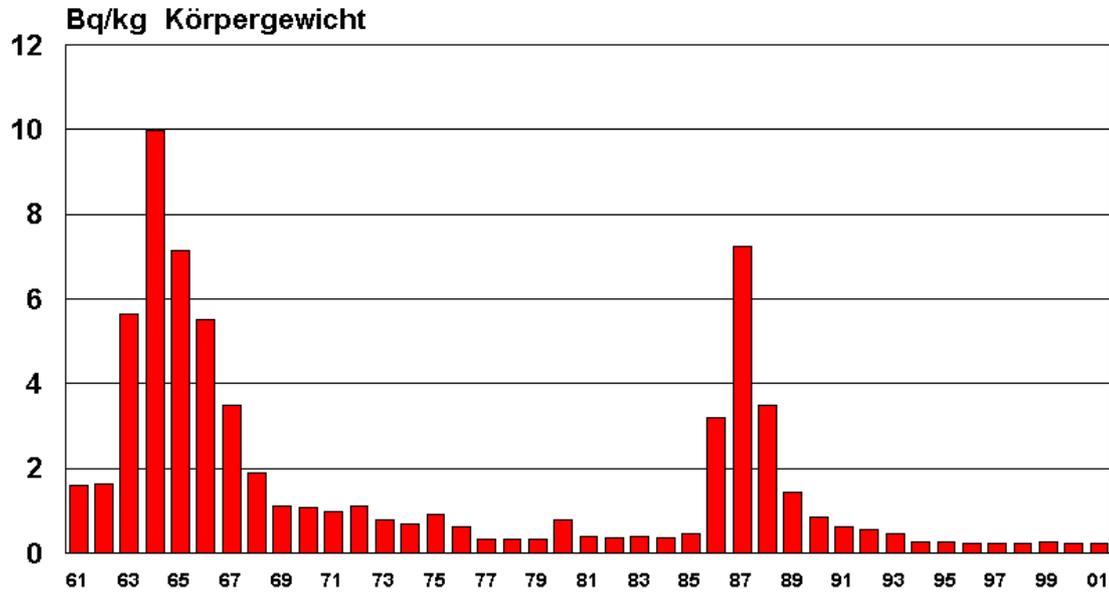


Abbildung 3.37

Abfall und Reststoffe

Nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz werden auch Abfälle, Reststoffe, Klärschlamm und Abwässer regelmäßig überwacht. Da in diese Medien eine Vielzahl von Stoffströmen aus unterschiedlichen Bereichen eingehen, sind sie gute Indikatoren für das Auftreten von Radionukliden in unserer Umwelt oder in unserem Alltag.

Kompost

Aus den verschiedensten biologischen Abfällen kann Kompost entstehen. Hierzu gehören Küchen- und Gartenabfälle, aber auch Gras- und Baumschnitt. Die Radionuklide aus Pflanzen und aus unserer Nahrung finden so ihren direkten Weg in den Kompost. Im Kompost findet man daher auch die gleichen radioaktiven Stoffe wie in anderen Umweltmedien. Kompost wird in Baden-Württemberg an 5 Standorten überwacht. Wegen Aufgabe der Kompostierung mussten im Laufe der Jahre mehrere Standorte verlegt werden, so dass nur für zwei Orte, Rastatt und Singen, durchgehende Zeitreihen seit 1989 verfügbar sind. Die Abbildung 3.38 zeigt den Cäsium-137-Gehalt in Kompost. Wegen des unterschiedlichen Feuchtegehaltes des Kompostes wird dieser vor der Messung getrocknet, sodass die spezifischen Radionuklidaktivitäten in der Trockensubstanz (TM) angegeben werden können. Wie in anderen Umweltmedien ist auch beim Kompost die höhere Kontamination der südlichen Landesteile durch den Reaktorunfall in Tschernobyl deutlich zu sehen.

Cäsium-137 in Kompost 1988-2001

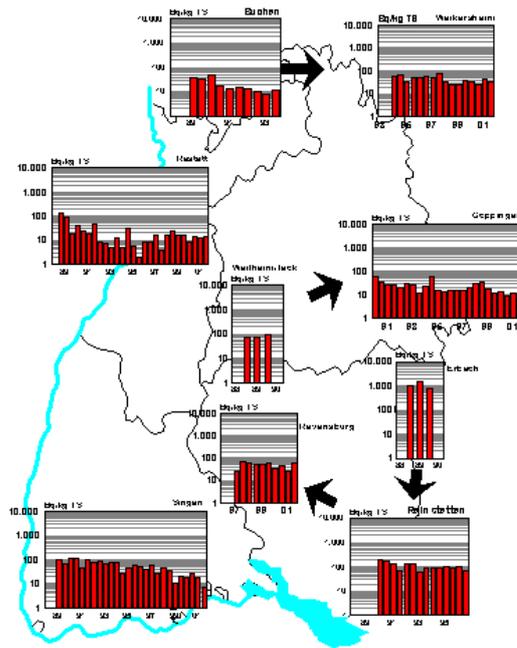


Abbildung 3.38

Klärschlamm

Im Abwasser von Kläranlagen und im Klärschlamm selbst finden sich nicht nur die Inhaltsstoffe von häuslichen, sondern auch von gewerblichen Abwässern. Radioaktiver Fallout, der sich auf Hausdächern und Straßen niederschlägt, wird durch den Regen abgewaschen und gelangt so in die Kläranlagen. Klärschlamm ist deshalb auch ein wichtiger Indikator für die großräumigen Kontaminationen der Umwelt. Klärschlamm wurde daher auch in die Überwachung nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz aufgenommen. Klärschlamm enthält heute, wie alle anderen Umweltmedien auch, noch Cäsium-137, das vom Reaktorunfall in Tschernobyl stammt. Daneben kann man im Klärschlamm häufig auch Radionuklide aus der medizinischen Anwendung finden. Hierzu gehört insbesondere Iod-131, das in der Schilddrüsen-Therapie eingesetzt wird. Besonders häufig ist es in Städten mit Tumorzentren wie etwa in Stuttgart, Heidelberg oder Tübingen, nachzuweisen. Einen Überblick über den Cäsium-137-Gehalt und das Auftreten von Iod-131 in Klärschlamm gibt die Abbildung 3.39

Cäsium-137 und Iod-131 in Klärschlamm 1989 - 2001

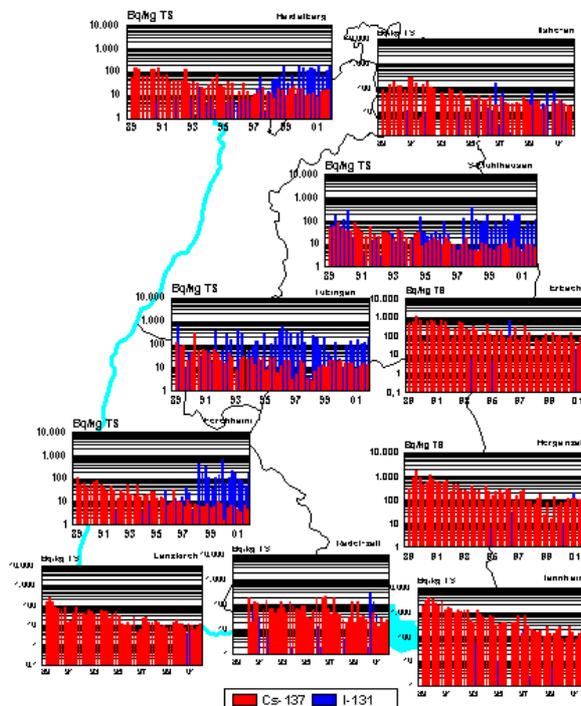


Abbildung 3.39

Müllverbrennungs-Anlagen

Ein Teil der in Baden-Württemberg entstehenden Abfälle aus dem häuslichen und gewerblichen Bereich, aber auch Klärschlämme, werden in entsprechenden Verbrennungsanlagen verbrannt. Derzeit werden vier Anlagen hinsichtlich der Radioaktivität überwacht, dabei handelt es sich in Mannheim und Göppingen um Hausmüllverbrennungsanlagen in Karlsruhe und Stuttgart jeweils um eine Klärschlammverbrennung. Beprobet werden Filterstäube, Schlacke, Washwasser und Rückstände. Bei der Klärschlammverbrennung im Wirbelschichtofen entsteht keine Schlacke. In Karlsruhe fallen außerdem keine festen Rückstände an.

Auch in den Rückstandsmedien aus der Müllverbrennung kann immer Cäsium-137 und häufig Iod-131 nachgewiesen werden. Die höchsten Werte treten für Cäsium-137 in den Filteraschen auf, da hier die stärkste Anreicherung stattfindet. Die geringsten Werte werden im Waschwasser der Rauchgaswäsche gefunden, wo sie oft nur geringfügig über der Nachweisgrenze von etwa 0,1 Bq/l liegen. Das Iod-131 stammt, wie schon beim Klärschlamm, aus der medizinischen Anwendung. Abbildung 3.40 gibt einen Überblick über die Messergebnisse seit 1990.

Cäsium-137 und Iod-131 in Rückständen aus Verbrennungsanlagen 1990 - 2001

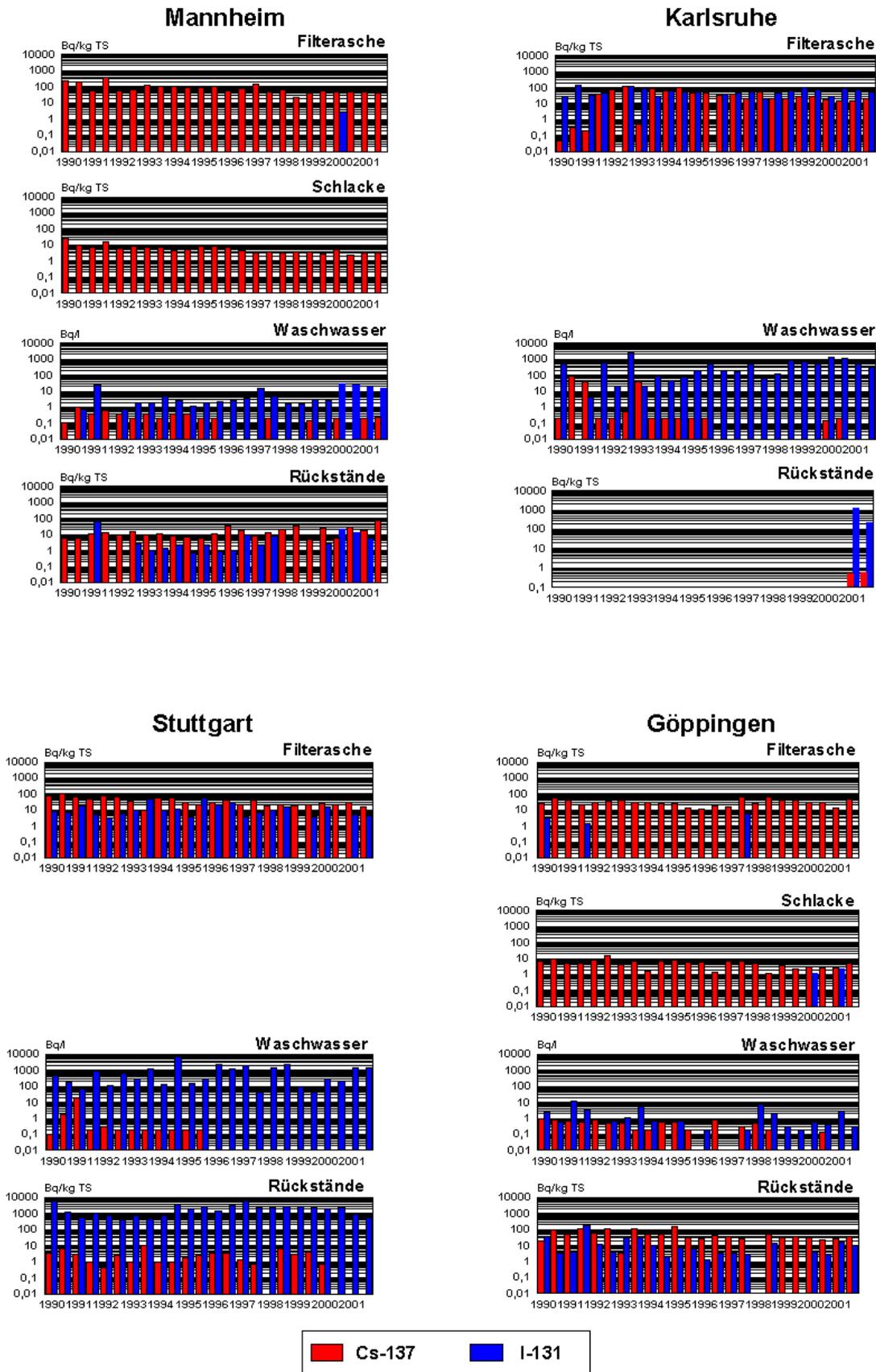


Abbildung 3.40

Sickerwasser von Hausmülldeponien

Abfälle, die nicht wiederverwertet werden können, die sich nicht kompostieren lassen und die auch nicht verbrannt werden, werden auf Hausmülldeponien gelagert. Diese Deponien sind nicht vollständig dicht abgeschlossen. Eindringendes Regenwasser löst Stoffe aus dem Deponiekörper aus, die dann mit dem Sickerwasser ausgetragen werden. Auf Hausmülldeponien lagern auch Gegenstände des allgemeinen Bedarfs, wie z.B. alte Uhren mit Zifferblättern, die radioaktive Stoffe enthalten können. In Baden-Württemberg wird derzeit das Sickerwasser von acht Hausmülldeponien radiologisch überwacht, indem pro Halbjahr eine Wasserprobe entnommen und gamma-spektrometrisch untersucht wird. Dabei ist auch hier das überall in der Umwelt vorhandene Cäsium-137 in sehr vielen Proben von Deponiesickerwasser nachzuweisen (41 von 63 Proben). Der höchste Wert lag bei 1,2 Bq/l und trat im Jahr 1998 auf. Alle anderen Werte lagen im Zeitraum 1998 bis 2001 zwischen 0,05 und ca 1 Bq/l, im Mittel bei 0,36 Bq/l. Die erreichten Nachweisgrenzen schwankten zwischen 0,04 und 0,1 Bq/l. Ein Vergleich mit dem natürlich vorkommenden Radionuklid K-40 zeigt, dass die Cs-137-Konzentrationen absolut betrachtet niedrig sind, da die gemessenen K-40-Werte zwischen 1,2 und 50 Bq/l, im Mittel bei 18 Bq/l lagen und in allen bis auf 2 Proben nachweisbar war.

Neben den gamma-spektrometrischen Messungen werden die Sickerwässer auch noch im Hinblick auf eine mögliche Belastung durch Tritium untersucht. Die Werte für Tritiumkontaminationen lagen im Zeitraum 1998 bis 2001 zwischen der Nachweisgrenze (8 Bq/l) und einem Maximalwert von 74 Bq/l, im Mittel bei 35 Bq/l. Zudem wurden Werte unterhalb bzw. gleich der Nachweisgrenze nur in 5 der 63 Proben festgestellt, ansonsten wurde die Nachweisgrenze deutlich überschritten.

Ein Vergleich zeigt, dass diese Werte deutlich über den Tritiumkonzentrationen liegen, die im Oberflächenwasser oder im Niederschlag gemessen werden. Ihre Ursache liegt demnach nicht in den früheren Kernwaffenversuchen, wie dies für das allgemein in der Umwelt vorhandene Tritium der Fall ist. Die erhöhten Tritiumgehalte in Deponiesickerwässern sind auf örtliche Quellen zurückzuführen. Sie haben ihre Ursache in der Verwendung des Radioisotops Tritium bei der Leuchtfarbenherstellung. Tritium löste in den 70er Jahren das früher hierfür verwendete Radium ab. Tritiumhaltige Leuchtfarben wurden bis vor kurzem nicht nur für eine Reihe von Instrumentenanzeigen, sondern auch für Zifferblätter und Zeiger von handelsüblichen Uhren verwendet. Zumindest bei Uhren wird zwischenzeitlich auf Tritium zugunsten nichtradioaktiver Leuchtfarben verzichtet. Es ist deshalb zu erwarten, dass die Tritiumkonzentrationen in den Sickerwässern von Hausmülldeponien zukünftig rückläufig sein werden.

4 Ergebnisse der anlagenbezogenen Überwachung der Radioaktivität

Während die allgemeine Überwachung der Radioaktivität auf die Immissionsüberwachung beschränkt bleibt, spielt in der anlagenbezogenen Überwachung der Radioaktivität die Emissionserfassung einer Anlage eine entscheidende Rolle, da jede Abgabe (Emission) radioaktiver Stoffe zwangsläufig mit einem Eintrag (Immission) dieser Stoffe in die Umwelt verbunden ist. Der Zusammenhang zwischen Emission und Immission kann sehr komplex sein. Im Wesentlichen sind die folgenden Vorgänge und Gesichtspunkte für den Eintrag in die Umwelt und damit auch die Pfade zum Menschen von Bedeutung:

- Art, Höhe, Menge und Zeitpunkt der Freisetzung,
- Verteilung und Verfrachtung mit der Luft,
- Transport und Verteilung mit dem Wasser,
- Verhalten und Verbleiben von Radionukliden in der Umwelt
- Anreicherung in der Nahrungskette und Aufnahme über die Atemluft

Obwohl die Emissionen kerntechnischer Anlagen sehr zuverlässig erfasst und kontrolliert werden, findet dennoch eine umfangreiche Immissionsüberwachung statt. Diese Immissionsüberwachung erlaubt es, Radioaktivitätsgehalte in den für den Menschen wichtigsten Umweltmedien festzustellen und die Strahlenbelastung abzuschätzen.

Emissionsüberwachung

Die beim Umgang mit radioaktiven Substanzen in vielen Fällen unvermeidlichen Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umwelt werden bei kerntechnischen Anlagen kontrolliert und bilanziert. Die Messung und Bilanzierung der Emissionen erfolgen hierbei für die beiden Abgabepfade Abluft und Abwasser. Sowohl von Frankreich als auch von der Schweiz wurden dankenswerterweise die Emissionsmessergebnisse der an der Grenze zu Baden-Württemberg gelegenen kerntechnischen Anlagen zur Verfügung gestellt. Insgesamt lagen auch für den Zeitraum 1998 bis 2001 bei allen Anlagen die Abgaben an radioaktiven Stoffen unter den genehmigten Abgabehöchstwerten.

