




Radioaktivität in Baden-Württemberg

 2002 bis 2011



Baden-Württemberg

Radioaktivität in Baden-Württemberg

 2002 bis 2011



Baden-Württemberg

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 76231 Karlsruhe, Postfach 100163, www.lubw.baden-wuerttemberg.de poststelle@lubw.bwl.de , Tel: 0721/5600-0
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Abteilung 3 – Technischer Umweltschutz; Referat 32 - Radioaktivität, Strahlenschutz
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Abteilung 3 – Technischer Umweltschutz Referat 32 - Radioaktivität, Strahlenschutz
BEZUG	Download unter http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/220325/
ISSN	1436-2783 (Bd. 17, 2012)
STAND	Mai 2012
BILDNACHWEIS	Titelbild: LUBW Karlsruhe



1	EINLEITUNG	9
1.1	Fukushima - 25 Jahre nach Tschernobyl	9
1.2	Der Reaktorunfall in Tschernobyl	9
1.2.1	Reaktorbauart	9
1.2.2	Unfallablauf	10
1.2.3	Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung radioaktiver Stoffe	10
1.2.4	Auswirkungen auf Europa und Baden-Württemberg	10
1.3	Der Reaktorunfall in Fukushima	12
1.3.1	Die Naturkatastrophen	12
1.3.2	Die Reaktorkatastrophe	12
1.3.3	Auswirkungen auf Baden-Württemberg	13
2	RADIOAKTIVITÄT – GRUNDBEGRIFFE UND URSPRUNG	17
2.1	Eigenschaften von Radioaktivität	17
2.1.1	Zerfallsgesetz	17
2.1.2	Strahlungsarten	17
2.2	Grundlegende Begriffe	18
2.3	Auswirkungen auf die Gesundheit	19
2.4	Natürliche Radioaktivität in der Umwelt	19
2.4.1	Kalium-40	19
2.4.2	Natürliche Zerfallsreihen	20
2.4.3	Radon und seine Zerfallsprodukte	20
2.4.4	Kohlenstoff-14	24
2.5	Künstliche Radioaktivität in der Umwelt	24
2.5.1	Medizinische Anwendungen	24
2.5.2	Technische Anwendungen	25
2.5.3	Rückstände in Metallschrotten	26
2.5.4	Kernkraftwerke	28
2.5.5	Reaktorunfall, Kernwaffentests	28
2.6	Strahlenexposition des Menschen	28
2.6.1	Exposition der Bevölkerung	28
2.6.2	Terrestrische Strahlung	28
2.6.3	Radoninhalation	30
2.6.4	Kosmische Strahlung	30
2.6.5	Aufnahme durch Nahrung	30
2.6.6	Medizinische Anwendungen	30
2.6.7	Weitere Strahlenexpositionen	31
2.6.8	Cäsium-137-Aktivitätsgehalt im Körper	31
2.6.9	Gesamtdosis	31
2.6.10	Berufliche Strahlenexposition	31
2.6.11	Radonexposition in Wasserwerken	33

INHALTSVERZEICHNIS

3	ÜBERWACHUNG DER RADIOAKTIVITÄT	34
3.1	Integriertes Mess- und Informationssystem	34
3.2	Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen	35
3.3	Arbeitsgemeinschaft Gewässer	35
3.4	Kernreaktor-Fernüberwachung	36
3.5	Radioaktivitätsmessnetz	36
3.6	Überwachung von Wildfleisch	38
3.7	Emissionen aus kerntechnischen Anlagen	38
3.7.1	Abgaben mit der Abluft	38
3.7.2	Abgaben mit dem Abwasser	39
4	ERGEBNISSE DER UMWELT- UND UMGEBUNGSÜBERWACHUNG	41
4.1	Ortsdosis	41
4.1.1	Ortsdosisleistungs-Messnetz des Bundesamtes für Strahlenschutz	42
4.1.2	Kernreaktor-Fernüberwachung	43
4.1.3	Ortsdosimetrie mit Flachglasdosimetern	45
4.2	Luft	45
4.2.1	Beryllium-7	46
4.2.2	Künstliche Nuklide	46
4.3	Niederschlag, oberirdische Gewässer und Grundwasser	47
4.3.1	Niederschlag	48
4.3.2	Trink- und Grundwasser	49
4.3.3	Oberflächenwasser	50
4.3.4	Sediment/Schwebstoffe	52
4.4	Boden	54
4.5	Bewuchs	58
4.5.1	Laub und Nadeln	59
4.5.2	Gras	59
4.6	Nahrungsmittel	59
4.6.1	Milch	61
4.6.2	Fleisch	62
4.6.3	Obst	64
4.6.4	Gemüse	64
4.6.5	Getreide	65
4.6.6	Wein	66
4.7	Abwasser, Reststoffe und Abfälle	66
4.7.1	Kläranlagen	66
4.7.2	Hausmülldeponien	67
4.7.3	Müllverbrennungsanlagen	68
4.7.4	Kompostierungsanlagen	68
5	GLOSSAR	70
6	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	73
7	LITERATURVERZEICHNIS	74
8	VERÖFFENTLICHUNGEN DER REIHE RADIOAKTIVITÄT UND STRAHLENSCHUTZ	75

Zusammenfassung

Radioaktivität ist ein physikalisches Phänomen, das überall in Natur und Umwelt auftreten kann. Auch in zahlreichen technischen und medizinischen Anwendungen werden die Eigenschaften der Radioaktivität sinnvoll genutzt. Ihre Strahlung kann jedoch auch Mensch und Umwelt schaden. Beispiele hierfür sind die in Folge einer Naturkatastrophe im März 2011 havarierten Kernkraftwerke in Fukushima sowie der Reaktorunfall von Tschernobyl vor 26 Jahren. Daher wird die Anwendung von Radioaktivität streng kontrolliert und ihr Vorkommen in der Umwelt überwacht. Der vorliegende Bericht stellt die radiologische Situation in Baden-Württemberg von 2002 bis 2011 dar, wobei teilweise auch ältere Daten mit einbezogen wurden.

Die Ereignisse im April 1986 in Tschernobyl, die in Kapitel 1 kurz dargestellt werden, hatten auf Deutschland und ganz Europa erhebliche Auswirkungen. Die Ursachen des Reaktorunfalls waren konstruktive Schwächen des Reaktors und regelwidrige Veränderungen an den Sicherheitseinrichtungen. Auch der Reaktorunfall 2011 in Fukushima führte in Deutschland zu Veränderungen, insbesondere bei der Energiepolitik.

Im Bericht werden einige grundlegende Eigenschaften von Radioaktivität erläutert und deren Vorkommen in der Natur sowie das Vorhandensein künstlicher Radionuklide durch Anwendungen in der Technik und Medizin dargestellt. Von den natürlichen Radionukliden ist vor allem Kalium-40 von Bedeutung, da es mit der Nahrung aufgenommen wird. Des Weiteren trägt das Edelgas Radon, das durch den Zerfall der in Gesteinen vorkommenden Radionuklide entsteht, zur Strahlenexposition bei. Durch radiologische Untersuchungen sind die Patienten ebenfalls einer Strahlung ausgesetzt. Die verschiedenen Beiträge der Strahlenexposition, die auf jeden Menschen wirken, werden deshalb aufgezeigt.

In Baden-Württemberg wird die Umwelt flächendeckend auf Radioaktivität überwacht. Wesentlicher Bestandteil ist die Bestimmung der Aktivität in den Umweltmedien Luft, Wasser und Boden sowie in Nahrungsmitteln und Abfällen. Neben der Untersuchung von Proben aus den genannten Bereichen gibt es ein flächendeckendes Netz zur Überwachung der Gamma-Ortsdosisleistung.

In der näheren Umgebung der Standorte der kerntechnischen Anlagen Neckarwestheim, Philippsburg, Obrigheim sowie des Karlsruher Instituts für Technologie, Campus Nord ist das Überwachungsprogramm hinsichtlich der Probenanzahl als auch der Ortsdosis wesentlich verdichtet. Hierbei wird außerdem die baden-württembergische Umgebung der grenznahen Kernkraftwerke in der Schweiz und in Frankreich einbezogen.

Die kerntechnischen Einrichtungen geben mit der Fortluft und dem Abwasser radioaktive Stoffe in die Umwelt ab. Diese Emissionen werden überwacht und bilanziert. Im Berichtszeitraum wurden die zulässigen Emissionen an Aerosolen, Edelgasen, Spaltprodukten und Tritium weit unterschritten.

Das Kernreaktor-Fernüberwachungssystem liefert automatisch Daten über den Betrieb der Anlagen und Emissionen sowie über die Gamma-Ortsdosisleistung im Umkreis von 10 km um die Anlagen. Im Berichtszeitraum wurden keine erhöhten Strahlenpegel-Messwerte festgestellt, die auf ein radiologisches Ereignis im Kernkraftwerk zurückzuführen sind. Die ermittelte Gamma-Ortsdosisleistung lag im Bereich der im Land üblichen Werte.

In nahezu allen untersuchten Umweltmedien finden sich natürlich vorkommende Nuklide, am häufigsten Kalium-40 und Beryllium-7. Ferner kommen in vielen Medien sehr geringe Aktivitätskonzentrationen der künstlichen Nuklide Cäsium-137 und Strontium-90 vor. Während Strontium hauptsächlich aus den oberirdischen Kernwaffenversuchen stammt, hat Cäsium-137 seinen Ursprung zu großen Teilen im Reaktorunfall von Tschernobyl. Hierbei finden sich vor allem in den südöstlichen Landesteilen deutlich höhere Konzentrationen als im Norden. Dies liegt an den Wetter- und Niederschlagsverhältnissen, die in den Tagen und Wochen nach dem Reaktorunfall herrschten. Vereinzelt wurden auch radioaktive Stoffe aus medizinischen Anwendungen gefunden, hierbei vor allem das Nuklid Iod-131.

Die Konzentrationen der gefundenen künstlichen radioaktiven Stoffe waren in den letzten Jahren so gering, dass die durch sie hervorgerufene Strahlenexposition für den Menschen gegenüber der natürlichen Exposition unbedeutend ist. Die untersuchten Nahrungsmittel enthalten mit Ausnahme von Wildschweinfleisch äußerst geringe Aktivitäten von Cäsium-137 und Strontium-90. Lediglich Wildschweinfleisch erreicht in belasteten Gebieten zum Teil so hohe Cäsium-Gehalte, dass es nicht für den Verzehr geeignet ist. Die Hauptnahrungsmittel sind nahezu frei von künstlichen Radionukliden, sie sind dort so gut wie nicht mehr nachzuweisen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in Baden-Württemberg die Strahlenexposition des Menschen hauptsächlich durch natürliche Radionuklide und durch radiologische Untersuchungen hervorgerufen wird. Insgesamt erhält jeder Bürger somit eine Strahlenexposition von durchschnittlich 4 Milli-Sievert (mSv) pro Jahr. Im Vergleich dazu sind die heutigen Folgen des Reaktorunfalls in Tschernobyl mit 0,01 mSv/Jahr und die Auswirkungen aus dem Betrieb der Kernkraftwerke mit 0,001 mSv/Jahr unbedeutend. Die Reaktor-katastrophe im März 2011 in Fukushima/Japan hatte keine Auswirkungen auf Baden-Württemberg.

1 Einleitung

1.1 Fukushima - 25 Jahre nach Tschernobyl

Die öffentliche Diskussion über die Themenkomplexe Radioaktivität und Strahlung wurde bis zur Katastrophe von Fukushima am 11. März 2011 hauptsächlich durch den Reaktorunfall im ukrainischen Kernkraftwerk Tschernobyl am 26. April 1986 geprägt. In Tschernobyl führten sowohl Fehlhandlungen des Bedienpersonals als auch konstruktive Mängel des Reaktortyps zu einer Freisetzung großer Mengen radioaktiver Substanzen in die Umwelt. Weite Gebiete in der Ukraine, Weißrussland und Russland wurden dabei kontaminiert. Ein kleinerer Teil der radioaktiven Stoffe gelangte dabei auch nach Mitteleuropa und Baden-Württemberg und wurde dort in der Umwelt abgelagert. Diese Stoffe sind in der Zwischenzeit zum Teil zerfallen, zum Teil jedoch immer noch nachweisbar.

In Fukushima haben dagegen ein extremes Erdbeben der Stärke 9,0 und der darauffolgende bis zu 14 m hohe Tsunami katastrophale Zerstörungen bis weit ins Landesinnere bewirkt. Hiervon waren auch die Kernkraftwerke an der japanischen Ostküste betroffen. Die Integrität ihrer Anlagen war zwar für Erdbeben bis Stärke 8,2 ausgelegt und vor Flutwellen bis 5,70 m Höhe geschützt. Diesen weitaus stärkeren, bislang in Japan einmaligen Naturgewalten haben ihre Sicherheitssysteme nicht Stand halten können. Inzwischen gilt als gesichert, dass in den Blöcken 1 bis 3 jeweils die Reaktorkerne zum großen Teil geschmolzen und Freisetzungen großer Mengen an Radioaktivität in Luft und Wasser erfolgt sind. Die Auswirkungen der Radioaktivität sind weit um die Anlagen herum messbar, Europa und mit hin auch Baden-Württemberg sind davon nicht betroffen. Es gibt aber auch noch andere Quellen für künstliche Radioaktivität in der Umwelt, wie z. B. der Fallout aus den Kernwaffenversuchen der 1950er und frühen 1960er Jahre und nuklearmedizinische Anwendungen. Diese Radioaktivität in der Umwelt wird durch verschiedene Programme regelmäßig überwacht und die bundesweiten Ergebnisse jährlich veröffentlicht. Ferner wurden in größeren Abständen, zuletzt für die Jahre 1998-2001, Übersichtsberichte für Baden-Württemberg herausgegeben, in denen die Ergeb-

nisse verschiedener Messprogramme zusammengefasst und erläutert sind. Des Weiteren erscheinen im Abstand von drei Jahren die *Umweltdaten*, die im [Internet](#) verfügbar sind. Hierin sind aktuelle Informationen zur Umweltsituation im Land enthalten.

2011 jährte sich der Reaktorunfall in Tschernobyl zum 25. Mal. Aus diesem Anlass wird der Radioaktivitätsbericht bis zu diesem Berichtsjahr fortgeschrieben. Er berücksichtigt dabei insbesondere die Auswirkungen des Unfalls in Tschernobyl, die – im Gegensatz zu Fukushima – auch heute noch in der baden-württembergischen Umwelt feststellbar sind.

1.2 Der Reaktorunfall in Tschernobyl

1.2.1 Reaktorbauart

Der Reaktor in Tschernobyl war ein Druckröhren-Siedewasserreaktor des Typs RBMK (russisch: Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny – Reaktor mit großer Leistung vom Kanaltyp), der Mitte der 1960er Jahre in der Sowjetunion entwickelt wurde. Dieser Reaktortyp verwendet Graphit, um die Neutronen zu moderieren und wird mit Wasser gekühlt. Anstelle des in den westlichen Reaktoren üblichen Druckbehälters werden Druckröhren verwendet, in denen sich die Brennstäbe befinden. Die Reaktorleistung wird durch Regelstäbe reguliert, die in den Reaktor eingefahren werden können. Im Gegensatz zu den westlichen Reaktoren besitzen die RBMK-Reaktoren kein Containment, das die radioaktiven Stoffe bei einem Unfall einschließen könnte.

Der Reaktortyp RBMK besitzt gegenüber den westlichen Reaktoren aber noch weitere konstruktionsbedingte Nachteile, insbesondere den positiven Reaktivitätskoeffizienten. Bei einem Ansteigen der Kühlmitteltemperatur wird unter bestimmten Bedingungen die Leistung des Reaktors verstärkt, was zu einem unkontrollierten Anstieg der Energieproduktion führen kann. Westliche Reaktoren besitzen dagegen einen negativen Reaktivitätskoeffizienten, wodurch bei einem Temperaturanstieg im Reaktor die Leistung abgeschwächt wird und die Energieproduktion schließlich zum Erliegen kommt.

1.2.2 Unfallablauf

Zu dem Unfall in Tschernobyl am 26. April 1986 trugen verschiedene Ereignisse bei, von denen nur die wichtigsten im Folgenden aufgeführt sind:

Am 25. April wurde begonnen, den Reaktor für die anstehende Revision abzuschalten. Im Zusammenhang mit diesem Abschaltvorgang war ein Versuch geplant, bei dem der Verlust von Kühlmittel als Störfallszenario überprüft werden sollte. Der Abschaltvorgang wurde jedoch durch die Anforderung nach weiterer Stromproduktion für die Stadt Kiew verzögert.

In den frühen Morgenstunden des 26. Aprils wurde der Reaktor bei teilweise abgeschalteten Sicherheitseinrichtungen regelwidrig bei geringer Leistung weiterbetrieben. Vor Beginn des Versuches befand sich die Anlage in einem instabilen Zustand. Außerdem wurde eine automatische Notabschaltung außer Funktion gesetzt, um den Versuch ggf. wiederholen zu können. Im Rahmen des Versuchs wurden die Hauptkühlmittelpumpen abgeschaltet. Der Test sollte zeigen, ob die Turbinen bei einem Stromausfall noch genug Restenergie für die Kühlmittelpumpen liefern. Hierdurch stieg jedoch die Reaktortemperatur, was durch den oben beschriebenen positiven Reaktivitätskoeffizienten zu einem unkontrollierten Leistungsanstieg des Reaktors führte. Der enorme Anstieg der Energiefreisetzung hatte die Zerstörung des Reaktorkerns zur Folge. Die Verdampfung des umgebenden Kühlmittels führte zu einem hohen Druckanstieg und damit zur Explosion des Reaktors. Das Abbrennen des Graphits konnte erst nach mehreren Tagen gelöscht werden. Durch die enorme Hitze wurden die leicht flüchtigen Spaltprodukte in bis zu 1,5 km Höhe geschleudert und aufgrund wechselnder Windverhältnisse über große Teile Europas verfrachtet.

Die Hauptursachen des Reaktorunfalls liegen in einer Kombination aus konstruktiven Schwächen des Reaktortyps, der Unkenntnis dieser Schwächen beim Reaktorpersonal, unzureichender Wirksamkeit der Abschalteinrichtungen und schwerwiegenden Verstößen gegen die geltenden Betriebsvorschriften.

1.2.3 Maßnahmen zur Verringerung der Freisetzung radioaktiver Stoffe

Innerhalb weniger Monate wurde eine Abdeckung bzw. ein Sarkophag über den zerstörten Reaktorblock gebaut, um die Freisetzung von radioaktiven Stoffen und Strahlung einzudämmen. Aufgrund der Dringlichkeit und Eile, in der der Sarkophag errichtet wurde, weist dieser erhebliche Defizite auf. Bis 2008 wurden Stabilisierungsmaßnahmen durchgeführt. Über den bestehenden Sarkophag soll nun ein neuer erbaut werden. Hierbei handelt es sich um eine Stahlkonstruktion in Form eines Bogens mit einer Spannweite von ca. 250 m und einer Höhe von ca. 100 m. Er wird außerhalb des Reaktorblocks errichtet und anschließend über den alten Sarkophag geschoben. Eine Simulation über den Bau des Sarkophags ist im Internet unter www.youtube.com/watch?v=jvEDVuGOJ6Y abrufbar. Diese neue Schutzhülle ist für einen Zeitraum von 100 Jahren ausgelegt. Des Weiteren wird ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente gebaut.

Der Betrieb der benachbarten Reaktorblöcke im Kernkraftwerk Tschernobyl wurde erst im Jahre 2000 vollends beendet. Der Rückbau des zerstörten Reaktors wird mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Die radioaktiven Materialien sollen sicher endgelagert und der derzeit bestehende Sarkophag unter der neuen Schutzhülle abgebaut werden. Diese Maßnahmen sollen den Standort Tschernobyl in einen sicheren Zustand überführen.

1.2.4 Auswirkungen auf Europa und Baden-Württemberg

Die hohen Temperaturen während des Graphitbrandes führten dazu, dass die freigesetzten Radionuklide bis in eine Höhe von 1,5 km geschleudert wurden. Auf diese Weise wurden sie mit der Luft weit über Europa verteilt. Der Transport in der Atmosphäre und die vorherrschenden Windverhältnisse hatten zur Folge, dass am 30. April 1986 luftgetragene Radionuklide in Baden-Württemberg messbar waren. In Kapitel 4.2 wird hierauf näher eingegangen. Nach Durchzug der radioaktiven Wolke reduzierte sich die Aktivitätskonzentration in der Luft schnell wieder auf das ursprüngliche Niveau.

Die Ablagerung von Radionukliden auf dem Boden erfolgte hauptsächlich durch Auswaschung aus der Luft durch Niederschläge, sodass die Kontamination der Böden von

der Niederschlagsmenge während des Durchzuges der radioaktiven Luftmassen abhing. In Deutschland war der Süden deutlich stärker betroffen als der Norden des Landes. Insbesondere im Bayerischen Wald und südlich der Donau wurden Cäsium und Iod abgelagert. Hier wurden z. T. bis zu 100.000 Becquerel (Bq) pro m² Cäsium gemessen, wobei die Verteilung regional sehr stark variierte. Dies spiegelt sich auch heute noch bei Untersuchungen der Böden wider (siehe Kapitel 4.4).

In den ersten Tagen und Wochen nach dem Unfall war für die Strahlenexposition des Menschen das relativ kurzlebige Iod-131 mit einer Halbwertszeit von acht Tagen von Bedeutung. Es lagerte sich auf der Oberfläche ab und gelangte über Grünfütter in Milch und Milchprodukte, wodurch es mit der Nahrung aufgenommen wurde. Die Aktivität von Iod-131 in Milch war aufgrund seines Zerfalls innerhalb von wenigen Wochen zurückgegangen und ab Juli 1986 nicht mehr nachweisbar. Im Kapitel 4 sind hierzu detaillierte Informationen enthalten.

Cäsium-137 hingegen hat eine Halbwertszeit von ca. 30 Jahren und ist deshalb auch heute noch in vielen Böden Baden-Württembergs vorhanden (siehe Kapitel 4.4). Die Ablagerung auf dem Boden und Blattoberflächen führte auch hier dazu, dass es mit Nahrungsmitteln aufgenommen wurde. Im Sommer 1986 war es in einigen Regionen notwendig, auf den Verzehr von Freilandgemüse zu verzichten. In der Milch stieg die Aktivitätskonzentration in den Wintermonaten 1986/1987 nochmals an, da z. T. kontaminiertes Heu vom Sommer verfüttert wurde. In den folgenden Jahren nahm die Aktivitätskonzentration landwirtschaftlicher Produkte in Deutschland schnell ab. Lediglich in Pilzen, Waldbeeren und somit auch im Wild sind heute noch deutliche Kontaminationen feststellbar.

Im Sommer 2010 wurde wegen der Waldbrände in Russland befürchtet, dass erneut radioaktive Partikel in die Luft gelangen und über weite Distanzen verfrachtet werden. Für Deutschland hatten diese Brände jedoch keine radiologische Bedeutung.

Insgesamt lässt sich für die Bevölkerung in Deutschland im Durchschnitt eine effektive Gesamtdosis von 0,01 mSv/a aus den Folgen des Reaktor-Unfalls in Tschernobyl ablei-

ten, wobei regional und in Abhängigkeit der Verzehrsgewohnheiten große Unterschiede bestehen. Im Vergleich zur mittleren effektiven Dosis durch natürliche Strahlung in Höhe von 2,1 mSv/a (siehe hierzu auch Kapitel 2.6) ist der Beitrag durch Tschernobyl sehr gering.

In Folge der Erfahrungen des Reaktorunfalls wurde in Deutschland im Dezember 1986 das Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG) erlassen. Das Gesetz fordert die Überwachung der Radioaktivität der Umwelt und die Minimierung der Strahlenexposition der Bevölkerung im Falle eines radiologischen Ereignisses. Die großräumige Überwachung der Umweltradioaktivität wird durch das Integrierte Mess- und Informationssystem (IMIS) des Bundes und der Länder realisiert. Hierzu wird die Gamma-Ortsdosisleistung, die Aktivitätskonzentration in der Luft, im Niederschlag, in Flüssen und in der Nord- und Ostsee kontinuierlich überwacht. Für die Messung der bodennahen Gamma-Ortsdosisleistung wurden bundesweit etwa 2150 Messstationen installiert, davon ca. 220 allein in Baden-Württemberg. Die aktuellen Messwerte können auf der Homepage des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) unter <http://odlinfo.bfs.de/> eingesehen werden.

Auf internationaler Ebene wurden Vereinbarungen zur Sicherstellung des Informationsaustausches und der Hilfeleistung im Ereignisfall getroffen.

Im Rahmen des IMIS werden vom Bund und den Ländern die unterschiedlichen Umweltbereiche und Nahrungsmittel analysiert. Hierbei werden auch die Langzeitfolgen des Ereignisses in Tschernobyl sichtbar. Bei den gammaspectrometrischen Untersuchungen der Bodenoberfläche in Baden-Württemberg sind noch heute Cäsium-Aktivitäten, die aus Tschernobyl stammen, nachweisbar. Cäsium reichert sich außerdem in Pilzen und Wildschweinen an, weshalb diese Nahrungsmittel mit speziellen Untersuchungsprogrammen der Chemischen und Veterinäruntersuchungsämter (CVUA) überwacht werden. Die Messprogramme werden im Kapitel 3 näher erläutert. Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Kapitel 4 dargestellt.

1.3 Der Reaktorunfall in Fukushima

1.3.1 Die Naturkatastrophen

Die betroffenen Kernkraftwerke an der japanischen Küste wurden von zwei aufeinanderfolgenden Naturkatastrophen heimgesucht. Am 11. März 2011 ist um 14:46 Uhr (06:46 Uhr MEZ) ca. 150 km vor der japanischen Ostküste ein starkes Erdbeben aufgetreten. Es wurde durch ruckartige tektonische Verschiebungen in einer Tiefe von etwa 20 bis 30 km unter der Meeresoberfläche ausgelöst. Es hatte eine Stärke von 9,0 auf der logarithmischen Skala. Damit ist über sechsmal mehr Energie freigesetzt worden als bei dem stärksten je in Japan registrierten Beben. Das zweite Ereignis war der vom Erdbeben ausgelöste Tsunami. Die Flutwelle überspülte die Küste und das angrenzende Hinterland. Von den extrem starken Erschütterungen und den hereinbrechenden Wassermassen waren damit auch die Kernkraftwerksstandorte Fukushima I (Daiichi), Fukushima II (Daini), Onagawa und Tomari betroffen, am schwersten die Blöcke 1-4 von Fukushima-Daiichi.

1.3.2 Die Reaktorkatastrophe

Am Standort Fukushima-Daiichi wurden sechs Siedewasserreaktoren ähnlichen Designs (sie entsprechen dem Typ BWR 3 bis BWR 5 von General Electric) betrieben, die Blöcke 5 und 6 liegen etwas abseits der Blöcke 1 bis 4. Die erdbebentechnische Auslegung der Anlage basiert auf dem stärksten bisher je in Japan registrierten Beben der Magnitude 8,2. Zu ihrer Kühlung liegen die Kraftwerke direkt an der Pazifikküste, ein 5,70 m hoher Schutzwall trennt das Anlagengelände vom Meeresniveau. Als um 15:41 Uhr die vom Beben ausgelöste Tsunamiwelle die Küste erreichte, wurde der Betonwall zwar deutlich überspült, er konnte aber wenigstens einen Teil der Wucht der aufprallenden Wassermassen abfangen. Die Überflutung des Anlagengeländes verursachte dennoch schwerste Zerstörungen an Kernkraftwerkseinrichtungen. Mit dem Ausfall nahezu aller Notstromgeneratoren war die Stromversorgung der Notkühlsysteme und damit die Haupt- und Nebenkühlwasserversorgung nicht mehr gewährleistet. Für die Stromversorgung standen nur noch die vorhandenen Batterien für eine kurze Zeitspanne zur Verfügung. In den Blöcken 1 bis 3 kam es in der Folge zu verschiedenen starken Kernschmelzen. Es gibt auch Vermutungen, dass es bereits durch die starken Erschütterungen des Bebens vor der Überflutung zu Brennelementschäden gekommen sein könnte, frühe Edelgasfreisetzungen wären hierfür ein Indiz. Die Reaktionen mit

den zirkoniumhaltigen Strukturen innerhalb des Druckbehälters ließen Wasserstoffgas entstehen, da durch die Schmelze die Temperaturen weiter anstiegen. Die innerhalb von drei Tagen folgenden Explosionen zerstörten weitestgehend die Stahlkonstruktionen der Reaktorhallen oberhalb der Reaktorebenen. Aus den teilweise geschmolzenen, zumindest aber undichten Brennstäben wurden gasförmige und leicht flüchtige Spaltprodukte in die Atmosphäre freigesetzt.

Die Reaktorblöcke Fukushima 4, 5 und 6 waren zum Zeitpunkt der Naturkatastrophe dagegen nicht in Betrieb. In Block 4 befanden sich wegen Wartungsarbeiten alle Brennelemente im Abklingbecken. Durch die hohe Nachwärmeproduktion gab es dort eine entsprechend starke Wärmeentwicklung. Das Wasser im Becken von Block 4 verdampfte innerhalb weniger Tage aufgrund dieser hohen Nachzerfallswärmeleistung und aufgrund einer Abschaltung der Kühlwasserzufuhr ins Becken. Mangels Kühlung platzten Brennstäbe auf und begannen wahrscheinlich auch zu schmelzen. Um ein Bersten der Sicherheitsbehälter zu vermeiden, wurde in verschiedenen Blöcken ein Venting, eine kontrollierte Druckentlastung in die Atmosphäre, vorgenommen. Am 15. März brach in Block 4 im Bereich des Abklingbeckens ein Feuer aus, das möglicherweise zusammen mit einer Explosion Teile der Gebäudestruktur zerstörte, sodass auch hier Radionuklide in die Atmosphäre entweichen konnten. In den Blöcken 5 und 6 befanden sich Brennelemente sowohl im Reaktor als auch im Abklingbecken. In diesen beiden Blöcken konnte jedoch eine ausreichende Kühlung der Brennelemente sichergestellt werden.

Rund 6 Stunden nach der Überflutung ordnete die Regierung erste Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor einer erhöhten Strahlenexposition an. Nach der ersten Wasserstoffexplosion wurde das Gebiet um Fukushima-Daiichi nach und nach evakuiert, zuletzt innerhalb eines Kreises von 20 km Radius. Etwa 200.000 Menschen wurden aufgefordert, ihre Häuser zu verlassen. Im weiteren Verlauf wurde zunächst versucht, die havarierten Reaktorblöcke mit Hilfe von Hubschraubereinsätzen mit Meerwasser zu kühlen. Dann haben Feuerwehr, Polizei und Militär mit Wasserwerfern und Spezial-Betonpumpen mit extra langem Ausleger Kühlwasser ins Innere der Anlagen gepumpt. Risse und Undichtigkeiten haben auch zum Aus-

tritt großer Wassermengen geführt, die den angrenzenden Meeresabschnitt mit radioaktiven Stoffen, vor allem Iod-131 und Cäsium-137, kontaminiert haben.

Neun Tage nach der Katastrophe konnte der Standort wieder an das externe Starkstromnetz angeschlossen und die 6 Blöcke sukzessive mit dem Netz verbunden werden. Die mobilen Feuerlöschpumpen konnten wieder durch elektrische Pumpen ersetzt werden. Verhältnismäßig günstige, überwiegend ablandige Winde auf das offene Meer haben die Strahlenbelastung auf dem Festland begrenzt. Alle Notmaßnahmen zur Eindämmung der Unfallfolgen wurden dadurch erschwert oder unterbrochen, dass in der Region um Fukushima immer wieder starke Nachbeben mit Magnituden bis 7,1 auftraten.

Die momentane Einschätzung lässt vermuten, dass der Anlagenstandort nicht ausreichend gegen hohe Flutwellen ausgelegt war. Die Vergangenheit zeigt, dass innerhalb geschichtlicher Zeiträume durchaus ähnlich starke Tsunamis vorgekommen sind. Damit fiel der Unfall nicht in den Bereich des Restrisikos, sondern der unzureichenden Auslegung gegenüber Einwirkungen von außen.

Eine ausführliche Chronologie der Ereignisse sowie eine ständig aktualisierte Lagebeschreibung findet man u. a. bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH unter <http://fukushima.grs.de/>. Sie sammelt und bewertet im Auftrag des Bundesumweltministeriums die Informationen zur Lage in den vom Erdbeben betroffenen Kernkraftwerken. Eine nichtamtliche, aber ausführliche Darstellung der Ereignisse und ihrer Folgen bietet auch Wikipedia unter http://de.wikipedia.org/wiki/Nuklearkatastrophe_von_Fukushima.

Der derzeitige Kenntnisstand der Unfälle in Tschernobyl und in Fukushima legt nahe, dass die radiologischen Auswirkungen in der Umgebung von Tschernobyl gravierender sind als in Fukushima. Dies ist dadurch bedingt, dass in Tschernobyl mehr radioaktive Stoffe freigesetzt wurden. Diese wurden aufgrund der Explosionen und des Brandes in die Höhe und somit in größere Entfernungen transportiert. In Japan hingegen wurden aufgrund der vorliegenden Windverhältnisse die Radionuklide zum großen Teil auf das Meer geweht.

1.3.3 Auswirkungen auf Baden-Württemberg

Die starken Beschädigungen an den Kernkraftwerken in Fukushima führten zu einer massiven Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Luft und ins Meer. Radionuklide wie Cäsium-134 und Cäsium-137, Iod-131 und Edelgase (z. B. Xenon-133) werden mit den Luftmassen transportiert und dadurch verteilt. Mit zunehmender Entfernung vom Unfallort ist somit auch eine abnehmende Aktivität in der Luft zu erwarten.

Aufgrund der großen Entfernung nach Japan bestand für die Bevölkerung in Europa keine Gesundheitsgefährdung. Mit empfindlichen Messsystemen war es dennoch möglich, einzelne Radionuklide in der Luft nachzuweisen. Das BfS betreibt auf dem Schauinsland im Schwarzwald eine Spurenmessstelle zur Überwachung des Kernwaffenteststopp-Abkommens. Künstliche Radionuklide können routinemäßig auch in sehr geringen Aktivitätskonzentrationen in der Luft nachgewiesen werden.

Bei einem Unfall in einem Kernkraftwerk werden unter anderem die beiden Cäsium-Isotope Cäsium-134 und Cäsium-137 gleichzeitig freigesetzt. In Baden-Württemberg sind als Folge des Reaktorunfalls in Tschernobyl aufgrund der Halbwertszeit von 30,2 Jahren noch geringe Aktivitäten von Cäsium-137 nachweisbar. Der aus Japan stammende Anteil des Cäsium-137 lässt sich nur ungefähr abschätzen. Als typische Radionuklide, die bei dem Unfall in Japan freigesetzt wurden, werden deshalb im Folgenden die beiden gammastrahlenden Radionuklide Iod-131 und Cäsium-134 betrachtet. Beide Nuklide wurden zwar auch bei dem Reaktorunfall in Tschernobyl in großen Mengen freigesetzt, sind aber aufgrund ihrer kurzen Halbwertszeit von 8 Tagen beim Iod-131 bzw. 2 Jahren beim Cäsium-134 inzwischen vollständig zerfallen. Die im Jahr 2011 in der Umwelt nachgewiesenen Aktivitäten beider Nuklide sind deshalb auf die Freisetzungen in Japan zurückzuführen.

Auf dem Schauinsland wurde am 24. März, also 13 Tage nach dem Erdbeben in Japan, Iod-131 mit einer Aktivität von 0,06 mBq/m³ Luft nachgewiesen. Dies entspricht 6 Iod-Zerfällen pro Sekunde in 100.000 m³ Luft bzw. 5 Zerfällen je m³ Luft und Tag. Am darauf folgenden Tag wurde außerdem Cäsium-134 mit einer Aktivität von 0,02 mBq/m³ in der Luft gemessen.

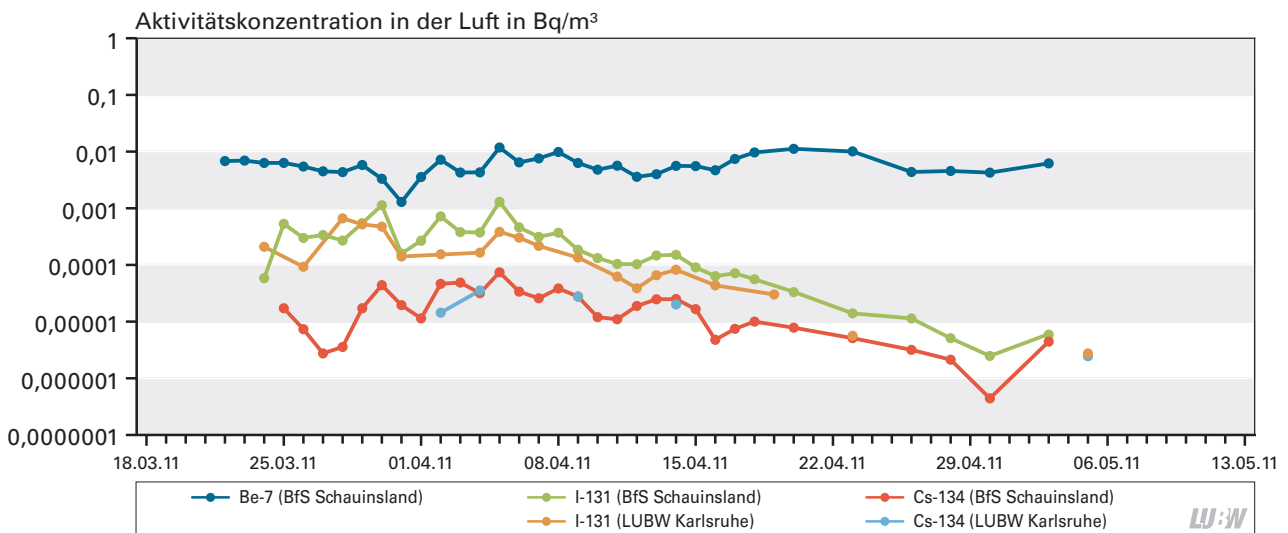


Abbildung 1.3.1: Aktivitätskonzentration von Iod-131 und Cäsium-134 in der Luft in Karlsruhe und auf dem Schauinsland, Quelle Daten Schauinsland: BfS

In der Abbildung 1.3.1 ist der zeitliche Verlauf der gemessenen Aktivitätskonzentration von Iod-131 und Cäsium-134 dargestellt. Das Maximum wurde am 5. April 2011 mit $1,3 \text{ mBq/m}^3$ für Iod-131 bzw. $0,07 \text{ mBq/m}^3$ für Cäsium-134 ermittelt. Nach dem Unfall in Tschernobyl 1986 wurden in Deutschland 10.000fach höhere Iod-131-Aktivitäten in der Luft gemessen als im Jahr 2011.

Die LUBW hat aufgrund der Ereignisse in Japan eine zusätzliche Messstation in Karlsruhe eingerichtet, die vom 24. März 2011 bis Anfang Mai 2011 betrieben wurde. Dort wurden ebenfalls radioaktive Nuklide aus Japan nachgewiesen. So betrug die maximale Aktivität von Iod-131 am 28. März $0,7 \text{ mBq/m}^3$, die maximale Cäsium-134-Aktivität wurde am 4. April mit $0,04 \text{ mBq/m}^3$ festgestellt. Der Verlauf dieser Nuklide ist ebenfalls in der Abbildung 1.3.1 dargestellt. Beide Messstationen zeigen zwischen dem 28. März und 8. April eine Erhöhung der Luftaktivität, die danach kontinuierlich abfällt.

Des Weiteren wurde auf dem Schauinsland im März und April eine Zunahme der Aktivität des Edelgases Xenon-133 in der Atmosphäre festgestellt. Näheres hierzu ist im Kapitel 4.2.2 enthalten.

Die gemessenen Aktivitäten in Luft sind sehr gering und stellen für die Bevölkerung in Deutschland keine gesundheitlichen Risiken dar. In der Abbildung 1.3.1 ist zum Vergleich die Aktivität von Beryllium-7 enthalten. Beryllium entsteht durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre

und ist ständig vorhanden (siehe Kapitel 4.2.1), was an der gleichbleibenden Aktivität zu erkennen ist. Auch während des Einflusses aus Japan war die Aktivität von Beryllium-7 um mindestens Faktor 10 größer als die der künstlichen Radionuklide.

Die in der Luft vorhandenen Elemente werden mit dem Niederschlag ausgewaschen. Dies führt zu einer Deposition der Radionuklide auf der Bodenoberfläche. Im Niederschlag selbst sind somit auch Spuren der Radionuklide aus den japanischen Reaktoren nachweisbar gewesen. In Baden-Württemberg wurden im März 2011 maximal 17 Bq/m^2 Iod-131 und $0,2 \text{ Bq/m}^2$ Cäsium-134 abgelagert (siehe Abbildung 1.3.2). Iod ist innerhalb weniger Wochen vollständig zerfallen. Die Cäsium-Deposition ist derart gering, dass auch dadurch keine nennenswerte Kontamination vorliegt.

Auf den Pflanzen findet eine trockene Deposition der Radionuklide in Form von Staub und eine nasse Deposition durch die Niederschläge statt. Abbildung 1.3.3 zeigt, dass im Rahmen der Routine-Überwachung geringe Spuren von Cäsium-134 oder Iod-131 auf Grünfütterpflanzen festgestellt wurden. Diese hatten jedoch keine Auswirkungen auf die Ernährungskette des Menschen. Die Aufnahme von Iod-131 oder Cäsium-134 durch die Wurzeln in die Pflanzen ist vernachlässigbar.

In Kläranlagen wurden ebenfalls geringe Aktivitäten von Cäsium-134 nachgewiesen, da Regenwasser in den Kläranlagen gesammelt wird und Schadstoffe sich im Klärschlamm

Cäsium-134 und Iod-131 im Niederschlag März 2011

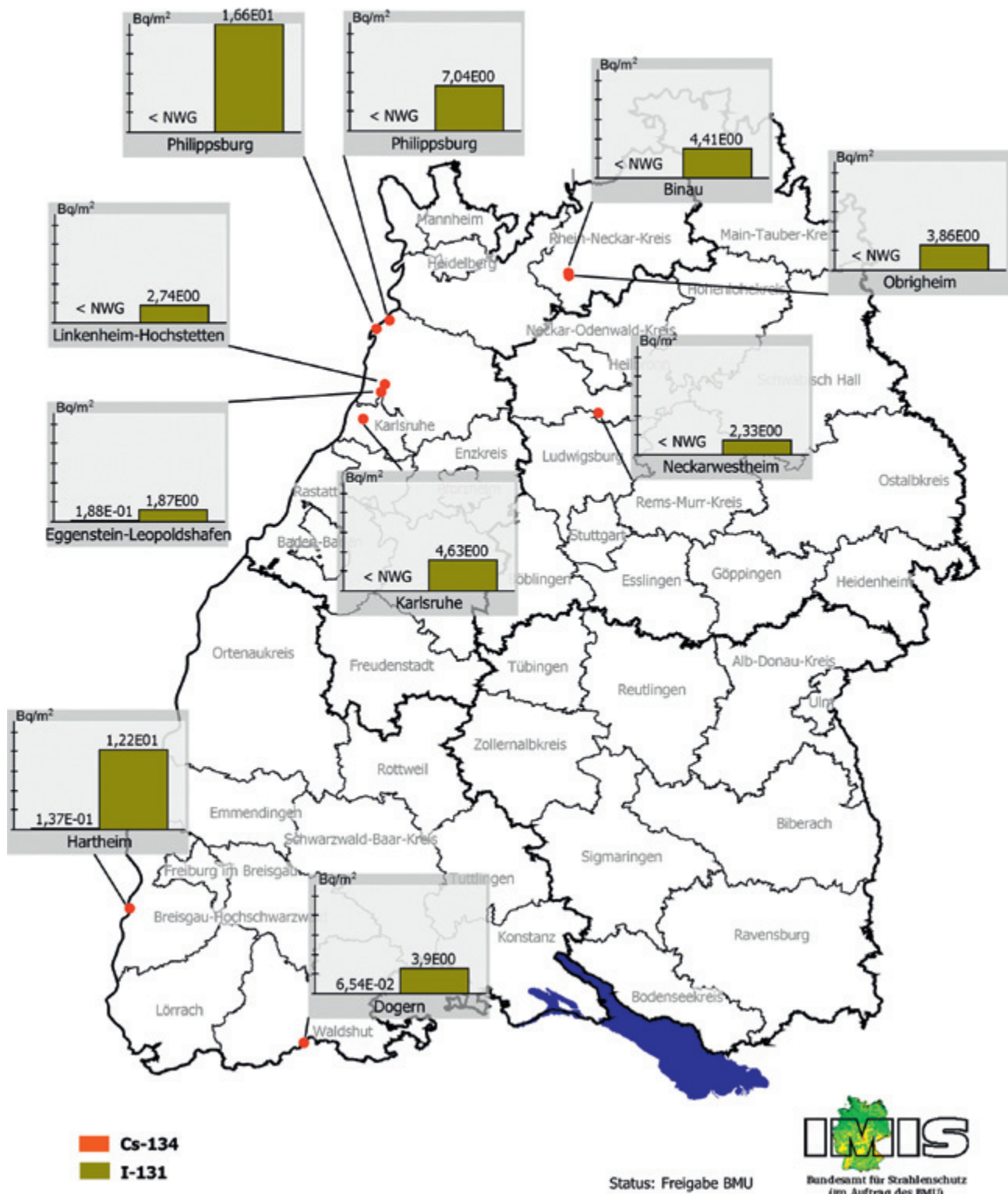


Abbildung 1.3.2: Iod-131- und Cäsium-134-Aktivität im Niederschlag im März 2011, berechnet als Deposition [Bq/m²]

anreichern. Entsprechendes trifft auch auf Rückstände aus Müllverbrennungsanlagen zu, da dort Klärschlamm verbrannt wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in Baden-Württemberg mit hochempfindlichen Messsystemen im Frühjahr 2011 geringe Spuren der in Japan freigesetzten Radionuklide Cäsium-134 und Iod-131 nachgewiesen werden

Cäsium-134 und Iod-131 in Weide- und Wiesenbewuchs April-Mai 2011

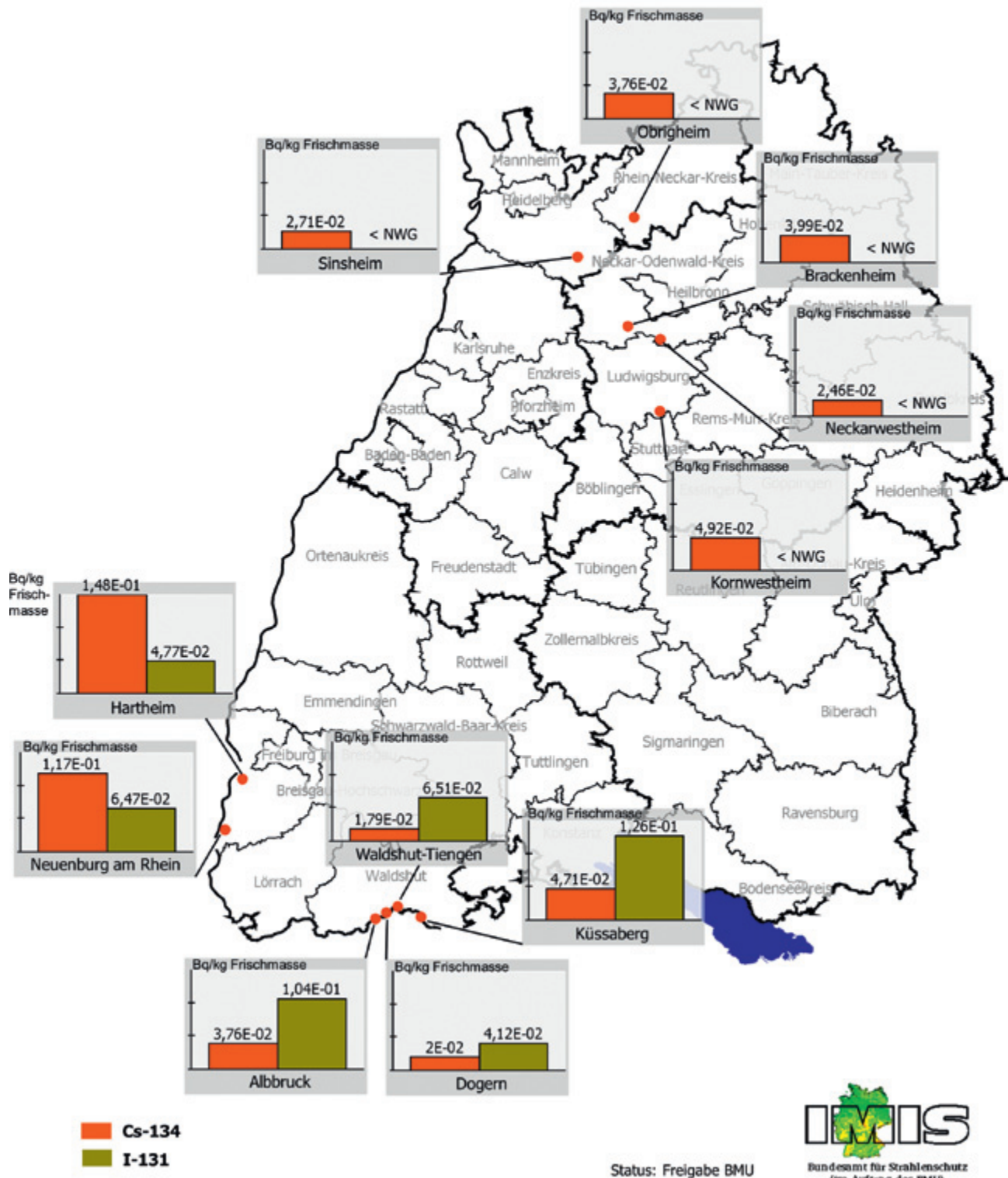


Abbildung 1.3.3: Iod-131- und Cäsium-134-Aktivität auf Weide- und Wiesenbewuchs im Frühjahr 2011

konnten. Die Aktivität war jedoch so gering, dass dies zu keiner Erhöhung der Strahlenexposition führte und es somit keinerlei gesundheitliche Auswirkungen auf die Bevölkerung in Deutschland gegeben hat.

2 Radioaktivität – Grundbegriffe und Ursprung

2.1 Eigenschaften von Radioaktivität

Die uns umgebende 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 zerfallen jedoch und wandeln sich 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, und den Zerfallsvorgang radioaktiven Zerfall. Der radioaktive Zerfall wurde vor ca. 100 Jahren von Henri Becquerel als natürliche Eigenschaft von Uranverbindungen entdeckt.

2.1.1 Zerfallsgesetz

Der radioaktive Zerfall unterliegt trotz der Spontanität 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) umgewandelt ist. Die Halbwertszeit ist für die verschiedenen Radionuklide unterschiedlich und reicht von Mikrosekunden bis zu Milliarden von Jahren.

2.1.2 Strahlungsarten

Neben der Halbwertszeit ist auch die Art der freigesetzten 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 ionisierende Strahlung. Als wichtigste Arten von ionisierender Strahlung sind zu nennen:

Alphastrahlung, eine Teilchenstrahlung aus Heliumkernen (ein Heliumkern besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen),

Betastrahlung, eine Teilchenstrahlung aus Elektronen oder Positronen,

Gammastrahlung, eine elektromagnetische Strahlung.

Die Energieabgaben und damit auch das Durchdringungsvermögen bzw. die Schwächung dieser Strahlungsarten beim Durchgang durch Materie sind sehr unterschiedlich. 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 Gammastrahlung 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 Gammastrahlen jeweils auf die Hälfte herabsetzen. Die Halbwertsschichtdicken für Luft betragen etwa 100 m bei einer Gammastrahlung von 1 Mega-Elektronenvolt (MeV) bzw. etwa 35 m bei 0,1 MeV. Die entsprechenden Halbwertsschichten für Wasser oder Gewebe liegen bei etwa 15 cm bzw. 5 cm. Nachstehende Abbildung 2.1.1 gibt einen schematischen Überblick.

Die Intensität der von einer radioaktiven Quelle ausgehenden Strahlung wird nicht nur beim Durchgang durch Materie verringert. Die Strahlung einer als punktförmig angenommenen Strahlenquelle verteilt sich mit zunehmendem Abstand auf eine vergrößerte Fläche und verliert somit umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes zur Quelle an Intensität. Diese Gesetzmäßigkeit nennt man daher Abstandskwadratgesetz. Die Strahlungsintensität einer radioaktiven Quelle kann deshalb durch Einhaltung eines großen Abstandes von der Quelle sehr effizient reduziert werden.

Strahlenart	Illustration	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	5 -15 cm

Schwächung auf die Hälfte

Abbildung 2.1.1: Arten direkt ionisierender Strahlung und ihre Abschirmung

2.2 Grundlegende Begriffe

Aktivität

Die Anzahl der Atome einer radioaktiven Substanz, die in einer bestimmten Zeit zerfallen, ist abhängig von der Art und Menge der vorhandenen Atome und stellt eine eigene physikalische Größe dar, die sogenannte Radioaktivität oder kurz Aktivität. Radioaktivität ist immer eine stoffgebundene Eigenschaft. Die Maßeinheit für die Radioaktivität wird mit „Becquerel“ bezeichnet. Ein Becquerel, abgekürzt „Bq“, entspricht einem Zerfall (Umwandlung) eines Atomkernes pro Sekunde.

Energiedosis

Entscheidend für den Menschen und damit auch für den Strahlenschutz ist die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlungen im menschlichen Organismus. 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.

Äquivalentdosis

Die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlung beruht aber nicht nur auf der absorbierten Energie, sondern auch auf der Strahlungsart. Dies führte zur Einführung der sogenannten Äquivalentdosis mit der Einheit „Sievert“. 1 Sievert (Sv) bedeutet ebenfalls 1 Joule/kg, jedoch biologisch bewertet. Die Äquivalentdosis ist gleich der Energiedosis, multipliziert mit einem Wichtungsfaktor. 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 20mal 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 aufgrund dieser besonderen Wirksamkeit 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 dem kleinen und nur wenig empfindlichen Bereich der Hornschicht der Haut des Menschen abgibt und diese nicht durchdringen kann.

Effektive Dosis

Um die unterschiedlichen Empfindlichkeiten einzelner Organe zu berücksichtigen, wird die Äquivalentdosis für die einzelnen betroffenen Organe gesondert berechnet und mit einem Gewebewichtungsfaktor multipliziert. Die sich ergebende Größe nennt man effektive Dosis und wird ebenfalls in Sievert (Sv) gemessen.

Dosisleistung

Da für bestimmte Fragestellungen von Interesse ist, innerhalb welcher Zeit eine bestimmte Dosis appliziert wird, ist noch eine weitere Größe von Interesse, die sogenannte Dosisleistung, d. h. die Dosis je Zeiteinheit.

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 Gamma-Ortsdosis. Die dort pro Zeiteinheit ermittelte Dosis wird als Gamma-Ortsdosisleistung (ODL) bezeichnet. In den folgenden Kapiteln wird als Maß für die Wirkung der äußeren Strahlung die Gamma-Ortsdosisleistung angegeben.

Zur Verdeutlichung der wichtigsten radiologischen Zusammenhänge sind die Begriffe Radioaktivität (als Strahlenquelle oder Ursache), Strahlung (als Folge) und Dosis (als Wirkung auf die bestrahlte Materie) noch einmal einander gegenüber gestellt (Abbildung 2.2.1).

<p>Ursache</p> <p>Radioaktivität immer stoffgebunden</p> <p>Maßeinheit: Becquerel (Bq) (Zerfälle pro Sekunde)</p>	<p>Folge</p> <p>Strahlung</p>	<p>Wirkung</p> <p>Dosis</p> <p>Maßeinheit: Energiedosis Gray</p> <p>Maßeinheit: Äquivalentdosis Sievert</p>
--	--------------------------------------	--

Abbildung 2.2.1: Zusammenhang zwischen Radioaktivität, Strahlung und Dosis

2.3 Auswirkungen auf die Gesundheit

Die Aufnahme von Energie im menschlichen Gewebe, verursacht durch eine der ionisierenden Strahlungsarten, kann zur Schädigung von Zellen oder Erbgut führen. Die biologische Wirkung der ionisierenden Strahlungen im Menschen erfordert deshalb verschiedene Maßnahmen zum Schutz vor Strahlung.

Trifft ionisierende Strahlung auf einen lebenden Organismus, laufen in den betroffenen Zellen als Sekundärfolgen der primär ausgelösten physikalischen Wechselwirkung (Ionisations- und andere Anregungsvorgänge) chemische Prozesse ab, die Schädigungen zur Folge haben können. Am strahlenempfindlichsten sind dabei Zellen mit hoher Teilungsrage. Deshalb sind jene Organe des Körpers mit häufiger Zellteilung am meisten gefährdet (z. B. das Knochenmark als Blut bildendes Organ oder der Magen- und Darmtrakt, dessen Epithelzellen ständig erneuert werden müssen). Eine einmalige Dosis von einigen Sievert, was etwa dem Tausendfachen der natürlichen jährlichen Strahlenexposition des Menschen entspricht, kann zu dauerhaften Funktionsbeeinträchtigungen einzelner lebensnotwendiger Organe und damit zum Tod führen. Aber auch wesentlich geringere Strahleneinwirkungen können - allerdings mit viel geringerer Wahrscheinlichkeit - zu Schädigungen führen. Es kann zu Veränderungen der Erbsubstanz der Zelle und als Spätfolge nach Jahren zu Krebserkrankungen kommen. Bei einer Schädigung von Keimzellen ist es möglich, dass der Schaden an die nächste Generation weitergegeben wird.

Die biologische Wirkung einer Strahlenart beruht aber nicht nur auf der insgesamt absorbierten Energie, auch weitere Einflussgrößen spielen eine wichtige Rolle, wie z. B. der Zeitraum, über den die Strahlung aufgenommen wird. Aufgrund von Reparaturmechanismen in den Zellen des menschlichen Körpers fällt die Schädigung umso geringer

aus, je größer der Zeitraum ist, in dem man eine bestimmte Dosis erhält, je geringer also die Dosisleistung ist.

Während es über die Auswirkungen von höheren Dosen (ab ca. 500 mSv) gesicherte Erkenntnisse gibt, wird über die Wirkungen niedriger Körperdosen noch wissenschaftlich diskutiert. In der Praxis des Strahlenschutzes geht man vorsorglich davon aus, dass auch eine geringe Dosis im Prinzip zu einer Schädigung führen kann.

2.4 Natürliche Radioaktivität in der Umwelt

Unter den mehr als 2.750 bekannten Radionukliden gibt es einige, die durch natürliche Ursachen in der Umwelt vorhanden sind. Prinzipiell kann man diese aufgrund von zwei unterschiedlichen Bildungsmechanismen unterscheiden. So gibt es die primordialen Radionuklide. Diese waren bereits bei der Entstehung der Erde vorhanden. Ihre Halbwertszeit ist jedoch so lang, dass sie bzw. ihre Zerfallsprodukte noch heute in der Erdkruste vorhanden sind (z. B. Uran-238, Thorium-232, Kalium-40, vergleiche Tabelle 2.4.1). Weiterhin gibt es kosmogene Radionuklide, die ständig durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Atomkernen der Atmosphäre neu gebildet werden (Kohlenstoff-14, Beryllium-7 und Tritium (H-3), siehe Tabelle 2.4.2).

Im Folgenden werden einige bedeutende natürlich vorkommende Radionuklide kurz erläutert.

2.4.1 Kalium-40

Das chemische Element Kalium spielt im Nährstoffhaushalt von Organismen eine bedeutende Rolle und ist daher sowohl in Düngemitteln als auch in der Nahrung vorhanden und wird mit dieser in den menschlichen Körper aufgenommen. Kalium besteht jedoch zu ca. 0,012 % aus dem radioaktiven Isotop Kalium-40. Dieses ist somit sowohl im menschlichen Körper als auch in der Umwelt ständig vorhanden. Mit einer Halbwertszeit von 1,3 Mrd. Jahren zerfällt es in die stabilen Elemente Calcium und Argon. Der Mensch enthält insgesamt ca. 4.200 Bq Kalium-40, das mit 0,18 mSv/a zur Strahlenexposition des Menschen beiträgt.

Tabelle 2.4.1: Häufigste primordiale Radionuklide

Radionuklid	Halbwertszeit (Jahre)
Kalium-40	$1,3 \cdot 10^9$
Rubidium-87	$4,8 \cdot 10^{10}$
Lanthan-138	$1,1 \cdot 10^{11}$
Samarium-147	$1,1 \cdot 10^{11}$
Lutetium-176	$3,8 \cdot 10^{10}$
Rhenium-187	$4,6 \cdot 10^{10}$
Thorium-232	$1,4 \cdot 10^{10}$
Uran-235	$7,0 \cdot 10^8$
Uran-238	$4,7 \cdot 10^9$

LUBW

Tabelle 2.4.2: Natürliche, durch kosmische Strahlung laufend erzeugte Radionuklide

Radionuklid	Halbwertszeit
Tritium (H-3)	12,3 a
Beryllium-7	53,3 d
Beryllium-10	$1,6 \cdot 10^6$ a
Kohlenstoff-14	5730 a
Natrium-22	2,6 a
Natrium-24	15 h
Magnesium-28	20,9 h
Silicium-31	2,6 h
Silicium-32	101 a
Phosphor-32	14,3 d
Schwefel-35	87,5 d
Schwefel-38	2,8 h
Chlor-34m	32 min
Chlor-36	$3 \cdot 10^5$ a
Chlor-38	37,2 min
Chlor-39	56 min
Argon-39	269 a
Krypton-85	10,7 a

LUBW

2.4.2 Natürliche Zerfallsreihen

Von den in der Erdkruste natürlich vorhandenen radioaktiven Nukliden gehören viele einer sogenannten Zerfallsreihe an. Diese Zerfallsreihen haben ihren Ausgangspunkt bei den primordialen Nukliden Thorium-232, Uran-235 und Uran-238. Die Zerfallsprodukte dieser sehr langlebigen Nuklide sind ebenfalls radioaktiv, sodass sie wiederum zu

weiteren radioaktiven Nukliden zerfallen. In der Folge entstehen immer neue radioaktive Nuklide, bis schließlich ein stabiles Nuklid erreicht ist. Uran-238 zerfällt in der Uran-Radium-Zerfallskette in 18 Zwischenstufen zum stabilen Blei-Isotop Blei-206 (siehe Abbildung 2.4.1), während in der Uran-Actinium-Reihe Uran-235 über 15 Zwischenprodukte zum Blei-207 zerfällt. Mit 10 Zwischenstufen ist die Thorium-Reihe, die mit Thorium-232 beginnt und mit Blei-208 endet, die kürzeste natürliche Zerfallsreihe. Da die Halbwertszeit der Mutternuklide Uran-238 ($4,5 \cdot 10^9$), Uran-235 ($7 \cdot 10^8$) und Thorium-232 ($1,4 \cdot 10^{10}$) deutlich länger als die der Tochternuklide ist, befinden sich alle Radionuklide einer Zerfallsreihe im Gleichgewicht.

2.4.3 Radon und seine Zerfallsprodukte

Von den genannten im Boden und in Gesteinen natürlich vorhandenen Radionukliden spielt das zur Uran-238-Zerfallsreihe gehörende Nuklid Radon-222 eine besondere Rolle. Wie in Abbildung 2.4.1 erkennbar ist, entsteht Radon-222 durch den Zerfall von Uran-238 bzw. Radium-226, das in geringen Konzentrationen überall im Erdboden vorhanden ist. Radon ist ein radioaktives Edelgas und wird durch Bodenporen in die Bodenluft bzw. in Gesteinsspalten freigesetzt. Aus dem Boden diffundiert es in die Luft, sodass der Mensch es einatmet. Die beiden Radon-Isotope Radon-219 und Radon-220 entstehen in den Zerfallsreihen des Uran-235 und Thorium-232. Aufgrund ihrer kurzen Halbwertszeit in der Größenordnung von Sekunden gelangen sie aus dem Boden kaum in die Atemluft. Beim Alpha-Zerfall des Radons-222 mit einer Halbwertszeit von 3,8 d entstehen weitere Radionuklide (Radonzerfallsprodukte, oft auch Radonfolgeprodukte genannt), die jedoch nicht gasförmig sind. Das Radon wird zum überwiegenden Teil wieder ausgeatmet, es verbleibt allerdings ein Teil der Zerfallsprodukte in den Atemwegen, die unter Emission von Alpha-, Beta- oder Gamma-Strahlung weiter zerfallen. Für den Strahlenschutz sind im Wesentlichen die vier kurzlebigen Zerfallsprodukte Polonium-218, Polonium-214, Blei-214 und Bismut-214 von Bedeutung, in einigen Fällen zudem Blei-210 und Polonium-210.

Werden die Zerfallsprodukte in der Luft gebildet, so lagern sie sich überwiegend an Aerosole (Durchmesser von $0,01 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$) an. Die sich im Freien ergebende spezifische, durch Radon verursachte Aktivität hängt von vielen Para-

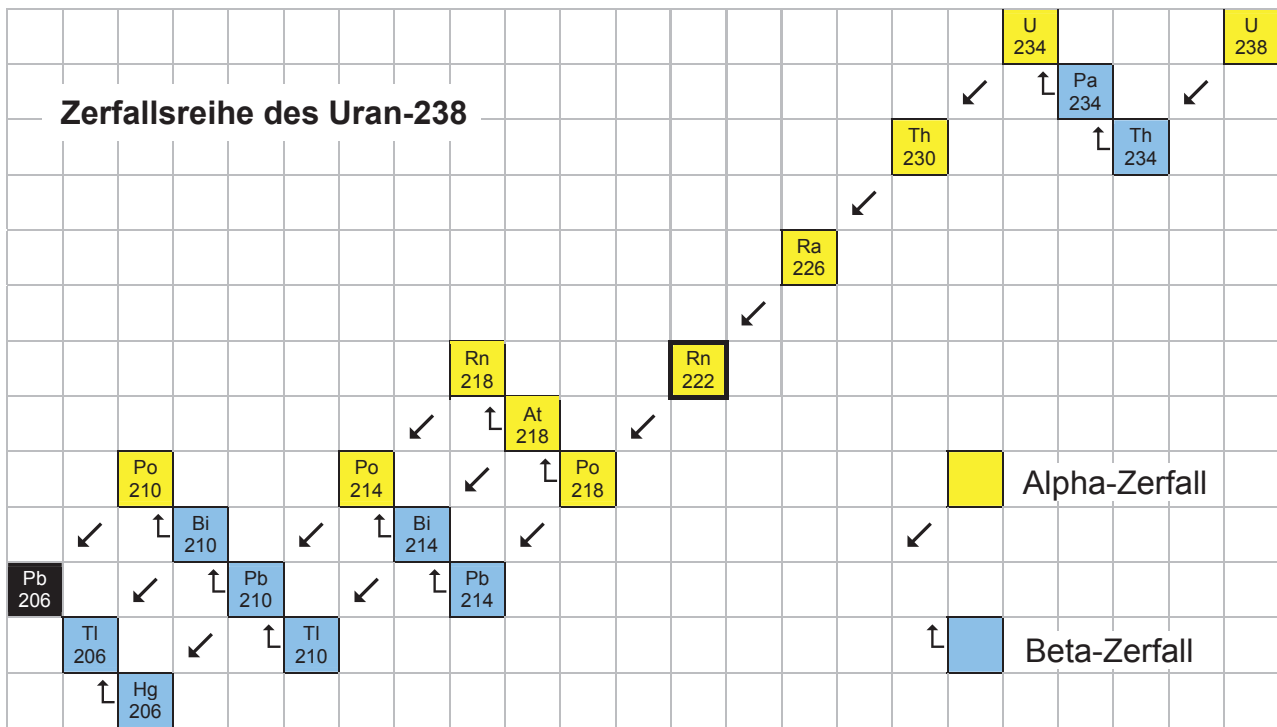


Abbildung 2.4.1: Uran-Radium-Zerfallskette; Quelle: UM

metern ab, z. B. vom Radium- bzw. Urangehalt im Boden (in Deutschland im Bereich von ca. 10 Bq/kg bis 200 Bq/kg), der Bodenbeschaffenheit und den meteorologischen Bedingungen. In Baden-Württemberg liegt der Mittelwert der spezifischen Radonaktivität in der bodennahen Luft bei etwa 20 bis 25 Bq/m³ [UM], wobei örtlich und zeitlich starke Schwankungen auftreten können. Das aus dem Erdreich oder aus Baumaterialien austretende Radon kann sich insbesondere in Häusern (v. a. Kellern) oder anderen Gebäuden, aber auch in Höhlen oder Bergwerken, anreichern und dort zu erheblich höheren spezifischen Radon- und Radonzerfallsprodukt-Aktivitäten führen als in der Außenluft. Der Mittelwert der spezifischen Radonaktivität in Häusern in Deutschland liegt bei etwa 50 Bq/m³, wobei die Schwankungsbreite von einigen Bq/m³ bis zu einigen 1000 Bq/m³ reicht. Auch im Quell- und Brunnenwasser ist Radon enthalten (ca. 1 Bq/l bis 1000 Bq/l) und kann von dort in die Luft austreten. In Abbildung 2.4.2 ist eine Übersichtskarte der spezifischen Radonaktivität in der Bodenluft in Deutschland dargestellt. Die Radonaktivität in der Bodenluft ist um einige Größenordnungen größer als in der bodennahen Atmosphäre, da Radon direkt im Boden entsteht und sich dort anreichert. Beim Übergang in die Atmosphäre wird es stark verdünnt.

Die durch das Einatmen von Radon verursachte Strahlenexposition des Menschen beträgt 1,1 mSv/a (siehe auch Kapitel 2.6). Sie zählt nach dem Rauchen zu den häufigsten Risikofaktoren von Lungenkrebs. Die Exposition durch Radon und seine Folgeprodukte verursacht den größten Teil der natürlichen Strahlenexposition des Menschen. In Abhängigkeit der spezifischen Radon-Aktivität am Aufenthaltsort können diese Werte erheblich schwanken. Insbesondere geologische Gegebenheiten (höhere Uran- und Thorium-Gehalte im Gestein) können die Radon-Aktivität der Bodenluft erhöhen. Die Radon-Zerfallsprodukte Blei und Bismut emittieren Gamma-Strahlung und leisten so einen Beitrag zur Gamma-Ortsdosisleistung. In Abbildung 2.4.3 ist beispielhaft die Gamma-Ortsdosisleistung in Baden-Württemberg am 15.05.2011 dargestellt. Dabei sind die Zusammenhänge zwischen geologischen Bedingungen und Gamma-Ortsdosisleistung gut zu erkennen: höhere natürliche Uran- und Thorium-Konzentrationen im Gestein im südlichen Schwarzwald führen sowohl zu einer höheren Direktstrahlung an der Erdoberfläche als auch zu einer höheren Radon-Aktivität im Boden. Diese beiden Faktoren beeinflussen die Gamma-Ortsdosisleistung und somit die lokal vorhandene natürliche Strahlenexposition. In Baden-Württemberg schwankt die Gamma-Ortsdosisleistung zwischen ca. 0,5 und ca. 1,2 mSv/a.

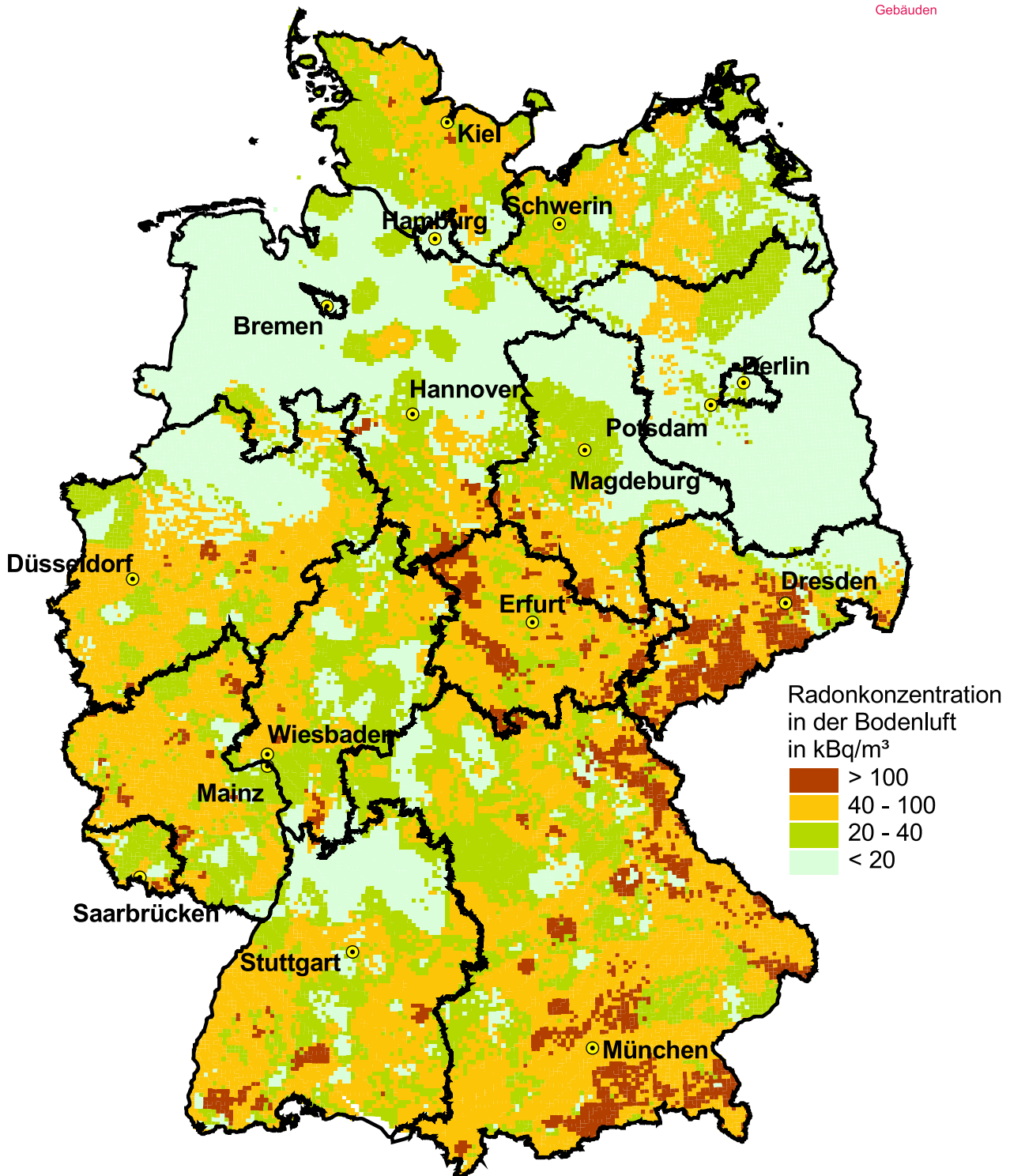


Abbildung 2.4.2: Übersicht über die Radonkonzentration in der Bodenluft in 1 m Tiefe; Quelle: BfS
Dies ist eine Übersichtskarte für Planungszwecke. Diese Karte reicht nicht für detaillierte Aussagen über kleinräumige Gebiete oder gar die Prognose der Belastung von Einzelhäusern aus.

Weitere Informationen zum Thema Radon in Baden-Württemberg sind auf der [Internetseite des Umweltministeriums](#) erhältlich.

Gamma-Ortsdosisleistung

24-Stunden-Mittelwert vom 15.05.2011

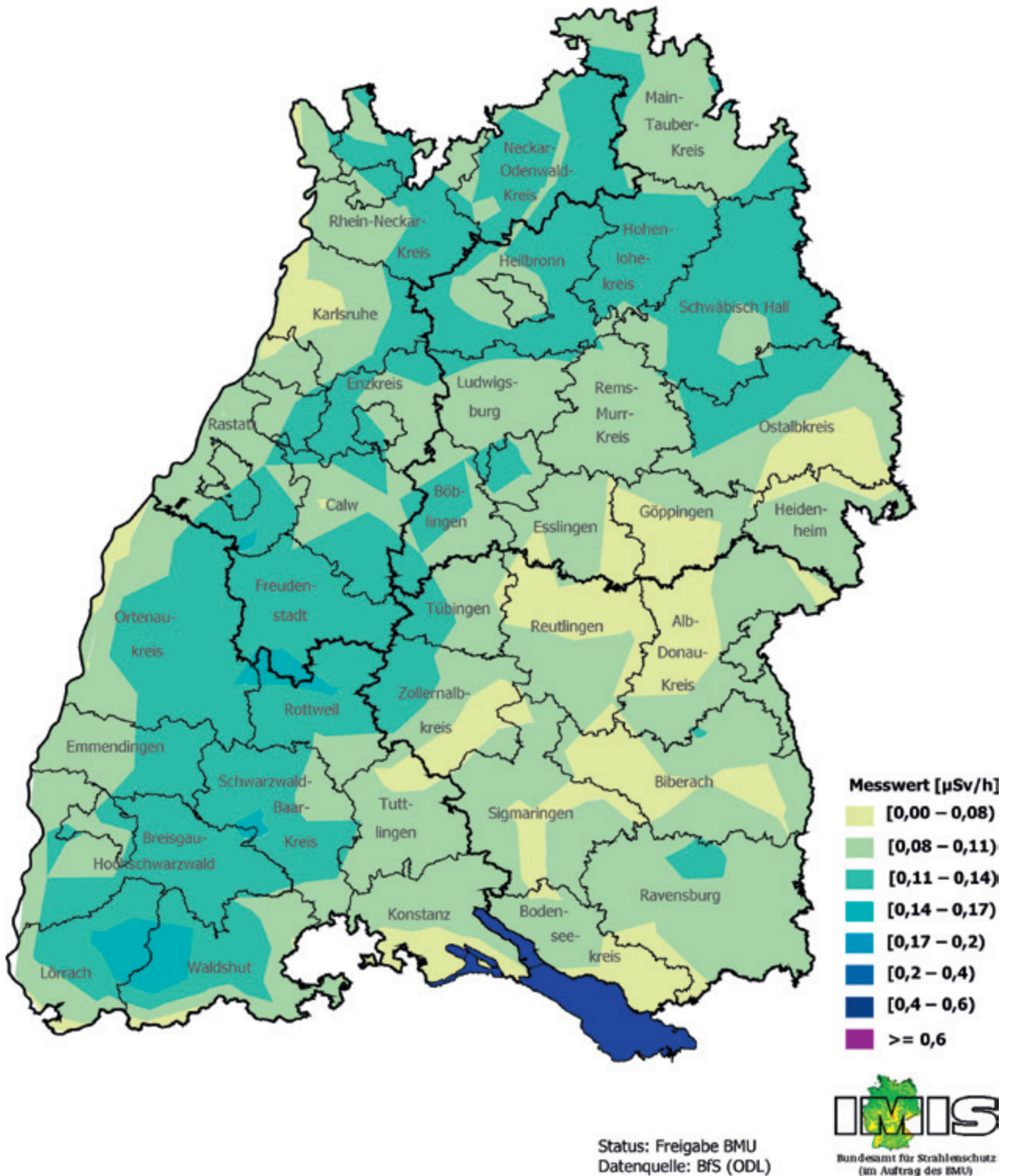


Abbildung 2.4.3: Gamma-Ortsdosisleistung in Baden-Württemberg am 15.05.2011

2.4.4 Kohlenstoff-14

Ein Beispiel für ein in der Umwelt vorkommendes kosmogen gebildetes Radionuklid ist das Kohlenstoff-Isotop Kohlenstoff-14. Es entsteht ständig durch den Beschuss des in der oberen Atmosphäre vorhandenen Stickstoffs mit Neutronen und ist somit in der Umwelt überall vorhanden. Kohlenstoff-14 ist ein Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren. Sein Anteil am insgesamt vorhandenen Kohlenstoff in der Luft beträgt lediglich ca. 10^{-10} %. Kohlenstoff ist ein wesentlicher Baustein für alle auf der Erde vorhandenen Organismen und wird von diesen ständig über den Stoffwechsel aufgenommen und abgegeben. Deshalb ist Kohlenstoff-14 auch in allen Organismen enthalten. Der Mensch hat eine durchschnittliche Kohlenstoff-14-Aktivität von 3.800 Bq. Daraus resultiert eine effektive Dosis von $12 \mu\text{Sv/a}$ [Koelzer].