Anlagen in Baden-Württemberg

Abgaben mit der Abluft

Bei kerntechnischen Anlagen wird grundsätzlich die gesamte Fortluft über den Kamin abgeleitet und überwacht. Die Abgaben radioaktiver Stoffe werden dabei getrennt nach Nuklidgruppen überwacht und bilanziert. Artverwandte Nuklide werden dabei zu Nuklidgruppen zusammengefasst. Die Nuklide einer Nuklidgruppe werden mit dem jeweils gleichen Messverfahren ermittelt. Folgende Nuklidgruppen und Einzelnuclide werden bei deutschen kerntechnischen Anlagen überwacht und bilanziert:

- Radioaktive Gase
Bei Kernkraftwerken handelt es sich vorwiegend um kurzlebige radioaktive Isotope der Edeltgase Xenon und Krypton. Bei der Wiederaufarbeitungsanlage für bestrahlte Kernbrennstoffe auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe war während ihres Betriebs (bis Ende 1990) Krypton-85 bestimmend. Bei Isotopenproduktionsanlagen oder Forschungsanlagen waren bzw. sind es vorwiegend Argon-41 oder kurzlebige Gase, die durch Aktivierung von Luftbestandteilen entstanden sind. Auch Anlagen, die derzeit stillgelegt werden, könnten noch Edeltgase abgeben, solange nicht alle Brennelemente entladen und abtransportiert sind.
- Radioaktive Aerosole
Hier unterscheidet man zwischen Aerosolen, die bei ihrer Kernumwandlung Alpha-Teilchen emittieren (Alphastrahler wie z. B. Americium oder Plutonium) und solchen, die Beta-Teilchen abgeben. Die meisten Kernumwandlungen werden zusätzlich von Gammastrahlung begleitet. Die Beta-/Gamma-Aerosole können die unterschiedlichsten Spaltprodukte enthalten, wie z. B. Cäsium-134 oder Strontium-90. Sie können aber auch durch Aktivierung entstanden sein, wie z. B. Kobalt-60. Man spricht deshalb auch von Spalt- und Aktivierungsprodukten.
- Radioiod
Beim bestimmungsgemäßen Betrieb von Kernkraftwerken haben die Isotope Iod-131 und bei der Behandlung bestrahlter Kernbrennstoffe in einer Wiederaufarbeitungsanlage oder Forschungseinrichtung Iod-129 die größte Bedeutung. Für die medizinische Diagnostik und Therapie werden zudem die kurzlebigen Nuklide Iod-123 und Iod-125 hergestellt, die sowohl bei der Produktion als auch bei der Anwendung abgaberelevant werden können.
- Tritium in Form von HTO
Dieses ist ein spezielles Wassermolekül, bei dem ein "normales", inaktives Wasserstoffatom durch ein überschweres Wasserstoffatom, das radioaktive Tritiumatom, ersetzt ist. Wegen der physikalisch/chemischen Eigenschaften des Wassers und der Strahlungseigenschaften des Tritiums wird dieses Nuklid separat überwacht.
- Strontium-90 und Strontium-89
Diese Radionuklide nehmen bei der Überwachung eine besondere Stellung ein, da sie bei der Kernspaltung mit hoher Ausbeute entstehen, teilweise sehr lange physikalische und biologische Halbwertszeiten haben bzw. hohe Radiotoxizität aufweisen und als reine Beta-Strahler nur mit besonderem Aufwand identifiziert werden können.
- Alpha-Strahler
Ausser den über Brutprozesse gebildeten Transurane treten bei Kernspaltungsvorgängen kaum langlebige Alphastrahler auf. Wegen ihrer hohen Radiotoxizität werden künstlich erzeugte Alphastrahler getrennt erfasst.
- Kohlenstoff-14
sowohl in Form von Kohlendioxid, als auch in anderen chemischen Verbindungen.

Beim Forschungszentrum Karlsruhe werden die Nuklidgruppen „radioaktive Gase“, „Aerosole“ und „Radioiod“ nochmals aufgespalten, sodass dort neben den Edeltgasen auch kurzlebige radioaktive Aktivierungsgase und verschiedene Iodisotope bilanziert werden müssen. Sowohl alpha- als auch betastrahlende Aerosole werden in eine kurzlebige (Halbwertszeit bis zu 8 Tagen) und in eine langlebige Fraktion (Halbwertszeit mehr als 8 Tage) aufgeteilt.

Die Abbildungen 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 und 4.6 zeigen für die Jahre 1980 - 2001 die für die baden-württembergischen kerntechnischen Großanlagen ermittelten Emissionen mit der Fortluft. Für einzelne Anlagen auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe werden für das Jahr 2000 die Emissionen gesondert in der Abbildung 4.7 dargestellt.

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft

1980 - 2001

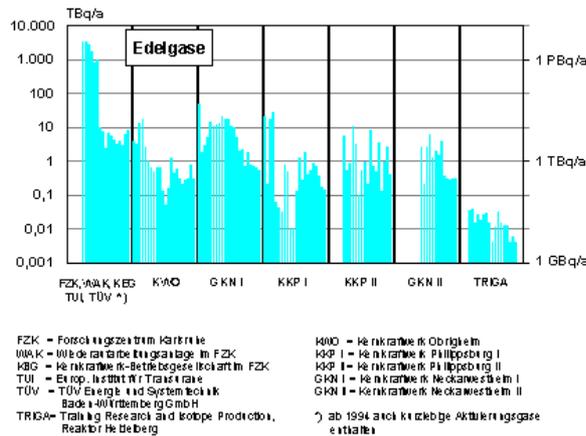


Abbildung 4.1

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft

1980 - 2001

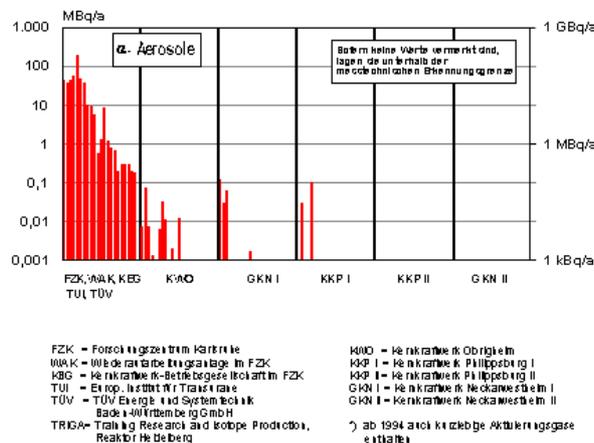


Abbildung 4.2

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft

1980 - 2001

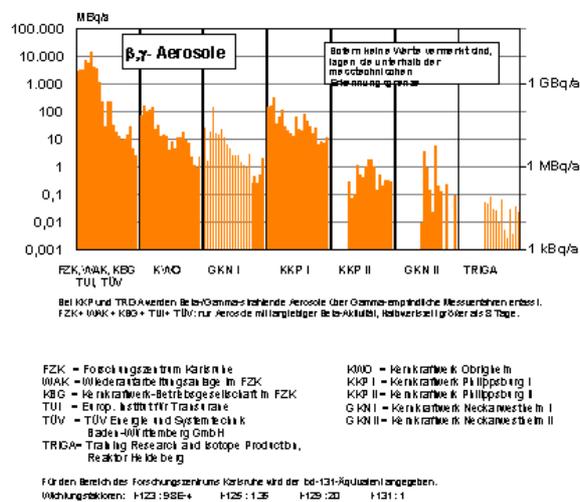


Abbildung 4.3

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft

1980 - 2001

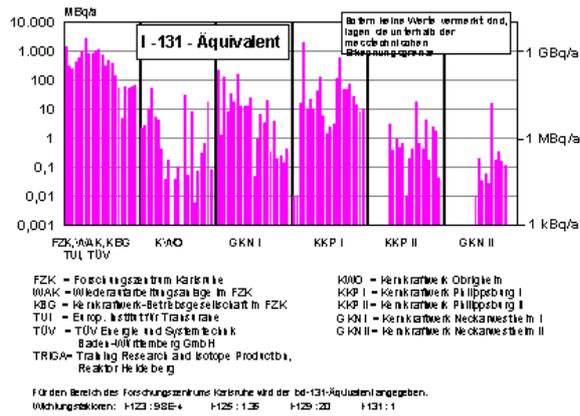


Abbildung 4.4

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft

1980 - 2001

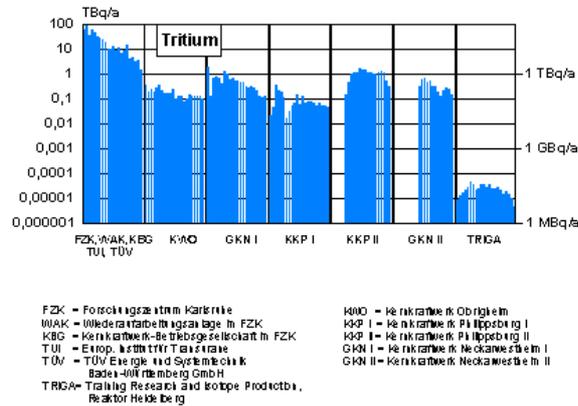


Abbildung 4.5

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft

1980 - 2001

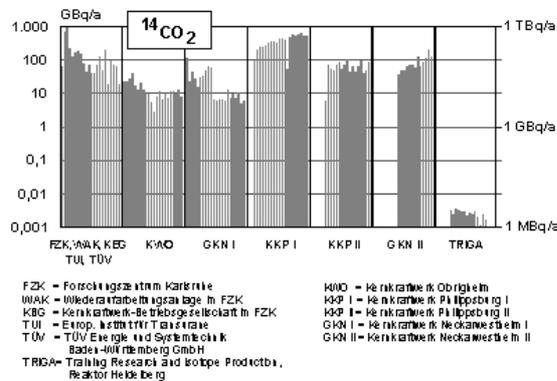
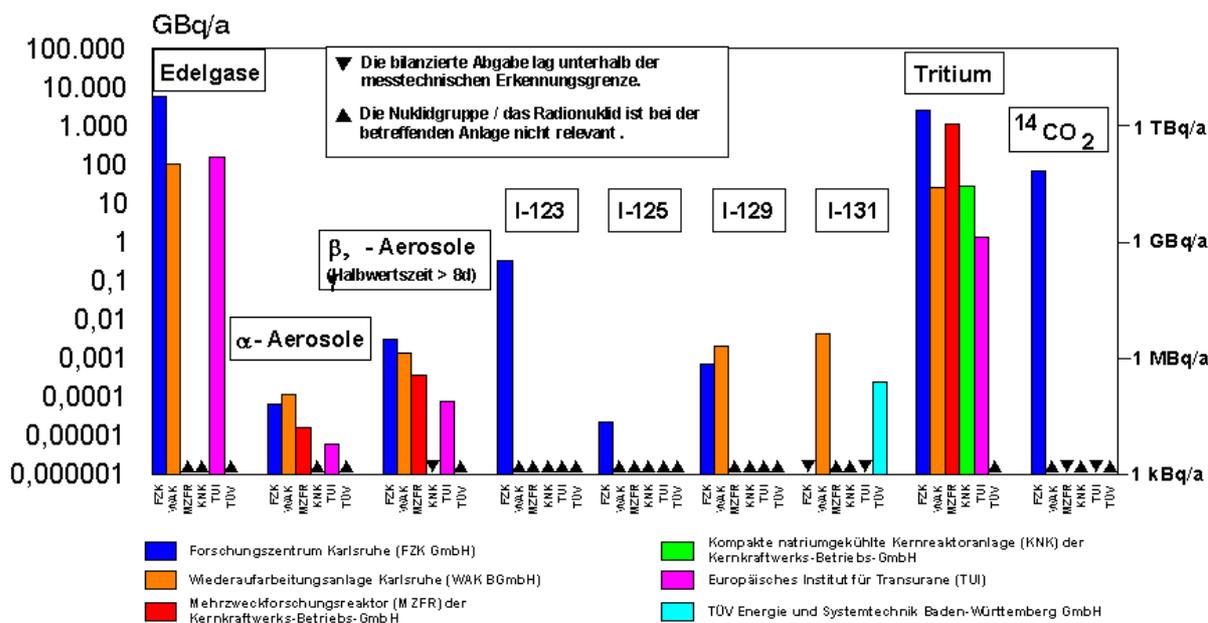


Abbildung 4.6

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft bei Anlagen auf dem Gelände des Forschungszentrums im Jahr 2000



Anmerkungen: Beim FZK enthalten die Edelgase auch kurzlebige, radioaktive Aktivierungsgase.
 Der Anteil der kurzlebigen β -strahlenden Aerosole beim FZK ist in der Darstellung nicht enthalten, er beträgt jedoch weniger als 2% der Ableitungen langlebiger Betaaktivität.
 Der Anteil von Strontium-90 bei der WAK beträgt 1,29 MBq und ist im Wert für β -Aerosole enthalten.
 Der Anteil von Plutonium-241 bei der WAK beträgt 4,58 MBq und ist im Wert für β -Aerosole enthalten.

Abbildung 4.7

Radioaktive Gase

Die aus Abbildung 4.1 ersichtlichen Edelgasemissionen spiegeln sowohl die leistungsabhängige Produktionsrate von Edelgasen als auch die Dichtheit der Brennelementhüllen beim Betrieb von Kernkraftwerken wider. Bei Forschungseinrichtungen wird bestrahlter Brennstoff z. T. in offener Form gehandhabt, weshalb auch hier Emissionen auftreten. Bei den niedrigen Emissionsraten fallen die Schwankungsbreiten innerhalb der einzelnen Jahre und unter den einzelnen Anlagen groß aus.

In die Emissionen des Forschungszentrums Karlsruhe sind in Abbildung 4.1 die Abgaben aus den zwischenzeitlich stillgelegten Anlagen zur Wiederaufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe, dem "Mehrzweckforschungsreaktor", der "Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage" und dem "Europäischen Institut für Transurane" sowie dem auf dem Gelände befindlichen TÜV-Labor einbezogen. Die Reaktoren wurden von der Kernreaktor-Betriebsgesellschaft mbH (KBG) betrieben. Ihre Edelgasemissionen setzten sich vorwiegend aus Xenonisotopen zusammen.

Man erkennt aus Abbildung 4.1, dass mit der Einstellung der Wiederaufarbeitung zum Jahresende 1990 die Emissionsraten der Edelgase deutlich zurückgingen. Zur Jahresmitte 2001 wurde auch der Brennstoff des Forschungsreaktor TRIGA Heidelberg entladen.

Das Krypton-85 aus der Gruppe der radioaktiven Edelgase ist in jüngster Vergangenheit wieder im Ansteigen begriffen (siehe Abbildung 3.8). Da mit Beendigung des Versuchsbetriebs der deutschen Wiederaufarbeitungsanlage von dort keine Abgaben mehr erfolgen, ist der Anstieg der spezifischen Aktivität des Krypton-85 in der Luft auf ausländische Wiederaufarbeitungstätigkeiten zurückzuführen.

Alle anderen künstlich erzeugten radioaktiven Edelgase (vorwiegend Xenon-133) sind wegen ihrer geringen Halbwertszeiten allenfalls noch in der unmittelbaren Nähe kerntechnischer Anlagen in Spuren nachweisbar. So liegt der rechnerische Wert der spezifischen Xenon-133-Aktivität für das Immissionsmaximum bei realistischen Standortannahmen langfristig im Bereich von 1 Bq/m³.

Die durch diese künstlich erzeugten radioaktiven Edelgase verursachte durchschnittliche effektive Strahlenbelastung ist gering. Sie liegt selbst im Nahfeld eines Kernkraftwerks um etwa drei Größenordnungen unter der Strahlenbelastung, die durch die natürlichen radioaktiven Edelgase Radon (Radon-222 und Radon-220) bedingt ist (siehe Kapitel 3).

Radioaktive Aerosole

Alphastrahlende Aerosole

Beim Normalbetrieb von Kernkraftwerken treten wegen der Dichtheit der Brennstabhüllen erfahrungsgemäß in der Abluft kaum alphastrahlende Radionuklide wie z. B. Plutonium oder Americium auf. So liegen hier die meisten Messergebnisse bei oder unterhalb der messtechnisch möglichen Erkennungsgrenze (Abbildung 4.2).

Anders liegen die Verhältnisse im Bereich des Forschungszentrums Karlsruhe. Durch den Umgang mit radioaktiven Abfällen und bestrahlten Kernbrennstoffen in offener Form sowie durch die Demontage von Kernanlagen und Kontrollbereichen sind hier mit empfindlichen Messverfahren alphastrahlende Aerosole in der Abluft nachweisbar.

Beta-/gammastrahlende Aerosole

Im Gegensatz zu den alphastrahlenden Aerosolen waren bei allen in Betrieb befindlichen kerntechnischen Anlagen beta-/gammastrahlende Radionuklide in der Abluft nachweisbar (Abbildung 4.3). Bei Kernkraftwerken treten sie vorwiegend während der Revision auf. Beim Forschungszentrum Karlsruhe entstehen sie abhängig vom Betrieb der Abfallbehandlungsanlagen sowie bei der Stilllegung von Kontrollbereichen und Anlagen aus der Wiederaufarbeitung (Abbildung 4.7). Kurzlebige Aerosole sind in ihren Emissionsraten durchweg gegenüber den längerlebigen Aerosolen vernachlässigbar.

1997 wurden vom TRIGA-Reaktor in Heidelberg auch kurzlebige gasförmige Bromisotope abgegeben (Brom-80: 2 GBq, Brom-80m: 0,05 GBq, Brom-82: 0,001 GBq, Brom-82m: 0,9 GBq), die in der Abbildung 4.3 (langlebige β/γ -Aerosole nicht enthalten sind).

Radioiod

Die menschliche Schilddrüse nimmt das dem Körper über die Atemluft und die Nahrung angebotene Iod und damit auch das radiologisch bedeutsame kurzlebige radioaktive Iod-131 fast vollständig auf. Bei Kernkraftwerken ist deshalb dem flüchtigen Iod-131 wegen seiner radiologischen Wirksamkeit besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Bei der Wiederaufarbeitung von bestrahltem Kernbrennstoff spielte vor allem wegen der langen Abklingzeit Iod-131 radiologisch

praktisch keine Rolle. Demgegenüber ist hier - auch nach Beendigung des Betriebs - das langlebige Iod-129 (Halbwertszeit 15,7 Mio Jahre) von Bedeutung. Der Vergleichbarkeit wegen wurden in der Abbildung 4.4 alle Iodisotope berücksichtigt. Bei den Emittenten auf dem Gelände des Forschungszentrums wurden alle Iodisotope mit einem auf Iod-131 bezogenen Umrechnungsfaktor versehen (Iod-131-Äquivalent) und als Iod-131-Emissionswert dargestellt. - Die nuklidspezifischen Emissionen für die einzelnen Emittenten sind im Detail der Abbildung 4.7 zu entnehmen. Dort ist auch ersichtlich, dass für mehrere Anlagen gewisse Iodisotope nicht relevant sind.

Während die Abgaben der Forschungs- und Versuchsanlagen über lange Jahre hinweg gegenüber den Kernkraftwerken dominierten, sind die Iod-Emissionen in den vergangenen Jahren hier deutlich zurückgegangen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass sie hauptsächlich durch die Wiederaufbereitungsanlage und die Abfallbehandlung bestimmt worden waren.

In den Iod-Emissionen der Kernkraftwerke ist keine Systematik zu erkennen. Teilweise lagen die durch Messung ermittelten Werte bei oder unterhalb der messtechnischen Erkennungsgrenze. Dies deutet auf gute und dichte Brennstabhüllrohre hin. Die Emissionsraten einiger Anlagen schwanken teilweise um mehr als eine Größenordnung. Dies kann auf Materialverbesserungen und Qualitätskontrollen zur Verbesserung der Brennstabhüllen zurückgeführt werden, die zu einer Verminderung der Abgabebilanz führen.

Tritium

Tritium entsteht bei Kernreaktoren im Brennstoff und im Kühlwasser. Die hauptsächliche Abgabe erfolgt mit dem Abwasser. Die Tritiumabgaben mit der Fortluft unterscheiden sich zwischen den einzelnen Anlagen (Abbildung 4.5) stark. Dies hängt mit der Verschiedenartigkeit der Anlagen zusammen; offenbar schneiden Siedewasserreaktoren i. a. günstiger ab als Druckwasserreaktoren. Ferner spielen die Leistung, die Betriebsfahrweise und das Anlagenverhalten sowie der Inbetriebnahmezeitpunkt und die Betriebsdauer eine wichtige Rolle.

Die Emissionen der Kernkraftwerke korrelieren in etwa mit den jeweiligen jährlichen Betriebsdauern und erreichen bei vergleichbarer Fahrweise schon nach wenigen Jahren einen Sättigungswert. Die Emissionen bei Anlagen im Bereich des Forschungszentrums Karlsruhe hingegen nahmen wegen der Stilllegung bzw. Ausserbetriebnahme von Anlagen und bedeutsamen Tritiumquellen bis Anfang der 90er Jahre ständig ab. Auch in den Jahren 1998 bis 2001 dominierten bei den Tritiumabgaben Anlagen der Abfallbehandlung und der stillgelegte Mehrzweckforschungsreaktor. Demgegenüber wird die verschwindend geringe Tritiumemission beim TRIGA fast ausschließlich durch die Verdunstungswassermenge bestimmt.