Da nach dem Tod die Aufnahme von Kohlenstoff-14 mit dem Stoffwechsel gestoppt wird, reduziert sich der enthaltene Kohlenstoff-14-Anteil durch radioaktiven Zerfall. Durch die Bestimmung des Kohlenstoff-14-Gehaltes einer organischen Substanz kann die seit dem Absterben vergangene Zeit ermittelt werden. Dies stellt eine wichtige Methode der Altersbestimmung dar. In der heutigen Zeit wird jedoch das natürliche Verhältnis von radioaktivem Kohlenstoff-14 zu stabilem Kohlenstoff-12 durch zwei gegenläufige Prozesse beeinflusst: Zum einen wird durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, die Kohlenstoff-14-frei sind, vermehrt Kohlenstoff-12 freigesetzt, sodass der Anteil des Kohlenstoff-12 erhöht wird. Andererseits wird der Anteil des Kohlenstoff-14 durch Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen und durch oberirdische Kernwaffentests erhöht [Koelzer].

2.5 Künstliche Radioaktivität in der Umwelt

Neben den genannten natürlichen Nukliden können Radionuklide auch künstlich hergestellt werden, z. B. in Beschleunigern oder Kernreaktoren. Diese Nuklide finden vielfältig Anwendung in Medizin und Technik.

2.5.1 Medizinische Anwendungen

Radioaktive Stoffe werden u. a. zu biochemischen und medizinischen Untersuchungszwecken und zur medizinischen Therapie eingesetzt. In der Nuklearmedizin werden Substan-

zen verwendet, die aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften am Stoffwechsel bestimmter Organe des menschlichen Körpers teilnehmen (Radiopharmaka). Diese Substanzen werden in der Diagnostik bevorzugt mit Gammastrahlern mit kurzer Halbwertszeit (z. B. Technetium-99m, Halbwertszeit 6 Stunden) markiert, bevor sie Patienten appliziert werden. Die emittierte Strahlung wird mit geeigneten Detektoren außerhalb des Körpers gemessen. Auf diese Weise können z. B. Durchblutungsstörungen des Herzmuskels erkannt oder die Funktion der Nieren überprüft werden.

Die häufigsten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren sind die Schilddrüsenszintigrafie, Skelettszintigrafie, Myokardszintigrafie, Nierenfunktionsszintigrafie und Lungenszintigrafie sowie die Positronen-Emissions-Tomografie (PET). Die Kombination einer nuklearmedizinischen Gammakamera oder PET-Kamera mit einem mechanisch fest verbundenen Computertomographen liefert ohne Umlagerung des Patienten sowohl funktionelle als auch anatomische Daten in einem Bildersatz.

In der nuklearmedizinischen Therapie werden Radiopharmaka eingesetzt, die Beta- oder seltener Alphastrahlung abgeben. Diese Strahlungsarten haben eine geringe Eindringtiefe (wenige Millimeter bei Betastrahlung, einige μm bei Alphastrahlung). Dadurch entfalten sie ihre Wirkung am Ort der Anreicherung im Organismus. Die Kinetik des Radiopharmakons bestimmt, wo diese Anreicherung stattfindet. So zielt beispielsweise die Radioiodtherapie auf die Schilddrüse. Die Strahlung zerstört bei einem Schilddrüsenkarzinom lokal bösartiges Gewebe. Die Strahlenwirkung bleibt wegen der geringen Reichweite der Betastrahlen im Gewebe auf die erkrankte Körperregion beschränkt, das umliegende Gewebe wird geschont. Radioiod wird gewöhnlich in Form einer Kapsel oral verabreicht.

Wenn das Zielorgan räumlich gut abgegrenzt und zugänglich ist, kann das therapeutische Radionuklid direkt eingebracht werden. Ein solches Verfahren ist die Radiosynoviorthese, die zunehmend bei der chronischen Polyarthritiden oder anderen Gelenkerkrankungen angewendet wird. Dabei wird ein Beta-Strahler wie z. B. Yttrium-90 oder Erbium-169 in den Gelenkspalt injiziert, um die Gelenkkinnenhaut zu veröden und die Schmerzen zu lindern.

Im Gegensatz zur Nuklear diagnostik ist die Strahlentherapie weitestgehend den Krankenhäusern vorbehalten. Durch die stationäre Behandlung der Patienten in abgetrennten Stationen will man die kurzlebigen radioaktiven Ausscheidungen der Patienten im Krankenhaus zentral erfassen und in Spezialtanks abklingen lassen, bevor sie ins Abwasser gelangen. Zudem kann so auch eine Strahlenbelastung der Angehörigen gering gehalten werden.

Dagegen erfolgen viele Untersuchungen ambulant, d. h. die Patienten dürfen unmittelbar danach wieder nach Hause. Auch dort werden noch geringe Mengen Radioaktivität ausgeschieden, die so an unterschiedlichen Stellen in die Kanalisation und damit in die Umwelt gelangen. In Kläranlagen oder in Flüssen sind sie in Spuren nachweisbar. Sogar selten angewandte Radiopharmaka, solche aus der Phase der klinischen Erprobung oder über im Ausland verabreichte Therapie- bzw. Diagnostiknuklide wie z. B. Lutetium-177 oder Samarium-153 werden mit hochempfindlichen Nachweisverfahren vereinzelt in Klärschlamm gefunden. Wegen der kurzen Halbwertszeit und der äußerst geringen Aktivität ist damit aber keinerlei Gefährdung verbunden.

2.5.2 Technische Anwendungen

Auch in Industrie, Gewerbe und Wissenschaft werden radioaktive Stoffe eingesetzt, meist als umschlossene Strahler. Im Folgenden werden einige Beispiele erläutert.

So eignen sich etwa bestimmte radioaktive Nuklide zur Messung von Schichtdicken, Foliendicken oder Massenbelegungen, da die Schwächung der Strahlung stark von der Dicke des durchstrahlten Materials abhängt. Hierzu werden häufig Betastrahler wie Strontium-90, Promethium-147 oder Thallium-204 verwendet. Eine sichere und dichte Umhüllung sorgt dafür, dass zwar die Strahlung die Probe und den Detektor erreicht, die radioaktive Substanz jedoch nicht entweichen kann. Solche umschlossenen Strahler unterliegen regelmäßigen Dichtheitsprüfungen.

Eine weitere technische Anwendung ist die Durchstrahlungsprüfung, ein Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Dabei wird mithilfe eines geeigneten Gammastrahlers wie Cobalt-60 oder Iridium-192 ein Werkstück durchstrahlt und auf einen Röntgenfilm abgebildet. Da die Strahlung auf ihrem Weg durch das Werkstück in Abhän-

gigkeit von Volumen und Dichte des Werkstückes unterschiedlich geschwächt wird, lassen sich auf dem Film z. B. Fehler, Risse oder eine veränderte Werkstoffzusammensetzung erkennen, ohne dass das Werkstück beschädigt wird.

Gammastrahlenquellen mit besonders hoher Intensität werden auch zur Sterilisation von medizinischen Geräten verwendet. Zur Anwendung kommt dabei vor allem das Isotop Cobalt-60. Medizinische Geräte und Verbrauchsmaterialien – meistens Einmalartikel – werden dabei für einige Zeit in das Strahlenfeld einer hochradioaktiven Quelle eingebracht und Dosen von einigen zehn Kilogray ausgesetzt. An den Materialien vorhandene Krankheitskeime werden durch diese hohen Dosen sicher abgetötet. Die Verbrauchsmaterialien wurden bereits vor der Bestrahlung luftdicht verpackt, wodurch eine nachträgliche Kontamination mit Erregern ausgeschlossen wird. In einigen Ländern werden ähnliche Verfahren für die Konservierung von Lebensmitteln verwendet, in Deutschland aber nicht. In der DDR wurde dieses Verfahren früher zur Sicherstellung der Keimfreiheit von Trinkwasser verwendet.

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 Schuttgütern steuern. Hier kommen z. B. die Nuklide Cobalt-60, Cäsium-137, aber auch Americium-241 zur Anwendung. Im Bereich der Analytik werden „Electron-Capture-Detektoren“ (ECD) mit Nickel-63 bei der Gaschromatographie eingesetzt. Radioaktive Substanzen sind auch in speziellen Brandmeldern, sogenannten Ionisationsrauchmeldern, enthalten. Pro Melder ist die eingesetzte Aktivität jedoch kleiner als das 10-fache der Freigrenze, neuere Meldereinsätze liegen unterhalb der Freigrenze. Ionisationsrauchmelder waren früher verbreitet, wurden aber in letzter Zeit zunehmend durch optische Rauchmelder ersetzt (Abbildung 2.5.1).

Umschlossene Strahler dienen auch zur Feuchte- bzw. Dichtemessung in festen Stoffen, z. B. im Baugewerbe. Dabei wird über die Absorption der Gammastrahlung von Cäsium-137 die Dichte ermittelt, über die Rückstreuung von Neutronen an Wasser kann auf den Feuchteanteil geschlossen werden. Die Neutronen entstammen einer Ame-



Abbildung 2.5.1: Ionisationsrauchmelder (Beispiele) mit 2,22 kBq Ra-226 (0,06 µCi)



Abbildung 2.5.2: Abgeschirmte (links) und ungeschirmte (rechts) Cäsium-137-Quelle

ricium/Beryllium-Kombinationsquelle über die Wechselwirkung von Americium-241 mit Beryllium-9.

2.5.3 Rückstände in Metallschrotten

Der Umgang mit radioaktiven Quellen unterliegt weltweit der staatlichen Überwachung. Illegale Verwendung oder Entsorgung, mangelndes Pflichtbewusstsein von Genehmigungsinhabern, Vergesslichkeit oder Unwissenheit, aber auch die Einstellung von Geschäftstätigkeiten können vereinzelt dazu führen, dass Strahlenquellen plötzlich zu herrenlosen Gütern werden, die – falls sie unerkannt bleiben – Mitmenschen gefährden könnten (Abbildung 2.5.2). Weltweit sind ca. 10 Millionen Strahlenquellen im Einsatz, darunter ca. 53.700 hochaktive Quellen [IAEA]. Im Mittel werden dem BfS jährlich etwa 80 meldepflichtige Ereignisse mit Radioaktivitätshintergrund mitgeteilt, wovon etwa 30 % auf Funde aus der Recycling- und Entsorgungsindustrie entfallen. [BfS]

Erfahrungsgemäß tauchen ältere, meist vergessene Quellen oder Erbstücke aus dem vorigen Jahrhundert auf, die meistens als offene radioaktive Stoffe eingestuft werden müssen. Hierbei finden sich durchaus noch handelsübliche Gebrauchsgegenstände (Abbildung 2.5.3). Zu nennen sind hier:

- radiumbelegte Leuchtziffern und Zifferblätter für private Uhren oder Flugzeugarmaturen mit Aktivitäten bis zu 0,1 MBq, Radium-226
- Betalights mit Tritium-Aktivitäten im Bereich bis 1 TBq,
- Trinkbecher für private Trinkkuren mit stark emanierenden Radium-226-Gehalten im MBq-Bereich,
- Krypton oder Americium haltige Ionisationsrauchmelder, thorierte Schweißelektroden und Gasglühstrümpfe, ältere Elektronenröhren,
- uranhaltige Kacheln, thoriumhaltige Linsen und Legierungen und Abschirmungen aus abgereichertem Uran.



Abbildung 2.5.3: Kurskreisel ca. 80 kBq Ra-226 (links), Taschenuhr 3,4 kBq Ra-226 (Mitte), Original ERKO Radium Trink- und Badekurapparat ca. 1 MBq Ra-226 (rechts)

Der liberalisierte Welthandel erzwingt in dieser Hinsicht geradezu erhöhte Anstrengungen, um in Handelsgütern verborgene, radioaktive Quellen zu erkennen und aus dem Warenstrom zu entfernen. Wareneingangskontrollen beim Zoll für Importe und bei Firmen, die sich mit der Rezyklierung von Gütern befassen, haben deshalb in der jüngeren Vergangenheit zugenommen. Durch den weltweiten Handel mit Altmetallen tauchen speziell bei Metallschrotthändlern und Schmelzanlagen vermehrt solche Strahlenquellen auf. Diese Firmen nehmen deshalb im Interesse der Reinheit ihrer Produkte wie auch des Strahlenschutzes ihrer Beschäftigten und Kunden eine wichtige und oft schwierige Kontrollfunktion wahr.

Um sich vor den dramatischen Folgen des Einschmelzens einer unerkannten Quelle zu schützen, haben sich in der Vergangenheit praktisch alle deutschen Stahlwerke mit hochempfindlichen, vollautomatischen Eingangskontrollsystemen ausgerüstet. Darüber hinaus wird von den Zulieferern verlangt, im Schrott die "Freiheit von Radioaktivität" vertraglich zuzusichern, geeignete Messtechnik vorzuhalten und anzuwenden. Deshalb sind in den letzten Jahren in Deutschland auch bei größeren Recyclingunternehmen bereits weit mehr als 100 stationäre Messanlagen - teils für LKWs, teils für Eisenbahnwaggons oder kombiniert - installiert worden. Darüber hinaus werden in kleinen Betrieben und Sonderabfallagenturen auch Messungen mit empfindlichen Handgeräten durchgeführt. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass durch die mehrfachen Kontrollen bei Lieferanten und Empfängern in Deutschland bereits heute ein recht guter Schutz

vor dem unbeabsichtigten Einschmelzen von radioaktiven Großquellen besteht. Außerdem sind auch an einigen Güterabfertigungsstellen an den Außengrenzen der Europäischen Union Messsysteme zur Entdeckung von radioaktiven Stoffen in der Ladung von Lastkraftwagen installiert.

Eine echte messtechnische Herausforderung stellt die Überwachung von Schrottlieferungen mit Flussschiffen dar. Die Messung erfolgt während des Entladevorgangs am Greifer des Krans innerhalb von etwa 15 Sekunden. Bei positiven Signalen wird anschließend mit gamma- und neutronenempfindlichen Handmessgeräten das auffällige Fundstück geortet und separiert (Abbildung 2.5.4).



Abbildung 2.5.4: Separieren und Dekontaminieren

Neben den Kontrollen eingehender Lieferungen auf Radioaktivität werden auch während des Einschmelzvorgangs Labormessungen an Proben durchgeführt. Auch an ausgehenden Stahlnebenprodukten und Waren werden Qualitätssicherungsmessungen hinsichtlich der Freiheit von Radioaktivität vorgenommen.

Bei gemeldeten Funden verdächtiger Teile, die vermutlich Radioaktivität enthalten, misst und identifiziert die LUBW im Auftrag der atomrechtlichen Aufsichtsbehörde die Strahlenquellen und hilft danach bei der ordnungsgemäßen Entsorgung an die Landessammelstelle für radioaktive Abfälle.

2.5.4 Kernkraftwerke

Eine der wichtigsten Anwendungen von Radioaktivität ist die Energieerzeugung in Kernkraftwerken. Über die bei der Spaltung von Uran-235 oder Plutonium-239 frei werdende Energie wird Wasserdampf und hieraus elektrischer Strom erzeugt. Die bei der Spaltung entstehenden Kernbruchstücke sind radioaktiv, sie sollen nach einer gewissen Abklingzeit im Zwischenlager in tiefen geologischen Endlagern sicher gelagert werden. Während des normalen Betriebs der Kernkraftwerke werden geringe Aktivitätsmengen über Luft oder Wasser abgeleitet. In den Genehmigungen der Kernkraftwerke sind Grenzwerte für diese Ableitungen festgelegt, die so niedrig liegen, dass eine gesundheitliche Gefährdung für die Bevölkerung ausgeschlossen werden kann. Die atomrechtliche Aufsichtsbehörde wacht darüber, dass diese Emissionsgrenzwerte eingehalten werden. Überwacht werden jeweils die Blöcke I und II der Kernkraftwerke Neckarwestheim (GKN I und GKN II) und Philippsburg (KKP I und II) sowie das Kernkraftwerk Obrigheim, auch während der Stilllegung. Darüber hinaus wird in der Umgebung der Einrichtungen auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie, Campus Nord (KIT) die Radioaktivität gemessen. Die Emissionsdaten sind in Kapitel 3.7 dargestellt.

2.5.5 Reaktorunfall, Kernwaffentests

Bei dem katastrophalen Reaktorunfall in Tschernobyl wurde eine Reihe von Radionukliden freigesetzt. Die Auswirkungen auf Baden-Württemberg sind in Kapitel 1.2.4 erläutert. Dabei standen zunächst die kurzlebigen Radionuklide, insbesondere Iod-131, im Mittelpunkt des Interesses. Mehr als 25 Jahre danach ist nur noch Cäsium-

137 aufgrund seiner Halbwertszeit von rund 30 Jahren als einziges bedeutsames „Tschernobyl“-Nuklid in Umweltmedien nachweisbar. Ein Teil des heute in der Umwelt vorhandenen Cäsium-137 sowie die Hauptmenge des heute noch vorhandenen Strontium-90 rühren aber von den oberirdischen Kernwaffentestexplosionen aus den 1950er und Anfang der 1960er Jahre her.

2.6 Strahlenexposition des Menschen

2.6.1 Exposition der Bevölkerung

Über Atemluft, Trinkwasser, Nahrung und verschiedene Umweltmedien nimmt der Mensch natürliche oder künstliche Radioaktivität in den Körper auf. In der ärztlichen Diagnostik profitiert er von medizinischen Strahlenanwendungen. Hierdurch ist er immer wieder Strahlung ausgesetzt, die nur bedingt vermeidbar ist und die zu einer Dosisgrundbelastung führt.

Die natürliche Strahlenexposition des Menschen setzt sich aus einer Einwirkung von außen durch die kosmische und terrestrische Strahlung und einer Einwirkung von innen durch in den Körper gelangte radioaktive Stoffe natürlichen Ursprungs zusammen.

2.6.2 Terrestrische Strahlung

Die Erdkruste und damit auch der an der Oberfläche liegende Boden enthalten Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen des Urans und des Thoriums. Der Zerfall dieser Nuklide führt zu einer Direktstrahlung des Bodens und damit zu einer äußeren Strahlenexposition des Menschen. Die Höhe der Dosis ist abhängig von der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes. Vergleichsweise hohe Dosiswerte werden in den alten Mittelgebirgen wie dem Bayerischen Wald oder dem Erzgebirge gemessen, besonders niedrige Dosiswerte finden sich in der norddeutschen Tiefebene. In Abbildung 2.6.1 ist die Gamma-Ortsdosisleistung in Deutschland am 15.05.2011 dargestellt. Im Mittel ergibt sich für die Bevölkerung in Deutschland eine terrestrisch verursachte Dosis von ca. 0,4 mSv im Jahr.

2.6.3 Radoninhalation

Aufgrund des natürlich vorhandenen Radiumgehalts bildet sich sowohl im natürlichen Untergrund wie auch in verschiedenen Baustoffen das radioaktive Edelgas Radon-222. Über Ritzen

Gamma-Ortsdosisleistung

24-Stunden-Mittelwert vom 15.05.2011

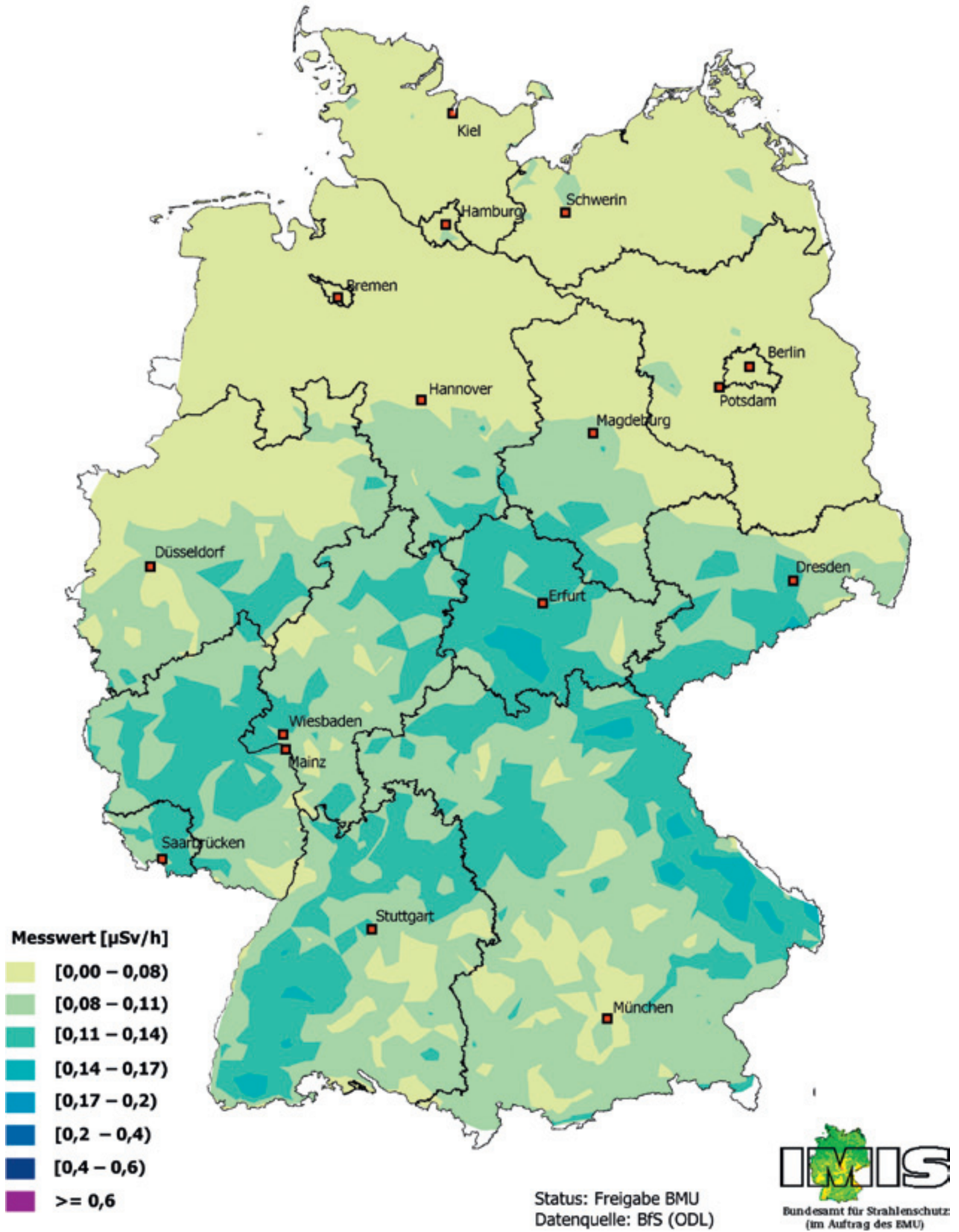


Abbildung 2.6.1: Gamma-Ortsdosisleistung in Deutschland am 15.05.2011

und Porosität gelangt es in die Häuser und kann sich bei mangelnder Raumlüftung in der Zimmerluft anreichern. Werden Radon und seine Zerfallsprodukte eingeatmet, ergibt sich daraus eine weitere Strahlenexposition des Menschen, die sowohl von den geologischen Gegebenheiten als auch von der Bauart der Häuser abhängig ist. In Deutschland beträgt die mittlere Strahlendosis durch Radoninhalation ca. 1,1 mSv/a.

2.6.4 Kosmische Strahlung

Von der Sonne und aus dem Weltall trifft ständig kosmische Höhenstrahlung auf die Erde. Diese Strahlung wird in den verschiedenen Atmosphärenschichten unterschiedlich geschwächt oder absorbiert. Die Strahlungsanteile, die die Erdoberfläche erreichen, bewirken eine äußere Strahlenexposition des Menschen, die von der Höhe über dem Meeresspiegel abhängt. Im Mittel ergibt sich durch diese kosmische Strahlung für die Bevölkerung in Deutschland eine mittlere Strahlendosis von ca. 0,3 mSv/a.

2.6.5 Aufnahme durch Nahrung

Radionuklide in der Umwelt gelangen über Pflanzen und Tiere in die Nahrungskette und werden damit auch vom Menschen aufgenommen. Somit enthalten nahezu alle Nahrungsmittel Spuren von Radionukliden. Für die menschliche Nahrung relevant ist hierbei insbesondere das natürliche Nuklid Kalium-40. Es ist in jedem Menschen mit einer Aktivität von einigen tausend Becquerel enthalten. Radionuklide in der Nahrung führen für die Bevölkerung in Deutschland im Mittel zu einer Dosis von ca. 0,3 mSv/a.

Die gesamte mittlere effektive Dosis durch die natürliche Strahlenexposition beträgt in Deutschland 2,1 mSv pro Jahr. Die für Deutschland geltenden mittleren jährlichen Werte der effektiven Dosis sind in Tabelle 2.6.1 dargestellt.

2.6.6 Medizinische Anwendungen

Zahlreiche ärztlich verordnete Anwendungen führen für die Patienten zu einer Strahlenexposition und damit zu einer Dosisbelastung. Von allen Anwendungen ionisierender Strahlen bringt die Röntgendiagnostik den bei weitem größten Beitrag zur zivilisatorischen Strahlenexposition der Bevölkerung (vergleiche Tabelle 2.6.2). Die mittlere effektive Dosis pro Einwohner in Deutschland durch die Röntgendiagnostik liegt derzeit bei etwa 1,8 mSv pro Jahr. Der Beitrag der verschiedenen nuklearmedizinischen Un-

Tabelle 2.6.1: Mittlere Strahlenexposition natürlichen Ursprungs in Deutschland; Quelle: Koelzer

	Mittlere Strahlenexposition in mSv pro Jahr
kosmische Strahlung	0,3
in Meereshöhe	0,27
in 1 000 m Höhe	0,38
terrestrische Strahlung	0,4
im Freien	0,32
in Häusern	0,43
inkorporierte Radionuklide	1,4
Radon und Folgeprodukte	1,1
Kalium-40	0,18
Uran-238, Thorium-232 u.a.	0,12
Summe	2,1

LJ:W

Tabelle 2.6.2: Bereiche durchschnittlicher effektiver Dosen für häufige Röntgenuntersuchungen; Quelle: Koelzer

Untersuchungsart	effektive Dosis [mSv]
Computertomographie	
Bauchraum	10 - 25
Brustkorb	6 - 10
Wirbelsäule	3 - 10
Kopf	2 - 4
Untersuchung mit Aufnahmen und Durchleuchtung	
Arteriographie	10 - 20
Darm	10 - 18
Magen	6 - 12
Harntrakt	3 - 7
Gallenblase	1 - 5
Untersuchung mit Aufnahme	
Lendenwirbelsäule	0,8 - 1,8
Beckenübersicht	0,5 - 1,0
Mammographie	0,4 - 0,6
Brustkorb	0,02 - 0,05
Halswirbelsäule	0,09 - 0,15
Zahn	≤ 0,01

LJ:W

tersuchungen ist mit 0,12 mSv mittlerer effektiver Dosis pro Jahr und Einwohner dagegen vergleichsweise gering.

2.6.7 Weitere Strahlenexpositionen

Zu den genannten Beiträgen zur Strahlenexposition des Menschen kommen noch weitere Beiträge, z. B. durch den

Fallout aus den früheren Kernwaffentests, durch Flugreisen, Kernkraftwerke und durch den Reaktorunfall in Tschernobyl. Diese Beiträge sind jedoch mit insgesamt weniger als 0,05 mSv/a sehr gering gegenüber den bereits genannten Beiträgen.

2.6.8 Cäsium-137-Aktivitätsgehalt im Körper

In der Abbildung 2.6.2 sind die Ergebnisse der Messungen der Cäsium-137-Aktivität im menschlichen Körper dargestellt, die seit 1961 in Karlsruhe durchgeführt werden. Sie zeigen für das künstliche Radionuklid Cäsium-137 den typischen Verlauf, der durch die beiden radiologisch bedeutsamen Ereignisse (oberirdische Kernwaffentests und Reaktorunfall in Tschernobyl) bedingt ist. Ein Vergleich der beiden Maxima ergibt, dass die durch das Kernwaffen-Cäsium-137 verursachte Körperaktivität im Karlsruher Raum deutlich größer war als die durch das Ereignis in Tschernobyl. Die derzeitigen Werte für Cäsium-137 sind wesentlich kleiner als 1 Bq/kg Körpergewicht. Die durch natürliches Kalium-40 bedingte Aktivität des menschlichen Körpers liegt durchgehend sehr viel höher, nämlich bei etwa 50 bis 70 Bq/kg Körpergewicht.

2.6.9 Gesamtdosis

Die gesamte mittlere effektive Dosis aus zivilisatorisch erhöhter Strahlenbelastung beträgt in Deutschland ca. 1,9 mSv pro Jahr. Die effektive Dosis aus allen Strahlenquellen beträgt für einen Einwohner in Deutschland im Mittel 4 mSv im Jahr. Diese Dosis stammt zu fast gleichen Anteilen aus der natürlichen und der medizinischen Exposition. Gegenüber

diesen Beiträgen zur Strahlendosis sind alle anderen Dosisbeiträge faktisch zu vernachlässigen (siehe Tabelle 2.6.3 und Abbildung 2.6.3).

2.6.10 Berufliche Strahlenexposition

In Deutschland gab es im Jahr 2009 knapp 364.000 Personen, die als beruflich strahlenexponiert eingestuft und deshalb strahlenschutzüberwacht waren. Von diesen wurden 333.700 mit Dosimetern überwacht, 36.200 Personen (2008: 37.000) waren als fliegendes Personal tätig und 1.670 Personen wurden auf Inkorporation oder aufgrund natürlich vorkommender Stoffe am Arbeitsplatz überwacht. In der Gruppe der mit Dosimetern Überwachten erhielten etwa 59.000 Personen – also nur etwa 18 % – eine messbare Dosis, die im Durchschnitt 0,79 Millisievert betrug.

Der Personenkreis des fliegenden Personals war nahezu vollständig exponiert, deren mittlere Jahresdosis betrug ca. 2,4 Millisievert. Aus Abbildung 2.6.4 ist ersichtlich, dass die mittlere berufliche Dosis über einen längeren Zeitraum betrachtet mehr als halbiert werden konnte. Die Hauptursache für die Strahlenexposition während eines Fluges ist die kosmisch bedingte Höhenstrahlung. Sie ist von der Flughöhe, der Flugroute und der Sonnenaktivität während des Fluges abhängig. Die resultierende Strahlenexposition wird nicht gemessen, sondern anhand der Flugdaten berechnet.

Das fliegende Personal ist im Durchschnitt die am höchsten strahlenexponierte Berufsgruppe (vergleiche Abbildung

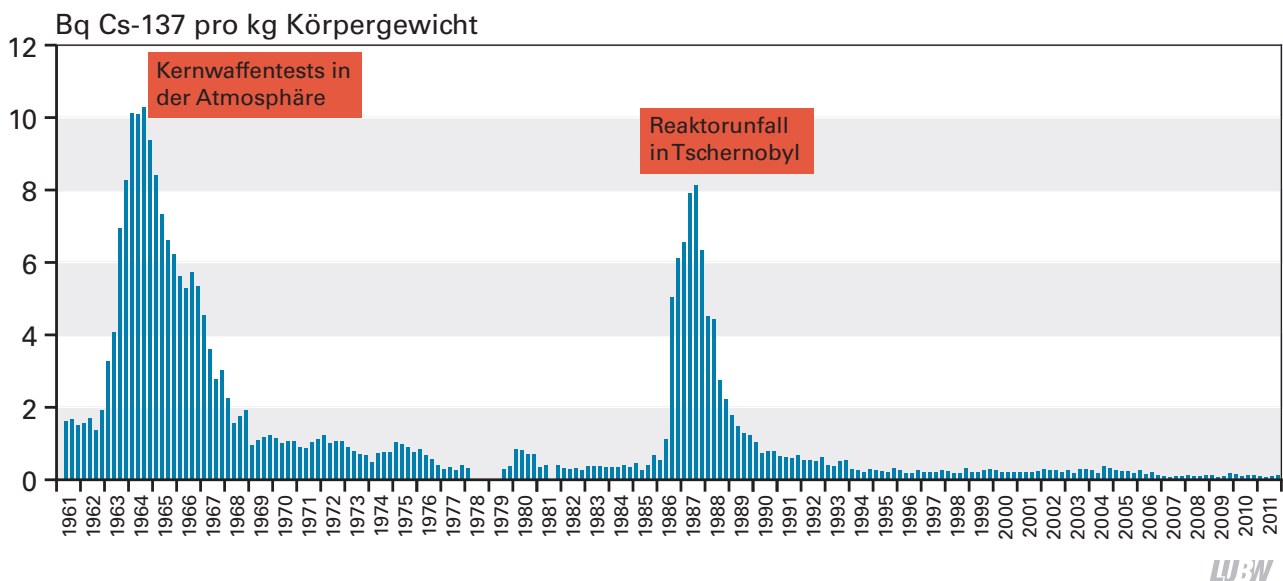


Abbildung 2.6.2: Spezifische Aktivität von Cäsium-137 im menschlichen Körper im Raum Karlsruhe; Quelle: KIT

Tabelle 2.6.3: Mittlere effektive Dosis aus zivilisatorisch erhöhter Strahlenbelastung in Deutschland; Quelle: Koelzer

Zivilisatorisch erhöhte Strahlenbelastung aus den Bereichen	[mSv pro Jahr]
Medizin (Röntgen 1,8, Nuklearmedizin 0,1)	1,9
industrielle Tätigkeit	0,01
Tschernobyl	0,01
Kernwaffentests	0,005
Flugreisen	0,005
Industrieprodukte	0,001
fossile Energieträger	0,001
Kernkraftwerke	0,001
Zivilisation gesamt	1,93

2.6.5), weit höher als das beruflich strahlenexponierte Personal aus Industrie, Medizin oder kerntechnischen Anlagen [BfS].

Mit 69 % war die große Mehrzahl aller mit Dosimetern Überwachten im medizinischen Bereich tätig (Abbildungen 2.6.6).

LUBW

Mittlere Strahlenexposition des Menschen
4 mSv / Jahr

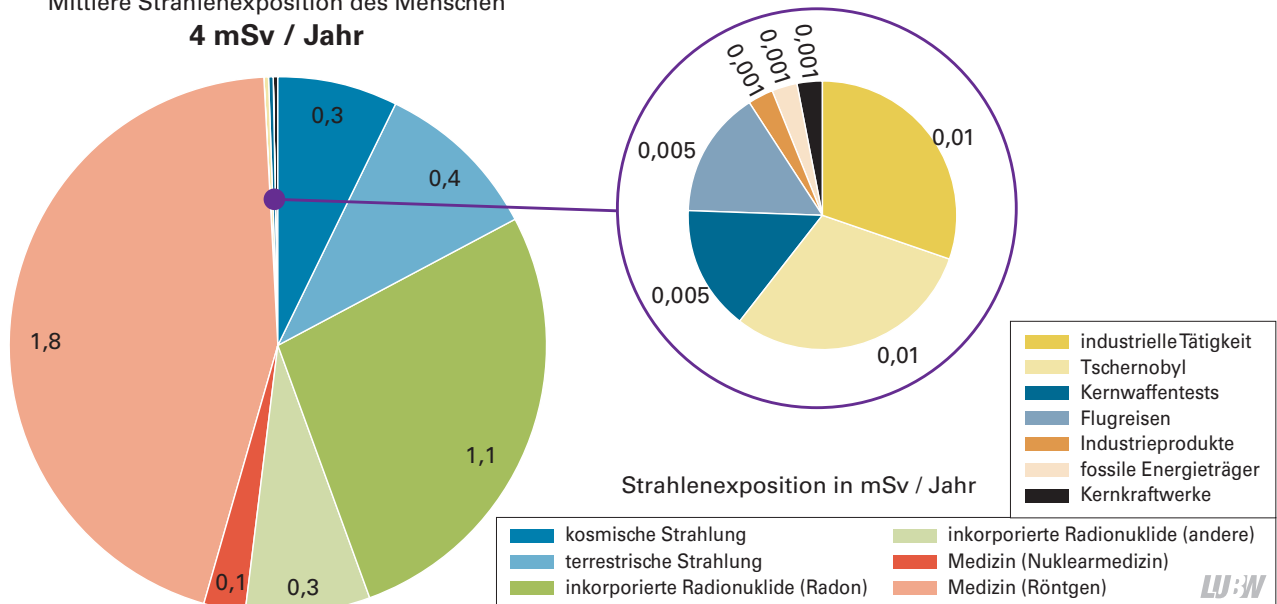


Abbildung 2.6.3: Beiträge zur mittleren effektiven Jahresdosis der Bevölkerung, Stand 2008; Quelle: Koelzer

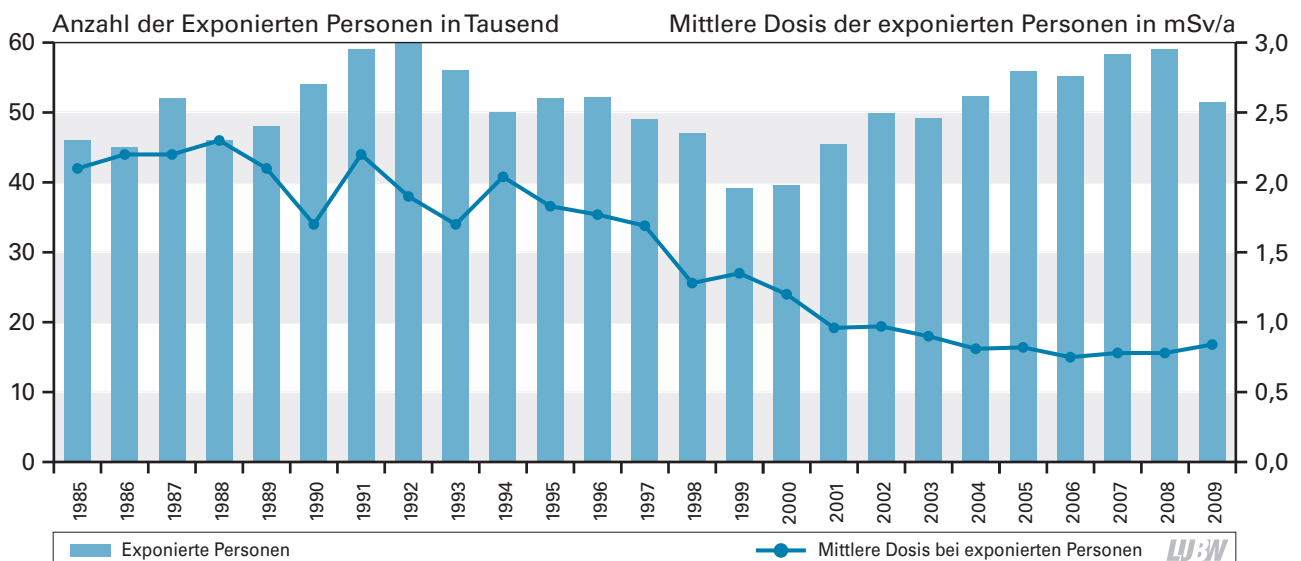


Abbildung 2.6.4: Exponierte Personen; Quelle: BfS

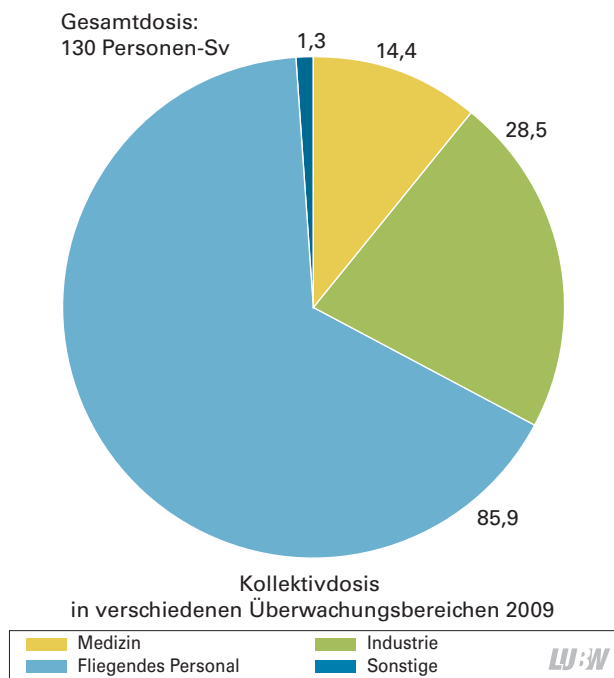


Abbildung 2.6.5: Kollektivdosis in verschiedenen Überwachungsbereichen 2009; Quelle: BfS

2.6.11 Radonexposition in Wasserwerken

Bei der Gewinnung von Wasser kann Radon in unterschiedlichen Mengen auch in die Wassergewinnungsanlagen gelangen. Durch Verwirbelung des Wassers bei der Wasseraufbereitung entweicht der überwiegende Teil an Radon innerhalb des Wasserwerkes. In einzelnen Bereichen der Wasserwerke können dadurch hohe Radon-Konzentrationen in der Luft zustande kommen. Insbesondere in Hochbehältern sind Konzentrationen von einigen 10.000 Bq/m³ und (ohne Lüftung) sogar bis zu 100.000 Bq/m³ möglich.

Da sich hieraus eine erhebliche Strahlenexposition des Personals ergeben kann, verlangt die Strahlenschutzverordnung eine Abschätzung der Radonexposition an solchen Arbeitsplätzen. Das Karlsruher Institut für Technologie führte im Auftrag des Landes systematische Radonerhebungsmessungen in Wasserwerken in Baden-Württemberg durch. Den Wasserwerken wurden hierzu Ortsexposimeter zur Verfügung gestellt, die über zwei Wochen in Hochbehältern und Wasseraufbereitungsanlagen ausgelegt wurden. Zusätzlich erhielten betroffene Beschäftigte Personenexposimeter, die beim Aufenthalt in diesen Bereichen über drei Monate getragen wurden.

Die gewonnenen Ergebnisse von 1163 Messorten an 117 Wasserversorgungsunternehmen zeigten, dass erhöhte Konzentrationen von Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten an Arbeitsplätzen in Wasserwerken auftreten

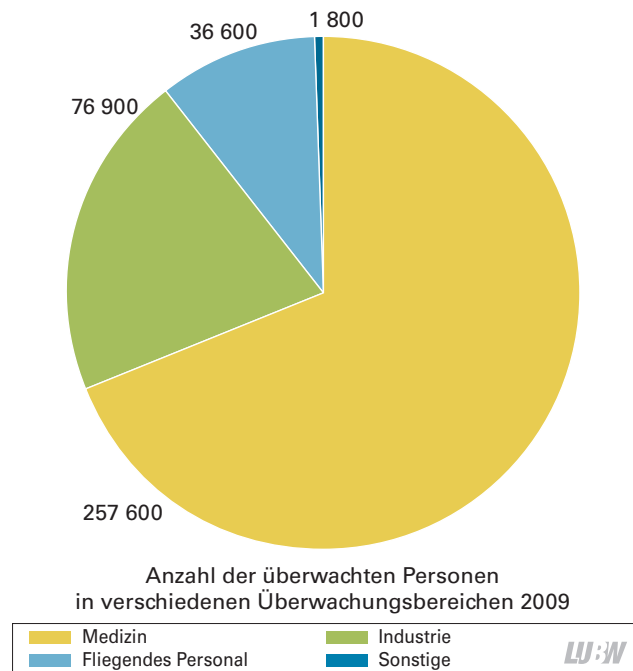


Abbildung 2.6.6: Überwachte Personen in verschiedenen Überwachungsbereichen 2009; Quelle: BfS

und damit das dort beschäftigte Personal einer Strahlenexposition ausgesetzt werden kann, die nicht mehr vernachlässigt werden darf.

Fast die Hälfte der gemessenen Radonkonzentrationswerte lagen zwar unter 1000 Bq/m³, aber rund 29 % immerhin zwischen 1000 und 5000 Bq/m³ und 14 % zwischen 5.000 und 10.000 Bq/m³. Bei 8 % der Messwerte wurde eine Radonkonzentration von über 10.000 Bq/m³ festgestellt. Bei einer angenommenen Aufenthaltszeit von 220 Stunden (an jedem Arbeitstag eine Stunde am gemessenen Ort) würde bei einer Radonkonzentration von 10.000 Bq/m³ der Eingreifwert erreicht, der einer Dosis von 6 mSv entspricht. Darüber liegende Werte entsprechen der Dosisbelastung einer beruflich strahlenexponierten Person der höchsten Kategorie A.

Zur Abhilfe wurden zumeist Lüftungsmaßnahmen und zur Kontrolle eine Wiederholungsmessung nach 2 Jahren empfohlen [KIT].

3 Überwachung der Radioaktivität

Baden-Württemberg betreibt ein komplexes System zur Überwachung der Radioaktivität. Zum einen werden die kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen im Land an den Standorten Philippsburg, Neckarwestheim, Obrigheim und Karlsruhe überwacht. Immissionsseitig werden zudem die den grenznahen ausländischen Kernkraftwerken Fessenheim (F) sowie Leibstadt und Beznau (CH) gegenüber liegenden Regionen im Land überwacht. Neben dieser anlagenbezogenen Radioaktivitätsüberwachung wird im übrigen Landesgebiet flächendeckend sowohl die Ortsdosisleistung gemessen als auch Proben verschiedener Umweltmedien und Nahrungsmittel regelmäßig auf ihren Radioaktivitätsgehalt untersucht. Die Daten werden im „IMIS Integrierten Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt“ zusammengeführt und vom BfS veröffentlicht.

Die Einrichtungen zur Online-Messung der Gamma-Ortsdosisleistung und zur nuklidspezifischen Messung der Radioaktivität in Schwebstoffen der Luft (Radioaerosole) bilden zusammen mit der Kernreaktor-Fernüberwachung (KFÜ) einen sensiblen Warndienst, der schon bei geringen Veränderungen gegenüber der natürlich vorhandenen Strahlung die zuständige Atomaufsicht alarmiert. Die verschiedenen Messnetze sind in Abbildung 3.5.1 dargestellt.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des Überwachungssystems näher erläutert.

3.1 Integriertes Mess- und Informationssystem

Das „Integrierte Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt (IMIS)“ wurde 1986 nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl eingerichtet. Ziel ist es, die Umwelt kontinuierlich zu überwachen, geringfügige Änderungen der Umweltradioaktivität flächendeckend schnell und zuverlässig zu erkennen und langfristige Trends zu erfassen. An dem Rou-

tinemessprogramm sind mehr als 60 Laboratorien in Bund und Ländern beteiligt, darunter auch die LUBW.

Für die Überwachung der Radioaktivität in der Atmosphäre, in den Bundeswasserstraßen und in der Nord- und Ostsee sind kontinuierlich arbeitende Messnetze eingerichtet. Die Gamma-Ortsdosisleistung wird an mehr als 1.800 Stationen im Bundesgebiet erfasst, davon liegen ca. 220 in Baden-Württemberg. An 4 Stationen wird die nuklidspezifische Aktivität in der Luft und im Niederschlag durch den Deutschen Wetterdienst ermittelt (Karlsruhe, Stötten, Lahr, Konstanz). An einer weiteren Messstation im Land (Schauinsland) werden die spezifische Gesamtbeta- und Iod-131-Aktivität erfasst. Die Bundeswasserstraßen in Baden-Württemberg (Rhein, Neckar) werden durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde überwacht.

Im Routinebetrieb werden bundesweit Luft, Niederschlag, Gewässer, Boden, Nahrungs- und Futtermittel, Abfallstoffe und Pflanzen auf Radionuklide untersucht. Eine der wesentlichen Aufgaben von IMIS ist es, alle Ergebnisse zusammenzuführen, auszuwerten und sowohl den angeschlossenen Behörden als auch der Öffentlichkeit in übersichtlichen Dokumenten darzustellen. Auf den Internetseiten des BfS sind aktuelle Informationen verfügbar: <http://www.bfs.de/de/ion/imis>.

Die LUBW ermittelt mit einem umfangreichen Messprogramm über ganz Baden-Württemberg und die Jahreszeiten verteilt die Radioaktivität, insbesondere in den Medien

- Oberflächenwasser, Sediment und Schwebstoffe aus Fließgewässern außer Bundeswasserstraßen; Grundwasser; Bodensee
- Abwasser und Klärschlamm aus Kläranlagen; Flugasche, Schlacke, feste und flüssige Rückstände aus der Rauchgaswäsche von Verbrennungsanlagen; Sickerwasser aus Hausmülldeponien; Kompost aus Kompostierungsanlagen
- Gras, Blätter und Nadeln als Indikatorpflanzen
- Messung der Bodenoberfläche vor Ort (in situ)

Daneben sind auch die Chemischen und Veterinäruntersuchungsämter Freiburg und Stuttgart für bestimmte Messungen zuständig. Sie ermitteln die Radioaktivität in den Medien

- Trinkwasser
- Nahrungsmittel pflanzlicher und tierischer Herkunft
- Säuglings- und Kindernahrung, Gesamtnahrung
- Boden
- Futtermittel

3.2 Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen

Die Überwachung der Emissionen und Immissionen kerntechnischer Anlagen werden sowohl von den Betreibern der Anlagen als auch von einer unabhängigen Messstelle durchgeführt. Die Messprogramme sind in der „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI)“ vorgegeben.

Für Baden-Württemberg nimmt die LUBW die Aufgabe dieser unabhängigen Messstelle wahr. Im Rahmen des Messprogramms zur Immissionsüberwachung werden in Baden-Württemberg ca. 1000 Messungen und Probenahmen in der Umgebung (ca. 25 km) der Anlagen genommen und in dem Labor der LUBW ausgewertet. Der Umfang der Messungen ist in einem abgestimmten Messprogramm festgelegt und erstreckt sich u. a. auf Luft, Niederschlag, Boden, Wiesenbewuchs, Milch, pflanzliche Nahrungsmittel, Trinkwasser, Oberflächenwasser, Sediment und Fische.

Die überwachten kerntechnischen Anlagen in Baden-Württemberg sind:

- Karlsruher Institut für Technologie, Campus Nord (KIT)
- Kernkraftwerk Obrigheim (KWO)
- Kernkraftwerk Philippsburg (KKP I und KKP II)
- Kernkraftwerk Neckarwestheim (GKN I und GKN II)

Weiterhin werden auf baden-württembergischem Gebiet die grenznahen ausländischen Anlagen überwacht:

- Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) mit Kernkraftwerk Beznau

- Paul-Scherrer-Institut (PSI)
- Kernkraftwerk Fessenheim (FSH I und FSH II)

Die LUBW veröffentlicht jährlich im Internet unter <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/2913/> einen ausführlichen Bericht über die Messergebnisse der untersuchten Proben und die Daten der Messnetze.

Der Betreiber der kerntechnischen Anlage überwacht neben den Immissionen auf seinem Anlagengelände und in der unmittelbaren Umgebung insbesondere die Emissionen. Dies erfolgt ebenfalls entsprechend eines abgestimmten Überwachungsprogramms.

Die Umgebungsüberwachung stellt eine Gegenkontrolle zur Emissionsüberwachung dar und gibt einen unmittelbaren Aufschluss über die Auswirkungen der Emissionen auf die Umgebung.

3.3 Arbeitsgemeinschaft Gewässer

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) betreibt seit Mitte der 1970er Jahre ein bundesweites Messnetz zur Erfassung der Radioaktivität in Wasser, Schwebstoffen und Sedimenten von Bundeswasserstraßen. Die BfG erhält hierzu aus ganz Deutschland Wasserproben einer länderübergreifenden Arbeitsgemeinschaft Gewässer. Für Wasserproben hat sich die an allen Messstellen gleichartige Herstellung von Monatsmischproben bewährt. Diese erlauben mit akzeptablem Aufwand vergleichbare Aussagen. Insbesondere im Falle des Tritiums erlauben die Daten einen großräumigen Vergleich der Einträge durch kerntechnische Anlagen, dokumentieren aber auch den zeitlichen Verlauf der Aktivitätsabnahme seit den Kernwaffenversuchen in den 1960er Jahren. Speziell für die Untersuchungen der Einträge aus Kernkraftwerken wurden an allen betroffenen Gewässern Messstellen im noch unbelasteten Bereich eingerichtet oder vorhandene Messstellen anderer Betreiber genutzt. Sie dienen der Ermittlung von Referenzwerten für den natürlichen Tritium-Gehalt von Rhein, Neckar und Donau. In Baden-Württemberg werden durch die Arbeitsgemeinschaft drei Standorte am Rhein (Öhningen, Weil am Rhein, Breisach), vier Standorte am Neckar (Schwabenheim, Rockenau, Lauffen, Obertürkheim) und die Donau bei Ulm untersucht.

3.4 Kernreaktor-Fernüberwachung

Die Kernkraftwerke in Baden-Württemberg werden zusätzlich mit Hilfe der Kernreaktor-Fernüberwachung (KFÜ) rund um die Uhr automatisch überwacht. Hierbei werden ständig sicherheitsbedeutsame Betriebsdaten der Anlagen, die radioaktiven Emissionen mit Abluft und Abwasser, meteorologische Größen sowie die Immissionen in der Umgebung erfasst. Diese Daten werden laufend zur LUBW als Zentrale sowie zum Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft als atomrechtliche Aufsichtsbehörde übertragen.

Das Kernreaktor-Fernüberwachungssystem vervollständigt die Emissions- und Immissionsüberwachung. Der Hauptzweck des Systems ist eine unmittelbare und sofortige Kontrolle derjenigen Einflussgrößen, die für die Sicherheit der Anlage und den Strahlenschutz von Bedeutung sind. Insbesondere können Abweichungen vom Normalbetrieb, Störungen und Störfälle schnell erkannt werden.

Die Gamma-Ortsdosisleistung wird durch Ortsdosisleistungs-Funksonden in einem Bereich bis zu 10 km Entfernung überwacht, die auf eigenen Messstationen oder an öffentlichen Gebäuden montiert sind. Die aktuellen Daten aller Funksonden sind im [Internet](#) für die letzten 7 Tage verfügbar. In der Umgebung der baden-württembergischen Kernkraftwerke Obrigheim, Neckarwestheim und Philippsburg gibt es jeweils 20 bis 30 Ortsdosisleistungs-Funksonden. Auch die grenznahen ausländischen Anlagen Fessenheim (Frankreich) und Leibstadt (Schweiz) sind mit jeweils zwölf Ortsdosisleistungs-Funksonden auf deutscher Seite in die Überwachung einbezogen. Da bei diesen Kernkraftwerken 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 die bodennahe Luft fortlaufend auch auf künstliche Radioaktivität gamma-spektrometrisch überwacht (Abbildung 3.5.1). Hinzu kommen noch meteorologische Messungen sowie die Messung der Gamma-Ortsdosisleistung. Auch an den Standorten der deutschen Kernkraftwerke in Baden-Württemberg ist jeweils eine Radioaerosolmessstation in Sichtweite aufgestellt, die sich in der Hauptwindrichtung relativ zu Kernkraftwerk befindet.

3.5 Radioaktivitätsmessnetz

Baden-Württemberg hat nach dem Unfall in Tschernobyl zur Überwachung der Radioaktivität und als Frühwarnsystem ein eigenes flächendeckendes Radioaktivitätsmessnetz aufgebaut. Das Radioaktivitätsmessnetz setzt sich aus dem Radioaerosolmessnetz und dem Ortsdosisleistungs-Messnetz der Kernreaktor-Fernüberwachung zusammen. Das Radioaerosolmessnetz besteht aus 12 ortsfesten Radioaerosolmessstationen, von denen zwei in die Überwachungsmessstationen der ausländischen Anlagen integriert sind und drei Messstationen zur Überwachung der inländischen Kernkraftwerke genutzt werden. Die restlichen Radioaerosolmessstationen liegen verteilt an den Randzonen von Baden-Württemberg und überwachen die Umweltradioaktivität. Alle Messstationen des Radioaerosolmessnetzes sind in die Kernreaktor-Fernüberwachung des Landes eingebunden. Zusätzlich sind drei mobile Messstationen verfügbar (MoRaM). Die Radioaerosolmessstationen erfassen die Radioaktivität der Schwebstoffe in der Luft gamma-spektrometrisch. Die Messdaten werden online zur LUBW übertragen.

Das Radioaktivitätsmessnetz bestand ursprünglich aus 35 Ortsdosisleistungs-Messstationen, welche in dem Luftmessnetz von Baden-Württemberg eingebunden waren. Zwangsläufig war die Standortwahl an die Bedürfnisse der konventionellen Luftüberwachung gebunden. Das BfS betreibt zusätzlich seit Jahren ein Ortsdosisleistungs-Messnetz mit über 220 Messstationen verteilt in ganz Baden-Württemberg. Da das Land nun einen uneingeschränkten zeitnahen Zugang zu diesem Bundes-Messnetz hat und dieses Messnetz aufgrund der höheren Überwachungsdichte eine bessere radiologische Überwachung bietet, hat dieses Messnetz das landeseigene Strahlenpegelmessnetz im Jahr 2011 abgelöst. Dagegen stehen die Regenwassersammlungen und Filterbestäubungen aus dem Luftmessnetz für die radiologische Überwachung weiterhin im Bedarfsfall zur Verfügung.

Zusätzlich betreibt das BfS auf dem Schauinsland im Schwarzwald eine Spurenmessstelle zur Überwachung des Kernwaffenteststopp-Abkommens. Routinemäßig können künstliche Radionuklide dort auch in sehr geringen Aktivitätskonzentrationen in der Luft nachgewiesen werden.

In der Abbildung 3.5.1 ist die landesweite Verteilung der Stationen des Radioaerosolmessnetzes, des Kernreaktor-

Radioaktivitätsmessnetze in Baden-Württemberg

Einrichtungen des Bundes

- ▲ Messstation Deutscher Wetterdienst
- ▲ Luftaktivitäts-Messstation des BfS
- Ortsdosisleistungs-Messstation des BfS

Einrichtungen des Landes Baden-Württemberg

- Radioaerosol-Messstation
- Überwachungsstation
- KFÜ-Immissionsmessringe



- BfS** - Bundesamt für Strahlenschutz
- KWO** - Kernkraftwerk Obrigheim
- KKP** - Kernkraftwerk Philippsburg
- GKN** - Kernkraftwerk Neckarwestheim
- FSH** - Kernkraftwerk Fessenheim
- KKL** - Kernkraftwerk Leibstadt



Abbildung 3.5.1: Radioaktivitätsmessnetze in Baden-Württemberg

Fernüberwachungssystem des Landes, des Ortsdosisleistungs-Messnetzes des Bundes sowie des Deutschen Wetterdienstes in Baden-Württemberg dargestellt.

3.6 Überwachung von Wildfleisch

Da der Waldboden im südöstlichen Teil Baden-Württembergs auch heute noch eine z. T. relativ hohe Cäsium-137-Kontamination aufweist, ist es notwendig, Wildfleisch auf seine Belastung mit Cäsium zu überprüfen. In den sauren Humusböden kann Cäsium nicht durch Tonminerale adsorbiert werden und ist somit weiter verfügbar. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit von Cäsium und Kalium wird Cäsium durch Pilze vermehrt aufgenommen, es reichert sich insbesondere in den im Boden wachsenden Hirschrüffeln an. Pilze sind Futterbestandteil der Wildtiere, weshalb diese Cäsium mit dem Futter aufnehmen. Die Hirschrüffel werden insbesondere von Wildschweinen zur Nahrungsergänzung gefressen.

In den Gebieten, die als belastet erkannt wurden, wird jedes erlegte Wildschwein durch Eigenkontrollmessstellen der Jägerschaft auf Cäsium-137 untersucht. Neben dem Südosten des Landes gibt es weitere Gebiete mit erhöhter Kontamination in Schwetzingen, Gaildorf, Schluchsee, St. Blasien und im nördlichen Schwarzwald. Die Wildschweine aus den umliegenden Gemeinden werden außerdem durch die Chemischen und Veterinäruntersuchungsämter regelmäßig auf ihre Kontamination mit Cäsium überprüft. Durch dieses verstärkte Überwachungsprogramm der Landesregierung wird sichergestellt, dass kein Wildfleisch mit einer Aktivität von mehr als 600 Bq/kg vermarktet wird.

3.7 Emissionen aus kerntechnischen Anlagen

Der Betrieb kerntechnischer Anlagen und der Umgang mit radioaktiven Substanzen führen zu Ableitungen radioaktiver Stoffe über Luft oder Wasser. Zur Minimierung dieser Emissionen legt die Atomaufsichtsbehörde Grenzwerte fest. Die abgeleiteten Aktivitätsmengen werden kontrolliert und nach Nuklidgruppen getrennt bilanziert.

In die Radioaktivitätsüberwachung in Baden-Württemberg sind die Blöcke der Kernkraftwerke Neckarwestheim (GKN) und Philippsburg (KKP) sowie das Kernkraftwerk Obrigheim (KWO, seit Mai 2005 in der Stilllegung) einbezogen. Darüber hinaus werden die Einrichtungen auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie, Campus Nord (KIT) – vormals Forschungszentrum Karlsruhe ein-

schließlich Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe – überwacht. Die heutige „Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe Rückbau und Entsorgungs-GmbH“ bündelt alle Rückbauaktivitäten an stillgelegten kerntechnischen Versuchs- und Prototypanlagen sowie die Verarbeitung radioaktiver Abfälle und Reststoffe auf dem Gelände des ehemaligen Forschungszentrums Karlsruhe. Damit wurde das neu gegründete Karlsruher Institut für Technologie (KIT), ein Zusammenschluss von Forschungszentrum und Universität Karlsruhe, von diesen Aufgaben freigestellt

3.7.1 Abgaben mit der Abluft

Bei kerntechnischen Anlagen wird die gesamte fortzuleitende Abluft über den Kamin abgeleitet und überwacht. In Abbildung 3.7.1 bis Abbildung 3.7.3 sind die Emissionen der Edelgase, beta- und gammastrahlender Aerosole sowie Tritium dargestellt.

Bei Kernkraftwerken setzen sich die Edelgasemissionen überwiegend aus den kurzlebigen radioaktiven Isotopen der Edelgase Xenon und Krypton zusammen. Die Edelgasemissionen spiegeln sowohl die leistungsabhängige Bildung von Edelgasen als auch die Dichtheit der Brennelementhüllen beim Betrieb von Kernkraftwerken wider. Die Emissionen bei der Wiederaufarbeitungsanlage (WAK) bestanden hauptsächlich aus dem Nuklid Krypton-85, das in seiner Menge unmittelbar proportional zum durchgesetzten abgebrannten Brennstoff war. Mit der Einstellung der Wiederaufarbeitung zum Jahresende 1990 gingen die Emissionsraten der Edelgase deutlich

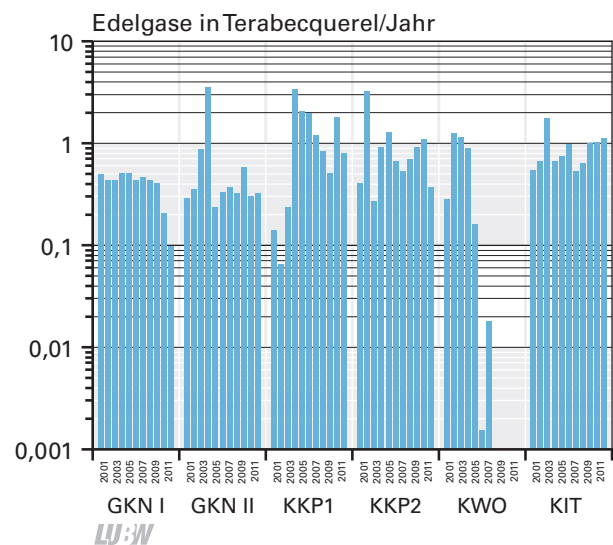


Abbildung 3.7.1: Emissionen radioaktiver Edelgasisotope mit der Abluft 2001 bis 2011; Quelle: IMIS

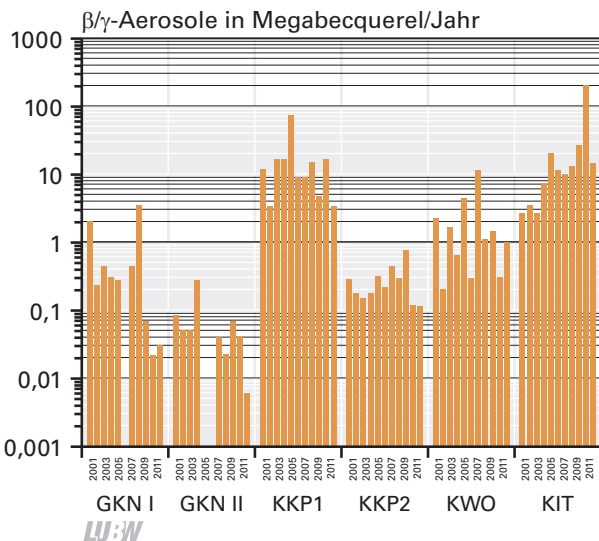


Abbildung 3.72: Emissionen beta- und gammastrahlender Aerosole mit der Abluft 2001 bis 2011 (GKN II im Jahr 2005 unterhalb der Erkennungsgrenze); Quelle: IMIS

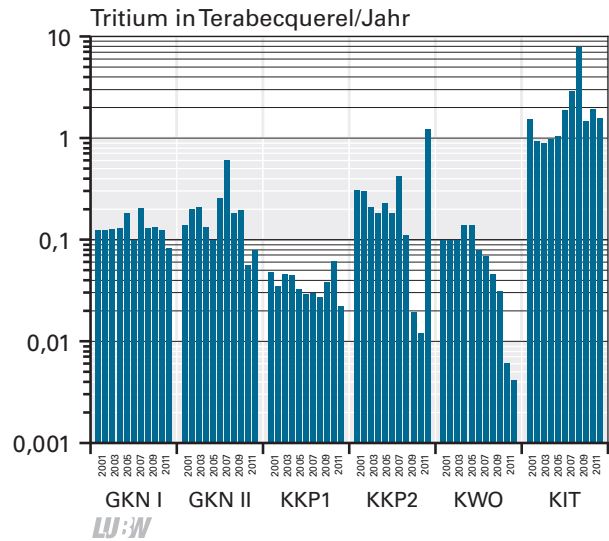


Abbildung 3.73: Tritium-Emissionen mit der Abluft 2001 bis 2011; Quelle: IMIS

zurück. Auch Anlagen, die stillgelegt wurden, können noch Edelgase abgeben, solange nicht alle Brennelemente entladen und abtransportiert sind oder sie noch nicht völlig frei von Kernbrennstoffen sind. Die durch diese künstlich erzeugten radioaktiven Edelgase verursachte durchschnittliche effektive Strahlenbelastung ist gering. Sie liegt selbst im Nahfeld eines Kernkraftwerkes um etwa drei Größenordnungen unter der Strahlenexposition, die durch die natürlichen radioaktiven Edelgase Radon-222 und Radon-220 bedingt ist.

Die beta- und gammastrahlenden Aerosole (Abbildung 3.72) können die unterschiedlichsten Spaltprodukte enthalten, wie Cäsium-134 oder Strontium-90. Sie können aber auch durch Aktivierung entstanden sein, wie Cobalt-60. Man spricht deshalb auch von Spalt- und Aktivierungsprodukten. Bei Kernkraftwerken werden sie vorwiegend während der Revision freigesetzt. Beim KIT entstehen sie beim Betrieb der Abfallbehandlungsanlagen sowie bei der Stilllegung von Kontrollbereichen und von Anlagen aus der Wiederaufarbeitung. Kurzlebige Aerosole sind in ihren Emissionsraten gegenüber langlebigen Aerosolen durchweg vernachlässigbar.

Tritium entsteht bei Kernreaktoren im Brennstoff und im Kühlwasser. Es wird sowohl mit dem Abwasser in Form von überschwerem Wasser mit der Summenformel HTO, als auch gasförmig abgegeben. Bei den Tritium-Abgaben mit der Fortluft (Abbildung 3.73) gibt es Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen, die u. a. von der Leistung, der Betriebsfahrweise, der Betriebsdauer und vom

Anlagentyp abhängen. Siedewasserreaktoren wie KKP I schneiden hier besser ab als Druckwasserreaktoren.

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 KIT hingegen nahmen wegen der Stilllegung bzw. Außerbetriebnahme von Anlagen und bedeutsamen Tritiumquellen in den vergangenen 30 Jahren ständig ab und liegen nunmehr bei rund einem Terabecquerel pro Jahr. An dosisrelevanten Nukliden werden noch verschiedene Iod-Isotope und Kohlenstoff-14 emittiert. Die insgesamt von Kernkraftwerks-Emissionen herrührende Strahlenbelastung liegt mit weniger als 0,01 mSv pro Jahr aber im Bereich weniger Promille der durchschnittlichen Strahlenexposition der Bevölkerung von 2 bis 4 mSv pro Jahr.

3.72 Abgaben mit dem Abwasser

Bei kerntechnischen Anlagen wird auch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser überwacht und bilanziert. In Abbildung 3.74 und Abbildung 3.75 sind die Ableitungen der Nuklidgruppe der beta- bzw. gammastrahlenden Radionuklide sowie Tritium dargestellt.

Die beta- bzw. gammastrahlenden Radionuklide im Abwasser entstehen einerseits bei den Spaltvorgängen im Kernbrennstoff und andererseits durch Neutronenaufnahme (Aktivierung) von vorher nicht radioaktiven Substanzen innerhalb der Strukturmaterialien. Durch kleinste Lecka-

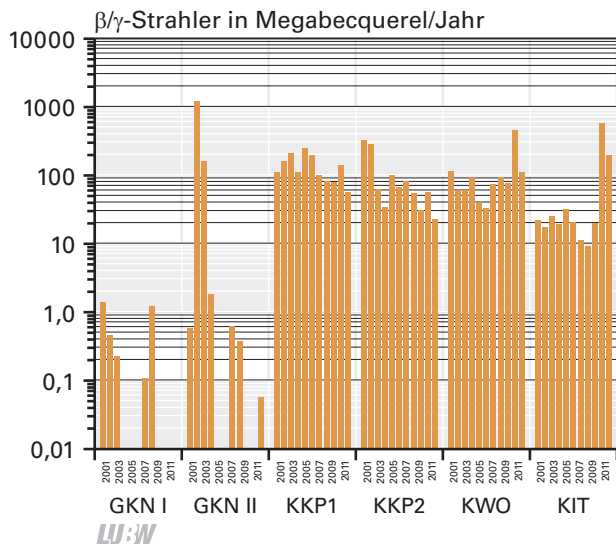


Abbildung 3.74: Emissionen von Beta-/Gamma-Strahlern mit dem Abwasser 2001 bis 2011; Quelle: IMIS

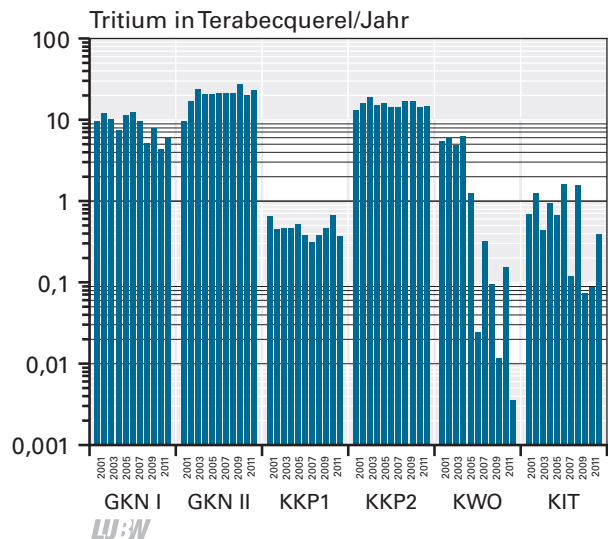


Abbildung 3.75: Tritium-Emissionen mit dem Abwasser 2001 bis 2011; Quelle: IMIS

gen in den Brennstabhüllrohren und durch korrosionsbedingten Materialabtrag kommen diese Spalt- und Korrosionsprodukte in das Wasser des Primärkreislaufes und von dort in Spuren nach außen. Die Erzeugung von beta- bzw. gammastrahlenden Spaltprodukten ist bei Kernkraftwerken abhängig von der erzeugten Energie. Das Auftreten künstlicher Radionuklide im Abwasser hängt von der Dichtheit der Umhüllung der Brennstäbe und der Leistungsfähigkeit der Wasserreinigungsanlagen ab (Abbildung 3.7.4).

Die Abgaberaten der Kernkraftwerke schwankten über Jahre stark, eine allgemeine Tendenz ist nicht feststellbar. Die Ableitungen der Kernkraftwerke sind mit denen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) nicht vergleichbar.

Die Druckwasserreaktoren geben jeweils mehr Tritium ab als der Siedewasserreaktor KKP I (Abbildung 3.7.5). Die Abgaben des KIT gingen im Einklang mit der Stilllegung von Tritium erzeugenden Anlagen in der Tendenz zurück. Tritium ist - langfristig betrachtet - im Abwasserpfad das am häufigsten nachgewiesene künstliche Radionuklid.

Jede Abgabe (Emission) radioaktiver Stoffe ist zwangsläufig mit einem Eintrag (Immission) dieser Stoffe in die Umwelt verbunden. Der Zusammenhang zwischen Emissionen und Immissionen kann dabei im Einzelnen sehr komplex sein. Im Wesentlichen sind dabei folgende Vorgänge von Bedeutung:

- Art, Höhe, Menge und Zeitpunkt der Abgabe
- Verfrachtung und Verteilung mit der Luft bzw. mit dem Wasser
- Verhalten und Verbleiben von Radionukliden in den einzelnen Umweltmedien
- Anreicherung in der Nahrungskette und Aufnahme über die Atemluft

Deshalb überwacht die LUBW als unabhängige Messstelle des Landes abgesehen von der dargestellten Emissionsüberwachung auch gezielt bestimmte Immissionen, deren Ergebnisse im nachfolgenden Kapitel dargestellt sind. Aus den Radioaktivitätsgehalten der für den Menschen wichtigsten Umweltmedien lässt sich dessen Strahlenbelastung ermitteln.

4 Ergebnisse der Umwelt- und Umgebungsüberwachung

Sowohl die Menge als auch die Art der in der Umwelt vorhandenen radioaktiven Stoffe schwanken innerhalb der Landesteile sowie zwischen den verschiedenen Medien stark. In Baden-Württemberg werden deshalb alle wichtigen Umweltmedien auf ihren Gehalt an radioaktiven Stoffen kontrolliert. Bei den nachgewiesenen Nukliden handelt es sich sowohl um natürliche Radioaktivität als auch um künstliche Radioaktivität. Spuren von Abgaben aus genehmigten Anwendungen radioaktiver Stoffe wurden auch gefunden.

Als Einträge früherer Kernwaffentests wurden häufig Cäsium-137, Strontium-90 und Tritium festgestellt. Durch den Reaktorunfall in Tschernobyl kam weiteres Cäsium-137 hinzu.

Die in die Umwelt gelangten künstlichen Radionuklide können aus sehr unterschiedlichen Quellen stammen. Radionuklide werden in der Nuklearmedizin, bei der Behandlung radioaktiver Abfälle und in geringem Umfang bei Anwendungen in Industrie und Gewerbe sowie über Recyclingprozesse, z. B. bei der Schrottverwertung freigesetzt. Aber auch genehmigte Abgaben aus Kernkraftwerken sind zu nennen. 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 ein. Diese Radionuklide können, da sie am Patienten angewendet werden, nach Ausscheidung aus dem Körper über Stuhl und Urin in Kläranlagen und Müllbehandlungsanlagen nachgewiesen werden.

Sowohl die Abgaben kerntechnischer Anlagen als auch der Fallout aus Kernwaffenversuchen enthalten praktisch immer ein Gemisch von mehreren Radionukliden. Diese Radionuklide zerfallen unterschiedlich schnell. Die Zusammensetzung der heute noch nachweisbaren Nuklide aus den Kernwaffenversuchen und aus dem Reaktorunfall von Tschernobyl 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 ermitteln, ob ein frischer Nuklideintrag stattgefunden hat oder nicht.