Kohlenstoff-14

Der bei der Kernenergieerzeugung gebildete und freigesetzte Kohlenstoff-14 in Form von Kohlendioxid (Abbildung 4.6) ist im Wesentlichen proportional der erzeugten Energie. Neben radioaktivem Kohlendioxid wird bei Druckwasserreaktoren auch noch organisch gebundener Kohlenstoff-14 v. a. in Form von Methan emittiert. Messwerte hierzu liegen seit einigen Jahren vor: GKN I: 231 GBq/a (2000) bzw. 159 GBq/a (2001); GKN II: 198 GBq/a (2000) bzw. 137 GBq/a (2001); KKP II: 140 GBq/a (2000) bzw. 200 GBq/a (2001); KWO: 71 GBq/a (2000) bzw. 48 GBq/a (2001). Zu bemerken ist dabei, dass das Methan als flüchtiges Gas in die Atmosphäre gelangt und im Gegensatz zum radioaktiven Kohlendioxid nicht an den pflanzlichen Assimilationsprozessen in der Umgebung der Anlage teilnimmt und somit sein Beitrag zur lokalen Dosisbelastung vernachlässigbar ist. Ein Teil des erzeugten Kohlenstoff-14 wurde während der Wiederaufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe auch dort freigesetzt. Heute beherrschen beim Forschungszentrum Karlsruhe die bei der Abfallbehandlung auftretenden Abgaben die Emissionssituation praktisch vollständig. Anders als bei den Tritiumemissionen weist beim Kohlenstoff-14 der Siedewassertyp des Kernkraftwerks Philippsburg II höhere Emissionsraten auf als der Druckwasserreaktor des benachbarten Kernkraftwerks Philippsburg II.

Zur Verdeutlichung der Verhältnisse im Forschungszentrum Karlsruhe sind in Abbildung 4.7 die radioaktiven Ableitungen an Kohlenstoff-14 mit der Fortluft für 2000 getrennt für die verschiedenen Anlagen bzw. Betreibergesellschaften dargestellt.

Abgaben mit dem Abwasser

Bei kerntechnischen Anlagen wird auch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser überwacht und bilanziert. Man unterscheidet entsprechend den vorgeschriebenen Überwachungsmethoden nach Ableitungen von alpha- bzw. beta-/gammastrahlenden Radionukliden und Tritium.

Die beta- bzw. gammastrahlenden Radionuklide im Abwasser kommen hauptsächlich aus zwei Quellen. Sie entstehen einerseits bei den Spaltvorgängen im Kernbrennstoff, und andererseits durch Neutronenaufnahme (Aktivierung) von vorher nicht aktiven Substanzen. Durch kleinste Leckagen in den Brennelementhüllrohren sowie durch überwiegend korrosionsbedingten Materialabtrag kommen diese sogenannten Spalt- und Korrosionsprodukte in das Wasser des Primärkreislaufes und von dort in Spuren nach außen.

Alphastrahler

Erhöhte Gehalte von Alphastrahlern im Wasser weisen bei Kernkraftwerken auf Brennstabschäden hin. Die Messergebnisse zeigen, dass die Emissionsraten von Alphastrahlern in die Vorfluter der Kernkraftwerke bei relativ niedrigen Werten oder gar unterhalb der messtechnischen Erkennungsgrenzen liegen. (Abbildung 4.8).

Emissionen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser

1980 - 2001

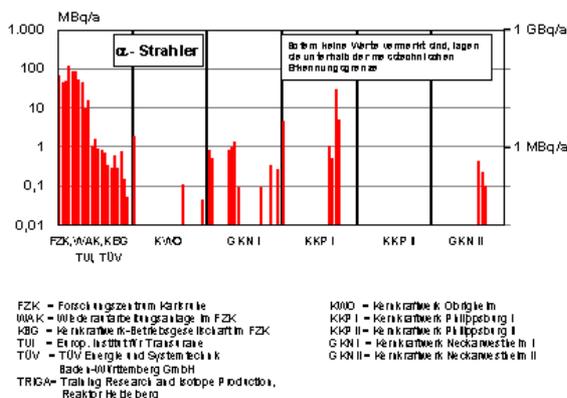


Abbildung 4.8

Beim Forschungszentrum Karlsruhe ist ein langfristiger Trend zu immer niedrigeren Abgaben von künstlichen Alphastrahlern mit den Abwässern zu erkennen. Die Gründe liegen hauptsächlich beim abnehmenden Kernforschungsanteil des Forschungszentrums. Die Abgaberaten sind heute in ihrer Höhe mit denen eines Kernkraftwerks trotz der langjährigen Wiederaufarbeitungstätigkeit vergleichbar. Als bestimmende Nuklide für Alpha-Strahler, die bei der Abwasserabgabe zu bilanzieren sind, werden die Transurane Plutonium-238 bis Plutonium-240 zugrunde gelegt. Die Ableitungen betragen 2001 nur noch 0,05 MBq.

Beta-/Gammastrahler

Die Erzeugung von beta-/gammastrahlenden Spaltprodukten ist abhängig von der erzeugten Energie. Das Auftreten künstlicher Radionuklide im Abwasser hängt von der Dichtigkeit der Umhüllung des Brennstoffs und der Leistungsfähigkeit der Wasserreinigungsanlagen ab. Früher wurden bei der Wiederaufarbeitung sowie bei einigen Untersuchungsaufgaben im Forschungszentrum Karlsruhe die Brennstoffumhüllungen bewusst entfernt und der abgebrannte Kernbrennstoff mit den darin enthaltenen Spaltprodukten bearbeitet. Diese Arbeiten sind seit den 90er Jahren eingestellt, was sich auch in den Abgabebilanzen niederschlägt. Auch wurde die Zahl der Kontrollbereiche deutlich verringert.

Beim Forschungszentrum Karlsruhe werden auch die Abgaben von Kohlenstoff-14 und Plutonium-241 bilanziert. Dies sind weder Spalt- noch Korrosionsprodukte und deshalb auch nicht in der Abbildung 4.9 dargestellt. Im Jahr 2000 betragen die Ableitungen von Plutonium-241 mit dem Wasser 1,1 MBq im Jahr 2001 waren es 2,1 MBq.

Emissionen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser

1980 - 2001

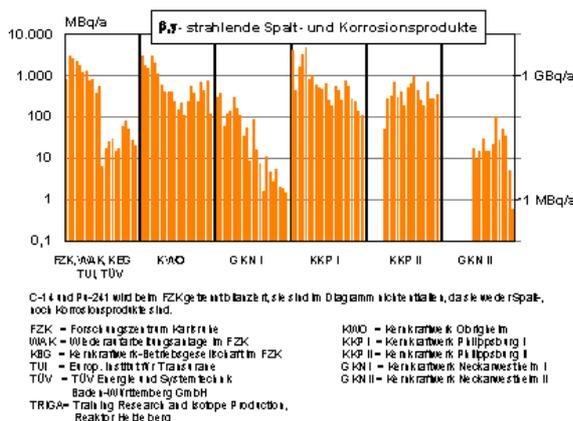


Abbildung 4.9

Die Abgaberaten der Kernkraftwerke schwankten über die Jahre stark, so dass eine allgemeine Tendenz nicht feststellbar ist. Die Kernkraftwerke sind mit dem Forschungszentrum Karlsruhe anlagentechnisch nicht vergleichbar (siehe Abbildung 4.9).

Tritium

Aus der Abbildung 4.10 ist erkennbar, dass die Druckwasserreaktoren über den Abwasserpfad jeweils mehr Tritium abgeben als der Siedewasserreaktor Philippsburg I. Auch gingen die Abgaben des Forschungszentrums in Einklang mit der Stilllegung von Tritium erzeugenden Anlagen, z. B. des Mehrzweckforschungsreaktors, zurück. Die geringere Emission des Kernkraftwerks Obrigheim im Jahr 1991 wurde durch eine längere, gerichtsverfügte Stillstandsphase bewirkt. Tritium ist - langfristig betrachtet - im Abwasserpfad das häufigste, nachzuweisende künstliche Radionuklid.

Emissionen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser

1980 - 2001

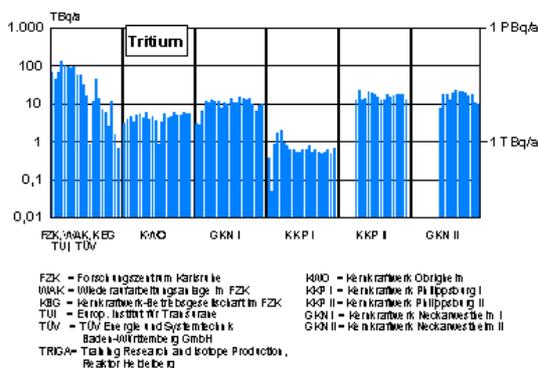


Abbildung 4.10

Grenznahe ausländische Anlagen

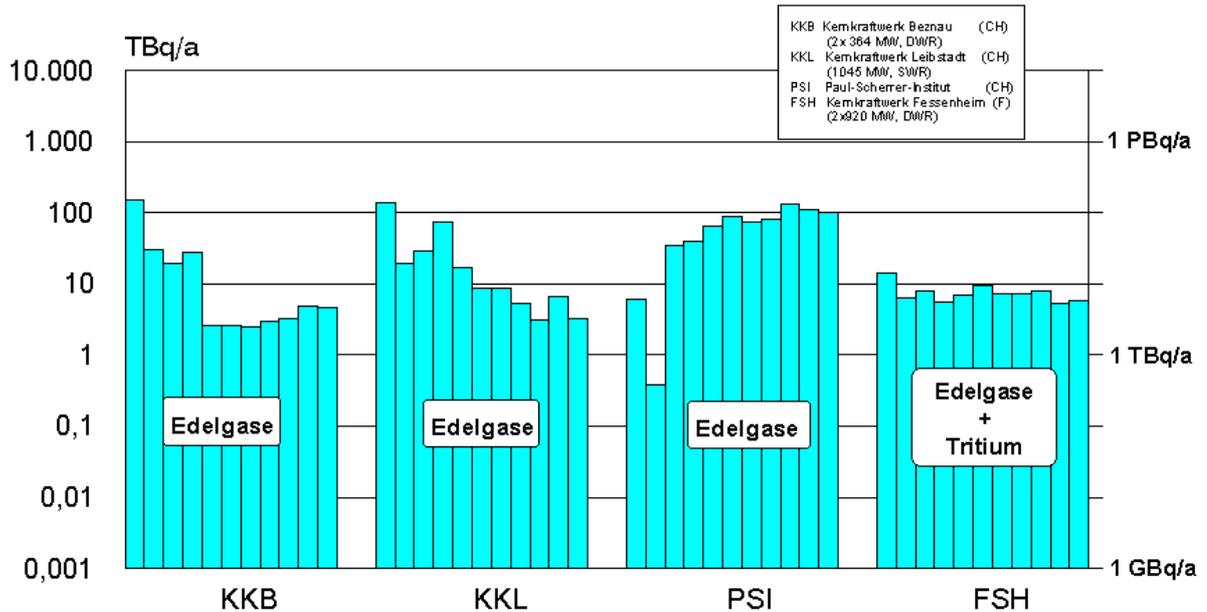
An der Grenze zu Baden-Württemberg befinden sich verschiedene größere kerntechnische Anlagen. In der Nordschweiz sind es die beiden Kernkraftwerke Beznau (2 Blöcke) und Leibstadt sowie die Anlagen des Paul-Scherrer-Instituts, eines Kernforschungszentrums an der Aare, südlich von Waldshut. Im südlichen Elsaß sind es die beiden französischen Kernkraftwerke in Fessenheim westlich von Bad Krozingen sowie ein Unterrichtsreaktor bei Straßburg.

Diese Anlagen sind reaktorphysikalisch und verfahrenstechnisch mit den in Baden-Württemberg befindlichen vergleichbar. Die Überwachung der Emissionen nach Radionuklidgruppen erfolgt aufgrund nationaler Vorschriften. Die Angaben können deshalb nicht in jedem Fall mit den zuvor genannten Nuklidgruppen und Emissionswerten baden-württembergischer Anlagen verglichen werden. Auch bedingen andere nationale Dosisgrenzwertvorgaben z. B. in der Schweiz oder die orographische Lage z. B. des Kernkraftwerks Fessenheim am Grand Canal d'Alsace andere Emissionsgrenzwerte als bei baden-württembergischen Anlagen.

Abgaben mit der Abluft

In den nachfolgenden Abbildungen 4.11, 4.12 und 4.13 sind für die Jahre 1991 - 2001 die für den jeweiligen ausländischen Standort zusammengefassten Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft dargestellt. Im Gegensatz zur deutschen Überwachungspraxis werden bei schweizerischen Anlagen auf Argon-41 bzw. Xenon-133 bezogene Edelgasäquivalente angegeben. In der Schweiz brauchen bilanzierte Abgaben unterhalb von 1 % des Genehmigungswertes (sog. Abgabelimit) nicht mehr näher angegeben zu werden. Das Kernkraftwerk Beznau lag in den Jahren 1998 bis 2001 bei Aerosolen unterhalb dieses Limits. Die französischen Vorschriften gestatteten bisher die zusammenfassende Messung und Angabe einerseits der im Abluftpfad emittierten Edelgase mit dem Tritium und andererseits aller Aerosole zusammen mit den Radioiodisotopen. Gelegentlich sind auch Einzelwerte getrennt verfügbar.

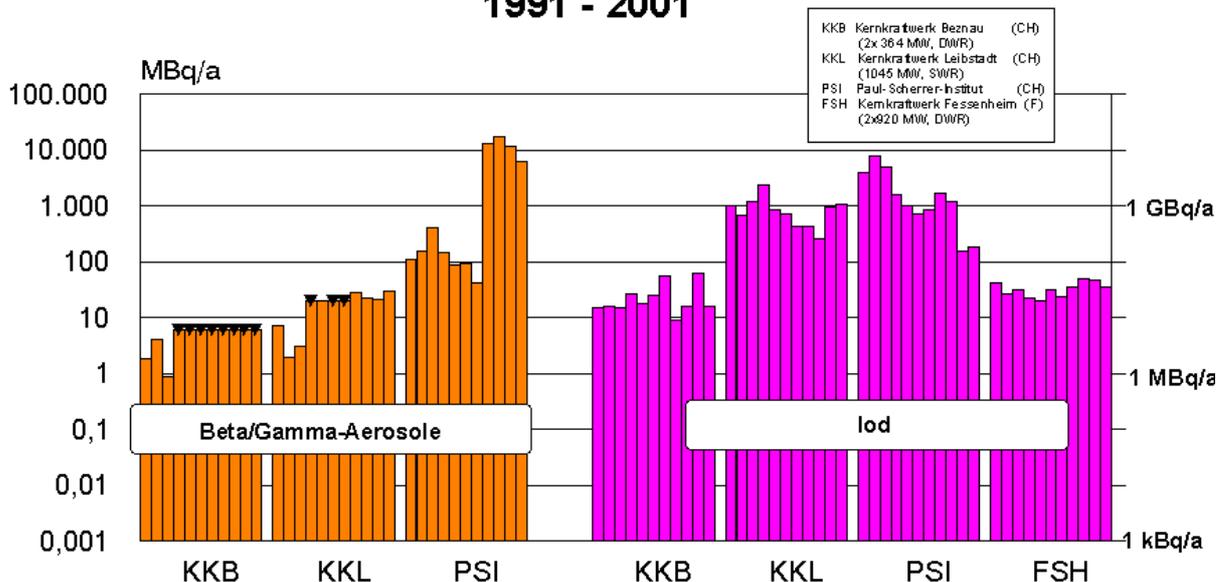
Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft bei kerntechnischen Anlagen des grenznahen Auslandes 1991 - 2001



Bei FSH werden Edelgase und Tritium zusammengefasst; in der Schweiz werden die Edelgase beim PSI als Argon-41-Äquivalent angegeben.

Abbildung 4.11

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft bei kerntechnischen Anlagen des grenznahen Auslandes 1991 - 2001

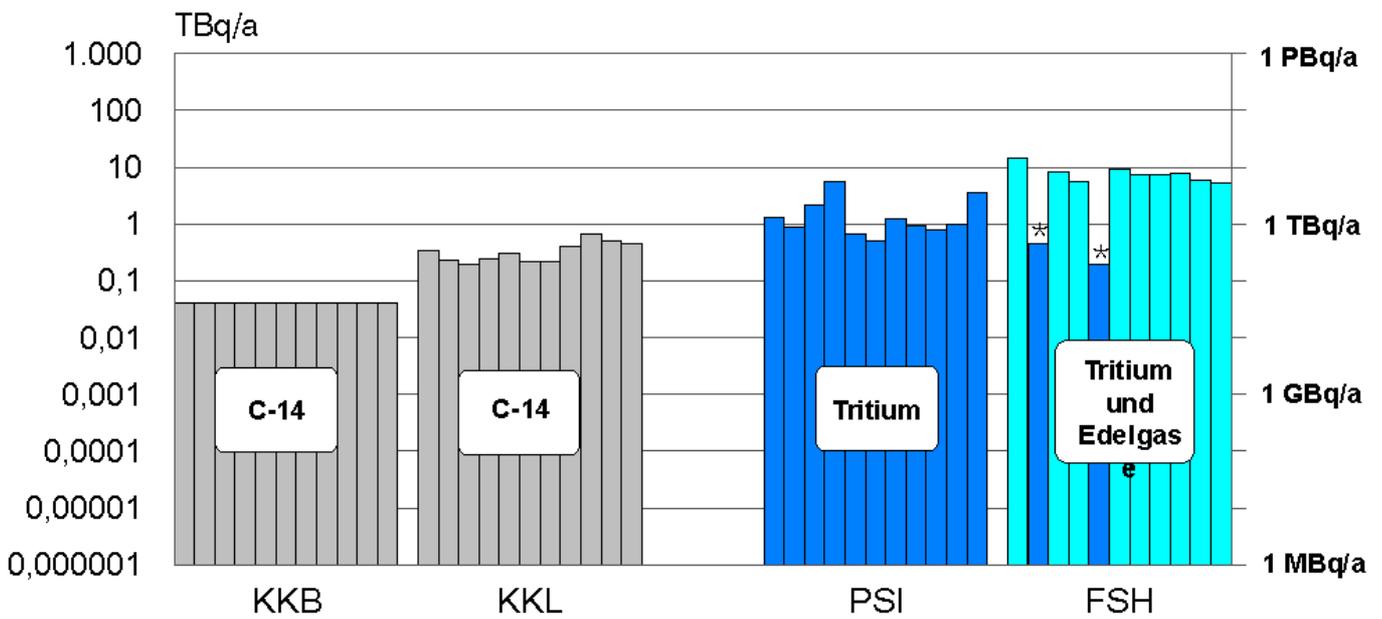


PSI: Kurzlebige Aerosole mit $HWZ < 8d$ liegen in der Abgaberrate gegenüber den langlebigen bis einschließlich 1994 bei vernachlässigbaren Werten. Die Emission kurzlebiger Radionuklide lag im Jahr 1997 bei 2,4 GBq; sie tragen jedoch zur aerosolbedingten Dosis maximal zu ca. 50 % bei. Für das PSI wird das I-131-Äquivalent angegeben.