4.1 Ortsdosis

Wie in Kapitel 2.6 erwähnt, ist der Mensch permanent einer von außen einwirkenden ionisierenden Strahlung ausgesetzt (Abbildung 2.6.3). Diese Strahlung hat in erster Linie natürliche Ursachen und ist seit Entstehung der Erde vorhanden. Sie lässt sich auf folgende Quellen zurückführen:

- Aus dem Weltall trifft kosmische Strahlung mit einem sehr energiereichen Anteil auf die Erde. Diese Komponente ist höhenabhängig.
- In der Erdatmosphäre werden aufgrund der Kollision der kosmischen Strahlung mit Molekülen der Lufthülle ständig Radionuklide neu gebildet (z. B. Beryllium-7, Kohlenstoff-14 und Tritium).
- Auf der Erde sind seit ihrer Entstehung natürliche Radionuklide mit langer Halbwertszeit vorhanden. Diese zerfallen entweder direkt zu stabilen Nukliden (z. B. Kalium-40) oder wandeln sich über mehrere Zwischenstufen um (z. B. Zerfallsreihen des Urans und Thoriums).

Der terrestrische Beitrag hängt demnach stark von den jeweiligen geologischen Verhältnissen ab. So ist der geologisch verursachte Strahlenpegel an Orten mit einer höheren natürlichen Konzentration an Uran und Thorium im Boden höher als an Orten mit einem geringeren Gehalt.

Die durch die äußere Strahlung verursachte Ortsdosisleistung wird in Baden-Württemberg durch verschiedene Überwachungsprogramme und mit unterschiedlichen Messmethoden überwacht:

- durch die Funksonden der Kernreaktor-Fernüberwachung Baden-Württemberg (KFÜ)

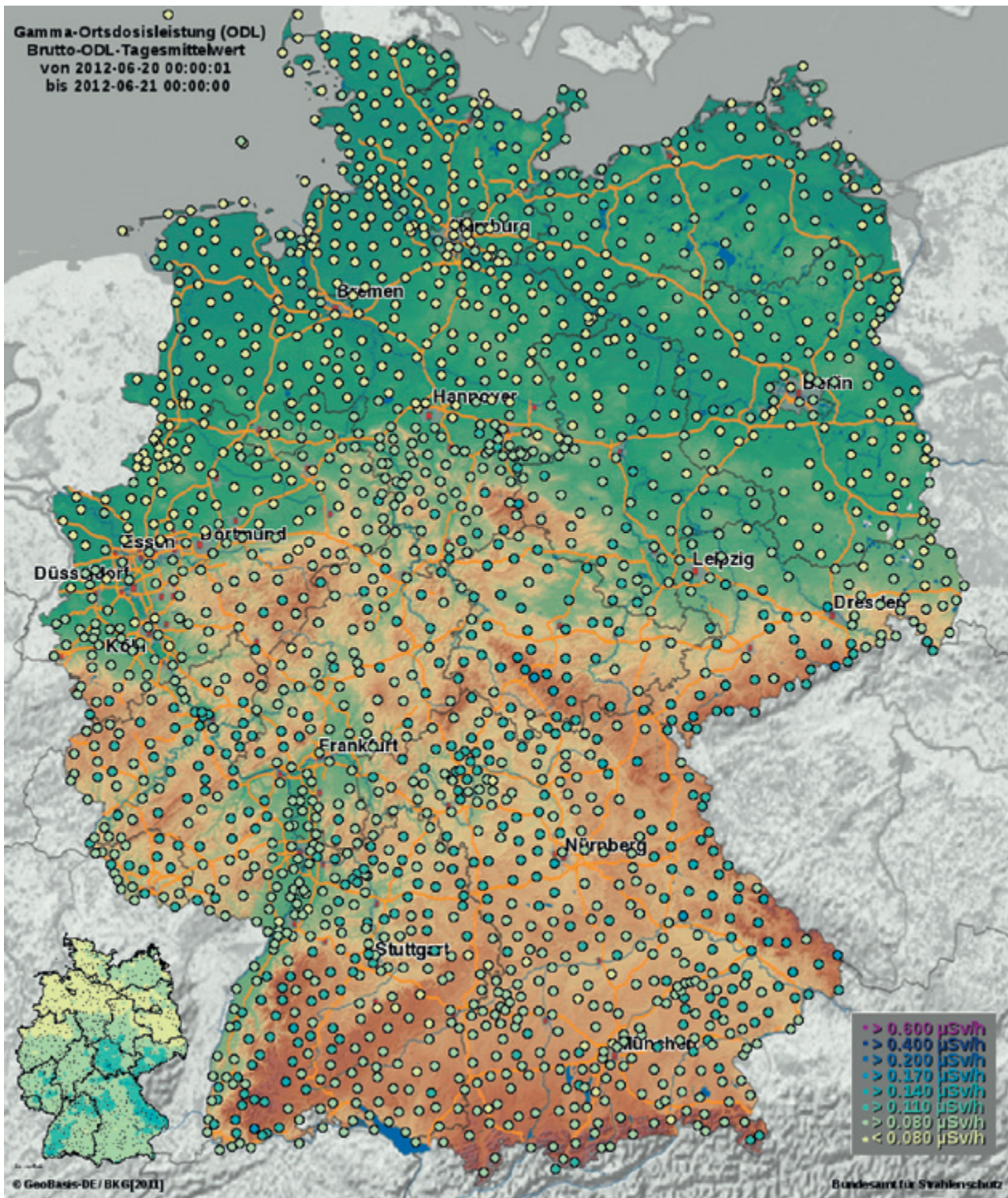


Abbildung 4.1.1: Online-Veröffentlichung der Ortsdosisleistungs-Werte des BFS-Messnetzes auf <http://odlinfo.bfs.de>

- durch das bundesweite Ortsdosisleistungs-Messnetz des BfS
- durch die in der Umgebung der kerntechnischen Anlagen ausgelegten Dosimeter

Die Messnetze sind in Kapitel 3 näher beschrieben.

4.1.1 Ortsdosisleistungs-Messnetz des Bundesamtes für Strahlenschutz

Das Ortsdosisleistungs-Messnetz des BfS ist Teil des IMIS und umfasst bundesweit ca. 1800 Stationen, von denen ca. 220 in Baden-Württemberg angesiedelt sind (Abbildung 3.5.1). Mit ihnen wird der Strahlenpegel großflächig überwacht und dokumentiert (Abbildung 4.1.1). Die Messwerte der Stationen werden vom BfS zeitnah im Internet veröffentlicht (<http://odlinfo.bfs.de>).

4.1.2 Kernreaktor-Fernüberwachung

In Abbildung 4.1.2 sind für die Jahre 2002 bis 2011 exemplarisch für die beiden baden-württembergischen Messnetze von jeweils einer Station die Jahresmittelwerte sowie die Minimal- und Maximalwerte der Gamma-Ortsdosisleistung dargestellt. Die Jahresmittelwerte der Ortsdosisleistung verändern sich über die Jahre kaum, da diese hauptsächlich von den geologischen Gegebenheiten des Standortes der Messstelle abhängen. Die Jahresmittelwerte der Funksonden lagen in den Jahren 2005 bis 2011 je nach Standort zwischen 0,061 und 0,133 $\mu\text{Sv/h}$. Die Minimal- und Maximalwerte zeigen jedoch größere temporäre Veränderungen, da sie stark von meteorologischen Ereignissen wie Niederschlag und Schneebedeckung beeinflusst werden. Die Absenkung des Mittelwerts in der Station IMM 514 zwischen den Jahren 2007 und 2008 ist durch die Modernisierung der Messtechnik im Immissionsmessnetz der Kernreaktor-Fernüberwachung zu erklären. Die kabelgebundenen Ortsdosisleistungs-Messgeräte wurden sukzessive durch Ortsdosisleistungs-Funksonden ersetzt. Da die neuen Ortsdosisleistungs-Funksonden Zählrohre mit geringerer Untergrundempfindlichkeit haben, hat sich die Untergrundzählrate etwas reduziert. Die Messempfindlichkeit ist dagegen unverändert geblieben. Die Messwerte der Funksonden können zeitnah im Internet unter folgender URL abgerufen werden:

<http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/79468/>

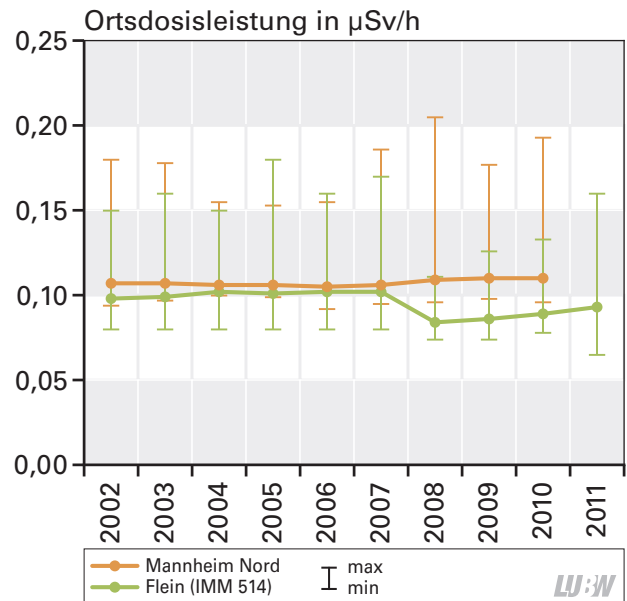


Abbildung 4.1.2: Ortsdosisleistungs-Jahreswerte zweier Stationen aus dem Immissions-Messnetz (Flein, IMM 514) und dem Strahlenpegel-Messnetz (Mannheim Nord). Gezeigt werden jeweils die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte des entsprechenden Jahres. Der Betrieb des Strahlenpegel-Messnetzes wurde zum Beginn des Jahres 2011 eingestellt (siehe Kapitel 3.5).

Warum steigt die Ortsdosisleistung an, wenn es regnet? Die typischen Erhöhungen in Folge von Niederschlägen werden häufig nach längeren Trockenperioden beobachtet und sind in Abbildung 4.1.3 dargestellt. In der Erde und im Gestein des Bodens ist das radioaktive Nuklid Radium-226 enthalten, welches in das Edelgas Radon-222 zerfällt. Mit Hilfe der Diffusion durch Hohlräume und Gesteinsspalten gelangt ein Teil des Gases an die Oberfläche. Dort mischt es sich mit der Luft und kann so über weite Strecken transportiert werden. Trockenheit des Bodens begünstigt dabei

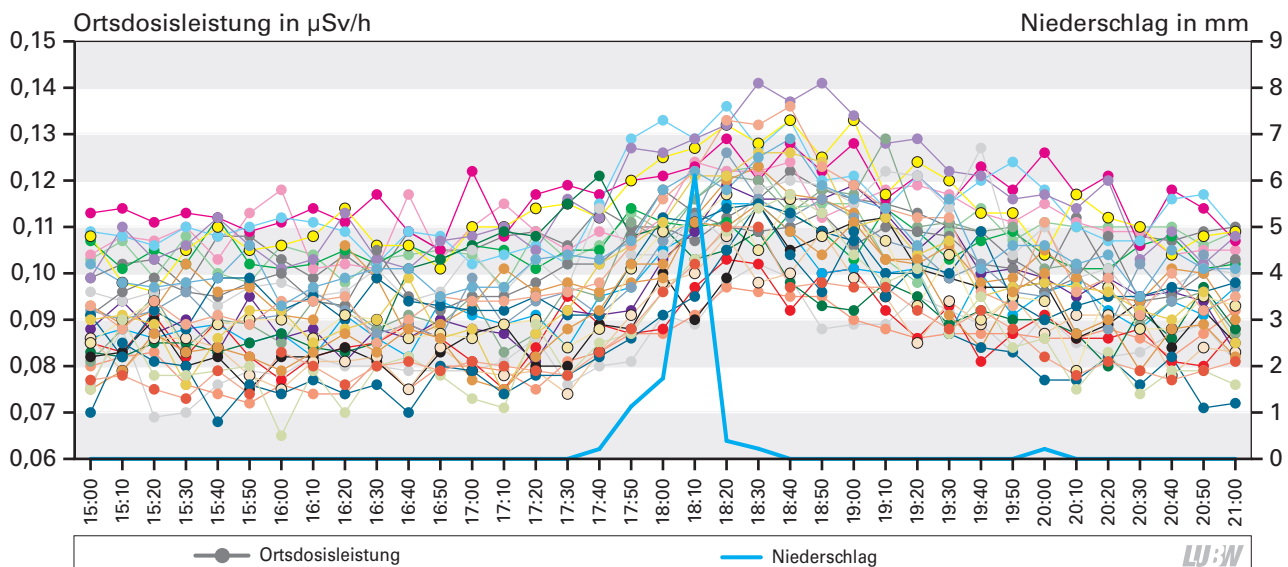


Abbildung 4.1.3: Anstieg der Ortsdosisleistung verursacht durch Niederschlag im Überwachungsbereich des Kernkraftwerks Philippsburg. Die blaue Kurve zeigt die Niederschlagsmenge in mm, die restlichen Linien zeigen die Ortsdosisleistung der Funksonden im Radius von bis zu 10 km zum Kernkraftwerk

die Freisetzung, während ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt den Radonaustritt behindert. Im Sommer, vor allem nach Erwärmung des Erdreichs durch direkte Sonneneinstrahlung, kann die Radon-Diffusion beschleunigt ablaufen. Die Zerfallsprodukte des Radons lagern sich anschließend an die von der Luft getragenen Aerosole an. Durch Niederschlag werden die Aerosole aus der Luft ausgewaschen und lagern sich auf dem Boden ab, wo sie die Ortsdosisleistung messbar erhöhen, bis sie schließlich zerfallen. Die Erhöhung kann während gewitterartiger Regenfälle bis zu dem Dreifachen des Nulleffektes betragen. Die Maximalwerte der Messstationen sind deshalb häufig auf Niederschlag zurückzuführen.

Warum sinkt die Ortsdosisleistung, wenn Schnee liegt?

Die Schneedecke hat aufgrund ihres Wassergehaltes eine stark abschirmende Wirkung auf die aus dem Boden stammende terrestrische Strahlung. Feuchtigkeit und Frost behindern zudem die Mobilität des Radon-222. Die Abschirmung durch eine Schneedecke kann vor allem in Höhenlagen bis zu 50 % betragen und ist daher in den meisten Fällen für die Jahresminima der Messstationen verantwortlich. In Abbildung 4.1.4 sind exemplarisch zwei Zeitreihen gegenübergestellt, die von Stationen stammen, die eine stark unterschiedliche Schneebedeckung aufweisen. Die Messsonde auf dem Schauinsland (1195 m NN) zeigt während der Schneebedeckung in den Wintermonaten deutlich niedrigere Werte als im Sommer. Die zweite Messsonde

steht auf dem Dach einer beheizten Messstation in der Rheinebene bei Philippsburg, auf dem eher mit geringer bis fehlender Schneebedeckung zu rechnen ist. Im Winter ist dadurch kein Absinken der Ortsdosisleistung zu beobachten. Die Messwerte zeigen im Jahresverlauf einen recht konstanten Wert.

In der Kernreaktor-Fernüberwachung des Landes laufen die radiologischen Messwerte unterschiedlichster Datenquellen und Messnetze zusammen. Das System prüft die Messwerte automatisiert gegen die Alarmierungsschwellen. Im Falle einer Überschreitung der Alarmierungsschwelle wird ein radiologischer Alarm ausgelöst. Die Funksonden ermöglichen in einem solchen Fall die Beurteilung der radiologischen Lage und einer möglichen Gefährdung der Bevölkerung

Ein Maß für die Empfindlichkeit eines Ortsdosisleistungsmessnetzes ist durch die sogenannte Nachweisgrenze definiert. Alle Ereignisse, die einen Ortsdosisleistungs-Anstieg verursachen, der über der Nachweisgrenze liegt, können messtechnisch detektiert werden. In der Kernreaktor-Fernüberwachung kommt darüber hinaus ein mathematisches Verfahren nach Czarnecki zur Anwendung, das bei der Bildung von Nettowerten die Funksonden eines Überwachungsbereichs als Kollektiv betrachtet und dadurch die Nachweisgrenze um ca. einen Faktor 2 verbessert. Die Nachweisgrenzen der Funksonden der jeweiligen Überwa-

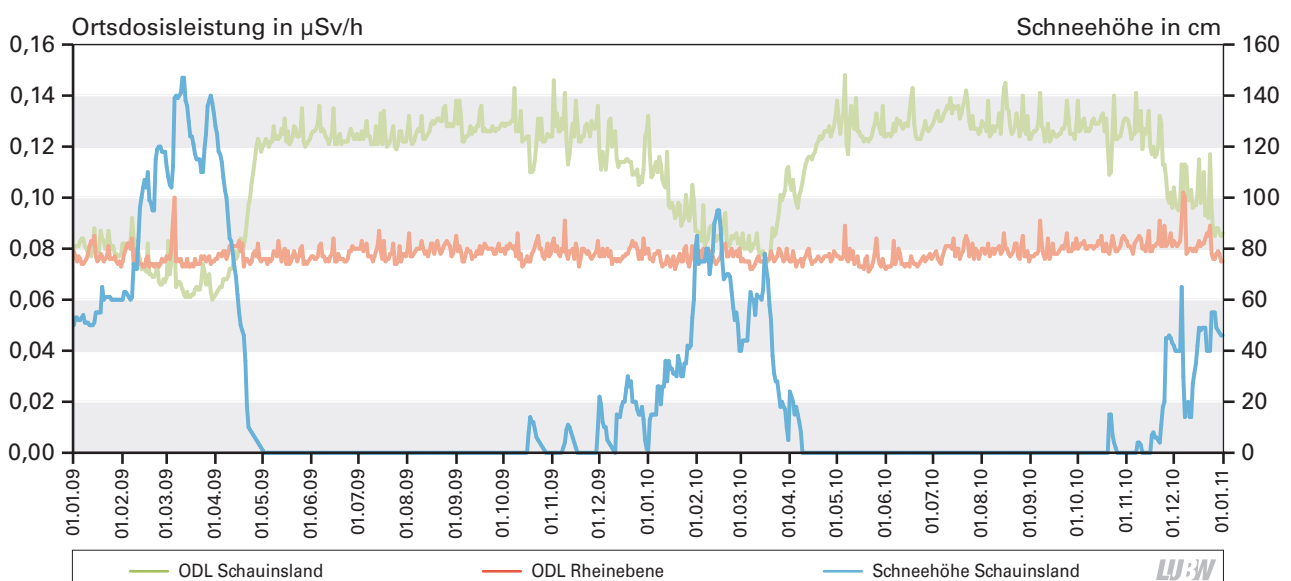


Abbildung 4.1.4: Einfluss der Schneebedeckung auf die Ortsdosisleistung während der Wintermonate: die Tagesmittelwerte der Sonde auf dem Schauinsland (1195 m NN) zeigt einen gegensätzlichen Verlauf zur Schneebedeckung, während die Sonde in der Rheinebene konstant verläuft; Quelle Schneehöhe Schauinsland: BfS

chungsbereiche liegen in Abhängigkeit des eingesetzten Messgerätetyps zwischen 0,008 und 0,015 $\mu\text{Sv/h}$.

Jedoch hat nicht jede Erhöhung der Ortsdosisleistung ihre Ursachen in natürlichen Vorgängen wie Auswaschungen durch Niederschlag. Am 22.03.2010 wurde bei der Messstation Eggenstein eine Erhöhung beobachtet, die keinem Niederschlagsereignis zugeordnet werden konnte. Zwischen 17:00 und 18:30 stieg die Ortsdosisleistung auf mehr als das Doppelte ihres Nulleffekts an (Abbildung 4.1.5). Ursache hierfür war eine Durchstrahlungsprüfung an einer Gas-Pipeline in der Nähe der Messstation. Diese zerstörungsfreien Werkstoff-Prüfungen werden mit Hilfe eines Gammastrahlers durchgeführt. Finden sie in der Nähe einer Messstation statt, können erhöhte Messwerte verursacht werden. Daher sind sie bei dem entsprechenden Regierungspräsidium als zuständiger Aufsichtsbehörde vorher anzumelden.

4.1.3 Ortsdosimetrie mit Flachglasdosimetern

In der Umgebung der kerntechnischen Anlagen werden von der LUBW jeweils bis zu 30 strahlungsempfindliche Flachglasdosimeter ausgelegt. Die Dosimeter werden jährlich ausgetauscht, ausgewertet und liefern so einen Jahreswert für die Ortsdosis. In Abbildung 4.1.6 sind die Ortsdosismessungen für den Überwachungsbereich Neckarwestheim für die Jahre 2001 bis 2011 dargestellt.

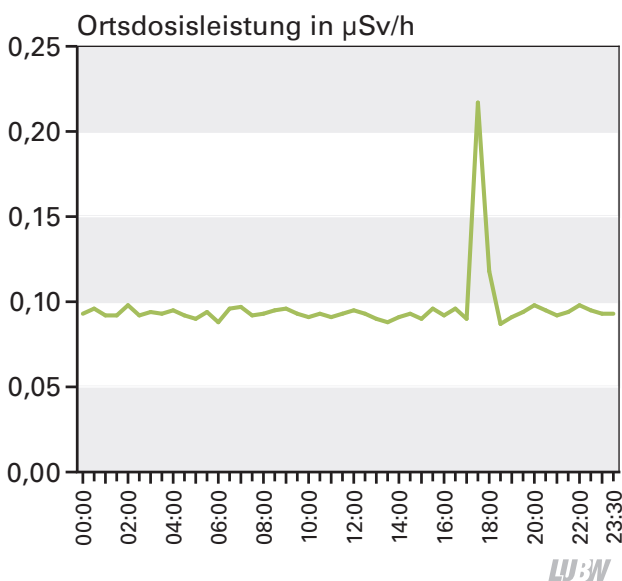


Abbildung 4.1.5: Erhöhung der Ortsdosisleistung infolge einer Durchstrahlungsprüfung in der Nähe der Messstation Eggenstein.

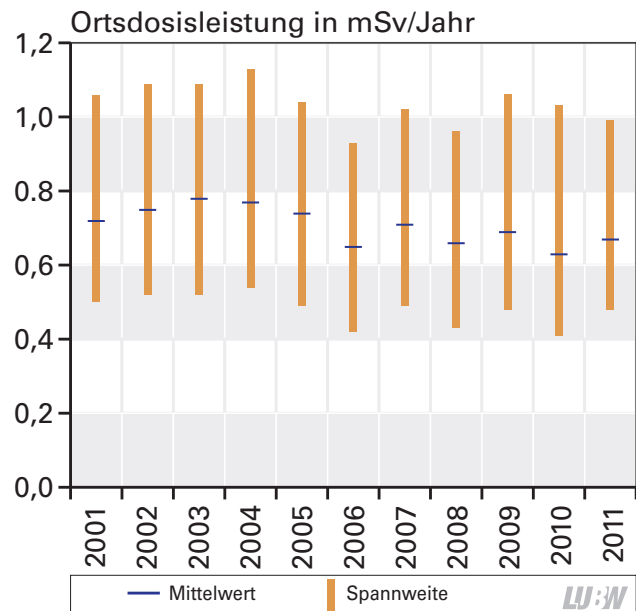


Abbildung 4.1.6: Ortsdosiswerte für den Überwachungsbereich Neckarwestheim

Die einzelnen Standorte weisen im Rahmen stets auftretender Schwankungen charakteristische Mittelwerte auf. Dies ist dadurch erklärbar, dass für die ermittelte Dosis am Messort hauptsächlich der geologische Untergrund und die nähere Umgebung des Auslegungsortes 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. Im Oberrheintal mit seinen sandigen Böden liegen die Ortsdosen am niedrigsten. Die Werte im Hochrheingebiet in der Umgebung des Kernkraftwerks Leibstadt sind am höchsten.

4.2 Luft

Durch die Einatmung von Luft können auch Schadstoffe in die Lunge gelangen. Sie sind gasförmig oder liegen als Schwebstoffe (Aerosole) vor. Unter den Gesichtspunkten des Strahlenschutzes sind vor allem Isotope des Edelgases Radon und seine Folgeprodukte von Bedeutung, die ebenfalls radioaktiv sind. Radon ist Teil der natürlichen Zerfallsreihen des Urans und Thoriums und kommt in den Nukliden Radon-219, Radon-220 und Radon-222 vor. Es trägt wesentlich zur Strahlenexposition des Menschen bei (siehe Kapitel 2.4).

Luft dient auch als Transportmedium, das Stoffe weiträumig verfrachten kann. Diese werden ausgewaschen und auf

Boden und Bewuchs abgelagert, können aber auch als Staub wieder in die Luft aufgenommen werden. Weitere natürliche Radionuklide, wie z. B. Beryllium-7 stammen aus der Atmosphäre. An künstlichen Nukliden können in der Luft z. B. Cäsium-137, Iod-131 oder Xenon-133 enthalten sein.

Der Radioaktivitätsgehalt der Luft wird daher in Baden-Württemberg in den landesweit installierten Radioaerosolmessstationen überwacht. Diese ermitteln mit Hilfe der Gamma-Spektrometrie die Aktivitätskonzentration aerosolgebundener gamma-strahlender Radionuklide („Radioaerosole“) in der Luft. Von den zwölf Messstationen in Baden-Württemberg werden fünf zur Überwachung von Kernkraftwerken eingesetzt, weitere sieben dienen zur Umweltüberwachung. Dabei wird Luft aus der Umgebung angesaugt und über Filter geleitet. Die Filter bestehen in der Regel aus einem Glasfaser-Feinfilter für Aerosole und einem Aktivkohlefilter für elementares, gasförmiges Iod. Die Filter werden online ausgemessen und die Ergebnisse können im [Internet](#) abgerufen werden. Mit mobilen Radioaerosolmessstationen kann im Bedarfsfall kurzfristig das Messnetz gezielt verdichtet werden.

In der Umgebung der kerntechnischen Anlagen sind zusätzliche Aerosolfilter installiert. Diese werden monatlich oder quartalsweise im Labor der LUBW ausgewertet.

Sowohl in den Radioaerosolmessstationen des Landes als auch auf den Luftfiltern in der Nähe der Kernkraftwerke werden unter anderem radioaktive Radonfolgeprodukte Blei-212, Blei-214, Bismut-212, Bismut-214 und Thallium-208 gemessen. Diese lagern sich im Gegensatz zum Edelgas Radon an Aerosole an und können somit auf den Filtern gesammelt werden.

4.2.1 Beryllium-7

Auf den Aerosolfiltern ist häufig das natürliche Radionuklid Beryllium-7 zu finden. Es entsteht durch Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit Luftmolekülen der Erdatmosphäre und hat eine Halbwertszeit von 53,3 Tagen.

Beryllium-7 befindet sich überwiegend in der Stratosphäre, ein Teil des Berylliums gelangt mit den Luftmassen in die bodennahe Luft. Die Beryllium-7-Aktivität in der boden-

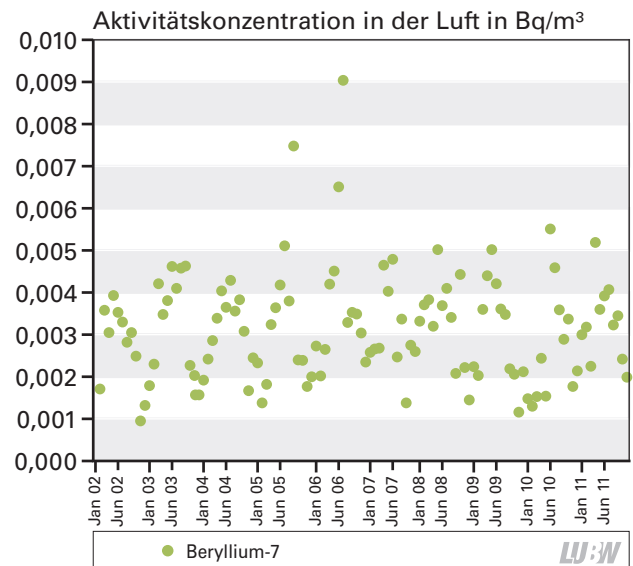


Abbildung 4.2.1: Beryllium-7-Aktivität in der Luft, Messstation Hartheim

nahen Luft wird durch die Aktivität der Sonne und die Anzahl der Sonnenflecken auf der Oberfläche der Sonne beeinflusst. Wie in Abbildung 4.2.1 zu sehen ist, unterliegt sie außerdem jahreszeitlichen Schwankungen im Bereich von einigen mBq/m³. Deutlich sind die Minima im Winter mit ca. 1,5 mBq/m³ und die Maxima im Sommer mit ca. 5 mBq/m³ zu erkennen. Der leicht zunehmende Trend der letzten 10 Jahre ist auf die erhöhte Sonnenaktivität zurückzuführen. Der Anteil der kosmischen Strahlung an der gesamten natürlichen Strahlenexposition beträgt mit rund 0,3 mSv/Jahr etwa 15%.

4.2.2 Künstliche Nuklide

Neben den natürlichen Radionukliden können auch Spuren künstlicher Nuklide festgestellt werden. Hierzu gehören Cäsium-137 und die Edelgase Krypton-85 und Xenon-133, die bei der technischen Nutzung der Kernenergie entstehen (siehe auch Kapitel 3.7). Diese Spaltprodukte werden mit der Abluft freigesetzt.

Das Edelgas Xenon-133 hat eine kurze Halbwertszeit von 5,2 Tagen und seine spezifische Aktivität in der Luft liegt seit Jahren – mit Ausnahme im März/April 2011 - unterhalb von 0,1 Bq/m³ Luft. In der Abbildung 4.2.2 ist zu sehen, dass die beiden Reaktorunfälle in Tschernobyl und Fukushima zu einem drastischen kurzzeitigen Anstieg der Xenon-133-Aktivität in der Luft führten. So stieg die Aktivität 1986 auf ca. 42 Bq/m³. Seit Anfang der 1990er Jahre nahm die Xenon-133-Aktivität ab, da die Emissionen aus den Kernkraftwerken durch veränderte Abluftsysteme zurückgingen. Seit 2002 ist ein mi-

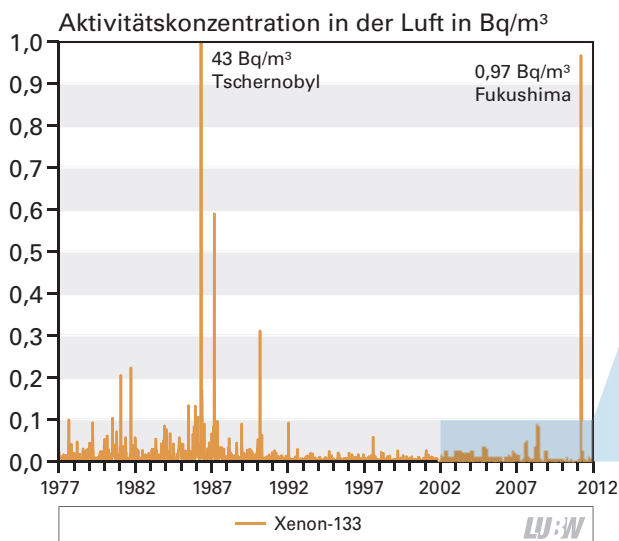


Abbildung 4.2.2: Aktivitätskonzentration von Xenon-133 in Luft seit 1977 (Wochenproben), Freiburg; Quelle: BfS

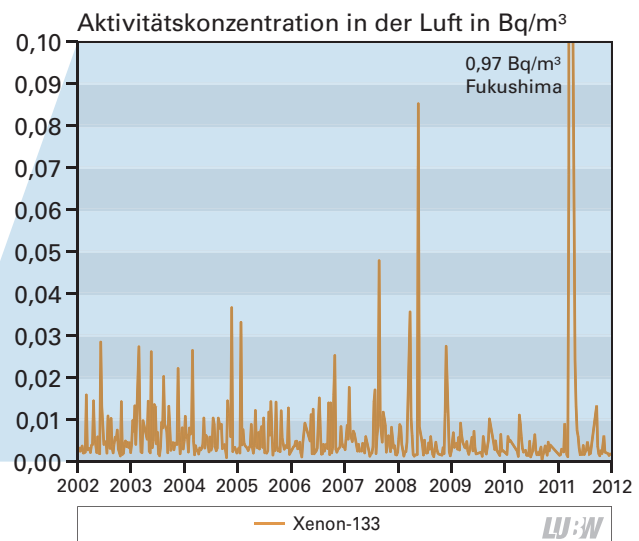


Abbildung 4.2.3: Aktivitätskonzentration von Xenon-133 in Luft für die Jahre 2002 bis 2011 (Wochenproben), Freiburg; Quelle: BfS

nimaler Anstieg zu verzeichnen, da die Produktion medizinisch verwendeter Isotope (insbesondere Molybdän-99 bzw. Technetium-99m) zugenommen hat. Heute beträgt die Xenon-133-Aktivität im Mittel einige mBq/m^3 Luft (Abbildung 4.2.3). Neben einzelnen kleineren Peaks ist die Erhöhung im Frühjahr 2011 auffällig. Durch die Reaktorkatastrophe in Fukushima wurde das Spaltprodukt Xenon-133 mit der Luft nach Deutschland transportiert und verursachte eine Erhöhung der spezifischen Xenon-133-Aktivität in der Luft auf ca. 1 Bq/m^3 . Nach ca. 8 Wochen war wieder das ursprüngliche Niveau von kleiner $0,01 \text{ Bq/m}^3$ Xenon-133 in Luft erreicht.

Die langfristig gemessene Krypton-85-Aktivität in der Atmosphäre erhöhte sich in unseren Breitengraden in den vergangenen 30 Jahren von $0,6 \text{ Bq/m}^3$ Luft auf im Mittel $1,6 \text{ Bq/m}^3$ (Abbildung 4.2.4). Dies entspricht einem globalen Trend und zeigt, dass die Freisetzungsrate für Krypton-85 größer ist als seine Zerfallsrate. Da Krypton ein Edelgas ist, führt lediglich der radioaktive Zerfall mit einer Halbwertszeit von 10,8 Jahren zu einem Abbau. Die kurzzeitigen Erhöhungen der spezifischen Aktivität sind hauptsächlich auf Emissionen aus den Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague (Frankreich), Sellafield (Großbritannien) und bis 1991 auch Karlsruhe zurückzuführen [Schlosser]. Wie in Abbildung 4.2.5 zu sehen ist, betrug das Maximum der spezifischen Aktivität zwischen 2002 und 2011 4 Bq/m^3 . Die Reaktorunfälle in der Ukraine und in Japan führten in Deutschland zu keiner Erhöhung der Krypton-85-Aktivität in der Luft. In den letzten 10 Jahren sind im Mittel $1,6 \text{ Bq/m}^3$ Krypton-85 in der Luft enthalten, wobei die Aktivität rela-

tiv konstant ist. Dies zeigt, dass radioaktiver Zerfall und Emissionen in etwa gleiche Beträge aufweisen.

Radiologisch stellen weder Krypton-85 noch Xenon-133 in den beobachteten spezifischen Aktivitäten ein Problem dar. Die aus der Inhalation der Edelgase resultierende effektive Jahresdosis ist im Vergleich zur Strahlenexposition, die durch Radon verursacht wird, vernachlässigbar.

In einzelnen Proben werden auch Spuren von Cäsium-137 gefunden. Nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl wurde es auf dem Boden abgelagert und kann später in die Luft aufgewirbelt werden. Die Aktivität in der Luft liegt dabei meist unterhalb der Nachweisgrenze oder in der Größenordnung von einigen $\mu\text{Bq/m}^3$ und ist somit um Faktor 1000 geringer als die Aktivität des Beryllium-7.

4.3 Niederschlag, oberirdische Gewässer und Grundwasser

Sauberes Wasser ist für den Menschen lebensnotwendig. Deshalb hat die Überwachung der verschiedenen Wasservorkommen eine besondere Bedeutung. Wasser wird in der Umwelt vielfältig umgesetzt, da es einen Kreislauf darstellt. Aus offenen Oberflächen (Seen und vor allem Meere) verdunstet Wasser und gelangt als Feuchtigkeit in die Atmosphäre, bis es durch Abkühlung wieder kondensiert und als Niederschlag in Form von Regen oder Schnee auf die Erdoberfläche trifft. Von dort versickert es ins Grundwasser oder fließt oberirdisch in Flüsse und Seen und

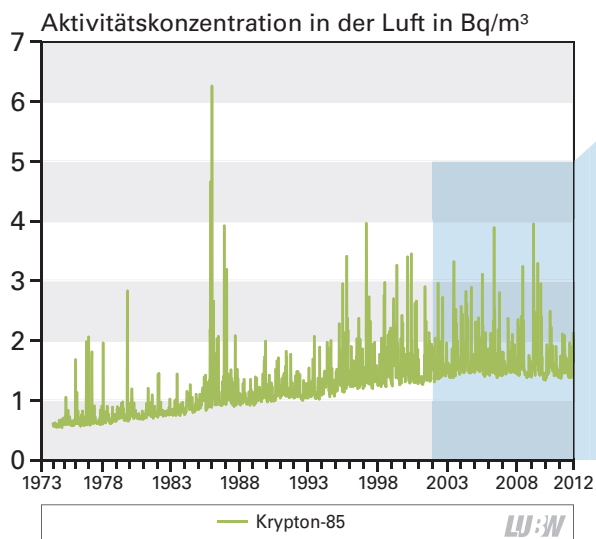


Abbildung 4.2.4: Aktivitätskonzentration von Krypton-85 in Luft seit 1973 (Wochenproben), Freiburg; Quelle: BfS

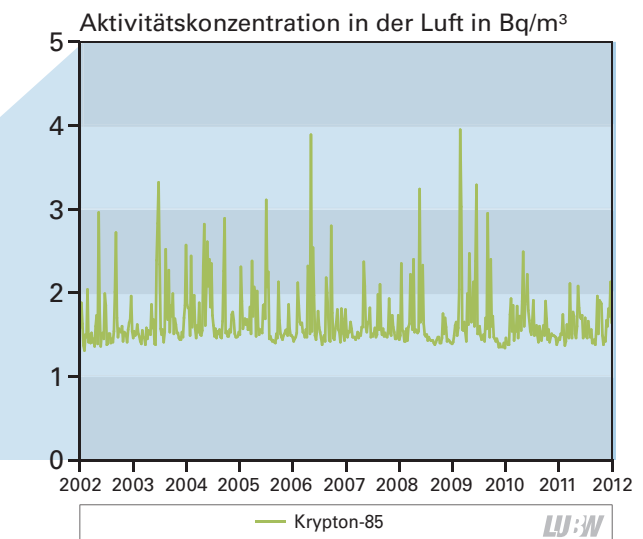


Abbildung 4.2.5: Aktivitätskonzentration von Krypton-85 in Luft für die Jahre 2002 bis 2011 (Wochenproben), Freiburg; Quelle: BfS

schließlich zurück ins Meer. Auf dem Weg nimmt es Stoffe auf und lagert diese an anderer Stelle wieder ab.

Wasser kann genauso wie Luft neben chemischen auch radioaktive Stoffe enthalten. Im Wasser gelöste Radionuklide sind überwiegend natürlichen Ursprungs, selten künstlicher Herkunft. Diese Radionuklide können entweder direkt über das Trinkwasser in den Menschen aufgenommen werden oder sich in der Nahrungskette wie z. B. in Fischen anreichern. Radionuklide im Wasser werden in Baden-Württemberg an verschiedenen Orten als Niederschlag, Trinkwasser und Oberflächenwasser überwacht. Aber auch Schwebstoffe und Sedimente sind von Bedeutung, da sich an Schwebstoffen viele der im Wasser gelösten Stoffe anlagern. Sedimente dagegen geben einen Hinweis auf Inhaltsstoffe, die in der Vergangenheit in das Gewässer eingetragen wurden.