FSH: Aerosole und Radioiodisotope werden als Summe angegeben. (Der I-131-Anteil betrug 1995 2,8 MBq)

Abbildung 4.12

Emissionen radioaktiver Stoffe mit der Abluft bei kerntechnischen Anlagen des grenznahen Auslandes 1991 - 2001



KKB: Abschätzung der schweizerischen atomrechtlichen Aufsichtsbehörde aufgrund Messungen früherer Jahre.
Bei * ist nur Tritium allein dargestellt.

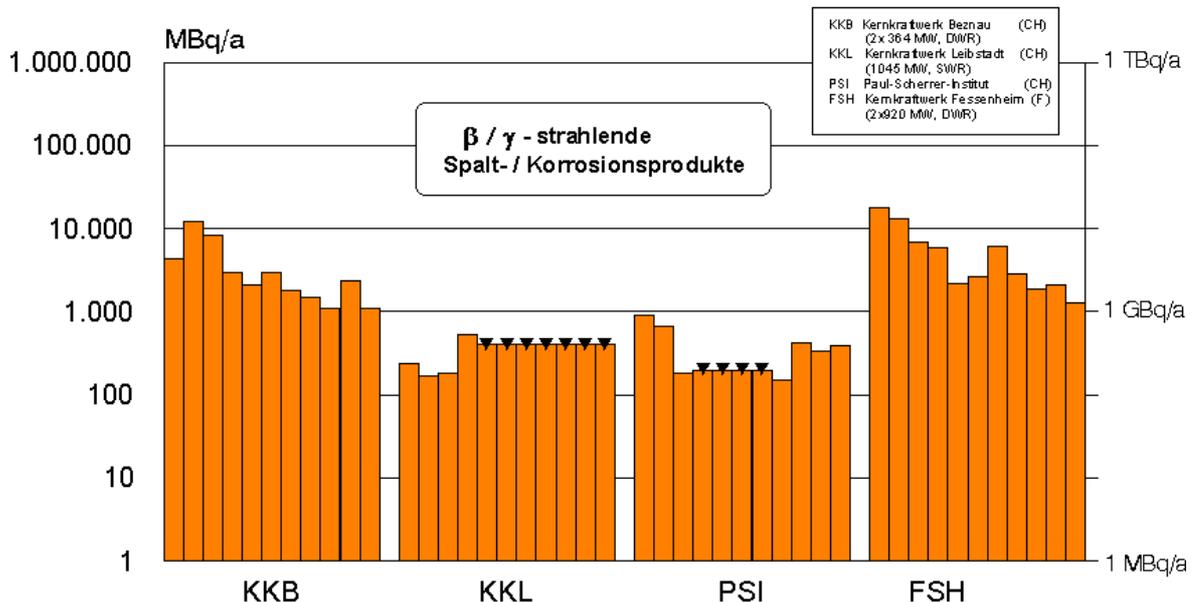
Abbildung 4.13

Ein Erfordernis zur Tritiumbestimmung in der Abluft besteht bei schweizerischen Kernkraftwerken nicht, demgegenüber verzichten die französischen Kontrollbehörden auf die Ermittlung der Radiokohlenstoffemission, da diese sich aus den Leistungs- und Betriebsdaten auch errechnen lässt.

Abgaben mit dem Abwasser

In den Abbildungen 4.14 und 4.15 sind die für den jeweiligen ausländischen Standort zusammengefassten Emissionen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser über mehrere Jahre dargestellt. Die Aufteilung erfolgte nach den üblichen Nuklidgruppen der beta-/gammastrahlenden Spalt- und Korrosionsprodukte und dem Tritium.

Emissionen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser bei kerntechnischen Anlagen des grenznahen Auslandes 1991 - 2001



KKB	Kernkraftwerk Beznau	(CH)
	(2 x 364 MW, DWR)	
KKL	Kernkraftwerk Leibstadt	(CH)
	(1045 MW, SWR)	
PSI	Paul-Scherrer-Institut	(CH)
FSH	Kernkraftwerk Fessenheim	(F)
	(2 x 920 MW, DWR)	

▼ Nachweisgrenze

Abbildung 4.14

Emissionen radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser bei kerntechnischen Anlagen des grenznahen Auslandes 1991 - 2001

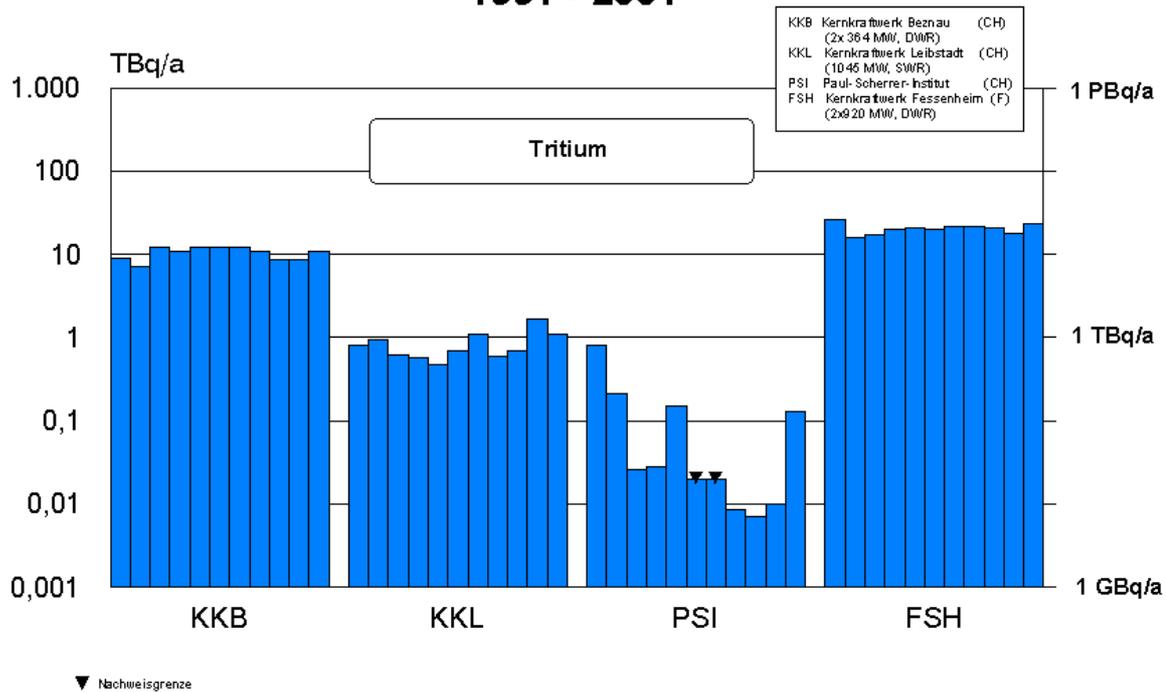


Abbildung 4.15

Die ermittelten Tritiumemissionen (Abbildung 4.15) waren demgegenüber zwar deutlich messbar, die genehmigten Abgaben wurden aber nicht ausgeschöpft. Erwartungsgemäß liegt der Siedewasserreaktor des Kernkraftwerks Leibstadt günstiger in der Abgabebilanz als die Druckwasserreaktoren.

Immissionsüberwachung

Die Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen untergliedert sich in die radiologische Umgebungsüberwachung und in das Kernreaktorfernüberwachungssystem (KFÜ) mit seinen über 100 Immissionsmessstationen. Dieses System ermittelt rund um die Uhr vollautomatisch aktuelle Dosisleistungsmesswerte und leitet sie an die Landesanstalt für Umweltschutz weiter. Die radiologische Umgebungsüberwachung beinhaltet das Ausmessen einer Vielzahl von Einzelproben aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen sowie das Training für eventuell erforderliche Störfallmessungen. Die hierbei gewonnenen Messwerte müssen zu den entsprechenden Messwerten der allgemeinen Überwachung der Radioaktivität in Beziehung gesetzt werden, um unzulässige Einwirkungen einer kerntechnischen Anlage auf die Umgebung feststellen zu können.

Die aktuell in die Umwelt gelangten künstlichen Radionuklide können aus sehr unterschiedlichen Quellen stammen. Die bedeutsamsten Abgaben stammen von den Kernkraftwerken. Radionuklide werden aber auch in der Nuklearmedizin, bei der Abfallbehandlung und in geringem Umfang bei Anwendungen in Industrie und Gewerbe sowie über Recyclingprozesse, z. B. bei der Schrottverwertung freigesetzt. Die Zusammensetzungen der freigesetzten Radionuklidgemische sind abhängig von der Entstehungsgeschichte und dem Verwendungszweck der Radionuklide. Sie sind sehr unterschiedlich und meist charakteristisch für die Quelle. So setzt z. B. die Nuklearmedizin möglichst kurzlebige und reine Substanzen wie Iod-125, Iod-131 oder Molybdän-99 / Technetium-99m-Generatorsysteme (siehe Kapitel 1) ein. Diese Radionuklide können, da sie am Patienten angewendet werden, nach Ausscheidung aus dem Körper über Stuhl und Urin dann noch gelegentlich in Kläranlagen und Müllbehandlungsanlagen nachgewiesen werden (siehe Kapitel 3).

Abgaben kerntechnischer Anlagen enthalten praktisch immer ein Gemisch von mehreren langlebigen Radionukliden. Die Zusammensetzung dieses Gemischs ist für die hier interessierenden Nuklide hinreichend bekannt. Durch die langjährige Überwachung aller wichtigen Medien kennt man die Vorbelastungen durch künstliche Radionuklide gut. Sie bestehen im Wesentlichen aus Spuren von Strontium-90 und Cäsium-137. Die Radionuklide zerfallen unterschiedlich schnell. Das heute anzutreffende Nuklidmuster der Vorbelastung unterscheidet sich deshalb erheblich von dem einer akuten Freisetzung aus einer kerntechnischen Anlage, wo auch kurzlebige Radionuklide zu erwarten sind. Durch die Betrachtung mehrerer Nuklide in einer Probe und durch Vergleich mehrerer Proben aus unterschiedlichen Gebieten lässt sich zuverlässig ermitteln, ob ein frischer Nuklideintrag stattgefunden hat oder nicht.

Mit der ab 1.1.1994 neu geregelten radiologischen Immissionsüberwachung werden alle Umweltmedien sowie alle wichtigen erzeugten Nahrungs- und Futtermittel aus der Umgebung einer kerntechnischen Anlage überwacht. So wurden im Rahmen der Umgebungsüberwachung 2001 allein von der Landesanstalt für Umweltschutz 978 Proben gezogen, an denen 1080 Einzelbestimmungen durchgeführt wurden. In den Überwachungsbereichen waren ferner an insgesamt 176 Stellen je zwei strahlungsempfindliche Flachglasdosimeter zur Ermittlung der Ortsdosis ausgelegt. Als Beispiel zeigen die Detailkarten (Abbildungen 4.16 und 4.17) für das überwachte Gebiet beim Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim die Mess- und Probenentnahmeorte sowie die Auslegungsorte von Doppeldosimetern.

Mess- und Probenahmeorte in der Umgebung des Gemeinschaftskernkraftwerkes Neckarwestheim (GKN)



Abbildung 4.16



Abbildung 4.17

Neben den Messprogrammen der Umgebungsüberwachung, mit denen die Auswirkungen der kerntechnischen Anlagen im Normalbetrieb beobachtet werden, müssen auch organisatorische und messtechnische Vorsorgemaßnahmen getroffen werden, um im Falle eines Störfalls oder Unfalls Strahlenschutzmessungen vornehmen zu können. Hierfür sind Messgeräteausstattungen mit erweitertem Messbereich nötig. Zudem müssen entsprechende Messungen und Probenentnahmen an festgelegten Orten vorher eingeübt werden. Die Trainingsmessungen erstrecken sich vorwiegend auf die systematische Bestimmung abgelagerter künstlicher Aktivität auf dem Boden an einem Teil der ausgesuchten Orte sowie auf die Luftüberwachung und die Ortsdosisermittlung.

Ortsdosis (Äußere Strahlung)

Die durch die äußere Strahlung verursachte Ortsdosis in der Umgebung der Kernkraftwerke wird sowohl von den Messstationen des Kernreaktorfernüberwachungssystems als auch unabhängig davon mit ausgelegten strahlungsempfindlichen Flachglasdosimetern ermittelt.

Im Bereich Leibstadt sind die Stundenmaxima im Jahre 1986 am höchsten. Hier hatte es Ende April/Anfang Mai 1986 geregnet. Die Nuklide wurden aus der radioaktiven Wolke ausgewaschen und auf der Erdoberfläche abgelagert. Der höchste Stundenwert mit 480 nSv/h trat bei der Ortschaft Remetschwil auf. Der dazugehörige Jahresmittelwert betrug 130 nSv/h. Im Laufe der folgenden Jahre ging dieser Jahresmittelwert auf 110 nSv/h zurück, was hauptsächlich eine Folge des Zerfalls der kürzerlebigen Nuklide aus dem Tschernobylunfall war.

Die Messstationen Bremgarten-Rheindamm, Dogern-Wasserwerk und Waldshut-Bahnhof arbeiten erst seit 1990 im automatischen Messnetz. Die Messstationen Waldshut-Kläranlage, Görwihl und Albruck waren 1992 wegen Umbaumaßnahmen vorübergehend außer Betrieb.

Die Übersichtskarten 4.20 bis 4.22 zeigen die Verhältnisse in der Umgebung baden-württembergischer Kernkraftwerke für 1998 bis 2001. Für die einzelnen Stationen sind jeweils wieder die Jahresmittelwerte und der höchste Stundenwert dargestellt.

Ortsdosimetrie mit Flachglasdosimetern

In Abhängigkeit von der Größe des zu überwachenden Gebiets um eine kerntechnische Anlage wurden an mindestens 20 Messorten (Überwachungsgebiet Leibstadt) und an bis zu 44 Messorten (Bereich des Forschungszentrums Karlsruhe) strahlungsempfindliche Flachglasdosimeter eingesetzt. Um gut abgesicherte Messwerte zu erhalten, werden pro Messort jeweils zwei Dosimeter ausgelegt. Die Ergebnisse der Ortsdosismessungen sind für die überwachten Gebiete der Kernkraftwerksstandorte für die Zeit von 1986 - 2001 in Abbildung 4.23 dargestellt. Die jeweiligen Jahresmittelwerte setzen sich dabei aus den Messergebnissen aller im Überwachungsgebiet ausgelegten, auswertbaren Dosimeter zusammen.

Mittlere Ortsdosis an überwachten Standorten

Jahresmittelwerte 1986 - 2001

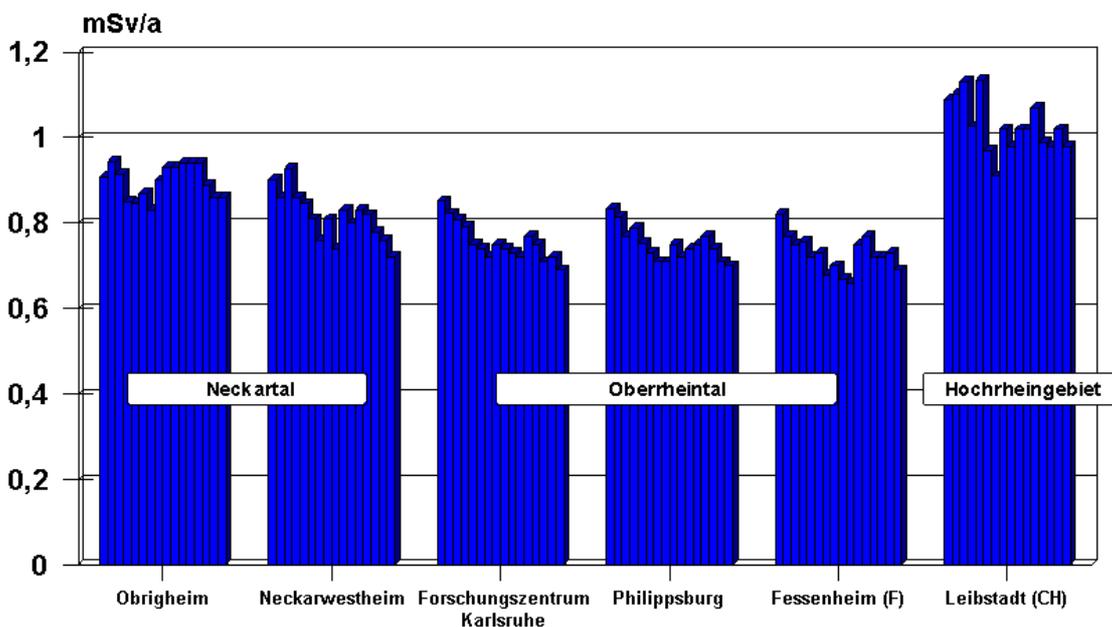


Abbildung 4.23

Die einzelnen Standorte weisen im Rahmen stets auftretender Schwankungen charakteristische Mittelwerte auf. Dies ist dadurch erklärbar, dass für die ermittelte Strahlensituation am Messort hauptsächlich der geologische Untergrund und die nähere Umgebung des Auslegungsorts bestimmend sind. So bewirken hohe natürliche Radiumgehalte des Untergrunds deutlich höhere Ortsdosen. Auch aktivitätshaltige Baustoffe oder das Ausbringen kaliumhaltiger Dünger am Auslegungsort können den Dosimetermesswert nennenswert beeinflussen. Für die genannten Gebiete wurden für 2001 folgende Schwankungsbereiche der Werte in Millisievert pro Jahr (mSv/a) ermittelt:

Bereich	KWO	GKN	FZK	KKP	Fessenh.	TRIGA	KKL
	Neckarraum		Oberrheintal				Hoch-rhein
Maxima	1,24	1,06	0,97	1,21	1,18	1,04	1,52
Gebietsmittelwert	0,86	0,72	0,69	0,70	0,69	0,94	0,98
Minima	0,56	0,50	0,52	0,58	0,45	0,84	0,61

Im Oberrheintal mit seinen sandigen Böden liegen die Ortsdosen am niedrigsten. Die Werte im Hochrheingebiet und Hotzenwald sind am höchsten. Ein Vergleich mit kernkraftwerkfernen Gebieten zeigt, dass die ermittelten Ortsdosen praktisch keine betriebsbedingten Komponenten enthalten. Diese Immissionsergebnisse entsprechen insoweit den Erwartungen, da im Berichtszeitraum auch keine bedeutsamen Zwischenfälle mit radiologischen Auswirkungen aufgetreten sind.

Luft

In der Umgebung von Kernkraftwerken wird auch die Luft als lebenswichtiges Primärmedium auf Beimengungen von künstlichen Radionukliden untersucht. Dabei konnten im Berichtszeitraum 1998 bis 2001 nur selten und dann unbedeutende Mengen künstlicher Radionuklide in der Luft festgestellt werden, die aber nicht auf Abgaben aus den überwachten kerntechnischen Anlagen schließen lassen.

Es handelte sich dabei um Cäsium-137, das nur in 55 von insgesamt 548 Proben in einer spezifischen Aktivität von 1,6 bis 17 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (d.i. etwa der Bereich der Nachweisgrenze) gefunden werden konnte. Dass auch heute noch gelegentlich niedrige spezifische Aktivitäten dieses aus dem Tschernobyl-Unfall stammenden Nuklids bei den Aerosolen auftreten, wird auf die Aufwirbelung von Straßenstaub, Abtragung von Oberflächenpartikeln durch Windverwehung und Resuspensionseffekte zurückgeführt.