4.3.1 Niederschlag

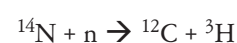
Mit dem Niederschlag werden Stoffe aus der Luft ausgewaschen und auf der Erdoberfläche abgelagert bzw. in die oberirdischen Gewässer und ins Grundwasser transportiert. Deshalb wird Niederschlag flächendeckend in Baden-Württemberg und verstärkt in der Umgebung der Kernkraftwerke radiologisch überwacht.

In nahezu jeder Niederschlagsprobe ist das natürliche Radionuklid Beryllium-7 enthalten. Es entsteht in der Atmosphäre durch die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Luftatomen (siehe Kapitel 4.2.1). Ein Großteil des Beryllium-7 bleibt in der oberen Atmosphäre, ein geringer Teil sinkt

aber bis in die unteren Luftschichten ab, wird dort vom Regen ausgewaschen und gelangt so in andere Umweltmedien. Die im Niederschlag enthaltene Aktivität wird als Deposition je m² Bodenfläche berechnet, sodass die Einheit Bq/m² beträgt. In Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge können so einige Hundert Bq/m² und Monat abgelagert werden.

Der Deutsche Wetterdienst ermittelt täglich die Gesamt-Beta-Aktivität im Niederschlag, die als nasse Deposition auf dem Boden abgelagert wird. In der Abbildung 4.3.1 ist der summierte Jahreseintrag der Beta-Aktivität (mit Ausnahme von Tritium) für Stuttgart seit 1958 dargestellt. Die lange Zeitreihe verdeutlicht, wie hoch der Eintrag künstlicher Radionuklide zur Zeit der oberirdischen Kernwaffentests in den 1960er Jahren war. Zu dieser Zeit wurden mehr als 10.000 Bq/m² und Jahr abgelagert. Einen kurzzeitigen Anstieg auf knapp 7.000 Bq/m² verursachte auch die Reaktorkatastrophe in Tschernobyl 1986. Seitdem liegen die jährlichen Aktivitätseinträge unterhalb von 100 Bq/m² bzw. knapp darüber (2005 und 2011). Auch der Unfall in Fukushima führte in Deutschland zu keinem Anstieg der Deposition. Da die Messstation Stuttgart im Jahr 2009 abgebaut wurde, sind ab 2009 die Daten für Rheinstetten in der Abbildung dargestellt.

Auch Tritium (H-3) ist im Niederschlag in Spuren enthalten. Tritium wird in der oberen Atmosphäre durch den Beschuss von Stickstoff mit Neutronen aus dem Weltall gebildet:



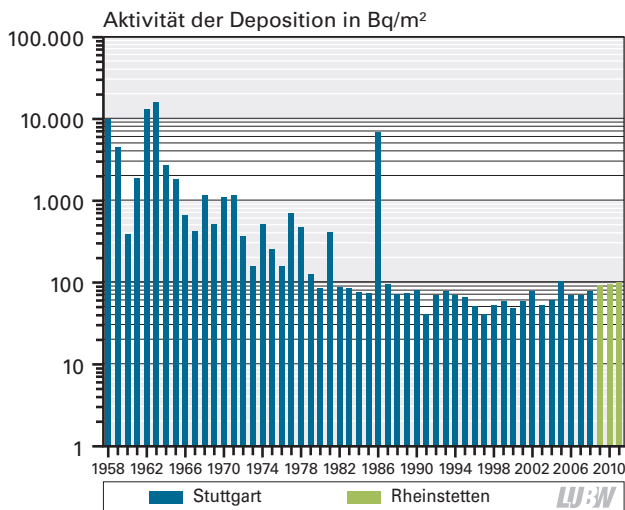


Abbildung 4.3.1: Jährlicher Eintrag der Gesamt-Beta-Aktivität (ohne Tritium) für Stuttgart bzw. Rheinstetten; Quelle: DWD

Es gibt jedoch auch anthropogene Quellen für Tritium, z. B. Kernkraftwerke oder Forschungseinrichtungen. In Baden-Württemberg wird deshalb in der Umgebung des KIT und nahe der Schweizer Grenze die Tritium-Aktivität im Niederschlag gemessen.

In einzelnen Fällen wurde Tritium in der Umgebung des KIT festgestellt. In der Abbildung 4.3.2 ist die ermittelte Tritium-Aktivität dargestellt, die im Laufe eines Monats in unmittelbarer Nähe zum Tritium-Labor auf dem Gelände des KIT mit dem Niederschlag auf der Bodenoberfläche abgelagert wird. Die überwiegende Zahl der Niederschlagsproben lag unterhalb der Nachweisgrenze, einige Proben enthielten messbare Tritium-Gehalte. Die Höhe der Nachweisgrenze ist abhängig von

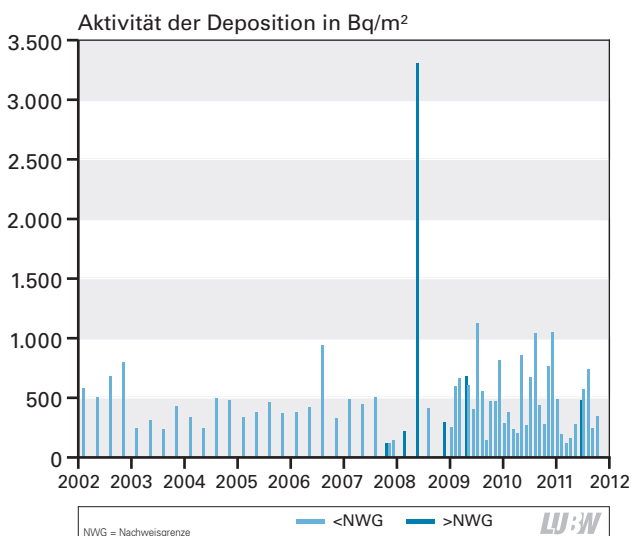


Abbildung 4.3.2: Im Monat mit dem Niederschlag abgelagerte Tritium-Aktivität in der Nähe des Tritium-Labors des KIT

der monatlichen Niederschlagshöhe und weist deshalb erhebliche Schwankungen auf. Seit 2009 wird der Niederschlag monatlich untersucht, zuvor waren es Quartalsammelproben.

An einer weiteren Messstelle nahe des KIT weisen die Tritium-Gehalte im Niederschlag geringere Schwankungen auf (siehe Abbildung 4.3.3). Lediglich 3 Proben enthalten Tritium geringfügig oberhalb der Nachweisgrenze. Jedoch können die Nachweisgrenzen in einigen Fällen auch erheblich höher als die ermittelten Aktivitäten der Proben sein.

Als weiteres natürliches Nuklid findet man gelegentlich auch Kalium-40 im Niederschlag.

Künstliche Nuklide konnten dagegen nur in Proben aus dem Frühjahr 2011 nachgewiesen werden, die durch die Reaktorunfälle in Japan beeinflusst waren. Erläuterungen hierzu sind im Kapitel 1.3.3 enthalten.

4.3.2 Trink- und Grundwasser

Sauberes Trinkwasser ist für die Gesundheit des Menschen von herausragender Bedeutung. Trinkwasser wird in Baden-Württemberg meist aus Grundwasser gewonnen. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei dem Grundwasser in der Nähe kerntechnischer Anlagen.

Trink- und Grundwasser enthält auch natürliche Radionuklide wie Kalium-40 und die Nuklide der natürlichen Zer-

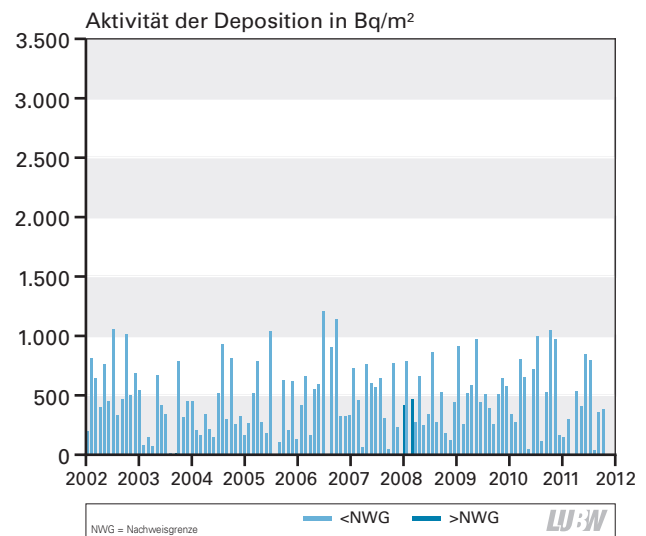


Abbildung 4.3.3: Im Monat mit dem Niederschlag abgelagerte Tritium-Aktivität in der Nähe des KIT (Linkenheim-Hochstetten)

fallsreihen des Urans und Thoriums. Die LUBW untersucht Trinkwasserentnahmestellen in der Umgebung kerntechnischer Anlagen auf radioaktive Nuklide sowie verschiedene Grundwasservorkommen in Baden-Württemberg.

In der im Jahr 2011 geänderten Trinkwasserverordnung (TrinkwV) wurde erstmals ein Grenzwert für Uran in Höhe von 0,01 mg/l eingeführt. Unter Berücksichtigung der Aktivität von natürlichem Uran entspricht dies einer Aktivität des Uran-238 von 0,12 Bq/l. Im Berichtszeitraum wurde eine maximale Aktivität von 0,01 Bq/l gemessen, sie lag somit um Faktor 10 unterhalb des Grenzwertes.

Des Weiteren wurden die künstlichen Radionuklide Cäsium-137 und Strontium-90 in Spuren ermittelt. Hierbei wurde für Cäsium-137 eine maximale Aktivität von 0,02 Bq/l und für Strontium-90 maximal 0,008 Bq/l festgestellt. Unter Berücksichtigung der Grenzwerte für Säuglingsnahrung von 75 Bq/l (Strontium-90) bzw. 400 Bq/l (Cäsium-137) sind diese Gehalte unbedenklich. Das Vorhandensein von Strontium ist noch immer auf die früheren oberirdischen Kernwaffentestexplosionen zurückzuführen. Das aus diesen Versuchen stammende Strontium-90 lagerte sich weltweit auf dem Boden ab, wurde im Wasser gelöst und so in das Grundwasser transportiert. Cäsium wurde zusätzlich durch den Reaktorunfall in Tschernobyl ins Grundwasser eingetragen.

Der Grenzwert für Tritium in Trinkwasser liegt nach der geltenden Trinkwasserverordnung bei 100 Bq/l. Dieser Wert war stets unterschritten. Bei Genuss von Tritium-haltigem Trinkwasser unterhalb des Grenzwertes wird kein Strahlendosisgrenzwert für die Bevölkerung erreicht, da Tritium einen kleinen Dosisfaktor und eine geringe Verweilzeit im menschlichen Organismus hat. Selbst der Verzehr von Trinkwasser mit einem Tritium-Gehalt von 1.000 Bq/l führt lediglich zu einer effektiven Dosis von 0,01 mSv/a (siehe auch Kapitel 2.6).

Die Tritium-Gehalte im Trinkwasser liegen fast überall unterhalb der messtechnischen Nachweisgrenze von 8 Bq/l. Trinkwässer, in denen Tritium nachgewiesen wurde, stammen überwiegend aus dem Raum Philippsburg und sind auf frühere Ableitungen des KIT in den Altrhein zurückzuführen. Im Trinkwasser von Einzelentnehmern wird regelmäßig Tritium festgestellt. Aufgrund von Speicherungseffekten im Gewässersystem des Rheingrabens sind dort heute noch

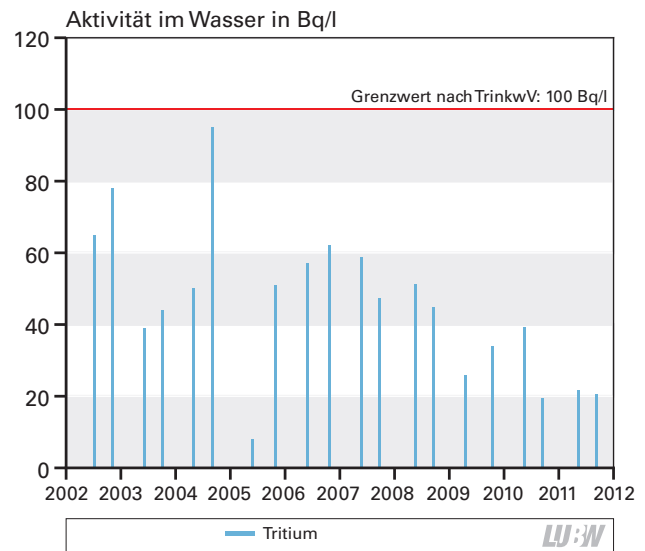


Abbildung 4.3.4: Tritium-Aktivität im Trinkwasser eines Einzelentnehmers im Raum Philippsburg

Tritium-Aktivitäten von ca. 20 Bq/l vorhanden, obwohl seit 2001 eine direkte Abwasserleitung in den Rhein führt. In der Abbildung 4.3.4 ist deutlich zu erkennen, dass dort seit einigen Jahren die Aktivität des Tritiums abnimmt. Der Genuss des Trinkwassers ist auch dort unbedenklich.

Ansonsten sind keine spezifischen Unterschiede im Radioaktivitätsgehalt von Trinkwässern aus der Umgebung kerntechnischer Anlagen gegenüber den in übrigen Gebieten gewonnenen Trinkwässern festzustellen.

4.3.3 Oberflächenwasser

Auch Oberflächenwässer wie Seen, Bäche und Flüsse werden regelmäßig auf ihren Gehalt an radioaktiven Stoffen überwacht.

Eine wichtige Rolle spielt das in allen Wasserproben enthaltene Tritium. Sein Gehalt in oberflächennahen Wässern, die nicht durch aktuelle anthropogene Tätigkeit beeinflusst sind, liegt heute bei einigen Bq/l. Ohne menschliches Zutun läge dieser Wert bei deutlich unter 1 Bq/l. In Abbildung 4.3.5 sind die Monatsmittelwerte der Tritium-Aktivität an acht Standorten von Rhein, Neckar und Donau dargestellt, die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde ermittelt werden.

In den 1950er und 1960er Jahren wurde durch Kernwaffentests Tritium in die Atmosphäre und somit in die Oberflächenwässer eingetragen. Durch radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit 12,3 Jahre), zunehmende Auswaschung aus der

Tritium im Oberflächenwasser 1980 - 2010

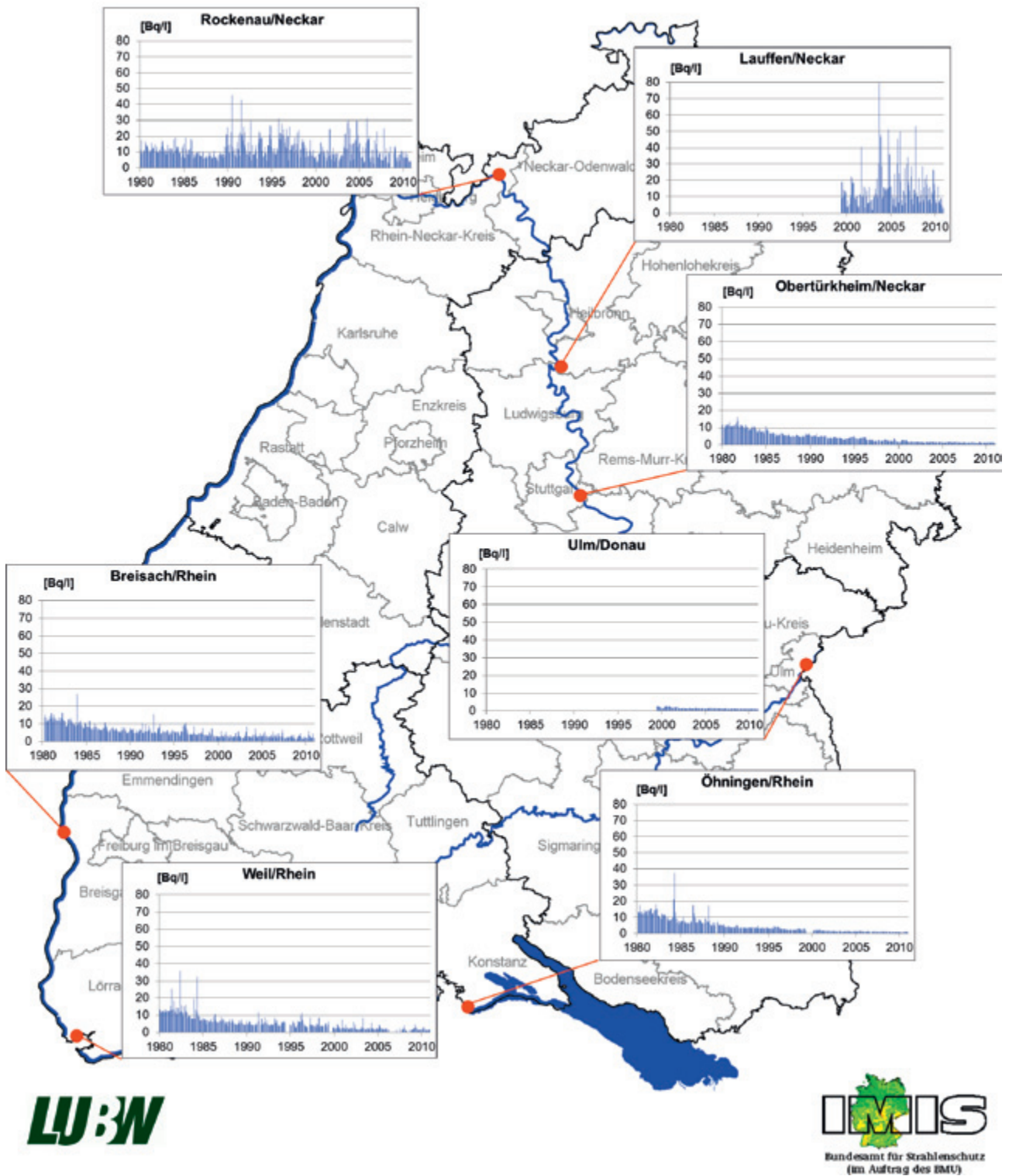


Abbildung 4.3.5: Aktivitätskonzentration von Tritium in Rhein, Neckar und Donau [Bq/l]; Quelle: Bundesamt für Gewässerkunde

Atmosphäre sowie Verdünnung mit dem vorhandenen Wasser ist die Tritium-Belastung in der Umwelt in den letzten 30 Jahren deutlich zurückgegangen. In der Donau bei Ulm werden heute Tritium-Aktivitäten im Flusswasser von ca. 1 Bq/l

gemessen. Dies ist hauptsächlich auf die Kernwaffenexplosionen zurückzuführen, da sich am Flusslauf kein Kernkraftwerk befindet. Am Rhein kann eine geringe Erhöhung der Tritium-Aktivität unterhalb der Kernkraftwerke Leibstadt

(Schweiz) und Fessenheim (Frankreich) beobachtet werden, da die Tritium-Aktivität im Wasser von Öhningen (vor den Kraftwerken) bis Breisach zunimmt. Dieser Zusammenhang lässt sich auch am Neckar feststellen. In Obertürkheim liegt die Tritium-Aktivität bei ca. 1 Bq/l, während in Lauffen und Rockenau unterhalb der Kernkraftwerke Neckarwestheim und Obrigheim eine Erhöhung der Tritium-Aktivität vorliegt. Wegen der geringeren Wasserführung im Neckar ist der Eintrag hier deutlicher als im Rhein zu erkennen, da im Rhein eine größere Verdünnung mit dem Flusswasser erfolgt. Die beobachteten erhöhten Tritiumwerte in der Umwelt sind heute somit überwiegend eine Folge der Ableitungen aus Kernkraftwerken. Zum Vergleich kann der Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 100 Bq/l herangezogen werden. Trotz der messbaren Erhöhung der Tritium-Aktivität lässt sich feststellen, dass der Grenzwert der Trinkwasserverordnung nicht überschritten wurde.

Im Rahmen der Umgebungsüberwachung der baden-württembergischen Kernkraftwerke durch die LUBW wird das Wasser im Einlauf- und Auslaufbauwerk beprobt, um so einen möglichen Eintrag in die Gewässer durch das Kraftwerk ermitteln zu können. Bei den grenznahen ausländischen Anlagen erfolgt die Probenahme im Rhein vor und nach dem Standort des Kraftwerks. In einigen Proben aus dem Auslauf der Kernkraftwerke können teilweise Spalt- und Aktivierungsprodukte nachgewiesen werden, die auf geringfügige Ableitungen im Rahmen der Genehmigung hinweisen. Nähere Informationen hierzu sind im jährlich erscheinenden Bericht [Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität](#) enthalten.

Des Weiteren werden kleinere Fließgewässer und der Bodensee auf Radionuklide untersucht. In geringen Aktivitätskonzentrationen wurde dabei das aus den Kernwafferversuchen stammende Strontium-90 mit einer maximalen Aktivität von 0,01 Bq/l festgestellt. Die natürlichen Uranisotope und Kalium-40 sind ebenfalls im Wasser enthalten.

4.3.4 Sediment/Schwebstoffe

Da Sedimente und Schwebstoffe sehr feinkörnig sind, akkumulieren sie Radionuklide aus dem Wasser. So können Einträge in ein Gewässer auch langfristig nachgewiesen werden. Neben dem Wasser wird deshalb in den baden-

württembergischen Fließgewässern auch das Sediment auf gammastrahlende Nuklide untersucht. Zusätzlich werden an einigen Stellen Schwebstoff-Fallen aufgestellt, um das frisch abgelagerte Material von älterem Sediment zu unterscheiden. Zum einen erfolgt die Beprobung am Rhein und Neckar vor und hinter einem Kernkraftwerk und zum anderen werden kleinere Fließgewässer im Land untersucht.

In der Abbildung 4.3.6 sind die Aktivitätskonzentrationen des Cäsium-137 im Sediment der Flüsse an verschiedenen Standorten im Land dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Lage der Kernkraftwerke am Rhein und Neckar keinen Einfluss auf die Aktivität im Sediment haben. Vielmehr wird deutlich, dass im Südosten Baden-Württembergs im Frühjahr 1986 mehr Cäsium-137 aus Tschernobyl als im übrigen Land abgelagert wurde. Da die Donau dieses Gebiet durchfließt, sind dort im Sediment auch heute noch höhere Cäsium-Aktivitäten anzutreffen.

In der Abbildung 4.3.7 ist ebenfalls zu erkennen, dass der Eintrag von Cäsium-137 in das Sediment aus Tschernobyl stammt. Die Aktivität im Sediment am Auslauf des Kernkraftwerks Philippsburg war im Sommer 1986 sprunghaft auf 1.200 Bq/kg Trockenmasse (TM) angestiegen. In den vergangenen 25 Jahren hat sich die Aktivität kontinuierlich verringert. Heute sind noch etwa 10 Bq/kg TM Cäsium-137 im Sediment vorhanden.

Der Vergleich der spezifischen Aktivität im Sediment und Schwebstoff, die am selben Ort entnommen wurden, zeigt, dass

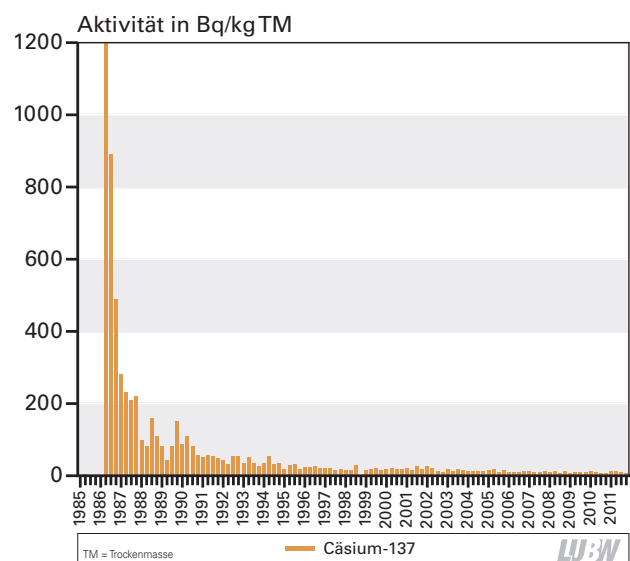
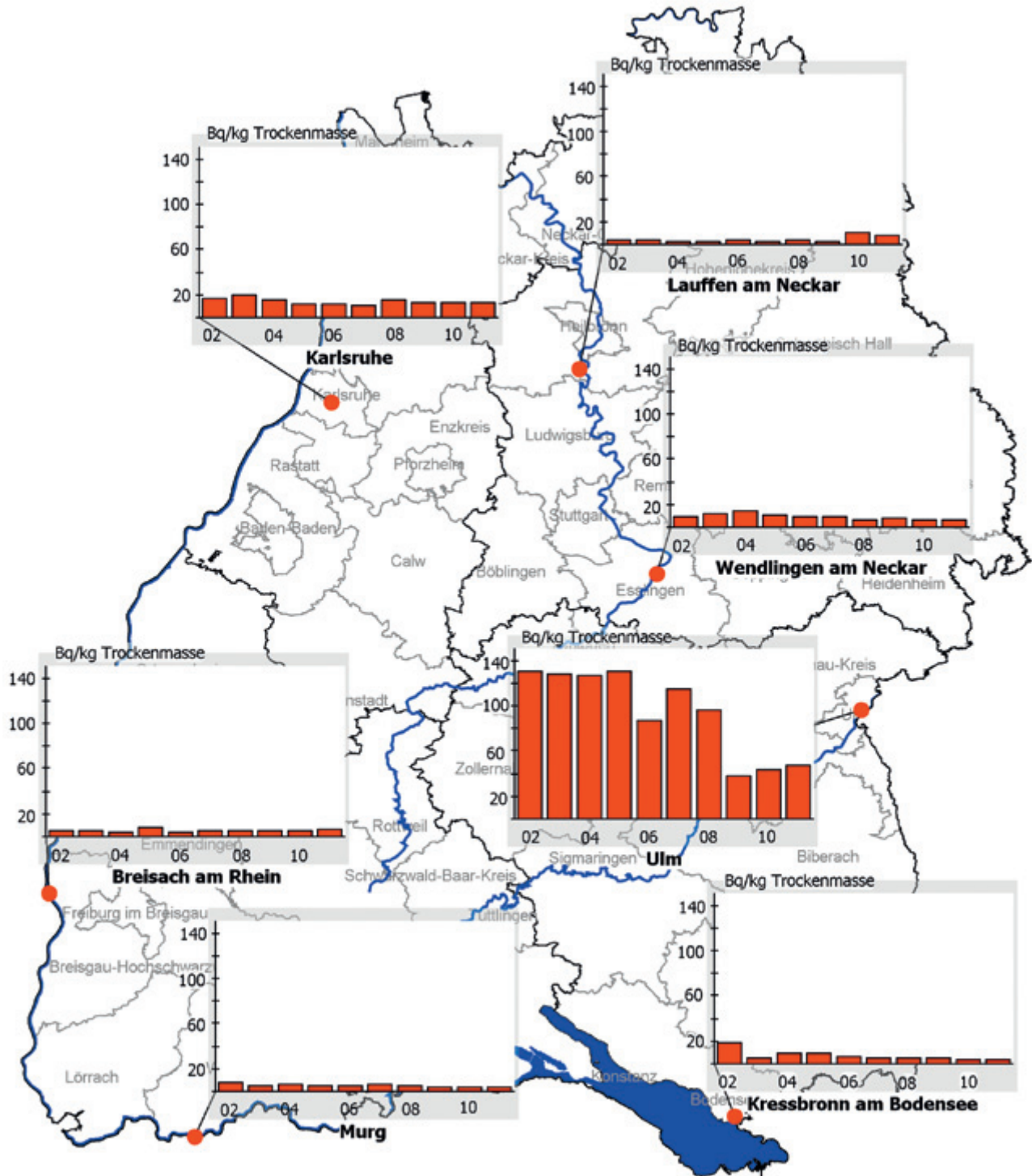


Abbildung 4.3.7: Cäsium-137-Aktivität im Sediment bei Philippsburg

Cäsium-137 im Sediment 2002-2011



Status: Freigabe BMU



Bundesamt für Strahlenschutz
(im Auftrag des BMU)

Abbildung 4.3.6: Cäsium-137-Aktivität im Sediment der Fließgewässer

im Schwebstoff meist höhere Werte vorliegen. In der Abbildung 4.3.8 ist dies am Beispiel von Kenzingen/Elz dargestellt. Durch Erosionsvorgänge in den oberen Bodenschichten wird Material in den Fluss transportiert und trägt so zur Radioaktivitätsfracht bei. Schwebstoffe sind feiner als Sedimentpartikel

und haben somit eine größere Oberfläche. Dadurch werden Radionuklide verstärkt adsorbiert, was zu einer höheren spezifischen Aktivität führt. Im Sediment sind dagegen auch größere Partikel vorhanden, die eine kleinere Adsorptionsoberfläche haben. Sie weisen deshalb eine geringere Aktivität auf.

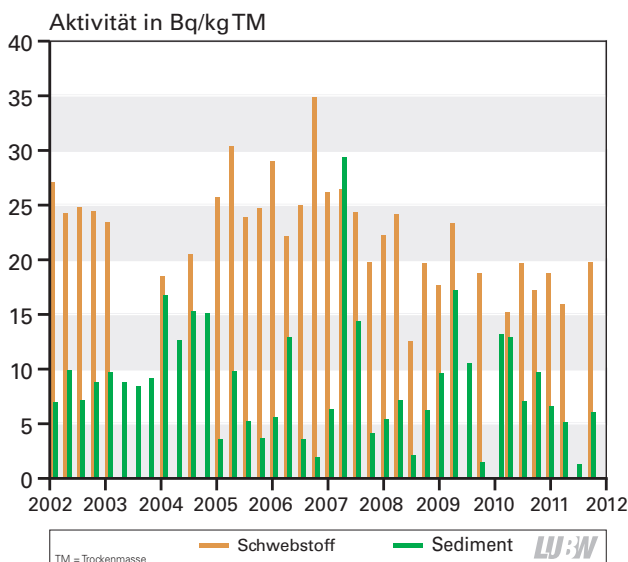


Abbildung 4.3.8: Cäsium-137-Aktivität in Sediment und Schwebstoff aus der Elz

An künstlichen Radionukliden sind in den Flusssedimenten neben Cäsium auch weitere Spaltprodukte wie Iod-131, Americium-241, Cobalt-58 und Cobalt-60 nachweisbar, die zum Teil aus kerntechnischen Einrichtungen stammen (siehe hierzu auch den Jahresbericht [Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität](#)). Americium ist im Sediment nahe des KIT vorhanden, während Cobalt mit geringen Aktivitäten im Rhein und Neckar vorliegt. Iod-131 kann auch aus medizinischen Einrichtungen bzw. Kläranlagen stammen.

4.4 Boden

Der Boden ist Bestandteil der ursprünglichen Landschaft und dient gleichzeitig der Landwirtschaft als Grundlage der Nahrungsmittelproduktion. Böden stellen zudem langfristige Sammler für alle Schadstoffe, also auch für Radionuklide, dar. Diese werden über die Luft herangeführt und sowohl durch trockene Deposition als auch durch Auswaschen aus der Luft zunächst oberflächlich abgelagert. Von dort werden sie in den Nahrungskreislauf der Organismen aufgenommen. Bodenuntersuchungen haben deshalb große Bedeutung für die radiologische Überwachung. 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 natürlichen radioaktiven Stoffe.

Aus den oberirdischen Kernwaffentests und infolge des Reaktorunfalls in Tschernobyl sind jedoch auch künstliche Radionuklide im Boden nachweisbar. Der überwiegende Teil des

Strontium-90 und ein Teil des Cäsium-137 stammen aus dem Fallout der oberirdischen Kernwaffenversuche. Im Mittel sind hierdurch ca. 5000 Bq/m² Cäsium-137 und 3000 Bq/m² Strontium-90 in die Böden Baden-Württembergs gelangt. Das übrige Cäsium-137 ist dagegen auf den Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahre 1986 zurückzuführen. Ein weiterer, sehr geringer Aktivitätseintrag in Baden-Württemberg fand 2011 durch die Reaktorunfälle in Fukushima statt (siehe Kapitel 1.3.3). Dieser Anteil ist jedoch vernachlässigbar.

Bereits 1986 wurden nach dem russischen Reaktorunfall umfangreiche Untersuchungen der Bodenkontaminationen durchgeführt. Es zeigte sich, dass je nach den damals herrschenden Wetterbedingungen die verschiedenen Gebiete Deutschlands unterschiedlich stark betroffen waren (Abbildung 4.4.1). Insbesondere in Bayern und in den südlichen und südöstlichen Regionen Baden-Württembergs wiesen die Böden im Vergleich zu den anderen Bundesländern höhere spezifische Cäsium-Aktivitäten auf. Auch innerhalb von Baden-Württemberg streuten die Cäsium-Werte stark. Diese regionalen Unterschiede sind noch heute feststellbar.

Diese Unterschiede in der Bodenkontamination haben Auswirkungen auf das gesamte Ökosystem. Das Cäsium-137 gelangt über den Boden und die Pflanzen in die Nahrungskette. Hierbei wird die Höhe der Cäsium-Aufnahme von verschiedenen Faktoren beeinflusst, z. B. Stärke der oberflächlichen Kontamination, Bodentyp, Bearbeitungszustand der Böden, Aufnahme durch Pflanzen, Anreicherungsmechanismen, Essgewohnheiten des Menschen und vieles mehr. Cäsium wird z. B. durch Pilze angereichert und gelangt so in Wildtiere (siehe auch Kapitel 3.6 und 4.6.2).

Die Kontamination der Böden wird im Rahmen der Überwachung der Umweltradioaktivität an mehreren Standorten in den verschiedenen Regionen des Landes untersucht. Außerdem werden verstärkt in der Umgebung der Kernkraftwerke Bodenproben regelmäßig analysiert. In der Abbildung 4.4.2 ist beispielhaft für mehrere Acker- und Weideböden die Cäsium-137-Aktivität der letzten Jahre dargestellt. In Abbildung 4.4.3 ist außerdem die maximale Cäsium-Aktivität des jeweiligen Jahres für Standorte in unmittelbarer Nähe der Kernkraftwerke enthalten. Die untersuchten Böden zeigen im Verlauf der Jahre meist eine Aktivität unter 20 Bq/kg. Die in den letzten Jahren maximal gemessene Cäsium-137-Aktivität im Boden

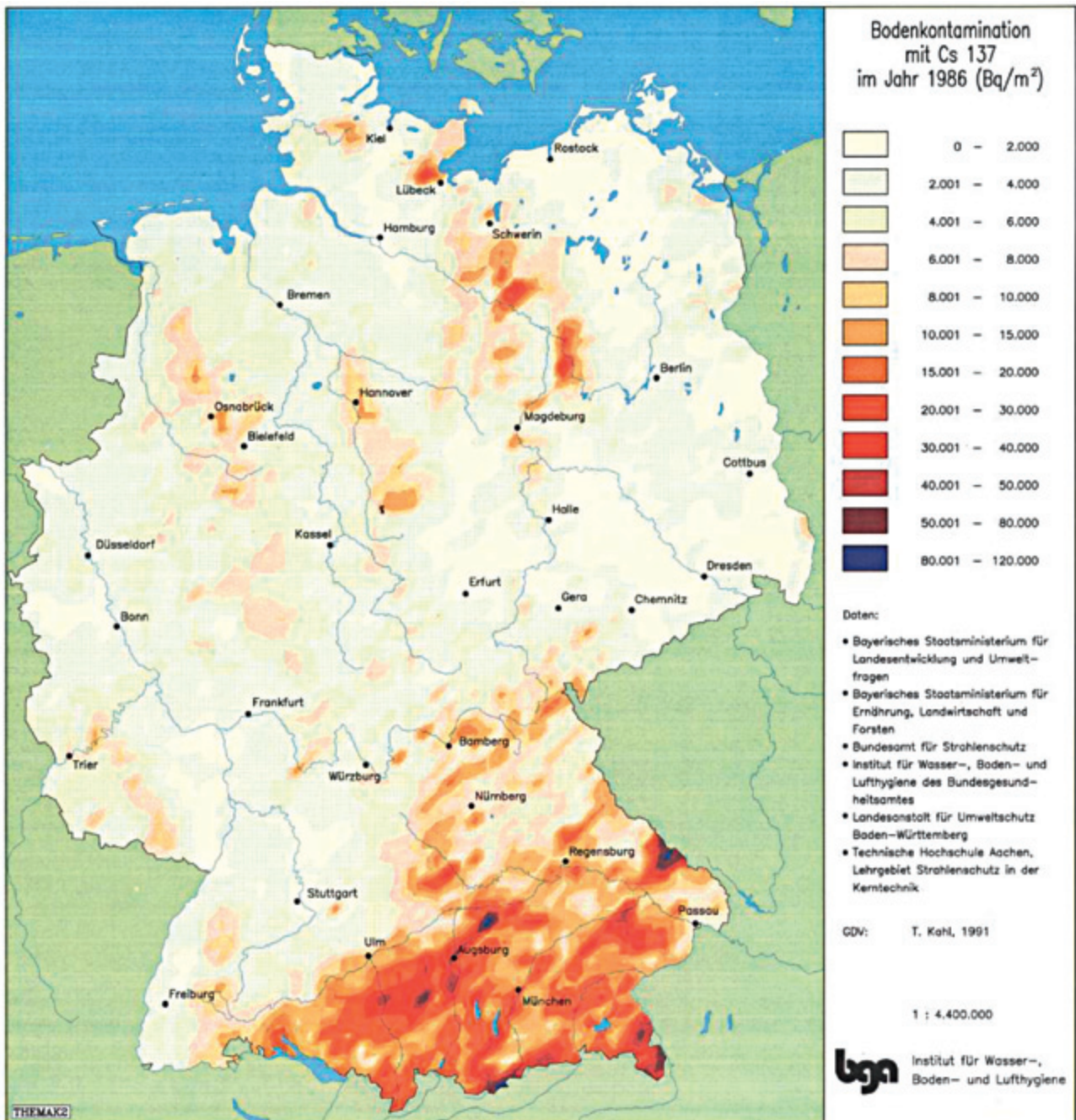


Abbildung 4.4.1: Cäsium-137-Kontamination der Böden Deutschlands im Jahr 1986; Quelle: BfS

betrug 121 Bq/kg. Hierbei ist es unabhängig, ob diese in der Nähe der Kernkraftwerke liegen. Vielmehr wird auch heute noch deutlich, dass in den südöstlichen Landesteilen die Cäsium-Aktivität über der Aktivität der nördlichen Region liegt. Dies ist auf den höheren Cäsium-Eintrag in dieser Region nach dem Unfall in Tschernobyl zurückzuführen.