Als Beispiel für den langfristigen Verlauf von künstlichen spezifischen Radionuklidaktivitäten in Aerosolen der bodennahen Luft zeigt Abbildung 4.24 die Monatswerte der Aerosolsammelstelle Bad Krozingen. Die Messwerte sind nicht auf den Betrieb des nahegelegenen französischen Kernkraftwerks Fessenheim zurückzuführen, sondern auf den Eintrag von Tschernobyl. Dies lässt sich in den 80er-Jahren am jeweiligen zeitabhängigen Verhältnis der beiden dargestellten Nuklide Cäsium-134 und Cäsium-137 erkennen. Bei den als Kobalt-60 dargestellten Werten handelt es sich nicht um tatsächliche, gemessene spezifische Luftaktivitäten, sondern um Vergleichskennwerte für die messtechnische Nachweisgrenze. Diese Größe wird angegeben, wenn anhand der Messung keine künstlichen Radionuklidgehalte erkannt werden. Die dabei eingesetzten gammaskopimetrischen Messverfahren sind im Mittel so empfindlich, dass sie eine Kobaltaktivität von 1 Becquerel (entsprechend $25 \times 10^{-15}\text{g}$, also 25 Milliardstel Mikrogramm Kobalt-60) in etwa $200\,000\text{ m}^3$ Luft zuverlässig erfassen. Allein schon anhand der zunehmenden Zahl an ermittelten und dargestellten Kobalt-Nachweisgrenzen ist zu erkennen, dass die Atemluft vom Tschernobyl-Fallout heute praktisch frei ist.

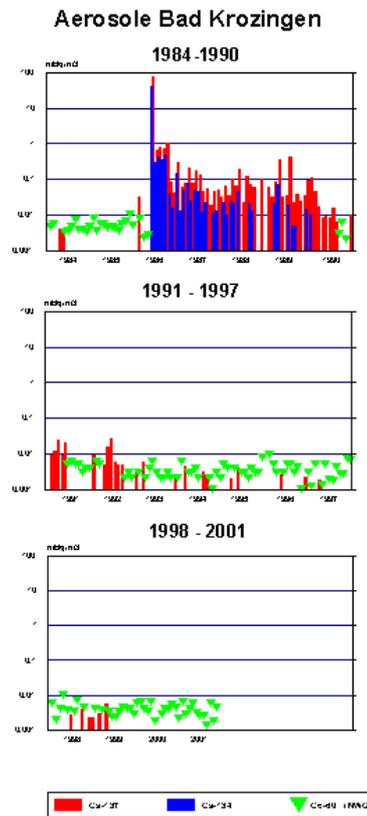


Abbildung 4.24

Niederschlag

Parallel zur Luftüberwachung erfolgt auch die ständige Sammlung von Niederschlägen und deren Überwachung an allen Standorten kerntechnischer Anlagen. Die jeweils über die Dauer eines Monats gesammelten Niederschlagswässer werden gamma-spektrometrisch untersucht. In den Monatsproben waren im Frühsommer 1986 wegen des Tschernobylunfalls zwar deutlich, ansonsten nur noch äußerst selten Spuren von Cäsium-137 im Bereich einiger MilliBecquerel je Liter zu messen.

Betrachtet man für das Radionuklid Tritium mehrere Probenentnahmeorte beim Forschungszentrum Karlsruhe im Vergleich (Abbildungen 4.25 und 4.26), so fällt hier auf, dass in jüngster Vergangenheit nur noch wenige Werte überhaupt über den Nachweisgrenzen von 6 Bq/l bzw. 8 Bq/l liegen. Die positiven Befunde von Tritium mit derart niedrigen Konzentrationen haben radiologisch keine Bedeutung.

Tritium und Cäsium-137 in Niederschlägen Monatsmittelwerte

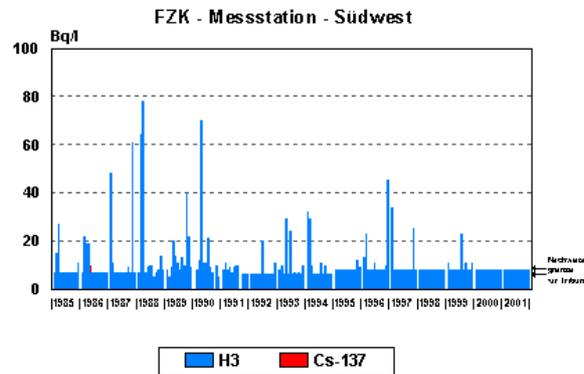


Abbildung 4.25

Tritium und Cäsium-137 in Niederschlägen Monatsmittelwerte

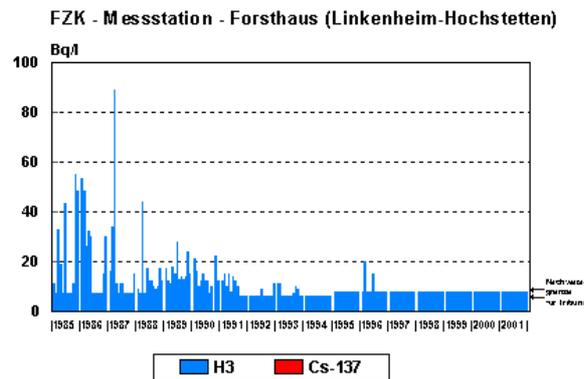


Abbildung 4.26

Wasser

Oberflächenwasser

Oberflächenwässer werden vor dem Eintritt in eine kerntechnische Anlage und nach dem Verlassen der Anlage auf ihren Gehalt an künstlichen Gammastrahlern sowie Tritium untersucht. Im Zeitraum 1998 - 2001 lag der Gehalt an künstlichen Gammastrahlern in den untersuchten Wasserproben aus Rhein und Neckar unterhalb der Nachweisgrenze. Dabei ist die Messung durchweg so empfindlich, dass man in 20 l Oberflächenwasser noch 1 Becquerel Kobalt-60 erkennen würde (dies entspricht 25×10^{-15} g Kobalt-60, also 25 Milliardstel Mikrogramm) und sich dabei nur in einem von hundert Fällen irrtümlich auf ein falsches Ergebnis festlegen würde.

Beim betastrahlenden Radionuklid Tritium dagegen lassen sich bei den Messungen im Auslaufkanal für Kühl- oder Abwässer von Kernkraftwerken oft deutlich höheren Konzentrationen (z.B. 2001 bis zu 150 Bq/l im Monatsmittel im Auslauf des Kernkraftwerkes Philippsburg Block II) nachweisen als vor der Kühlwasserentnahme. Unterhalb findet bei größeren Vorflutern eine merkliche Verdünnung statt. Die Höhe der Konzentration im Flusswasser hängt außerdem stark von der Wasserführung des Vorfluters und der Lage der Probenahmestelle ab. Deshalb fallen die Konzentrationswerte bei den am Rhein liegenden Anlagen infolge der großen Verdünnungseffekte mit dem Rheinwasser niedriger aus als bei den anderen Anlagen.

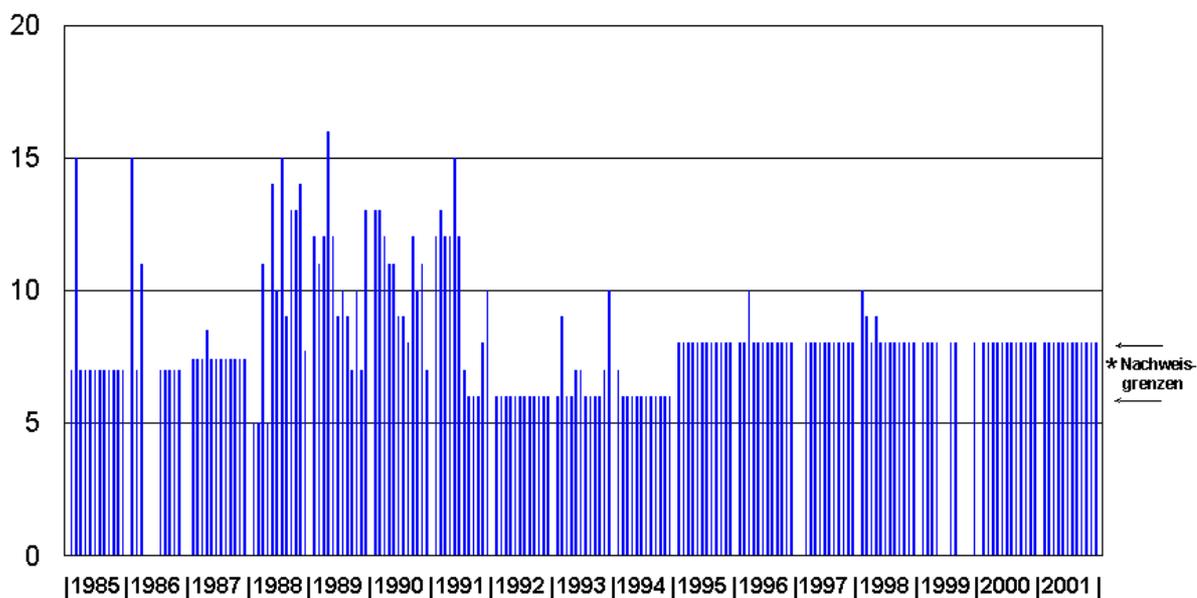
Dies wird auch deutlich, wenn man die Tritiumgehalte an den jeweils einmal im Quartal genommenen Stichproben von Oberflächenwasser ausserhalb der Einflussbereiche von kerntechnischen Anlagen betrachtet. Die Probenahmeorte sind weit genug von kerntechnischen Anlagen entfernt, um lokale oder systematisch ortsbedingte Messeffekte auszuschließen. Probenahmeorte sind Zimmern ob Rottweil (Eschbach), Bingen (Lauchert), Kressbronn (Argen), Rastatt (Murg), Wendlingen (Neckar), Weikersheim (Tauber), Hardthausen (Kocher), Ulm (Donau), Kenzingen (Elz), Albruck (Alb) und Langenargen (Bodensee in 0 m und 100 m Tiefe). 1998 lagen bis auf einen Wert von 9,0 Bq/l alle Messwerte (insgesamt 48 Messwerte) an der Nachweisgrenze von 8,0 Bq/l. In den Jahren 1999 bis 2001 lagen jeweils alle 48 Messwerte unterhalb der Nachweisgrenze.

Mit den Informationen aus der Emissionsüberwachung kann man auch heute noch erkennen, dass kerntechnische Anlagen den Tritiumgehalt des Oberflächenwassers im Mittel beeinflussen. Wegen der geringeren Wasserführung fällt der Zusatzbeitrag im Neckar regelmäßig höher aus als im Rhein, hat aber radiologisch keine Bedeutung, zumal Tritium ein niederenergetischer Betastrahler und nur gering radiotoxisch ist.

Die wirkungsvolle Verdünnung im Rhein, aber auch deutlich verminderte industrielle Einträge in jüngster Zeit, sind auch Abbildung 4.27 zu entnehmen. So lagen die langjährigen Monatsmittelwerte am Überwachungsort Weisweil mit einer einzigen Ausnahme bisher stets unter 15 Bq/l. Seit 1994 lagen mit zwei Ausnahmen sogar alle Werte unter der messtechnischen Erkennungsgrenze. Seit 1997 liegen keine Werte dieser Station mehr vor, da sie verlegt werden musste, ab diesem Zeitpunkt sind die Werte der Insel Vogelgrün (Rhein bei Breisach) aufgeführt. Hier wurden dreimal Werte knapp über der Nachweisgrenze festgestellt. Auch hier spiegelt sich die allgemein feststellbare Tendenz fallender Tritiumeinträge in die Umwelt sowie das Absinken des noch von den oberirdischen Kernwaffentests stammenden Tritiuminventars in der Atmosphäre durch Auswaschung und radioaktiven Zerfall wider.

Tritium im Oberflächenwasser 1985 - 2001

Monatswerte bei Messstation Weisweil (bis 1996) bzw. Rhein bei Breisach (ab 1997)



*) seit 1995 hat sich aufgrund einer DIN-Norm die Berechnung von Nachweisgrenzen geändert

Abbildung 4.27

Einen Vorfluter mit meist deutlich höheren Werten stellte der Rheinniederungskanal beim Forschungszentrum Karlsruhe dar. Hier treten wegen der geringen Wasserführung stets die höchsten Tritiumkonzentrationen auf. So wurden an der Probenahmestelle nach der Abwassereinleitung 1998 Konzentrationen bis 830 Bq/l, 1999 bis 3100 Bq/l, 2000 bis 220 Bq/l und 2001 bis 63 Bq/l gemessen. Ende Juni 2001 endet die Probenahme, weil seit Anfang des Jahres die Abwässer über die neu erbaute Abwasserleitung direkt in den Rhein geleitet werden. Die Konzentrationen dieses kleinen Oberflächengewässers korrelieren gut mit den jährlichen Emissionsraten (siehe Abbildung 4.10) des Forschungszentrums. Die Eigenschaften des Tritiums als sehr niederenergetischer Betastrahler mit einer hohen Austauschrate im menschlichen Körper führen dazu, dass selbst die Aufnahme höherer Aktivitäten in den Körper zu relativ geringen Dosisbelastungen führt. Beispielsweise würde durch die andauernde Aufnahme von Trinkwasser, welches mit 1000 Bq/l Tritium belastet ist, pro Jahr bei einem erwachsenen Menschen eine effektive Dosis von ca. 0,01 mSv resultieren (zum Vergleich: Die natürliche Strahlenexposition beträgt etwa 2,4 mSv - vgl. Kapitel 5).

Das Wasser des Rheinniederungskanals wurde bis zur Inbetriebnahme der neuen Abwasserleitung des Forschungszentrums Karlsruhe im Jahr 2001 monatlich auf Tritium untersucht. Abbildung 4.28 zeigt die Ergebnisse seit 1986. In der Abbildung sind zudem die Ergebnisse von oberflächennahem Grundwasser aus der Nähe des Rheinniederungskanals angegeben. Die Werte korrelieren nicht miteinander. Dies ist auf Langzeitspeichereffekte des Grundwasserleiters zurückzuführen.

Tritium im Rheinniederungskanal bei Leopoldshafen und in oberflächennahem Grundwasser bei Philippsburg - Huttenheim

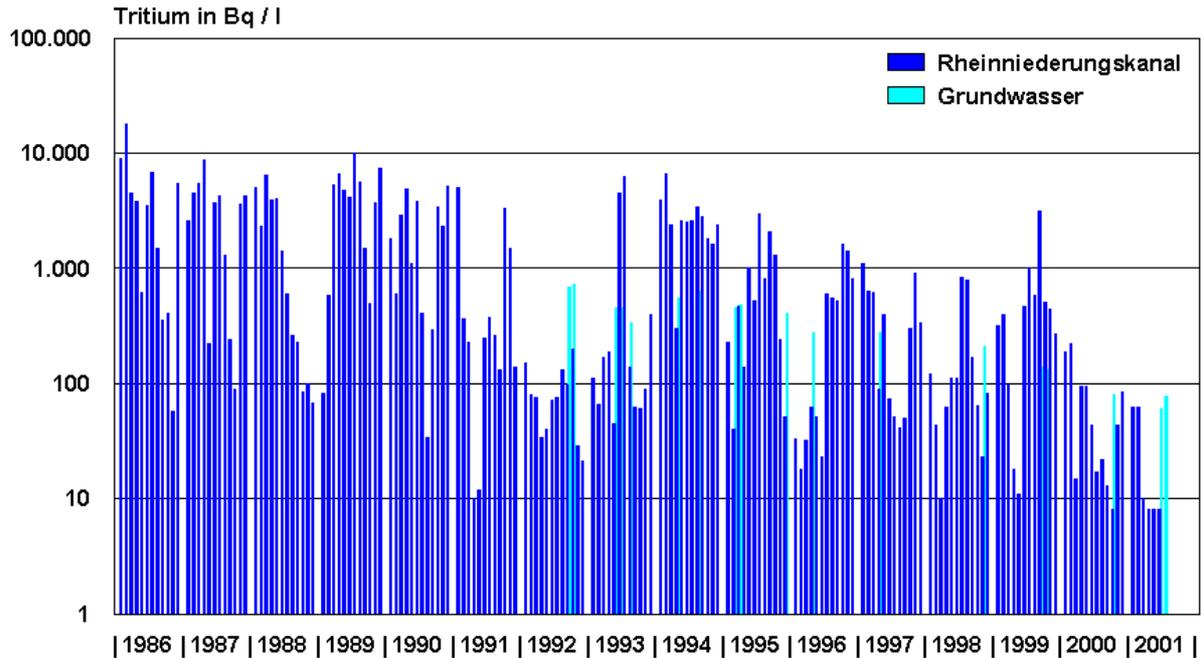


Abbildung 4.28

Sedimente, Wasserpflanzen, Schwebstoffe

Sedimente, Wasserpflanzen und Schwebstoffe in Oberflächengewässern sind als Akkumulatoren von radioaktiven Stoffen empfindliche Nachweismedien. Die ermittelten Werte erlauben allerdings keine quantifizierbare Zuordnung der Aktivitäten, die in geringen Mengen mit dem Abwasser abgeleitet worden sind. Sie lassen jedoch gewisse Rückschlüsse auf den Emittenten bzw. die Herkunft der Radioaktivität zu.

In den stromabwärts gelegenen Flussabschnitten aller kerntechnischen Anlagen wurden in den Sedimenten künstliche Radionuklide gefunden. Den Hauptanteil hatte das Nuklid Cäsium-137, das vorwiegend aus Tschernobyl stammt. In Abbildung 4.29 wird der Verlauf der spezifischen Aktivität von Cäsium-137 in feinkörnigem Rheinsediment aus dem überwachten Gebiet beim Kernkraftwerk Philippsburg dargestellt. Die Entnahme erfolgte in einer Station, wo die im fließenden Rheinwasser enthaltenen Schwebstoffe über die Dauer eines Monats abgeschieden werden. Ansonsten schwanken bei Sedimentstichproben die Werte bei der ufernahen Entnahme und wegen der unterschiedlichen limnologischen Verhältnissen der beprobten Gewässer sehr stark, so dass ein Vergleich der einzelnen Gebiete nicht ohne weiteres möglich ist. So liegen die Werte der spezifischen Aktivität für feinkörnige Sedimente aus Staustufenbereichen höher als aus Gewässerabschnitten mit höheren Fließgeschwindigkeiten.

Cäsium - 137 im Sediment Rhein bei Philippsburg

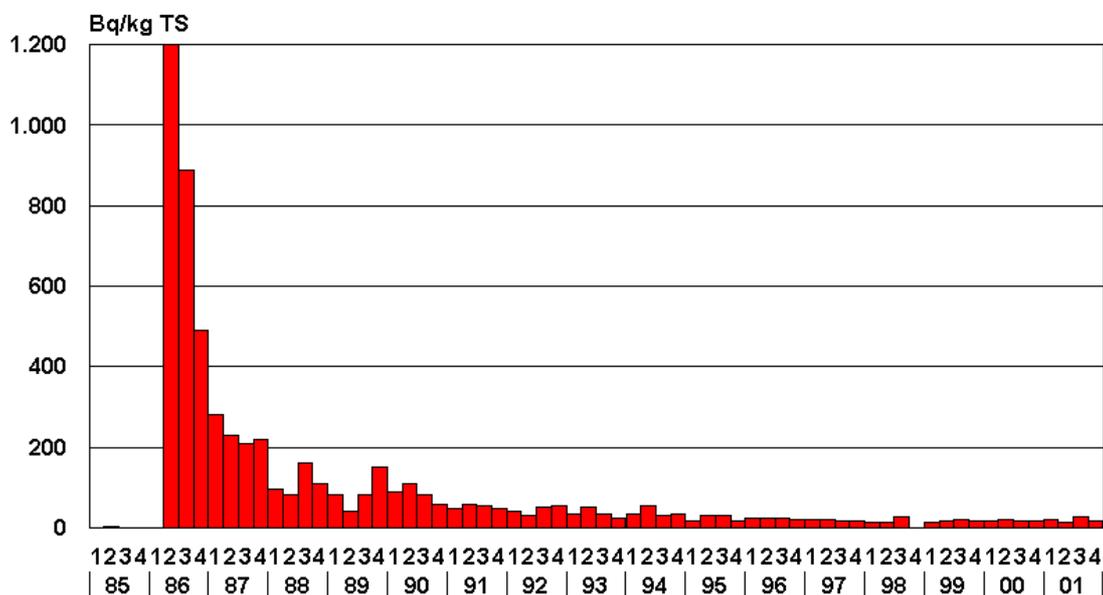


Abbildung 4.29

Die spezifischen Aktivitäten von Cäsium-137 in Sedimenten aus Rhein und Neckar (siehe Abbildung 4.30) schwankten im Berichtszeitraum zwischen einigen Zehnteln und etwa 30 Bq/kg Trockensubstanz, ebenso die Werte von anderen Spalt- und Aktivierungsprodukten (Kobalt-60 und Kobalt-58). Cäsium-137 erreicht in alten Sedimenten des Hirschkanals beim Forschungszentrum Karlsruhe im Mittel ein Vielfaches des obigen Maximalwerts, was auf frühere Ableitungen über den Luftpfad aus den dortigen Experimentieranlagen und die geringe Wasserführung dieses Gewässers zurückzuführen ist.

Schwankungsbereiche für Radionuklide in Sedimenten der Umgebung kerntechnischer Anlagen im Überwachungszeitraum 1998 - 2001

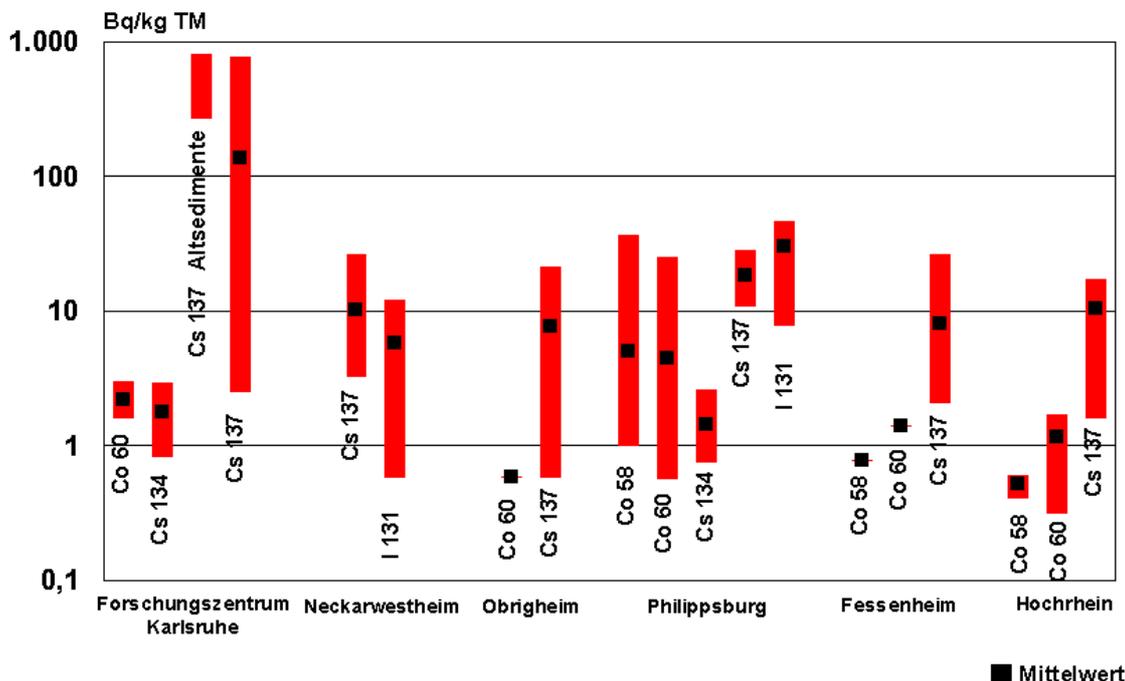


Abbildung 4.30

Bei allen am Rhein gelegenen kerntechnischen Anlagen waren im Berichtszeitraum für kerntechnische Anlagen typische Aktivierungsprodukte in den stromabwärts liegenden Sedimenten zu messen. Dies zeigt, dass sowohl die nordostschweizerischen und die elsässischen als auch die deutschen kerntechnischen Anlagen im Forschungszentrum sowie die Kernkraftwerke bei Philippsburg geringe Mengen radioaktiver Stoffe über den Abwasserpfad abgegeben haben.

Trinkwasser

Das in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen gewonnene Trinkwasser stammt ausschließlich aus Grundwasser. Im Berichtszeitraum 1998 bis 2001 wurden 198 Trinkwasserproben untersucht. Es wurden dabei keine künstlichen alpha- oder gammastrahlenden Radionuklide nachgewiesen.

Die stichprobenweise ermittelten Strontium-90-Gehalte (53 Messungen) bewegten sich je Liter Wasser im Bereich von 1 bis 13 mBq/l und sind langfristige Auswirkungen der früheren oberirdischen Kernwaffentestexplosionen. Erfasst werden hier Gehalte von einigen Picogramm in einem m³ Trinkwasser. Dies ist der Millionstel Teil eines Millionstel Gramms je m³.

Die Tritiumgehalte (161 Messungen) liegen fast überall unterhalb der messtechnischen Nachweisgrenze von etwa 8 Bq/l (146 Proben). Lediglich im Einflussbereich des Forschungszentrums Karlsruhe ist ein signifikanter, anlagenbedingter Beitrag zum Tritiumgehalt des dortigen Grundwassers erkennbar. So lagen in Fließrichtung der Grund- und Oberflächenwässer in einem Rheinniederungsgebiet die Tritiumkonzentrationen des Grundwassers einiger Einzelentnehmer teilweise bis 230 Bq/l (siehe Abbildung 4.28). Dennoch wird bei Genuss eines solchen Wassers kein Strahlendosisgrenzwert für die Bevölkerung erreicht oder gar überschritten, da Tritium einen kleinen Dosisfaktor und eine geringe Verweilzeit im menschlichen Organismus hat. Ansonsten sind keine spezifischen Unterschiede im Radioaktivitätsgehalt von Trinkwässern aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen gegenüber den in sonstigen Gebieten gewonnenen Trinkwässern festzustellen.

Boden

Die Kulturböden haben großen Einfluss auf unsere Nahrung. Sie sind deshalb besonders zu schützen. Böden stellen zudem langfristige Sammler für alle Stoffe dar, auch für Radionuklide, die über die Luft herangeführt und sowohl durch trockene Sedimentation als auch durch Auswaschen zunächst oberflächlich abgelagert werden. Bodenuntersuchungen haben deshalb große Bedeutung für die radiologische Überwachung.

Programmgemäß werden Böden auf ihren Gehalt an künstlichen gammastrahlenden Einzelnucliden überwacht, beim Forschungszentrum Karlsruhe auch auf Plutoniumisotope. In den 1998 bis 2001 untersuchten Böden (Abbildungen 4.31 und 4.32) wurde nahezu immer Cäsium-137 gefunden. Es stammt jedoch nicht von den überwachten kerntechnischen Anlagen, sondern spiegelt die früher erfolgten Einträge aus den Kernwaffentestexplosionen und dem Reaktorunfall von Tschernobyl wider.

Cäsium-137 in Böden aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen

Jahresmittelwerte einzelner Gebiete

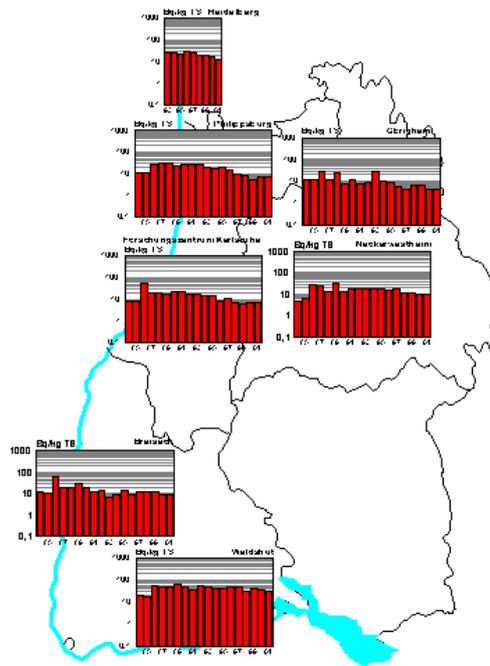


Abbildung 4.31

Cäsium-137 in der Umgebung des Forschungszentrums Karlsruhe 1981 - 2001

Boden

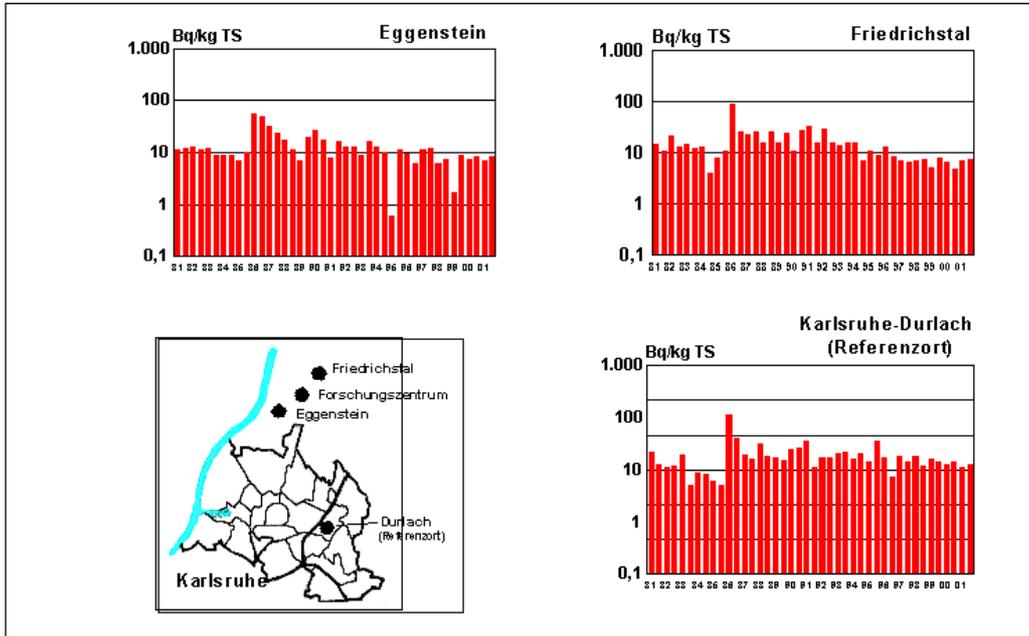


Abbildung 4.32

Vergleicht man z. B. die längerfristig ermittelten spezifischen Aktivitäten aus dem südlichsten überwachten Gebiet um Waldshut mit solchen aus dem nördlichen Landesteil, z. B. bei Heilbronn, so zeigt sich, dass die spezifischen Aktivitäten von Cäsium-137 zwar innerhalb eines Überwachungsgebiets großen Schwankungen unterworfen sind, die Werte bei Waldshut jedoch stets höher liegen als im Bereich Heilbronn. Das mit einer physikalischen Halbwertszeit von 2,06 Jahren relativ kurzlebige Cäsium-134 hat deutlich abgenommen und ist heute in Böden nicht mehr nachzuweisen. Dennoch konnte früher stets über das Verhältnis dieser beiden Radionuklide und über den Vergleich mit Referenzorten nachgewiesen werden, dass die gefundenen Cäsiumnuklide nicht aus den überwachten Anlagen der Nordostschweiz bzw. Neckarwestheim, sondern aus Tschernobyl stammen.

In Abbildung 4.32 ist am Beispiel des Überwachungsgebietes beim Forschungszentrum Karlsruhe im Detail für mehrere Probenahmeorte der längerfristige Verlauf der Cäsium-137-Gehalte in halbjährlich entnommenen Bodenproben dargestellt. Man erkennt einerseits an allen Probenahmeorten den sprunghaften Anstieg der Werte im Jahr des Reaktorunfalls von Tschernobyl und andererseits auch den schon vor 1986 durch die Kernwaffentestexplosionen verursachten Cäsium-137-Pegel. Nicht selten liegen die Werte aus den Referenzorten, die sich fernab der überwachten Anlagen in unbeeinflusstem Gebiet befinden, höher als die Werte aus der Nähe einer kerntechnischen Anlage.

Die Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen ist nur auf künstlich erzeugte Radionuklide ausgerichtet. Dennoch werden bei der Untersuchung von Bodenproben stets auch die darin enthaltenen natürlichen Radionuklide miterfasst. Dies sind radioaktive Stoffe von Elementen, die aus der Entstehungszeit der Erde

stammen. Im Wesentlichen sind es die in der Natur vorkommenden Zerfallsreihen des Urans und Thoriums sowie Kalium-40. In Abbildung 4.33 sind für die Böden der Überwachungsgebiete der Kernkraftwerke die natürlichen Aktivitätsgehalte den Cäsium-137-Gehalten gegenüber gestellt. Allerdings sind in der Abbildung 4.33 lediglich die Aktivitätsgehalte der Mutternuklide von zwei der natürlichen Zerfallsreihen (Uran-238 und Thorium-232) dargestellt. Im Boden findet sich daneben noch eine größere Zahl von Folgeprodukten (Tochternuklide) aus diesen Zerfallsreihen, die einen weiteren Aktivitätsbeitrag liefern. Man erkennt, dass nur im Hochrheingebiet die spezifischen Aktivitäten von Cäsium-137 im oberflächennahen Boden ähnlich hoch liegen wie die des Urans und Thoriums. Während das künstliche Cäsium-137 auf eine Bodenschicht von maximal 30 bis 40 cm (Pflugschartiefe) beschränkt bleibt, sind die natürlichen Radionuklide in der gesamten Erdrinde enthalten. Sie bewirken dadurch eine entsprechend höhere, natürlich bedingte Strahlendosis.

Radioaktivität in Böden 2001

alle Überwachungsgebiete in Baden-Württemberg

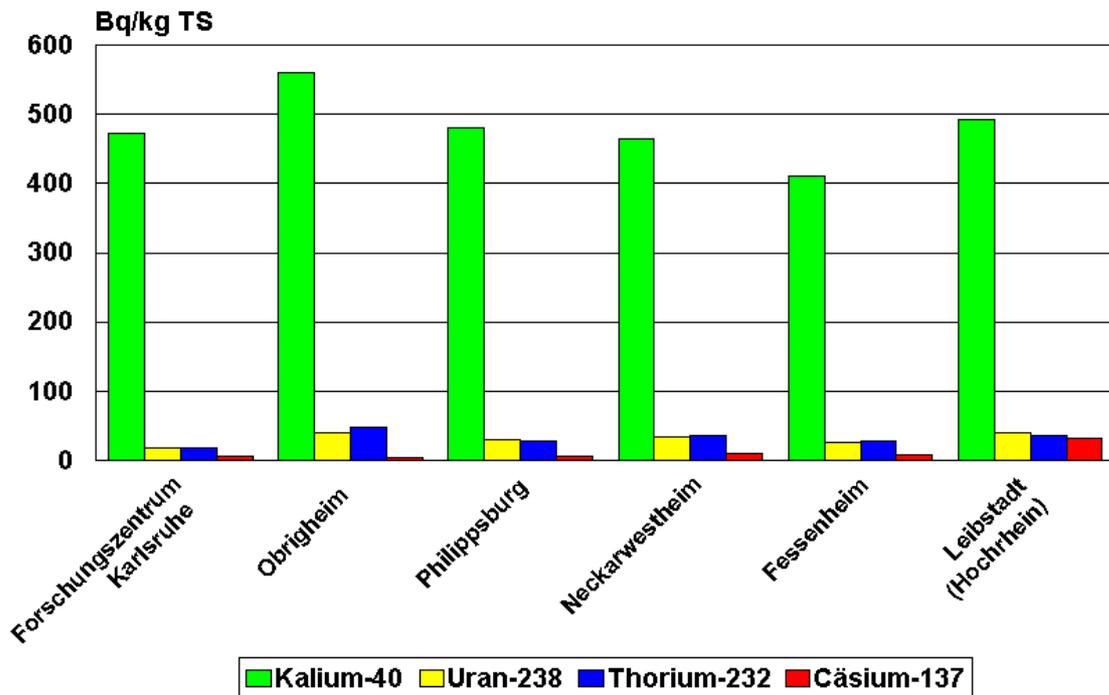


Abbildung 4.33

In Abbildung 4.34 sind für die verschiedenen Überwachungsgebiete des Landes die anteiligen Strahlendosen abgeschätzt, die sich aus den gemessenen Radionuklidgehalten der Böden beispielhaft für das Jahr 1997 ergeben.

Aus Bodenproben des Jahres 1997 für alle Überwachungsgebiete abgeschätzte Gamma-Ortsdosis (einschließlich Höhenstrahlung)

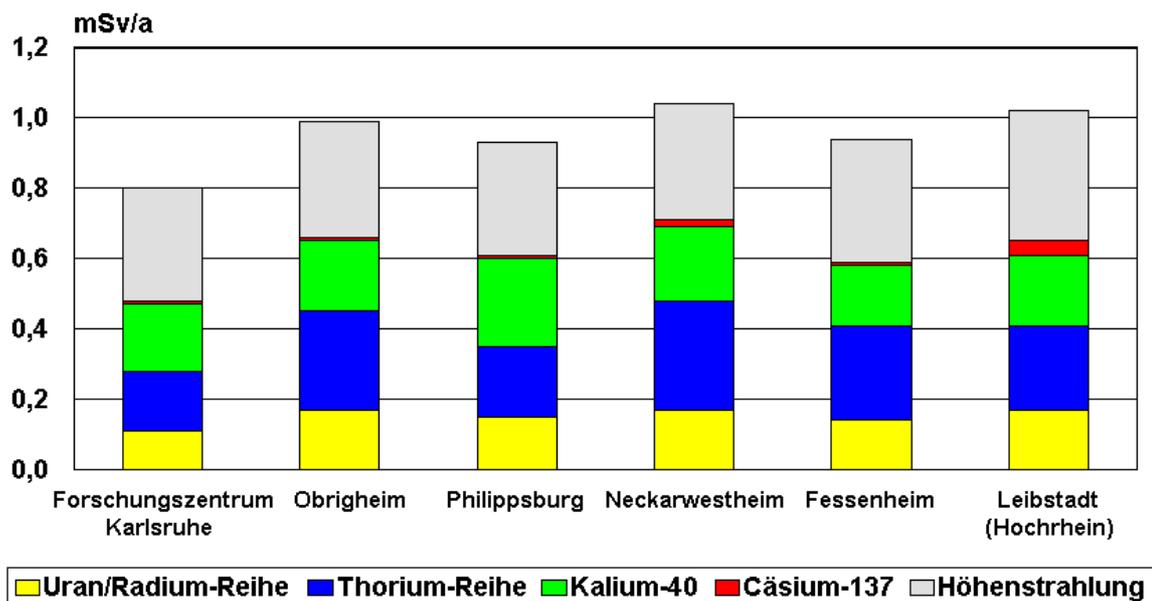


Abbildung 4.34

Hier sind die Dosisleistungsbeiträge der Folgeprodukte aus den Zerfallsreihen mitberücksichtigt. Gerade die gammastrahlenden Nuklide daraus liefern einen wesentlichen Beitrag. Der Vollständigkeit halber wurde noch die von der natürlichen Höhenstrahlung ausgehende Strahlendosisleistung mit angegeben. Damit ergeben sich gebietsabhängige Mittelwerte für die Gamma-Ortsdosen durch äußere Strahlung natürlichen und künstlichen Ursprungs zwischen etwa 0,8 und 1 mSv/a. Die Ergebnisse schwanken von Gebiet zu Gebiet hauptsächlich wegen der unterschiedlichen Gehalte der Böden an natürlichen Radionukliden recht stark. Die

Ergebnisse liegen gut im Bereich der mit Dosimetern gemessenen Dosiswerte (Abbildung 4.23). Sie zeigen auch, dass im Vergleich zur natürlichen, äußeren Strahlung die von künstlichen Radionukliden in der Umgebung ausgehende Strahlenbelastung von untergeordneter Bedeutung ist. Die von künstlichen Radionukliden verursachte Dosis liegt im Überwachungsgebiet Hochrhein im Mittel bei ca. 3 %, in den übrigen Überwachungsgebieten zwischen 1 und 2 % der durch die äußere Strahlung insgesamt bedingten Dosis. Sie ist in allen Überwachungsgebieten hauptsächlich vom Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl und von den Einträgen als Folge der ehemaligen oberirdischen Kernwaffenversuche verursacht. Das Überwachungsgebiet Hochrhein war stärker als die übrigen Überwachungsgebiete vom Unfall von Tschernobyl betroffen. Dies spiegelt sich auch in diesen Ergebnissen wider. Vom Betrieb der Kernkraftwerke stammt nur ein geringer Teil.