Ausführliche Information zu den Ergebnissen der Untersuchungen, z. B. die Aktivitäten weiterer Radionuklide an den Standorten in der Umgebung der Kernkraftwerke, sind in dem jährlich erscheinenden Bericht [Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer](#)

[Anlagen auf Radioaktivität](#) enthalten, der auf den Internetseiten der LUBW abrufbar ist.

Über die Luft eingetragene Stoffe werden auch durch Regen und Oberflächenwasser stetig ausgewaschen und an andere Orte oder in die Tiefe verlagert.

Die Tiefenverteilung des Cäsiums im Boden lässt sich anhand von Tiefenprofilen ermitteln. Solche Profile wurden bereits in den Jahren 1993 und 1999/2000 sowie erneut 2011 erstellt. Sie sind in Abbildung 4.4.4 dargestellt. Für die Untersuchung wurden Wiesen bzw. Weiden ausgewählt, da möglichst unbearbeitete und somit ungestörte Böden analysiert werden sollten.

Cäsium-137 in Böden 2002-2011

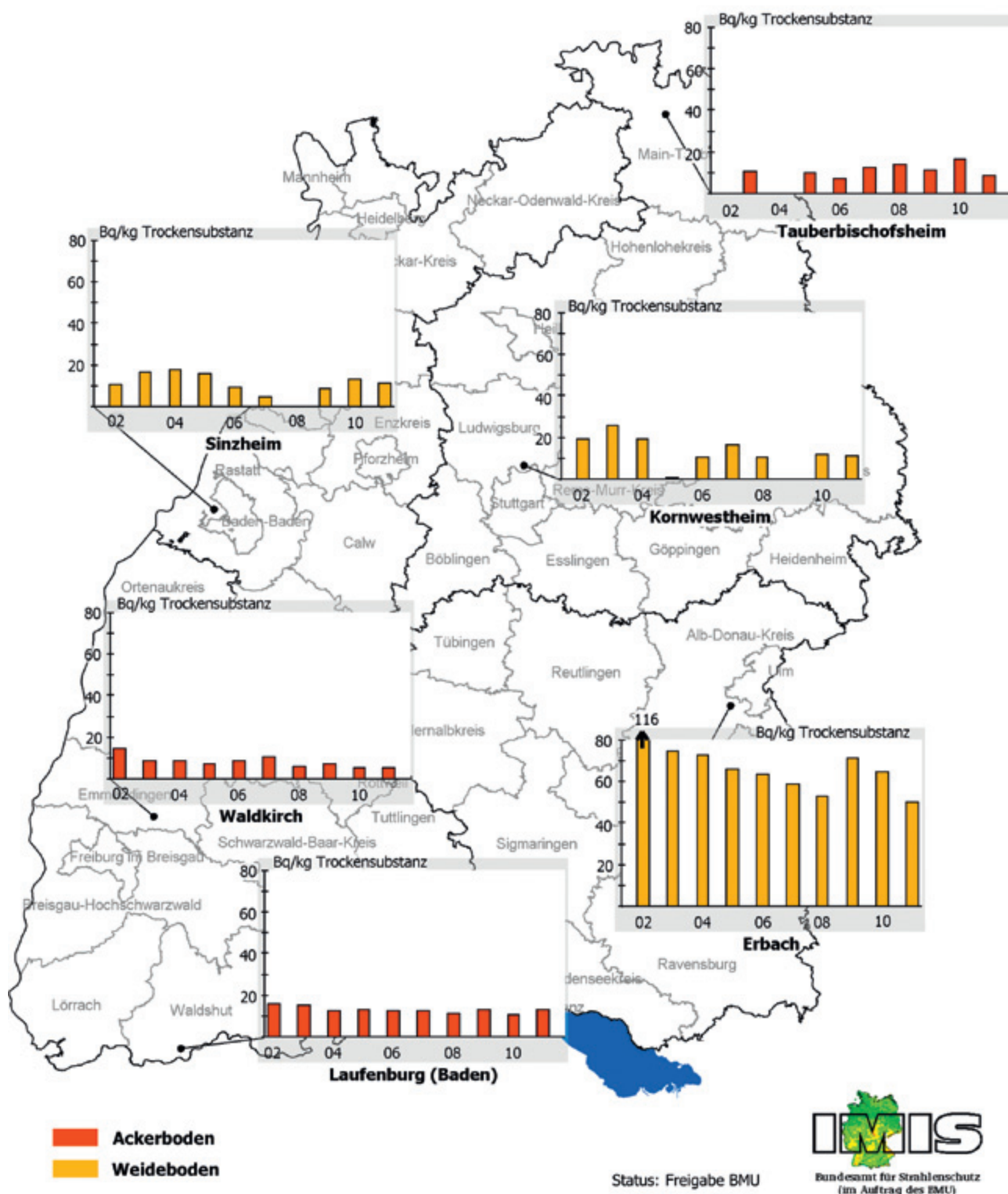


Abbildung 4.4.2: Cäsium-137-Aktivität in Böden an verschiedenen Probenahmeorten

Andernfalls ist keine Aussage darüber möglich, wie sich Cäsium-137 mit der Zeit im Boden verlagert. Bei Standorten, bei denen angenommen werden kann, dass sie in den letzten Jahrzehnten nicht gepflügt wurden, hat sich gezeigt, dass Cäsium-137 hauptsächlich in den oberen 15 cm vorhanden ist. Somit

ist es weiterhin für die Wurzeln der Pflanzen verfügbar. Allerdings variiert die Tiefe, in der die maximale Aktivität vorliegt.

Da seit 1986 nahezu eine Halbwertszeit des Cäsium-137 (30,2 Jahre) vergangen ist, hat sich die Aktivität deutlich

Cäsium-137 in Böden 2002-2011

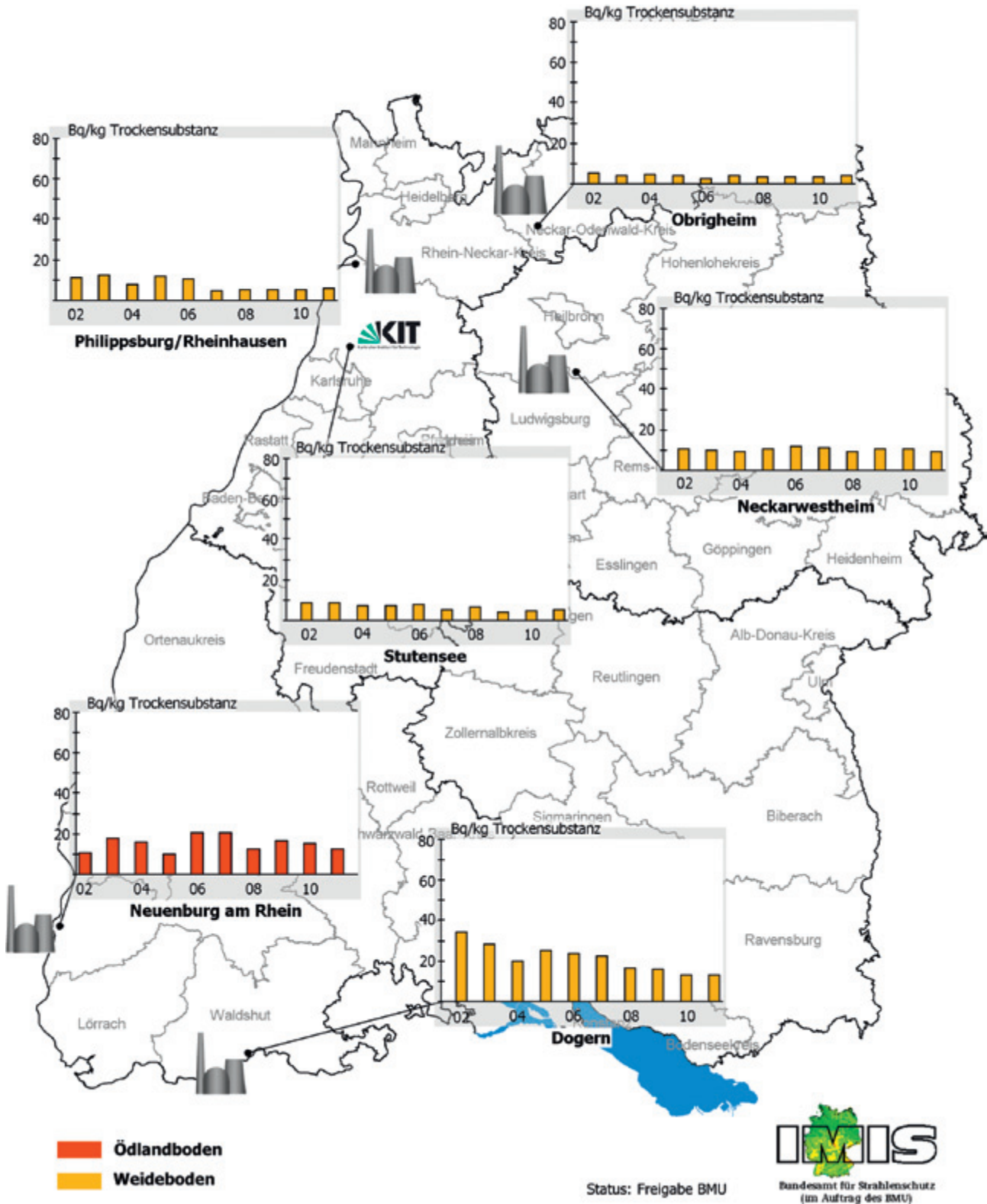


Abbildung 4.4.3: Cäsium-Aktivität in Böden in der Umgebung kerntechnischer Anlagen (Maximalwerte innerhalb eines Jahres)

verringert. Ein Vergleich der aktuellen Profile mit denen aus dem Jahr 1999 zeigt an einigen Standorten einen annähernd parallelen Verlauf, sodass hier keine Verlagerung des Cäsiums in die Tiefe stattgefunden hat. Auch die Reduzierung der Aktivität aufgrund des radioaktiven Zerfalls

stimmt näherungsweise mit den ermittelten Gehalten überein. Durch das Aufbringen von Dünger oder Klärschlamm kann ein erneuter Cäsium-Eintrag in den Boden stattgefunden haben, sodass sich die Aktivität bis zum Jahr 2011 nicht allen Standorten wie erwartet reduziert hat.

Cäsium-137 in Bodenprofilen

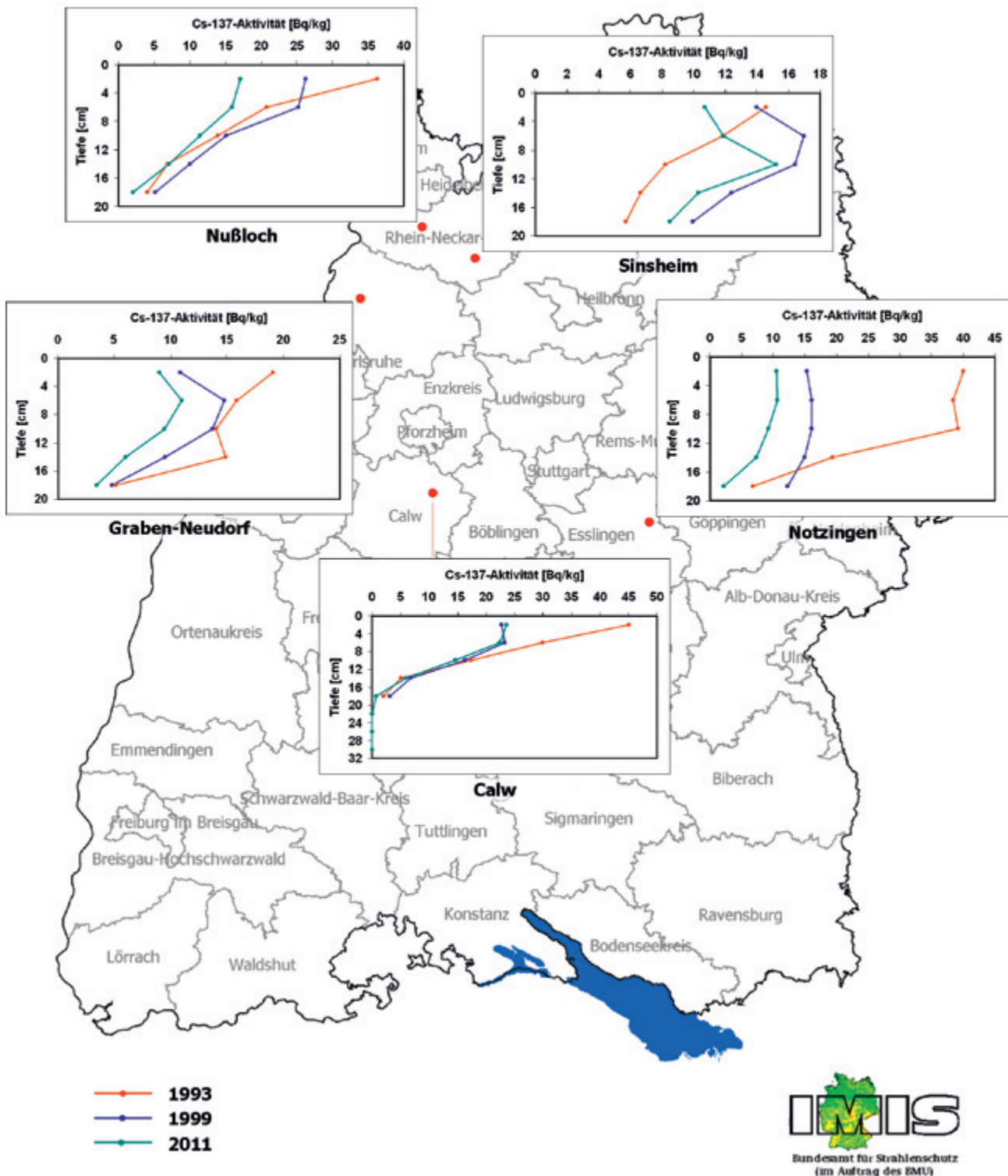


Abbildung 4.4.4: Tiefenverteilung des Cäsium-137 in Böden Baden-Württembergs

4.5 Bewuchs

In den vorangehenden Kapiteln wurde die Radioaktivität in Luft, Boden und Wasser diskutiert. Von dort werden die Stoffe zunächst in Pflanzen und in der Folge in Tiere und in den Menschen aufgenommen.

Tendenziell sind die Pflanzenkontaminationen im südlichen Bereich von Baden-Württemberg höher als im nördlichen. Maßgebend für den Aktivitätsgehalt von Pflanzen sind der jeweilige Aktivitätsgehalt des Bodens, der Vegetationsstand zum Zeitpunkt der Probenahme und durchge-

fürte Bodenbearbeitungsmaßnahmen. Alle Zeitverläufe von Cäsium-137-Aktivitäten zeigten jedoch einen deutlichen Anstieg der spezifischen Aktivität infolge des Reaktorunfalls von Tschernobyl. 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 1980er Jahre.

4.5.1 Laub und Nadeln

Neben den Pflanzen, die zu Lebensmitteln weiterverarbeitet werden, werden auch sogenannte Indikatorpflanzen wie Fichtennadeln oder Buchenlaub beprobt. Diese werden in Baden-Württemberg einmal jährlich 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. So ist sichergestellt, dass bei der Betrachtung von Zeitreihen über mehrere Jahre menschlicher Einfluss weitgehend ausgeschlossen werden kann. In Abbildung 4.5.1 sind die maximalen Aktivitäten der natürlichen Radionuklide Beryllium-7 und Kalium-40 sowie des künstlichen Nuklids Cäsium-137 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass Kalium-40 und Beryllium-7 in den Pflanzen eine höhere oder gleiche Aktivität wie das künstliche Radionuklid Cäsium-137 aufweisen.

Im Süden des Landes liegt wiederum eine höhere Cäsium-Kontamination vor. Die maximale Aktivität in Nadeln wurde mit 248 Bq/kg TM im Jahr 2005 ermittelt, während 1993 noch eine Cäsium-137-Aktivität von 500 Bq/kg TM ermittelt wurde. Ähnlich verhält es sich mit Blättern, die im Berichtszeitraum eine maximale Cäsium-137-Aktivität von 72 Bq/kg TM im Jahr 2006 aufwiesen, während 1993 noch eine Aktivität von 130 Bq/kg TM vorlag.

4.5.2 Gras

Da Gras zu jeder Jahreszeit vorhanden ist, eignet es sich gut für die Beobachtung der Radioaktivität in der Umwelt. Außerdem ist es ein wichtiges Futtermittel, sodass der Transfer von Radionukliden aus dem Boden in Gras und Milch von Bedeutung ist. In Abbildung 4.5.1 sind auch für Gras die Messergebnisse für Cäsium-137 sowie Beryllium-7 und Kalium-40 dargestellt.

Im Jahr 2006 wurde mit 759 Bq/kg TM die maximale Cäsium-137-Aktivität der letzten Jahre gemessen.

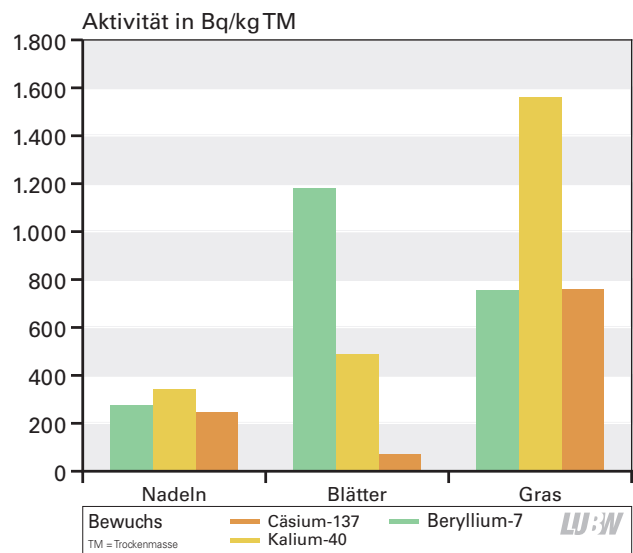


Abbildung 4.5.1: Maximale Aktivität von Cäsium-137, Kalium-40 und Beryllium-7 in Blättern, Gras und Nadeln zwischen 2002 und 2011

4.6 Nahrungsmittel

Der Mensch nimmt mit der Nahrung natürliche und künstliche Radionuklide auf. Von den natürlichen Radionukliden ist Kalium-40 bedeutend, zu den künstlichen Radionukliden zählen Cäsium-137 und Strontium-90. Die Nahrung setzt sich aus den unterschiedlichsten Lebensmitteln zusammen. Eine repräsentative Auswahl davon wird regelmäßig auf ihren Gehalt an radioaktiven Stoffen untersucht. Hierfür wird eine Vielzahl an unterschiedlichen Nahrungsmitteln auf den Gehalt an gammastrahlenden Radionukliden und Strontium-90 überprüft.

Einen Überblick über die Schwankungsbreite der spezifischen Cäsium-137-Aktivitäten in Nahrungsmitteln gibt die Abbildung 4.6.1. In der Darstellung sind die Minimal- und Maximalwerte der Jahre 2002 bis 2011 enthalten (obere und untere Begrenzung der Säule). Die Mehrheit der Nahrungsmittel weist Aktivitäten auf, die durch den breiteren Teil der Säule gekennzeichnet sind, lediglich 10 % der untersuchten Proben über- bzw. unterschreiten diesen Wertebereich. Der Median ist durch den Punkt gekennzeichnet. Die verschiedenen Daten werden nachfolgend anhand der Wildpilze beispielhaft erklärt: Im Zeitraum 2002 bis 2011 wurden 404 Wildpilzproben untersucht (Anzahl in der Abbildung in Klammern). Diese wiesen im Mittel eine Cäsium-137-Aktivität von 46,6 Bq/kg auf (als kleines Quadrat gekennzeichnet), wobei in 80 % der Wildpilze die Aktivität zwischen 0,73 und 1.150 Bq/kg lag (breiterer Teil der Säule). Weitere 10 % der Proben enthielten zwischen 1.150 Bq/kg und maximal 11.600 Bq/kg Cäsium-137

(obere schmale Säule). Für die übrigen 10 % der Proben wurden Aktivitäten zwischen 0,73 und dem Minimalwert von 0,12 Bq/kg ermittelt (untere schmale Säule). Der Grenzwert der Cäsium-137-Aktivität in Hauptnahrungsmitteln für Erwachsene liegt bei 1.250 Bq/kg. Somit sind 90 % der untersuchten Wildpilze für den Verzehr geeignet gewesen.

Für Säuglingsnahrung gilt ein zulässiger Höchstwert von 400 Bq/kg Cäsium-137 (in Abbildung 4.6.1 als gestrichelte rote Linie dargestellt). Dieser Wert wird ausschließlich von Wildpilzen und Wildschweinfleisch überschritten. Für diese Lebensmittel gilt jedoch der Grenzwert in Höhe von 1.250 Bq/kg Cäsium-137. Für Wildschweinfleisch wird meist der Grenzwert für den Import von Lebensmitteln in die EU angewendet, der eine spezifische Cäsium-137-Aktivität von 600 Bq/kg erlaubt.

Insgesamt zeigt sich, dass die Belastung mit künstlichen Radionukliden so gering ist, dass sie in den meisten landwirtschaftlichen Produkten mit den üblichen Messverfahren nicht mehr nachweisbar ist. In den vergangenen 10 Jahren

wurden in Baden-Württemberg von den Lebensmitteluntersuchungsämtern und der LUBW in der Summe 13.522 Nahrungsmittel auf Cäsium-137 untersucht.

Analog zu Abbildung 4.6.1 sind in Abbildung 4.6.2 die Strontium-90-Aktivitäten in Nahrungsmitteln dargestellt. So wurde in den Jahren 2002 bis 2011 an insgesamt 245 Getreideproben die Strontium-90-Aktivität bestimmt. Im Mittel betrug diese 0,13 Bq/kg, wobei 80 % der Proben eine Aktivität zwischen 0,07 und 0,25 Bq/kg aufweisen. Der Minimalwert wurde mit 0,0013 Bq/kg und der Maximalwert mit 1,29 Bq/kg ermittelt. Für Getreide gilt ein Grenzwert von 750 Bq/kg. In der Abbildung wurde der Grenzwert für Säuglingsnahrung, der bei 75 Bq/kg liegt, dargestellt.

Insgesamt wurden in den vergangenen 10 Jahren 1.602 Nahrungsmittel auf Strontium-90 untersucht.

Für einige der wichtigsten Nahrungsmittel werden die Messergebnisse im Folgenden diskutiert.

Cäsium-137 in Nahrungsmitteln 2002-2011

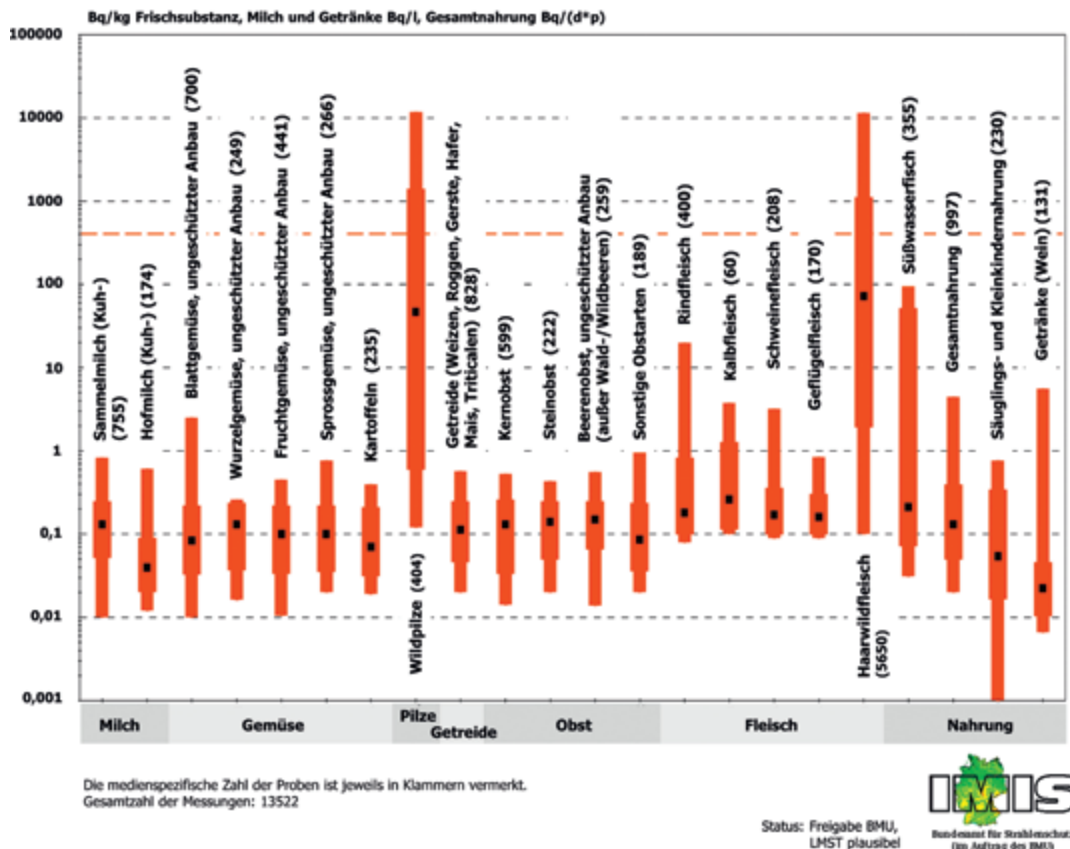


Abbildung 4.6.1: Schwankungsbreite der Cäsium-137-Aktivität in Lebensmitteln

Strontium-90 in Nahrungsmitteln 2002-2011

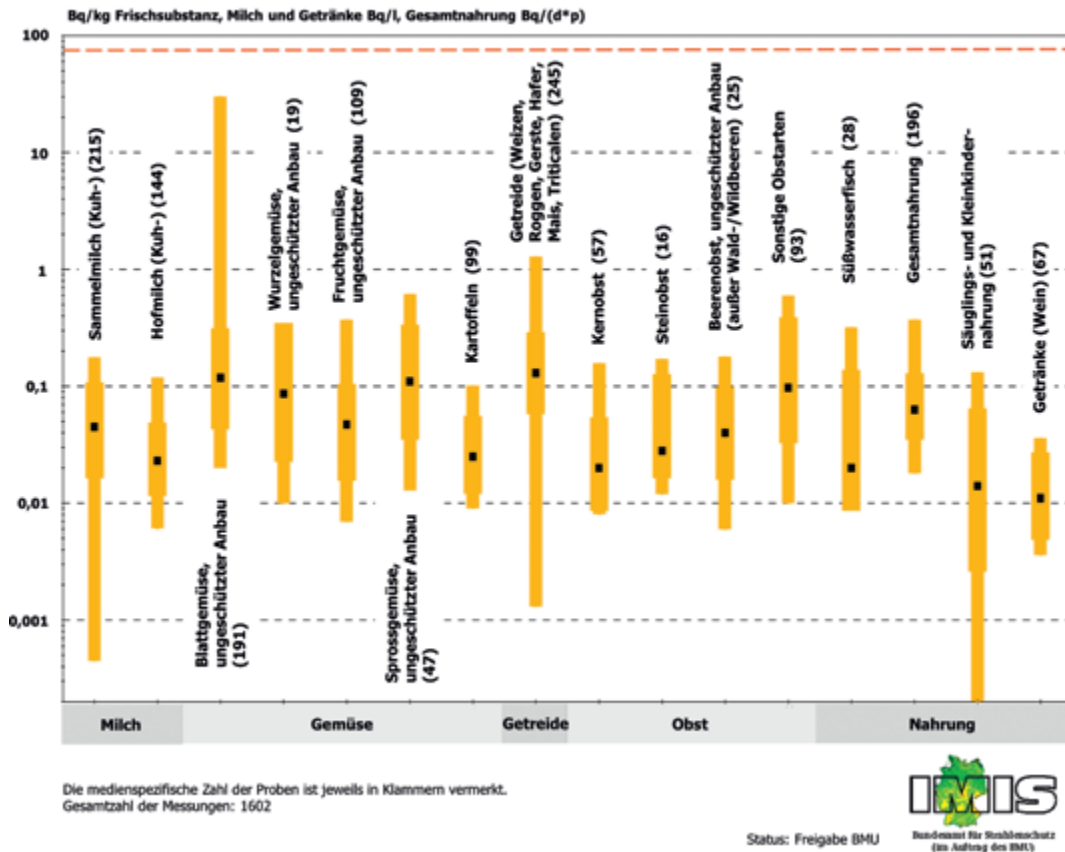


Abbildung 4.6.2: Schwankungsbreite der Strontium-90-Aktivität in Lebensmitteln

4.6.1 Milch

Der Pro-Kopf-Verbrauch für Milch liegt in Deutschland bei knapp 70 Litern pro Jahr. Da Milch und Milchprodukte in großem Maße auch von Kindern verzehrt werden, werden sie intensiv überwacht. Auch nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl war die Überwachung des Radioaktivitätsgehaltes der Milch besonders wichtig. In den ersten Wochen nach dem Unfall war vor allem Iod-131 von großer Bedeutung, da es maßgeblich zur Schilddrüsenexposition bei Kindern beiträgt. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von 8 Tagen war es jedoch nach wenigen Wochen nicht mehr in der Umwelt vorhanden. Auch in den letzten Jahren wurde in Milch kein Iod-131 nachgewiesen. Demnach haben die überwachten Kernkraftwerke keinen Einfluss auf den Radionuklidgehalt von Milch.

Die Radionuklide gelangen über Futtermittel bzw. Weidegras in die Kuh und somit in Milch. In Abhängigkeit von der Aktivität der Futtermittel schwanken demnach auch die Cäsium- und Strontiumwerte in Milch. Sie werden deshalb vom Standort und den Fütterungsbedingungen beeinflusst.

Die Abbildung 4.6.3 stellt die Messwerte von Cäsium-137 in Milch im Zeitraum 2002 bis 2011 dar.

Cäsium-137 wurde in den letzten Jahren mit einer maximalen Aktivität von 0,82 Bq/l gemessen, wobei der Grenzwert bei 1.000 Bq/kg liegt. Im Mittel beträgt die Cäsium-137-Aktivität in Milch 0,13 Bq/l.

Die Abbildung 4.6.4 zeigt, dass unmittelbar nach dem Unfall in Tschernobyl die Cäsium-137-Aktivität in Milch aus Ravensburg deutlich erhöht war. Mitte 1986 betrug die Cäsium-137-Aktivität maximal 120 Bq/l und ging in den folgenden Monaten stark zurück. Anfang 1987 gab es aufgrund der Fütterung von kontaminiertem Gras einen erneuten Anstieg auf 36 Bq/l. Seit 1988 ist die Aktivität des Cäsium-137 generell kleiner als 5 Bq/l und in den vergangenen 10 Jahren unter 1 Bq/l.

Ebenfalls in Spuren ist Strontium-90 nachzuweisen, das aus den Kernwaffenversuchen stammt. Der Grenzwert von 125 Bq/kg wurde in den letzten Jahren mit im Mittel 0,05 Bq/l deutlich unterschritten. Die Darstellung der Schwankungsbreite der Strontium-90-Aktivität zwischen

Cäsium-137 in Milch 2002-2011

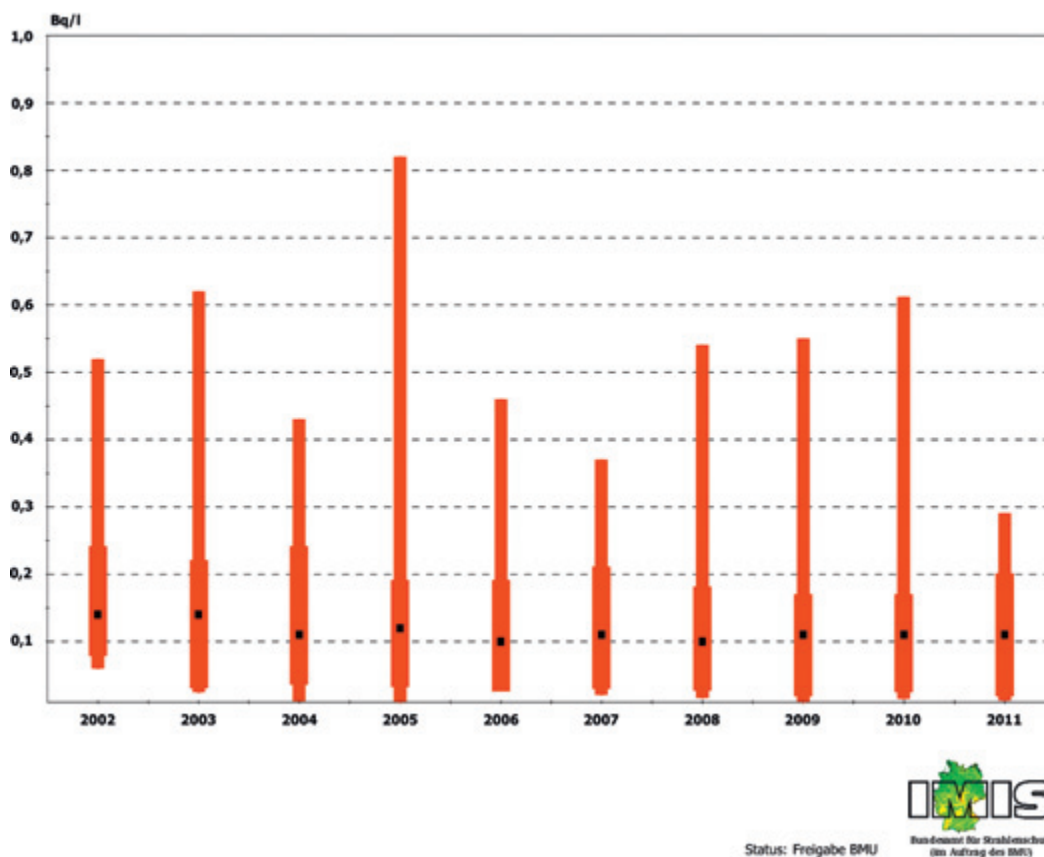


Abbildung 4.6.3: Schwankungsbreite der Cäsium-137-Aktivität in Milch

2002 und 2011 in Abbildung 4.6.5 zeigt, dass mit maximal 0,18 Bq/l nur sehr geringe Strontium-Aktivitäten nachgewiesen wurden und diese weit unter dem Grenzwert liegen.

Anhand der natürlichen Kalium-40-Aktivität in Milch lassen sich die ermittelten Aktivitäten der künstlichen Radionuklide vergleichen. Der Gehalt an Kalium-40 beträgt landesweit einige zehn Bq/l und ist damit deutlich höher als die Aktivität der künstlichen Radionuklide. Die resultierende Strahlenexposition durch Milchverzehr ist vor allem auf das natürliche Radionuklid Kalium-40 zurückzuführen. Insgesamt beträgt die Strahlenexposition durch Aufnahme von Radionukliden mit der Nahrung für Erwachsene im Mittel 0,3 mSv/a.

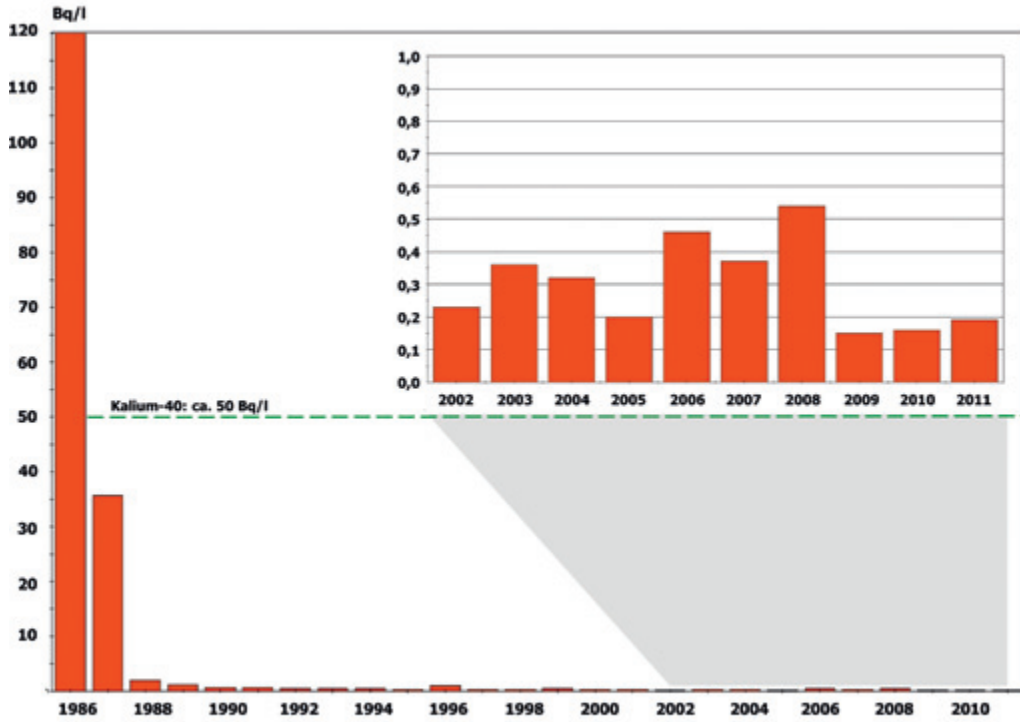
4.6.2 Fleisch

Cäsium-137, das durch Tiere über das Futter aufgenommen wird, gelangt ins Fleisch. In der landwirtschaftlichen Produktion ist die Cäsium-137-Aktivität des Fleisches von Rind, Kalb, Geflügel und Schwein jedoch sehr gering. Die Mittelwerte liegen deutlich unter 1 Bq/kg und damit um Faktor 1.000 unter dem Grenzwert von 1.250 Bq/kg. Einzelne untersuchte Fleischproben erreichten maximal 20 Bq/kg.

Wie bereits aus der Abbildung 4.6.1 zu erkennen ist, ist die Kontamination von Wildfleisch (Rehwild und Wildschwein zusammengefasst als Haarwild) mit Cäsium-137 auffällig. Die Tiere ernähren sich im Wald unter anderem von Pilzen und Farnen, in denen Cäsium-137 angereichert ist. Somit gelangt das Cäsium-137 vermehrt in Wildfleisch. Ein spezielles Überwachungsprogramm für Wildschweine stellt sicher, dass beim Verkauf von Wildschweinfleisch der Grenzwert für Importe von Lebensmitteln in die EU eingehalten wird. Dieser liegt bei 600 Bq/kg, während in Deutschland für Hauptnahrungsmittel eine maximale Aktivität von 1.250 Bq/kg zulässig ist.

Eine Abnahme der Cäsium-Kontamination kann beim Schwarzwild nicht festgestellt werden. In Abbildung 4.6.6 sind die ermittelten maximalen Cäsium-137-Aktivitäten der untersuchten Wildschweine für die letzten 10 Jagdjahre (April bis März) dargestellt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass in Regionen mit bekannter stärkerer Belastung eine deutlich höhere Anzahl von Wildschweinen untersucht wird, sodass die dargestellten Werte nicht für ganz Baden-Württemberg repräsentativ sind.