Bewuchs

Futtermittel/Gras

Gras als stets verfügbares Messmedium ist als Zwischenglied in der Nahrungskette ein wichtiger Indikator, um Veränderungen der oberflächennahen Radioaktivitätssituation zu erkennen. In den Jahren 1998 bis 2001 wurde in Grasproben aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen nur noch das künstliche Radionuklid Cäsium-137 in Bereichen zwischen einigen Zehnteln und 7 Bq/kg Trockensubstanz ermittelt, das Nuklid Cäsium-134 dagegen nicht mehr. Künstliche Alphastrahler oder andere gammastrahlende Radionuklide, insbesondere Aktivierungsprodukte, wurden in Grasproben in Baden-Württemberg im Rahmen der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen lediglich einmal beim Kernkraftwerk Obrigheim in Spuren, sonst nie nachgewiesen.

Tendenziell sind die Pflanzenkontaminationen im südlichen Bereich von Baden-Württemberg höher als im nördlichen (siehe Abbildung 4.35). Aber auch innerhalb eines Überwachungsgebietes kann es zwischen den einzelnen Probenahmeorten große Schwankungen geben, wie das Beispiel des Forschungszentrums Karlsruhe (Abbildung 4.36) zeigt. Maßgebend hierfür ist der jeweilige Aktivitätspegel des Bodens, der Vegetationsstand zum Zeitpunkt der Probenahme, durchgeführte Bodenbearbeitungsmaßnahmen usw. Alle Zeitverläufe zeigen jedoch einen deutlichen Anstieg der spezifischen Aktivität infolge des Reaktorunfalls von Tschernobyl. Dieser Beitrag überlagert sich den Werten, die von den früheren oberirdischen Kernwaffentestexplosionen verursacht worden sind. Heute liegen in Baden-Württemberg (Ausnahme ist der Südosten des Landes) die Cäsium-137-Gehalte der meisten Pflanzen bei ähnlichen Werten wie zu Beginn der 80er Jahre.

Cäsium-137 in Bewuchs (Gras) aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen

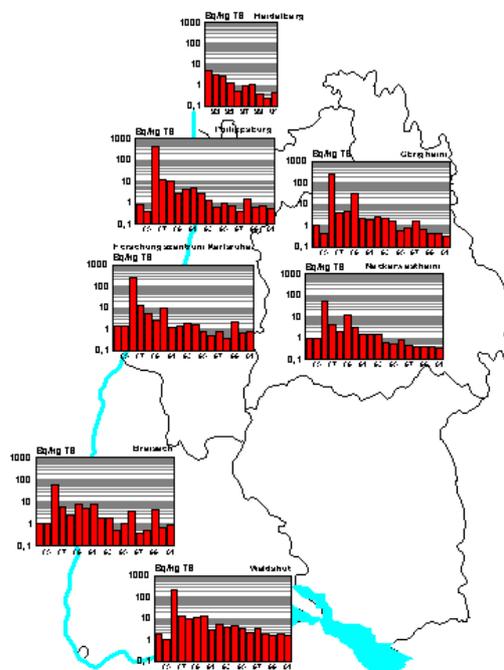


Abbildung 4.35

Cäsium-137 in der Umgebung des Forschungszentrums Karlsruhe 1981 - 2001

Bewuchs

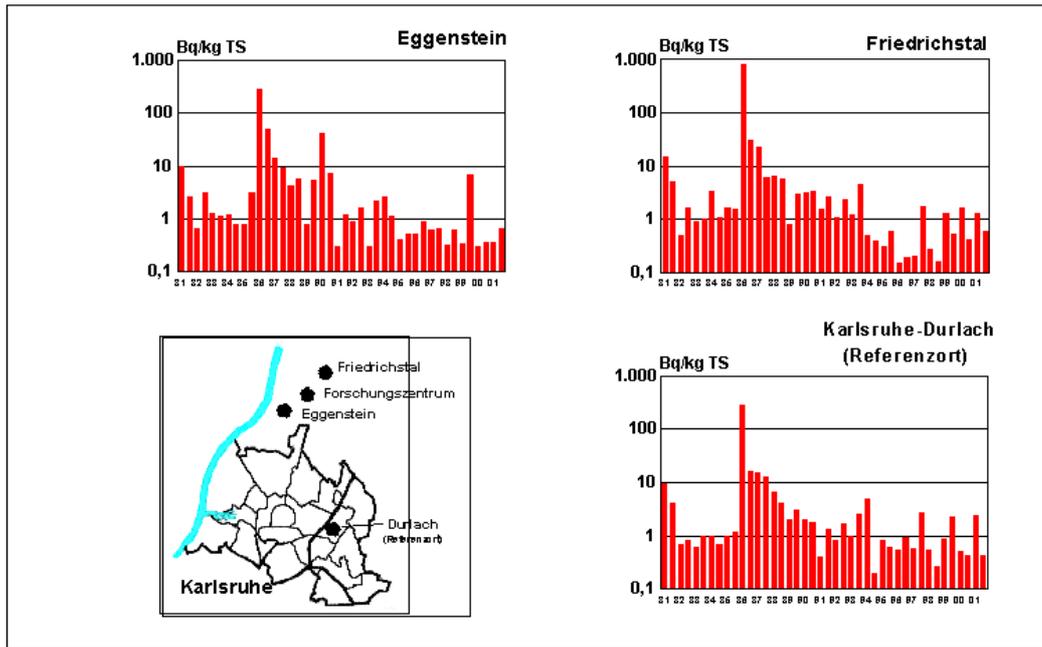


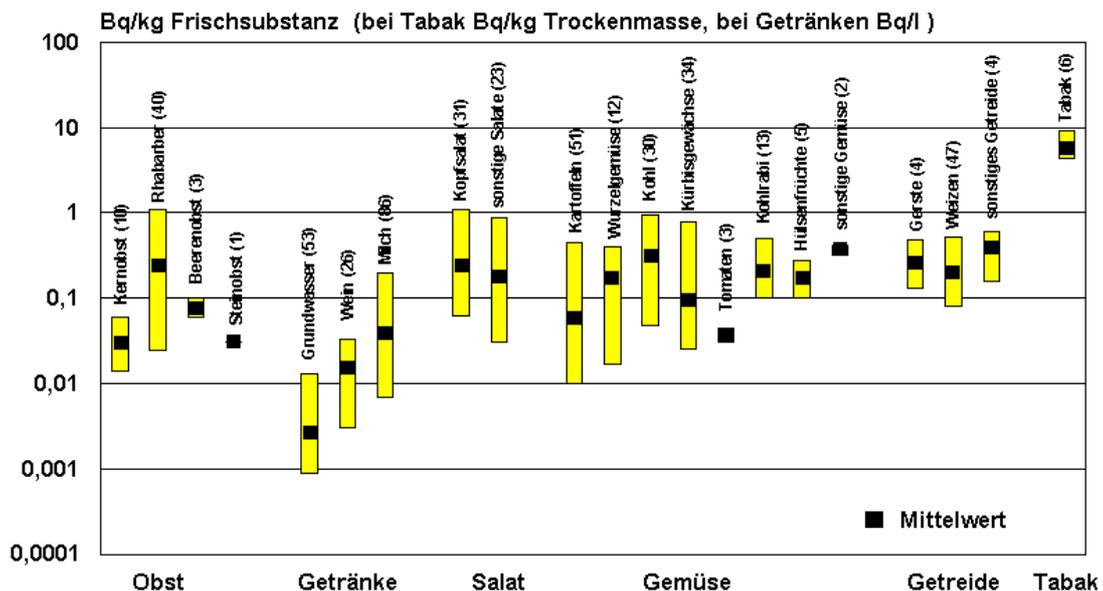
Abbildung 4.36

Nahrungsmittel

Die meisten der zahlreichen untersuchten Nahrungsmittel sind heute frei von künstlichen gammastrahlenden Radionukliden. Gelegentlich wurden in den in der Umgebung der kerntechnischen Anlagen erzeugten Lebensmitteln noch Spuren von Cäsium-137 im Bereich der messtechnischen Nachweisgrenzen gefunden, die sortenabhängig zwischen einigen 10^{-2} und einigen 10^{-1} Bq/kg schwanken.

Einen Überblick über das in Nahrungsmitteln gefundene künstliche Radionuklid Strontium-90 gibt die Abbildung 4.37. Die untersuchten Proben waren in der Umgebung der Kernkraftwerke nicht signifikant höher belastet als solche, die fernab kerntechnischer Anlagen gesammelt wurden. Die Einträge des genannten Radionuklids sind vorwiegend auf die früher stattgefundenen oberirdischen Kernwaffentests zurückzuführen. Dies zeigt auch ein Vergleich der Ergebnisse der Referenzorte mit den im Rahmen der allgemeinen Überwachung der Radioaktivität ermittelten Messwerten (siehe Kapitel 3).

Strontium-90 in Nahrungsmitteln 1998 - 2001



Die medienspezifische Zahl der Proben ist jeweils in Klammern vermerkt.

Gesamtzahl der Messungen: 484

Abbildung 4.37

Im folgenden wird auf die überwachten Nahrungsmittel näher eingegangen.

Milch

Wegen der hohen Anreicherungsfaktoren der Iodisotope über den Weide-Kuh-Milch-Pfad, der hohen Strahlenwirksamkeit des Iods und des hohen Anteils von Milch und Milchprodukten an der Ernährung von Kleinkindern wird dieses Medium besonders aufmerksam überwacht. In Kuhmilch war auch im Zeitraum 1998 bis 2001 kein radioaktives Iod nachzuweisen, so dass ein Einfluss der überwachten Anlagen auf dieses Nahrungsmittel ausgeschlossen werden kann.

Das an Stichproben (86 Messungen) ermittelte Strontium-90 weist im Mittel Konzentrationen von unter 0,1 Bq/l auf. Die Bandbreite der ermittelten Werte reichte von 0,007 bis 0,2 Bq/l. Im Vergleich zu dem in der Milch vorhandenen und gleichartig wirkenden natürlichen Kalium-40 mit Konzentrationen von 40 - 50 Bq/l spielt das Radiocäsium keine Rolle (vgl. auch Kapitel 3). Der höchste im Berichtszeitraum gefundene Wert (bei 196 Messungen) von Cäsium-137 lag bei 0,43 Bq/l (im Mittel 0,08 Bq/l).

Pflanzliche Nahrungsmittel

An pflanzlichen Nahrungsmitteln gibt es eine große Sortenzahl, aus denen im Rahmen der radiologischen Umgebungsüberwachung gebietstypische Stichproben überwacht werden. Der Schwerpunkt liegt auf oberirdisch wachsenden, essbaren Pflanzenteilen und Früchten. So liegen Einzelergebnisse für den Gehalt an den künstlichen Radionukliden Tritium, Strontium-90, Cäsium-137 für verschiedene Sorten vor. Im einzelnen handelt es sich dabei um Obst (z. B. Äpfel, Erdbeeren, Rhabarber), Gemüse und Salate (Blattgemüse, Kohl, Wurzel-, Sprossen- und Fruchtgemüse), Kartoffeln, Getreide (Gerste, Weizen, Mais). Abbildung 4.37 zeigt den Wertebereich für alle im Zeitraum 1998 bis 2001 durchgeführten Strontium-Analysen. Auf eine Darstellung der Gehalte an Tritium und Cäsium wird verzichtet, da in fast allen Proben deren Gehalte unter der messtechnischen Erkennungsgrenze liegen. Soweit in wässrigen Proben (z. B. Wein) Tritium ermittelt wurde, lagen die Ergebnisse im Rahmen des heutzutage im Wasserkreislauf üblichen Schwankungsbereichs, d. h. sie schwanken um die messtechnische Erkennungsgrenze von etwa 8 Bq/l oder lagen darunter. Die Strontium-90-Werte bewegten sich - stark sortenabhängig - durchweg unterhalb von etwa 1 Bq/kg. Deutlich über diesem Wert lagen alle Proben des Genussmittels Tabak (4,4 – 9,3 Bq/kg). Dies liegt z.T. auch daran, dass die Ergebnisse normalerweise auf die Frischsubstanz, bei Tabak jedoch auf die Trockensubstanz bezogen werden. Dies macht etwa den Faktor 10 in der Angabe der Werte aus.

Sofern in den untersuchten Pflanzenproben überhaupt noch das gammastrahlende Cäsium-137 nachweisbar war (in 87 von 627 Proben ohne Berücksichtigung der Weinproben), lagen die Aktivitätsgehalte im Mittel bei 0,13 Bq/kg. Der höchste gemessene Wert für Cäsium-137 betrug 0,64 Bq/kg (bei einer Tabak-Probe) und liegt damit in einem Bereich, der messtechnisch gerade noch erfassbar, radiologisch aber bedeutungslos ist. Bei Wein wurde von 53 Proben nur in einer Probe Cs-137 mit einem Aktivitätsgehalt von 0,04 Bq/l gefunden.

Fische

Routinemäßig werden auch regelmäßig Fische aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen gammaspektrometrisch auf eine Anreicherung künstlicher Radionuklide hin untersucht. Die Fische stammen aus Rhein, Neckar oder dem Rheinniederungskanal. Im Zeitraum 1998 bis 2001 wurden in 54 von 71 Proben noch Spuren des von Tschernobyl herrührenden Cäsium-137 nachgewiesen. Die Werte lagen zwischen 0,06 Bq/kg und 2,7 Bq/kg verzehrfertiger Frischware, im Mittel bei 0,29 Bq/kg. Aktivierungsprodukte aus kerntechnischen Anlagen konnten im Fischfleisch nicht nachgewiesen werden. Der Verzehr von Fisch trägt zur gesamten Strahlenexposition nur untergeordnet bei.

Den längerfristigen Verlauf der spezifischen Aktivität von Cäsium-137 in Fischen aus einem langsam fließenden Gewässer zwischen Karlsruhe und Philippsburg (Rheinniederungskanal und Philippsburger Altrhein) kann man in Abbildung 4.38 verfolgen. Man erkennt deutlich die Auswirkungen des Cäsiumeintrages in das Gewässer und damit in das Fischfleisch infolge des Reaktorunglücks in Tschernobyl.

Cäsium-137 in Fischfleisch 1985 - 2001

Rheinniederungskanal / Philippsburg Altrhein bzw. Rhein

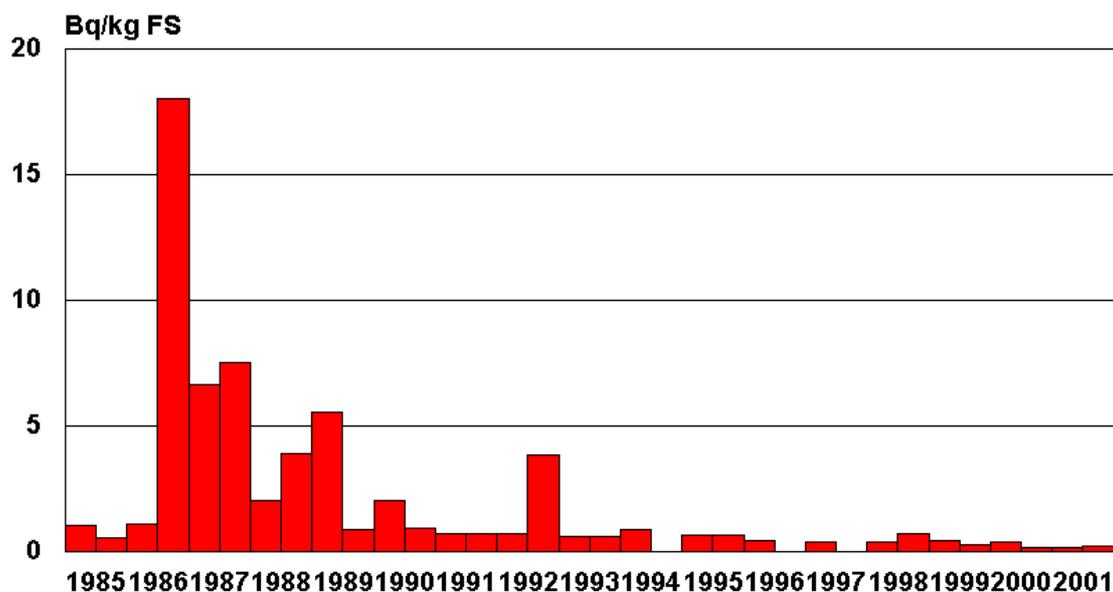


Abbildung 4.38

5 Strahlenexposition

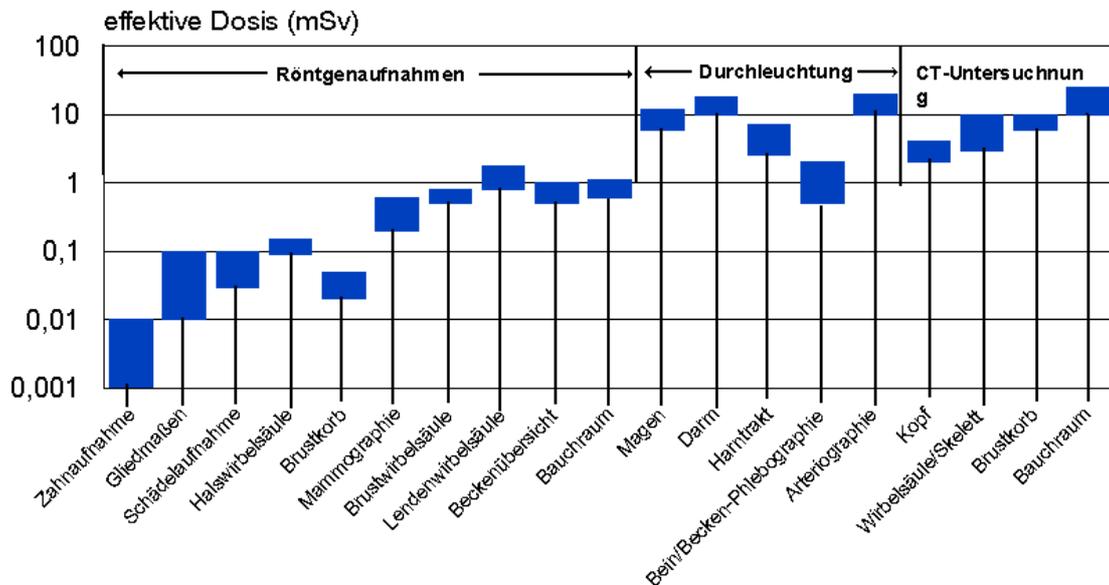
Radioaktivität und ionisierende Strahlungen sind natürliche Bestandteile unserer Umwelt. Bedingt durch die kosmische Strahlung und durch die immer und überall vorhandenen Uran- und Thoriumbestandteile und deren Folgeprodukte in der Erde, den Gesteinen und den vom Menschen genutzten Baumaterialien, sowie anderer natürlich vorkommender Radionuklide in unserer Umwelt ergibt sich in Deutschland im Jahre 2001 eine mittlere effektive Dosis durch natürliche Strahlenexposition von ca. 2,1 mSv im Jahr (Abbildung 5.1).

Neben der von außen wirkenden Gammastrahlung (kosmische Strahlung ca 0,3 mSv/a, terrestrische Strahlung ca 0,4 mSv/a) tragen besonders die mit der Atemluft und der Nahrung in den Körper gelangenden Radionuklide zur Strahlenexposition bei. Über die Hälfte des natürlichen Beitrags zur menschlichen Strahlenbelastung ist dabei auf das radioaktive Edelgas Radon zurückzuführen (ca 1,1 mSv/a). Dieses bildet sich aus dem Radium und gelangt im Wesentlichen aus dem Erdboden und den Baumaterialien in die Luft. Dort entstehen weitere radioaktive Folgeprodukte, die dann über die Atmung in die Lunge gelangen und dort den Hauptanteil der natürlichen Strahlenbelastung mit einer erheblichen Variationsbreite bewirken. (siehe auch Kapitel 1). Etwa 15 % der natürlichen Strahlenbelastung entsteht durch die Aufnahme natürlicher Radionuklide über die Nahrung und mit dem Wasser in den menschlichen Körper. Es handelt sich dabei um Kalium-40 und die Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232.

Nach der Entdeckung der Kernspaltung vor etwa sechs Jahrzehnten wurden der Radioaktivität in Wissenschaft, Medizin und Industrie durch Gewinnung künstlicher Radionuklide viele Anwendungsbereiche eröffnet. Neben diesen zivilisationsbedingten Anwendungen der Radioaktivität muss zusätzlich der Einsatz von Röntgenstrahlen in der Medizin beachtet werden, wenn Aussagen über die zivilisatorische Belastung durch ionisierende Strahlung gemacht werden sollen. Insgesamt beträgt das Mittel dieser zivilisatorischen Strahlenexpositionen zusammen ca. 2,0 Millisievert im Jahr. Nahezu 100 % kommt dabei aus dem medizinischen Bereich - nicht zuletzt deshalb, weil sich im Durchschnitt jeder Bürger jährlich mehr als einmal einer Röntgenuntersuchung unterzieht. Die medizinisch bedingte Strahlenexposition verteilt sich allerdings sehr ungleichmäßig über die Bevölkerung. In Abbildung 5.2 sind mittlere Werte für die effektive Dosis für häufige Röntgenuntersuchungen an einem Standardpatienten (Körpergewicht ca 75 kg) dargestellt. Beim Vergleich der Werte ist dabei die Kenntnis hilfreich, dass Verfahren mit Röntgenaufnahmen deshalb eine niedrigere Dosis verursachen, weil hierbei ein kurzer Röntgenblitz für die Belichtung des Filmes ausreicht. Bei Durchleuchtungen wird eine zwar schwächere aber dafür länger einwirkende Röntgenstrahlung benutzt. Eine noch längere Einwirkungsdauer (wegen Anfertigung von Schichtaufnahmen) liegt bei der Computertomographie (CT-Untersuchung) vor.

Bereiche mittlerer Werte für die effektive Dosis für häufige Röntgenuntersuchungen an Standardpatienten (ca 75 kg)

(Stand 2001)



Alle anderen zivilisationsbedingten Beiträge sind wesentlich kleiner als die regionalen Schwankungen der natürlichen Strahlenexposition. Auch die mittlere Strahlenexposition durch den Reaktorunfall in Tschernobyl ist heute mit weniger als 0,015 mSv im Vergleich mit der natürlichen und der medizinischen Belastung nur sehr gering.

In Abbildung 5.1 sind die unterschiedlichen Beiträge zur jährlichen Strahlenexposition in Deutschland zusammengestellt. Die dargestellten Werte sind Durchschnittswerte. Sie geben keine Auskunft über die Strahlenbelastung in speziellen Fällen wie z. B. bei einer strahlentherapeutischen Behandlung. Mit diesen Werten ist es jedoch möglich, die zivilisatorisch bedingte Strahlenbelastung eines Menschen in normalen Lebensverhältnissen mit seiner natürlichen Strahlenbelastung zu vergleichen.

Die berufliche Strahlenexposition ist stark von der Tätigkeit abhängig und kann sowohl auf zivilisatorische Strahlenexposition als auch auf natürliche Strahlenexposition zurückgehen. Für Fluggesellschaften kann eine mittlere jährliche Strahlenexposition von mehreren mSv erreicht werden. Die Werte hängen aber stark von der jeweiligen Flugroute, Flughöhe und der Anzahl der Flugstunden ab. Aussagen hierüber finden sich im Bericht „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2001“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Von der deutschen Strahlenschutzkommission wurden die Mittelwerte der sich aus dem Unfall in Tschernobyl ergebenden zusätzlichen Effektivdosen für verschiedene Gebiete in Deutschland ermittelt. Sie sind in der Tabelle 5.1 zusammengestellt. Unterschieden wird dabei zwischen der effektiven Dosis im ersten Jahr nach dem Unfall und der Lebenszeitdosis. Das ist die gesamte zusätzliche effektive Dosis für die nach dem Unfall folgenden 50 Jahre.

Gebiet	Effektive Dosis (mSv) im 1. Jahr nach dem Unfall	Gesamte effektive Dosis (mSv) für die nach dem Unfall folgenden 50 Jahre
Voralpengebiet	0,65	2,2
Südliche Donau	0,35	1,3
Nördliche Donau	0,17	0,55

Tabelle 5.1 - Zusätzliche effektive Dosen durch den Unfall von Tschernobyl für verschiedene Gebiete (Quelle: Bericht der Strahlenschutzkommission, 1996)

Für einzelne Personen, deren Lebens- und Ernährungsgewohnheiten stark von den bei diesen Abschätzungen angenommenen Durchschnittswerten abweichen, können sich Dosiswerte ergeben, die etwa um den Faktor 2-3 über oder unter den angegebenen Mittelwerten liegen.

Als Mittelwerte für Baden-Württemberg lassen sich, mit den gleichen Einschränkungen, für die effektive Dosis im 1. Jahr nach dem Tschernobyl-Unfall etwa 0,2 mSv und für die gesamte effektive Dosis in den nach dem Unfall folgenden 50 Jahren etwa 0,7 mSv abschätzen. Die zusätzliche Strahlenbelastung für die Bewohner des Landes durch den Reaktorunfall war somit im 1. Jahr nach dem Unfall kleiner als die Schwankungsbreite der jährlichen natürlichen Strahlenexposition durch unterschiedliche Aufenthaltsorte (bis zu 3 mSv pro Jahr). Die Zusatzbelastung wird auch für die gesamte Lebenszeit selbst in den stärker belasteten Regionen nicht höher sein als die natürliche Strahlenexposition in einem Jahr (einige mSv, bis zu 4 mSv pro Jahr).

Anhang

Informationen

Videotext

Im Videotext des Fernsehprogramms des Südwestfunks (Südwest-Text) werden auf Tafel 196 aktuelle mit dem Kernreaktorfernüberwachungssystem und dem Strahlenpegel-Messnetz ermittelte Messwerte der Ortsdosisleistung bekanntgegeben. Tafel 198 enthält ergänzende Informationen zur Radioaktivitätsüberwachung.

World Wide Web

Strahlenpegelmesswerte aus den Bereichen der Kernreaktorfernüberwachung und der Umweltüberwachung sowie weitere interessante Hinweise zum Bereich Strahlenschutz sind auch im World Wide Web unter der Adresse www.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/akt32.htm zu finden.

Jahresbericht der Umgebungsüberwachung

Alle Messergebnisse aus der Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität werden regelmäßig in Jahresberichten veröffentlicht. Sie sind somit allgemein zugänglich.

Größen und Einheiten

Tabelle 1: Radiologische Größen und Maßeinheiten

Physikalische Größe	Einheiten		gebräuchliche Untereinheiten und Bezug zu alten Einheiten
	- Bezeichnung	- Kurzzeichen	
Aktivität	Becquerel	Bq	
Energiedosis	Gray	Gy	1µGy=100 µrad 1mGy= 100 mrad
Energiedosisleistung	Gray pro Stunde Gray je Jahr	Gy/h Gy/a	1µGy/h= 100 µrad/h 1mGy/a= 100 mrad/a
Körperdosis	Sievert	Sv	1µSv=100 µrem 1mSv= 100 mrem
Körperdosisleistung	Sievert pro Stunde Sievert je Jahr	Sv/h Sv/a	1 µSv/h = 100 µrem/h 1 mSv/a = 100 mrem/a

Tabelle 2: Vorsatzzeichen für Einheiten

Da die Werte der Messgrößen sich über viele Größenordnungen erstrecken können, werden anstelle der Faktoren für Teile oder Vielfache eindeutige Vorsatzzeichen an den Einheiten(-zeichen) angebracht.

	Multiplikationsfaktor		Vorsatz	Vorsatzzeichen
10 ⁻¹⁸	0,000 000 000 000 000 001	Trillionstel	Atto	a
10 ⁻¹⁵	0,000 000 000 000 001	Billiardstel	Femto	f
10 ⁻¹²	0,000 000 000 001	Billionstel	Pico	p
10 ⁻⁹	0,000 000 001	Milliardstel	Nano	n
10 ⁻⁶	0,000 001	Millionstel	Mikro	µ
10 ⁻³	0,001	Tausendstel	Milli	m
10 ³	1 000	Tausendfach	Kilo	k
10 ⁶	1 000 000	Millionenfach	Mega	M
10 ⁹	1 000 000 000	Milliardenfach	Giga	G
10 ¹²	1 000 000 000 000	Billionenfach	Tera	T
10 ¹⁵	1 000 000 000 000 000	Billiardenfach	Peta	P
10 ¹⁸	1 000 000 000 000 000 000	Trillionenfach	Exa	E

Erläuterungen von Begriffen

Aerosol

Gemisch aus Luft und festen oder flüssigen Schwebeteilchen.

Aktivierung

Vorgang, durch den ein Material beim Beschuss mit Neutronen, Protonen oder anderen Teilchen durch Kernumwandlungen radioaktiv wird

Aktivierungsprodukte

Radionuklide, die durch Aktivierung entstehen

Aktivität

quantitatives Maß für die Radioaktivität; auch: Zerfallsrate, Zahl der je Sekunde zerfallenden bzw. sich umwandelnden Atomkerne eines radioaktiven Stoffes. Einheit ist das Becquerel (Bq). Ein Becquerel entspricht dabei einem Zerfall pro Sekunde. Die alte Einheit war das Curie (Ci); die Umrechnung ist $1 \text{ Ci} = 37 \cdot 10^9 \text{ Bq}$.

Alphastrahler

Radionuklide hoher Massenzahl, deren Atomkerne beim Zerfall Alphastrahlen (Heliumatomkerne mit Massenzahl 4) emittieren.

Äquivalentdosis

Im Strahlenschutz benutzte Größe für die biologisch bewertete Dosis; Produkt aus Energiedosis und Bewertungsfaktor; Einheit ist das Sievert (Sv).

Becquerel

Einheit der (Radio-)Aktivität; 1 Becquerel bedeutet, dass im statistischen Mittel 1 Atomkern je Sekunde zerfällt. Einheitenzeichen ist Bq.

Betastrahler

Radionuklide, deren Atomkerne bei Umwandlung eines Kernbausteins negativ geladene Elektronen oder positiv geladene Positronen emittieren.

Bewertungsfaktor

Faktor für die Beurteilung der biologischen Wirkung einer bestimmten Energiedosis von Strahlung. Er setzt sich zusammen aus dem Qualitätsfaktor für die Strahlenart und einem Faktor, der die räumliche und zeitliche Verteilung der Strahlung berücksichtigt.

Brutprozess

Vorgang zur Umwandlung von nichtspaltbarem Material in spaltbares Material.

Deposition

Ablagerung, Einlagerung; im weiteren Sinne Eintrag in eine oberflächennahe Schicht

Dosis

Maß für die Wirkung absorbierter ionisierender Strahlung

Dosisleistung

Quotient aus der Dosis und dem zugrundegelegten Zeitraum (in der Regel: je Stunde).

Effektivdosis

Kurzbezeichnung für effektive Äquivalentdosis; Summe der gewichteten Organdosen.

Elektronvolt

in der Atom- und Kernphysik gebräuchliche Energieeinheit. Sie ist die von einem Elektron beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von 1 Volt gewonnene kinetische Energie und entspricht $0,16 \cdot 10^{-18}$ Joule. Einheitenzeichen ist eV. Abgeleitete größere Einheiten sind das Kiloelektronvolt ($10^3 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$) und das Megaelektronvolt ($10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$).

Emission

Abgabe, Ausstoß, Freisetzung von Stoffen in die Atmosphäre oder ein Gewässer; hier auch Aussendung von ionisierenden Strahlen

Energiedosis

ist die durch ionisierende Strahlung auf eine Masseneinheit der bestrahlten Materie übertragene Energie. Einheit ist das Gray (Gy).

Erkennungsgrenze

Wert, oberhalb dessen ein Messeffekt mit hoher Wahrscheinlichkeit einem realen Beitrag der untersuchten Größe entspricht.

Fallout

Ablagerung von kleinsten radioaktiven Teilchen aus der Atmosphäre, die z. B. aus Kernwaffenversuchen entstanden sind

FM

Abkürzung für Feuchtmasse (Bei Lebensmitteln wird häufig auch von „Frischmasse“ gesprochen)

Gammastrahlung

energiereiche elektromagnetische Strahlung von deutlich quantenhafter Natur, die bei einer radioaktiven Kernumwandlung auftreten kann und aus dem Atomkern stammt.

Gammaspektrum

Gesamtheit aller emittierten und als Linien nachgewiesenen Gammaenergien. Eine mit aufwendigen Mess- und Auswertemethoden gewonnene Analyse der Energieverteilung eines Gammastrahlenfelds. Aus den Lagen und Höhen der Gammalinien (als „Fingerabdrücke“) kann unter Berücksichtigung mehrerer Randbedingungen auf die Art und Menge der vorliegenden gammaemittierenden Radionuklide geschlossen werden.

Gray

Einheit der Energiedosis. Einheitenzeichen ist Gy.

1 Gray entspricht 1 Joule/Kilogramm. Die alte Einheit war $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$.

Halbwertszeit

Zeitspanne, nach der die Hälfte der Atome einer ursprünglichen Menge eines radioaktiven Stoffes zerfallen ist bzw. sich umgewandelt hat.

Immission

lokale Einwirkung von Luftfremdstoffen z. B. Radionukliden u.a. auf Mensch, Tier und Vegetation; auch Einfall von ionisierenden Strahlen.

Ingestion

Nahrungsaufnahme, hier: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Nahrung.

Inhalation

Einatmung von Gasen, Aerosolen oder Stäuben, hier: Aufnahme von radioaktiven Stoffen mit der Atemluft.

Inkorporation

Aufnahme in den Körper, hier: Aufnahme von radioaktiven Stoffen in den menschlichen Körper.

Ionisation

Abspaltung oder Aufnahme von Elektronen bei Atomen oder Molekülen

Ionisierende Strahlung

Strahlung, die direkt oder indirekt ionisiert, z.B. Alpha-, Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlung.

Isotope

Atomarten eines Elementes mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedenen Massenzahlen. Isotope eines Elementes unterscheiden sich in der Zahl der Neutronen im Atomkern.

Körperdosis

Sammelbegriff für Organdosis und effektive Dosis.

Körperdosis, effektive -

körpergemittelte und organsgewichtete Körperdosis, die die jeweilige Strahlenempfindlichkeit der einzelnen Organe berücksichtigt. Einheit ist das Sievert (Sv).

Kontamination

hier: Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen

Korrosionsprodukte

hier: durch Aktivierung radioaktiv gewordene Inhaltsstoffe in Kreisläufen von kerntechnischen Anlagen

Nachweisgrenze

gibt an, ob ein Meßverfahren bestimmten Anforderungen genügt und für den vorgesehenen Messzweck geeignet ist (Nachweisbarkeitsgrenze).

Nuklid

durch Protonenzahl und Neutronenzahl charakterisierte Atomart

Nulleffekt

auch Nullrate; Anzahl der Impulse je Zeiteinheit, die in einem Strahlungsdetektor durch andere Ursachen als die zu messende Strahlung ausgelöst werden. Zur Erzielung niedriger Nachweisgrenzen ist der Nulleffekt als statistisches Rauschen so gering wie möglich zu halten.

Organdosis

Produkt aus der mittleren Energiedosis in einem Organ und dem Wichtungsfaktor.

Ortsdosis

an einem bestimmten Ort gemessene Äquivalentdosis für Weichteilgewebe.

Parameter

veränderbare Einflussgröße

Radioaktive Stoffe

Stoffe, die aus Radionukliden bestehen oder solche enthalten (Kernbrennstoffe und sonstige Stoffe, die ionisierende Strahlen aussenden).

Radioaktivität

Eigenschaft instabiler Nuklide, sich ohne erkennbare äußere Einwirkung spontan umzuwandeln und dabei ionisierende Strahlen auszusenden

Radionuklide

instabile Nuklide, die sich unter Emission von Strahlung in andere Nuklide umwandeln (zerfallen)

Radionuklide, künstliche

nichtnatürliche, durch menschliche Tätigkeit geschaffene Radionuklide

Radionuklide, natürliche

nicht durch menschliche Tätigkeit geschaffene, in der Natur vorhandene Radionuklide

Röntgenstrahlung

wie Gammastrahlung elektromagnetischer Natur; stammt aber aus der Atomhülle oder kommt durch Abbremsung von beschleunigten Elektronen zustande.

Sievert

Einheit der Körper- bzw. Effektivdosis; Einheitenzeichen ist Sv. Die alte Einheit war 1 rem = 0,01 Sv.

Spaltprodukte

Radionuklide, die bei der Spaltung von Atomkernen (Kernspaltung) entstehen

Strahlenexposition

Einwirkung ionisierender Strahlen

Strahlenexposition, natürliche

die durch natürlich vorkommende Radionuklide und Strahlenfelder verursachte Einwirkung auf den Menschen

TM

Abkürzung für Trockenmasse

Datennachweis (externe Quellen)

1. Bundesamt für Energie (Schweiz) Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, CH-Villigen
Electricité de France, Centre Nucléaire de Production d'électricité de Fessenheim
Abbildung 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, und 4.15
2. Bundesamt für Strahlenschutz,
Abbildung 3.4
Institut für atmosphärische Radioaktivität, Freiburg
Abbildung 3.8
3. Bundesanstalt für Milchforschung, Kiel
Abbildung 3.35
4. Chemische Landesuntersuchungsanstalten Freiburg; Chemisches- und Veterinäruntersuchungsamt Stuttgart
Abbildung 3.22, 3.23, 3.24, 3.25 und 3.26, sowie 3.30, 3.31, 3.33, 3.34 und 3.36
5. Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Abbildung 5.1, 5.2, 5.3 und 5.4
Veröffentlichung der SSK, Bd 47 „Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten“
Abbildung 1.3
6. Deutscher Wetterdienst, Offenbach
Abbildung 3.9 und 3.10
7. Fachhochschule Ravensburg - Weingarten
Abbildung 3.13, 3.21, 3.27, 3.28, 3.29 und 3.32
8. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt
Abbildung 3.37, 4.7, 5.5
9. ehem. Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene
Abbildung 3.15
10. Jeweilige kerntechnische Anlage des Landes einschließlich Deutsches Krebsforschungszentrum und Forschungszentrum Karlsruhe
Abbildung 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 und 4.10