Cäsium-137 in Milch aus Ravensburg 1986-2011

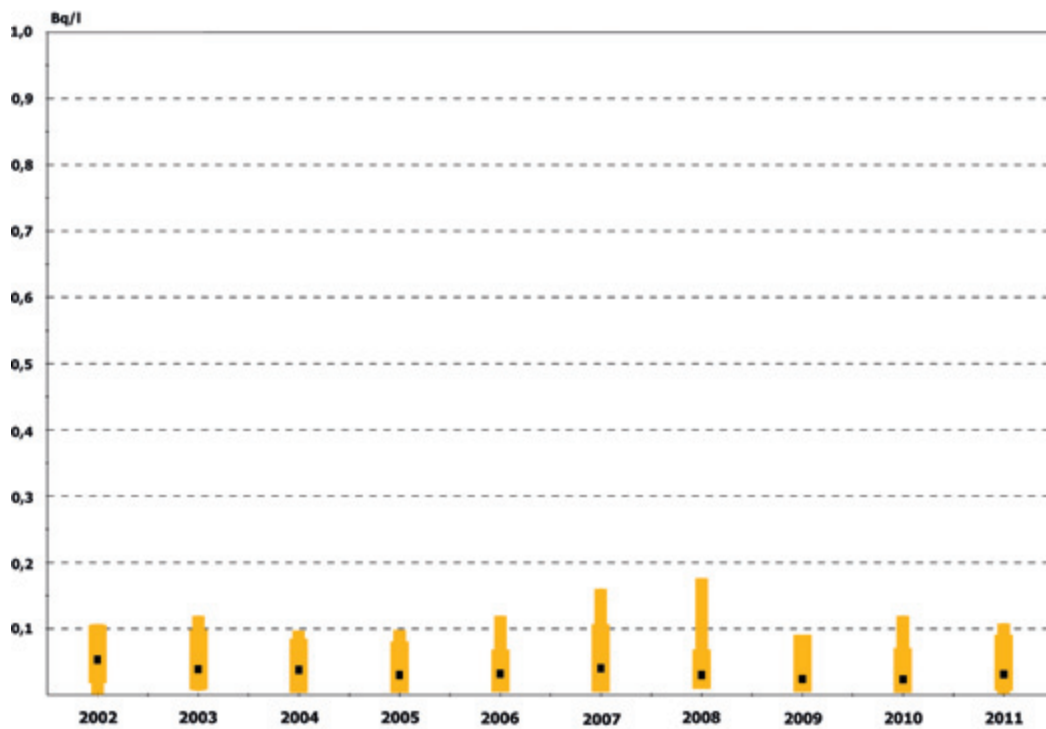


Status: Freigabe BMU

Bundesamt für Strahlenschutz
(im Auftrag des BMU)

Abbildung 4.6.4: Cäsium-137-Aktivität in Milch aus Ravensburg

Strontium-90 in Milch 2002-2011



Status: Freigabe BMU

Bundesamt für Strahlenschutz
(im Auftrag des BMU)

Abbildung 4.6.5: Schwankungsbreite der Strontium-90-Aktivität in Milch

Für die letzten Jahre wurde eine maximale Aktivität des Cäsium-137 in Wildschweinen von 11.600 Bq/kg ermittelt.

Da Wildschweine nicht standorttreu sind, sondern auf der Suche nach Nahrung wandern, beschränkt sich Auftreten belasteter Wildschweine nicht auf die durch den Tschernobyl-Unfall mit Cäsium-137 kontaminierten Gebiete. So werden im nördlichen Schwarzwald häufig Wildschweine mit mehr als 600 Bq/kg Cäsium-137 erlegt.

Im Jagdjahr 2011/2012 (April bis März) wurden landesweit ca. 2060 Wildschweine untersucht. Die höchste Aktivität wurde mit 7.960 Bq/kg im Landkreis Biberach ermittelt. In Abbildung 4.6.7 sind die Medianwerte der Cäsium-Aktivität der untersuchten Tiere im Jahr 2010/2011 in einer Karte dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass auch im westlichen Baden-Württemberg der Grenzwert von 600 Bq/kg regelmäßig überschritten wird.

Das CVUA Freiburg bereitet die Ergebnisdaten zentral für Baden-Württemberg auf und veröffentlicht diese auf ihren [Internetseiten](#).

Wichtig für die Beurteilung des Radioaktivitätsgehalts in Nahrungsmitteln ist die Höhe der Strahlenexposition, die sich aus dem Verzehr für den Menschen ergibt. Als Faustregel gilt, dass die Aufnahme von 80.000 Bq Cäsium-137 mit Lebensmitteln bei Erwachsenen einer Strahlenexposition von etwa 1 Millisievert (mSv) entspricht. Die Strahlenexposition durch den Verzehr von Nahrungsmitteln lässt sich aber durch das

individuelle Ernährungsverhalten reduzieren. Wer für sich persönlich die Strahlenexposition so gering wie möglich halten möchte, kann deshalb den Verzehr von Wildpilzen und Schwarzwild aus vergleichsweise höher kontaminierten Gebieten bewusst reduzieren oder ganz darauf verzichten.

4.6.3 Obst

Obst wird über das Land verteilt stichprobenartig untersucht. Hierbei werden neben den typischen Obstarten wie Kernobst, Steinobst und Beeren auch landestypische Erzeugnisse berücksichtigt. Bei den meisten gärtnerischen Produkten in Baden-Württemberg wird praktisch kein Cäsium-137 mehr nachgewiesen. Mit Ausnahme einer Rhabarber-Probe von 2004 lagen sämtliche untersuchten Obstproben unterhalb von 1 Bq/kg und somit nahe der Erkennungsgrenze.

Analog zu den Wildtieren liegt auch bei den Wald- und Wildbeeren eine Kontamination mit Cäsium-137 vor, die im Vergleich zum sonstigen Obst erhöht ist. Die Beeren wachsen auf unbearbeiteten Standorten (z. B. Wald) und nehmen Cäsium-137 auf, das oberflächennah im Boden vorliegt. In den letzten Jahren wurde bei einzelnen Proben eine Aktivität von maximal 80 Bq/kg ermittelt.

Etwa 10 % der untersuchten Obstproben werden außerdem auf Strontium-90 analysiert. Im Mittel liegen diese bei ca. 0,1 Bq/kg bzw. deutlich darunter, auch die Maximalwerte lagen unterhalb von 1 Bq/kg. Zum Vergleich kann natürliches Kalium-40 mit einer mittleren Aktivität zwischen 50 und 100 Bq/kg herangezogen werden. Die radiologische Bedeutung von Strontium-90 in Obst ist somit vernachlässigbar.

4.6.4 Gemüse

Bei den mehr als 1.800 untersuchten Gemüseproben (inklusive Kartoffeln) aus den Jahren 2002 bis 2011 fanden sich nur in wenigen Proben Spuren des künstlichen Nuklids Cäsium-137. Lediglich bei einem Grünkohl aus dem Jahr 2002 wurde eine Aktivität von 2,5 Bq/kg festgestellt. Alle anderen Proben blieben meist deutlich unter 1 Bq/kg und unterschreiten damit den Grenzwert von 1.250 Bq/kg um einen Faktor von mehr als 1.000.

Strontium-90 liegt ebenfalls mit einer Ausnahme mit sehr geringen Aktivitäten von kleiner 1 Bq/kg vor. Bei einem einzelnen Kopfsalat wurde 2007 eine Strontium-90-Aktivität

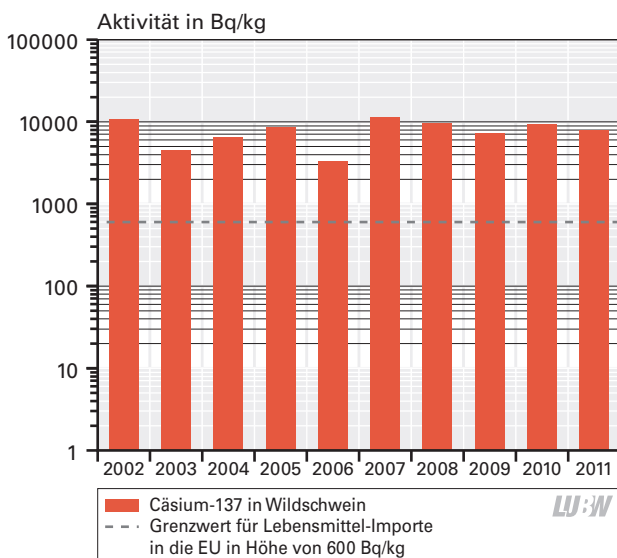


Abbildung 4.6.6: Maximalwerte der Cäsium-137-Aktivität in Wildschweinfleisch 2002 bis 2011; Quelle: CVUA, IMIS

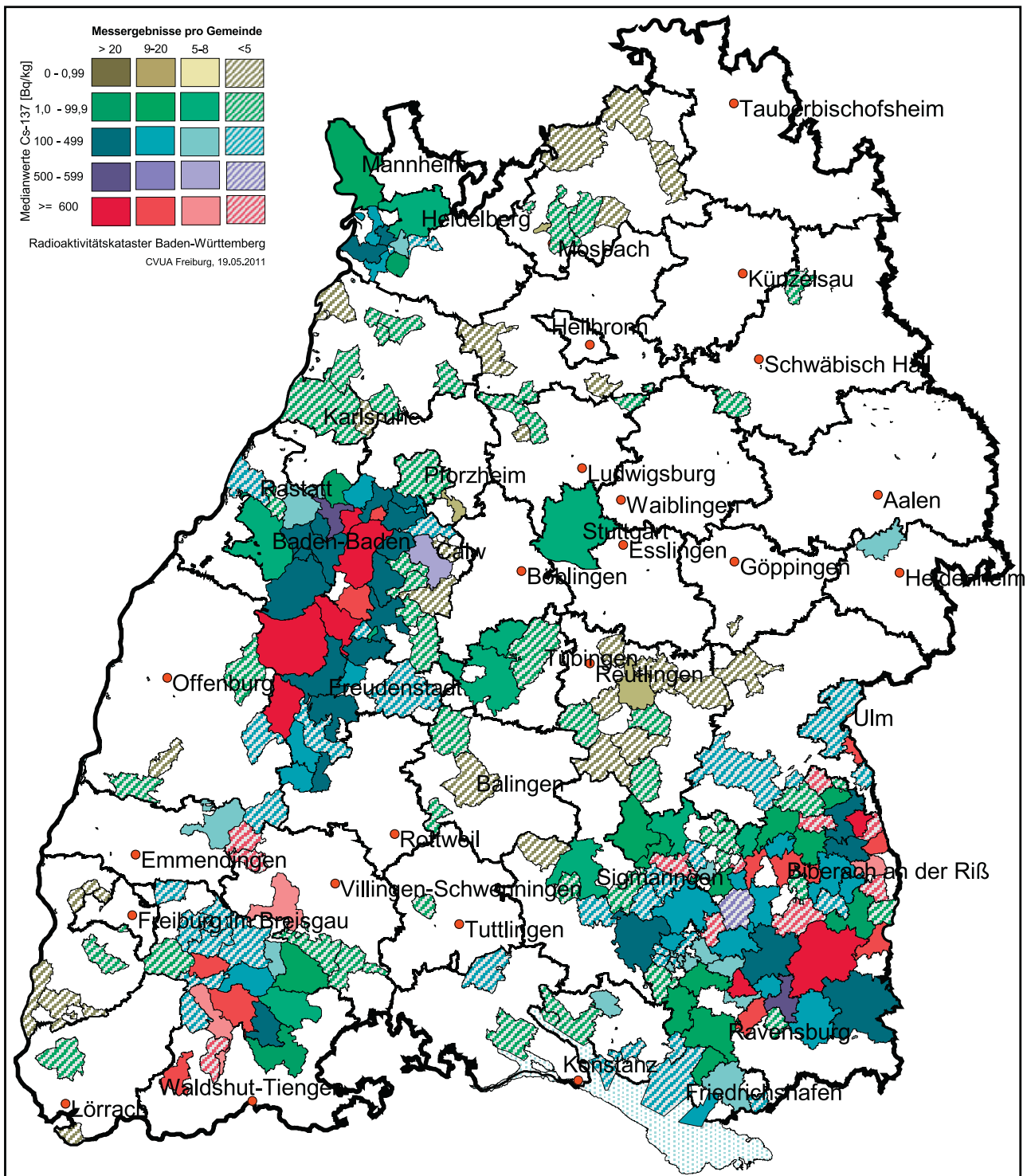


Abbildung 4.6.7: Medianwerte in Wildschweinproben aus Baden-Württemberg 2010/2011; Quelle: CVUA

tät von 30 Bq/kg festgestellt, die dennoch weit unterhalb des Grenzwertes von 750 Bq/kg liegt.

Eine andere Situation ist jedoch bei Wildpilzen gegeben. Sie wachsen in den oberen Bodenschichten im Wald und nehmen daher das oberflächlich abgelagerte Cäsium-137 in verstärktem Maße auf. Außerdem reichern einige Pilzsorten Cäsium-137 an. Im Jahr 2003 wurden so vereinzelt mehr als 10.000 Bq/kg Cäsium-137 in Wildpilzen nachgewiesen. Im Mittel

sind ca. 46 Bq/kg Cäsium-137 enthalten. Wildpilze unterliegen keinem speziellen Überwachungsprogramm, sodass eine Aussage zum Trend der Cäsium-137-Belastung nicht möglich ist.

4.6.5 Getreide

In den Jahren 2002 bis 2011 wurden ca. 830 Getreideproben auf ihren Gehalt an Radionukliden untersucht, darunter verschiedene Getreidesorten wie Weizen, Roggen, Mais, Hafer und Gerste. Dabei fanden sich in einzelnen Proben

geringe Spuren der künstlichen Nuklide Cäsium-137 und Strontium-90 mit Aktivitäten von jeweils unter 1 Bq/kg FM. Eine einzelne Weizenprobe aus dem Jahr 2009 enthielt 1,3 Bq/kg FM Strontium-90. Die maximale Aktivität von Beryllium-7 lag bei 32,7 Bq/kg FM und für Kalium-40 bei 420 Bq/kg FM. Damit liegt die Aktivität der künstlichen Nuklide um Faktor 25 bis 500 unter der Aktivität der natürlichen Nuklide Beryllium-7 und Kalium-40. Die jeweils höchsten Werte sind in Abbildung 4.6.8 dargestellt.

4.6.6 Wein

Die in den verschiedenen baden-württembergischen Weinanbaugebieten produzierten Weine haben eine große regionale Bedeutung und gehören letztlich zu den pflanzlichen Nahrungsmitteln. Daher werden sie regelmäßig auf ihren Gehalt an radioaktiven Nukliden untersucht. In Abbildung 4.6.9 ist wiederum die zwischen 2002 und 2011 maximal ermittelte Aktivität der künstlichen und natürlichen Radionuklide dargestellt. Im Jahr 2006 wurde für das Nuklid Cäsium-137 das Maximum mit 5,6 Bq/l festgestellt, wohingegen Kalium-40 mit durchschnittlich 41 Bq/l (maximal 88 Bq/l) enthalten ist.

4.7 Abwasser, Reststoffe und Abfälle

Die LUBW überwacht nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz die Radioaktivität in Stoffströmen im alltäglichen Umfeld der Bevölkerung. Bei der Entsorgung von Abwasser, Abfällen und Reststoffen können entsprechend ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften Radionuklide aufkonzentriert vorliegen. Besonders in Klärschlamm

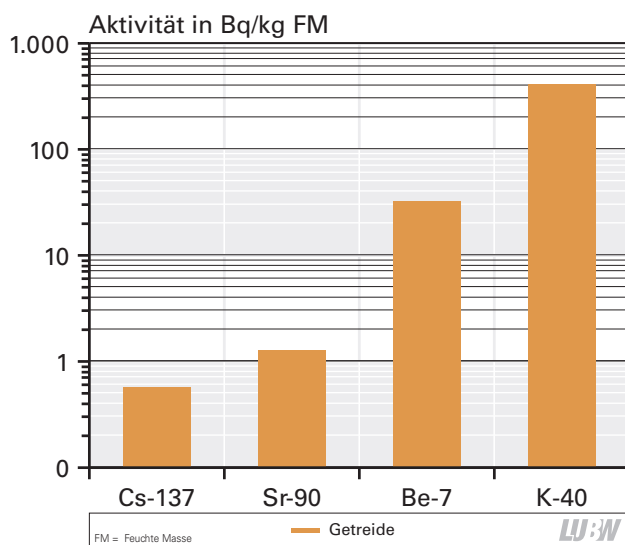


Abbildung 4.6.8: Maximalwerte der künstlichen und natürlichen Radionuklide in Getreide

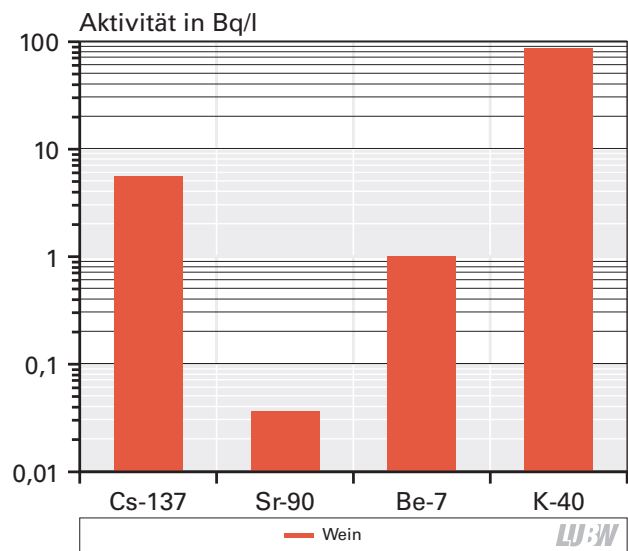


Abbildung 4.6.9: Maximalwerte der künstlichen und natürlichen Radionuklide in Wein

und Rückständen aus Verbrennungsanlagen ist dies zu beobachten. Damit sind diese Stoffströme gute Anzeichen für das Vorhandensein von Radionukliden in der Umwelt in den jeweiligen Ursprungsbereichen.

4.7.1 Kläranlagen

In den Kläranlagen werden sowohl häusliche als auch gewerbliche Abwässer gesammelt. In der Atmosphäre vorhandene radioaktive Stoffe werden auf Hausdächern und versiegelten Flächen abgelagert und gelangen durch Regen in die Kläranlagen. Im Klärschlamm erfolgt eine Aufkonzentrierung der Inhaltsstoffe, sodass die Reststoffe aus Kläranlagen gute Indikatoren für eine großräumige Kontamination der Umwelt sind. Aus diesem Grund werden Kläranlagen im Routinebetrieb auf Gamma- und Alpha-Strahler sowie Strontium überwacht.

Neben den natürlichen Radionukliden Kalium und Uran sind auch künstliche Radionuklide aus medizinischen Anwendungen, z. B. Iod-131 im Abwasser zu finden. Im Körper eines Patienten, der eine Schilddrüsen-Therapie mit radioaktivem Iod erhalten hat, ist auch einige Tage nach der Entlassung aus dem Krankenhaus noch Iod vorhanden, das in den darauffolgenden Tagen ausgeschieden wird und so ins Abwasser der Kläranlagen gelangt. Weitere Nuklide, die im Abwasser vorkommen und aus der Nuklearmedizin stammen, sind Indium-111 und Luthetium-177. Außerdem ist in einzelnen Proben auch Strontium-90 nachzuweisen.

Die regionalen Unterschiede spiegeln sich auch im Klärschlamm wider und sind in Abbildung 4.7.1 dargestellt. Während in Forchheim im Westen Baden-Württembergs die spezifische Cäsium-137-Aktivität heute bei ca. 2,5 Bq/kg TM liegt, beträgt sie in Tannheim im Osten im Mittel ca. 45 Bq/kg TM. Im Südosten des Landes war der Eintrag von Cäsium nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl deutlich höher als im übrigen Land. Wie in Abbildung 4.7.2 gezeigt, ist die Aktivität aufgrund des radioaktiven Zerfalls rückläufig.

Gegenüber dem Abwasser erfolgt im Klärschlamm eine deutliche Aufkonzentrierung der Radionuklide. Das wird daran deutlich, dass in allen Klärschlämmen Cäsium-137 nachzuweisen ist. Die Aktivität des Cäsium-137 im Abwasser der Kläranlagen liegt dagegen generell unterhalb der Nachweisgrenze.

Auch die Aktivität des radioaktiven Iods unterscheidet sich an den verschiedenen Standorten sehr stark voneinander. So ist in nahezu jeder Probe aus Forchheim bei Freiburg Iod-131, das aus der nuklearmedizinischen Anwendung stammt, vorhanden. Der Vergleich mit dem Standort Tannheim im Landkreis Biberach ist in Abbildung 4.7.3 dargestellt. Dort wird Iod-131 weniger häufig nachgewiesen. Die Kläranlage Forchheim entwässert auch das Stadtgebiet von Freiburg. Deshalb kann ein Zusammenhang mit dem Universitätsklinikum Freiburg vermutet werden.

Im Klärschlamm sind wie im Abwasser auch weitere künstliche Radionuklide, wie z. B. Indium-111, Luthetium-177

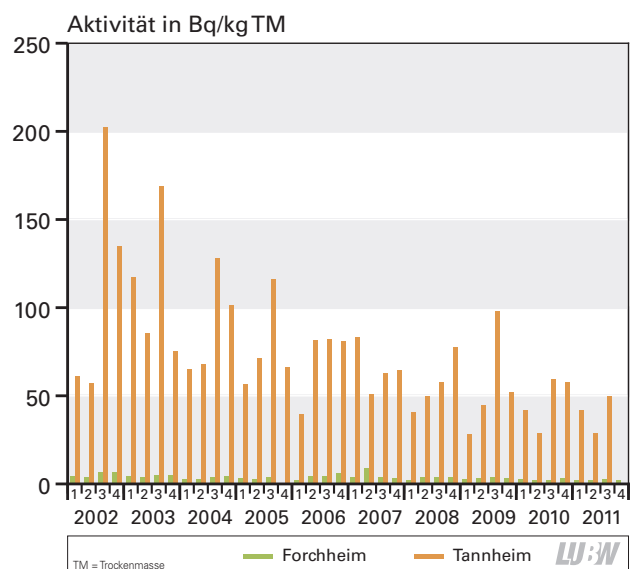


Abbildung 4.7.1: Vergleich der Cäsium-137-Aktivität im Klärschlamm der Standorte Forchheim und Tannheim

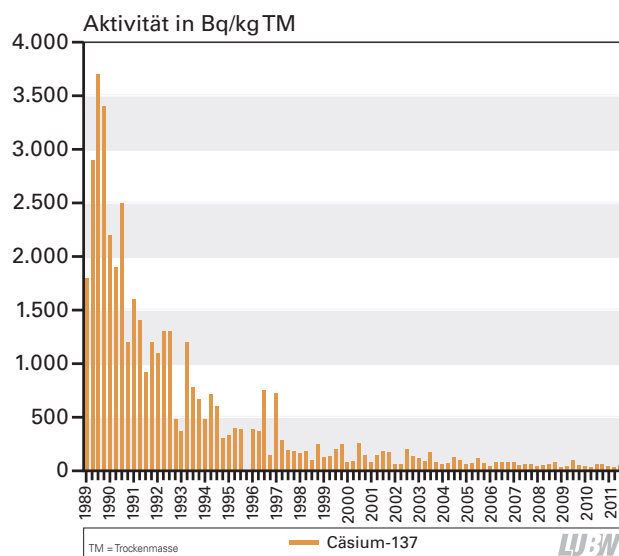


Abbildung 4.7.2: Cäsium-137-Aktivität im Klärschlamm aus Tannheim seit 1989

und Strontium-90 enthalten. Im Frühjahr 2011 wurde in geringen Aktivitäten auch Cäsium-134, das vom Reaktorunfall in Japan stammt, nachgewiesen (siehe hierzu auch Kapitel 1.3.3).

4.7.2 Hausmülldeponien

Das Sickerwasser von Hausmülldeponien wird in Baden-Württemberg an 3 Standorten auf gammastrahlende Nuklide und Tritium überwacht. Eindringendes Regenwasser löst Stoffe aus dem Deponiekörper aus, die dann mit dem Sickerwasser ausgetragen werden können. Auf Hausmülldeponien werden Gegenstände gelagert, die nicht wiederverwertet oder verbrannt werden können.

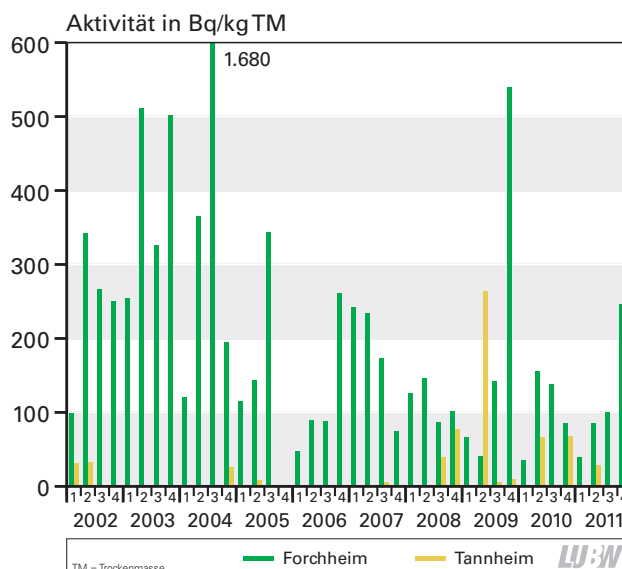


Abbildung 4.7.3: Vergleich der Iod-131-Aktivität im Klärschlamm aus Forchheim und Tannheim

Das Sickerwasser der Deponien enthält neben dem natürlichen Kalium-40 auch Tritium. Des Weiteren ist in den meisten Proben das überall in der Umwelt gegenwärtige Cäsium-137 vorhanden. Die maximale Aktivität von Cäsium-137 der letzten 10 Jahre betrug 0,9 Bq/l, das Maximum der Kalium-40-Aktivität ist mit 59 Bq/l deutlich höher.

Die Untersuchung der Sickerwasserproben auf Tritium (H-3) hat ergeben, dass von 123 Proben die Nachweisgrenze bei 108 Proben überschritten war. Die maximal gemessene Tritium-Aktivität betrug 223 Bq/l, wobei mehr als 95 % der Proben weniger als 100 Bq/l Tritium beinhalten. Eine mögliche Ursache für den Eintrag von Tritium in Deponien kann die Verwendung des Radioisotops Tritium bei der Leuchtfarbenherstellung sein. Seit den 1970er Jahren wurde Tritium in Instrumentenanzeigen und in Uhren für Ziffernblätter und Zeiger verwendet. Bei Uhren wird zwischenzeitlich auf Tritium verzichtet, da nicht-radioaktive Leuchtfarben entwickelt wurden

4.7.3 Müllverbrennungsanlagen

Die anfallenden häuslichen, kommunalen und gewerblichen Abfälle sowie Klärschlämme werden in entsprechenden Müllverbrennungsanlagen verbrannt und somit thermisch verwertet.

Derzeit werden die Abfälle von vier Anlagen in Baden-Württemberg auf radioaktive Inhaltsstoffe überwacht. Bei den entstehenden Reststoffen handelt es sich um Filterstaub bzw. Flugasche, feste und flüssige Rückstände aus der Rauchgasreinigung sowie um Kesselasche bzw. Schlacke. Insbesondere bei der Verbrennung von Klärschlamm findet eine weitere Aufkonzentrierung der enthaltenen Radionuklide statt.

In der folgenden Tabelle 4.7.1 sind für die genannten 4 Medien die Radionuklide aufgeführt, die zwischen 2002 und 2011 am häufigsten nachgewiesen wurden.

In den Rückstandsmedien werden meist die natürlichen Radionuklide Beryllium-7 und Kalium-40 ermittelt. Beryllium-7 reichert sich besonders im Filterstaub an, da hier der Luftdurchsatz am größten ist. Besonders häufig werden auch die künstlichen Nuklide Cäsium-137 und Iod-131 nachgewiesen. Das Vorhandensein von radioaktivem Iod kann wiederum auf die Nuklearmedizin zurückgeführt

werden, z. B. durch die Verbrennung von Iod-haltigem Klärschlamm (siehe auch Abbildung 4.7.3). In den Reststoffen aus der Rauchgaswäsche ist die Anreicherung mit bis zu 15.800 Bq/kg TM in den festen Rückständen bzw. 36.800 Bq/l in den flüssigen Rückständen am größten. Ebenfalls aus der Anwendung von radioaktiven Substanzen in der Medizin stammen die Radionuklide Indium-111, Thallium-201 und Thallium-202, die sich in den Filterstäuben und den Schlämmen der Rauchgasreinigung wiederfinden.

Im Jahr 2011 wurde als Folge des Reaktorunfalls in Japan vereinzelt Cäsium-134 im Filterstaub der Verbrennungsanlagen mit einer Aktivität von maximal 1,3 Bq/kg TM festgestellt.

Da in Karlsruhe bei der Klärschlammverbrennung im Wirbelschichtofen keine Schlacke entsteht, ist für dieses Medium die Anzahl der untersuchten Proben geringer.

4.7.4 Kompostierungsanlagen

Biologische Abfälle wie Garten- und Küchenabfälle sowie Baum- und Grasschnitt werden in Kompostierungsanlagen zu Kompost verarbeitet und z. B. im Gartenbau wiederverwendet. Kompost beinhaltet daher die Radionuklide, die auch in Pflanzen vorkommen. In Baden-Württemberg werden derzeit 3 Anlagen halbjährlich untersucht. Die Anlage in Bad Mergentheim wird seit 2003 regelmäßig überprüft.

Cäsium-137 ist in allen Proben enthalten. Abbildung 4.7.4 zeigt die spezifische Cäsium-137-Aktivität im Kompost seit 2002. Wiederum wird der regionale Unterschied der Cäsium-Kontamination deutlich. In Singen (Hohentwiel) nahe Bodensee sind aufgrund der stärkeren Regenfälle im Frühjahr 1986 während des Durchzuges der radioaktiven Wolke aus Tschernobyl bis heute höhere Aktivitäten an Cäsium-137 vorhanden. In den letzten Jahren schwanken diese um ca. 20 Bq/kg TM. Die beiden Standorte Karlsruhe und Bad Mergentheim unterscheiden sich dagegen nicht und weisen weniger als 10 Bq/kg TM Cäsium-137 auf.

Da im Laufe der letzten Jahre immer wieder Standorte verlegt wurden, liegen lediglich für die Anlage in Singen (Hohentwiel) Daten seit 1989 vor. Diese sind in der Abbildung 4.7.5 dargestellt. Während 1990 noch Cäsium-

Tabelle 4.71: Aktivitätskonzentration verschiedener Radionuklide in den Rückständen der Müllverbrennungsanlagen

		Filterstaub/ Filterasche [Bq/kg TM]	Kesselasche/ Schlacke [Bq/kg TM]	Feste Rückstände aus Rauchgaswäsche [Bq/kg TM]	Flüssige Rückstände aus Rauchgaswäsche [Bq/l]
Anzahl Proben 2002-2011		92	56	91	94
Be-7	Anzahl > Nachweisgrenze	87	54	56	11
	maximale Aktivität	2.340	57,8	743	18,8
K-40	Anzahl > Nachweisgrenze	92	56	83	69
	maximale Aktivität	3.220	427	2.540	20,3
Cs-137	Anzahl > Nachweisgrenze	91	56	72	10
	maximale Aktivität	62,3	7,16	98,4	0,262
I-131	Anzahl > Nachweisgrenze	49	20	85	94
	maximale Aktivität	643	81,4	15.800	36.800
Tl-201	Anzahl > Nachweisgrenze	34	1	40	7
	maximale Aktivität	525	5,36	136	44,2
In-111	Anzahl > Nachweisgrenze	30	0	17	6
	maximale Aktivität	71,6	---	40,4	4,5

LUBW

137-Aktivitäten von 120 Bq/kg TM enthalten waren, reduzierte sich die Aktivität auf unter 20 Bq/kg TM in 2011.

Im Kompost ist außerdem das natürliche Radionuklid Kalium-40 mit einer Aktivität bis ca. 1.000 Bq/kg TM enthalten. Dies zeigt, dass die radiologische Bedeutung des heute noch im Kompost vorhandenen Cäsium-137 äußerst gering ist und in Relation zu den Aktivitäten von natürlich vorkommenden Radionukliden vernachlässigt werden kann.

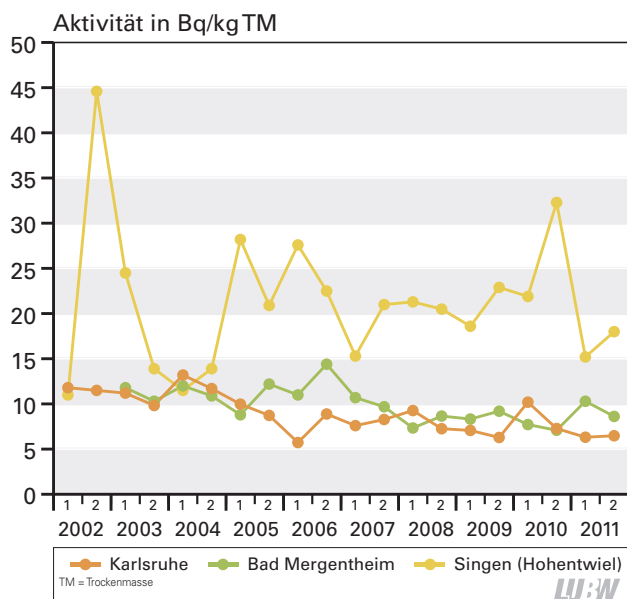


Abbildung 4.74: Cäsium-137-Aktivität in Kompost 2002 bis 2011

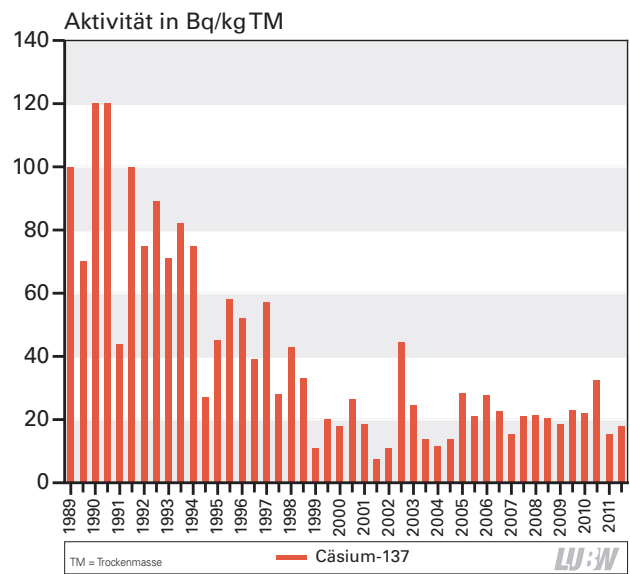


Abbildung 4.75: Cäsium-137-Aktivität in Kompost aus Singen seit 1989

5 Glossar

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.

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 zu-

sammen aus dem Qualitätsfaktor für die Strahlenart und einem Faktor, der die räumliche und zeitliche Verteilung der Strahlung berücksichtigt.

Deposition

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

Dosis

Maß für die Wirkung absorbiertes ionisierender Strahlung

Dosisleistung

Quotient aus der Dosis und dem zugrundegelegten Zeitraum

Effektivdosis

Kurzbezeichnung für effektive Äquivalentdosis; Summe der gewichteten Organdosen.

Elektronenvolt

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 $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule. Einheitenzeichen ist eV. Abgeleitete größere Einheiten sind das Kilo-Elektronenvolt (10^3 eV = 1 keV) und das Mega-Elektronenvolt (10^6 eV = 1 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

Freigrenze

Werte der Aktivität bzw. spezifischer Aktivität radioaktiver Stoffe, bei deren Überschreitung eine Überwachung nach Strahlenschutzverordnung erforderlich ist

Gammastrahlung

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

Gammasppektrum

Gesamtheit aller emittierten und als Linien nachgewiesenen Gammaenergien. Eine mit aufwendigen Mess- und Auswertemethoden gewonnene Analyse der Energieverteilung eines Gammstrahlenfelds. 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 rad = 0,01 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.

KIT Campus Nord

Karlsruher Institut für Technologie, Campus Nord, vormals Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) www.kit.edu

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

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

nicht-natürliche, 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

Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung

(StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. I Nr. 38 S. 1714), zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 7 des Gesetzes vom 24.02.2012

<http://www.bfs.de/de/bfs/recht>

WAK-GmbH

Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe Rückbau- und Entsorgungs-GmbH

<http://www.ewn-gmbh.de/index.php?id=wak>

6 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
Bq	Becquerel
CVUA	Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt
eV	Elektronenvolt
FM	Feuchtmasse, bei Lebensmittel häufig auch Frischmasse
FSH	Kernkraftwerk Fessenheim (Frankreich)
GKN	Kernkraftwerk Neckarwestheim, früher: Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
IMIS	Integriertes Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt
KFÜ	Kernreaktor-Fernüberwachung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie, Campus Nord, früher: Forschungszentrum Karlsruhe
KKL	Kernkraftwerk Leibstadt (Schweiz)
KKP	Kernkraftwerk Philippsburg
KWO	Kernkraftwerk Obrigheim
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
MLR	Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg
NWG	Nachweisgrenze
ODL	Ortsdosisleistung
PSI	Paul-Scherrer-Institut (Schweiz)
REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
Sv	Sievert
TM	Trockenmasse
UM	Umweltministerium Baden-Württemberg bzw. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft

7 Literaturverzeichnis

BMU: Berichte der Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung an den Deutschen Bundestag (jährliche Berichterstattung)

IAEA: Nuclear Safety Review for the Year 2008, http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/GC53InfDocuments/English/gc53inf-2_en.pdf, 2009

Koelzer: Lexikon zur Kernenergie
http://iwrwww1.fzk.de/kernenergielexikon/Lexikon_zur_Kernenergie_2008-11-2.pdf, 2008

Schlosser: Großräumige Veränderung der Umweltradioaktivität: Atmosphärische Radioaktivität. In Strahlenschutzkommission (Hrsg.) Interventionen und Nachhaltigkeit im Strahlenschutz. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 65, Schnelle Verlag, 2010

UM: Radon in Baden-Württemberg,
(Radon_Broschuere_bw.pdf) 2007
http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/65267/Radon_Broschuere_bw.pdf?command=downloadContent&filename=Radon_Broschuere_bw.pdf

8 Veröffentlichungen der Reihe Radioaktivität und Strahlenschutz

Die Einzelbände sind (falls lieferbar) kostenlos zu beziehen.

Titel	Band	Jahr der Herausgabe
Radioaktivität in Baden-Württemberg. Jahresbericht 1996–1997	1	1998
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 1997	2	1998
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 1998	3	1999
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 1999	4	2000
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2000	5	2001
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2001	6	2002
Radioaktivität in Baden-Württemberg. Jahresbericht 1998–2001	7	2003
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2002	8	2003
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2003	9	2004
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2004	10	2005
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2005	11	2006
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2006	12	2007 Internetversion
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2007	13	2008 Internetversion
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2008	14	2009 Internetversion
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2009	15	2010 Internetversion
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2010	16	2011 Internetversion
Überwachung der baden-württembergischen Umgebung kerntechnischer Anlagen auf Radioaktivität. Jahresbericht 2011	-	2012 Internetversion

Band 7 und die Veröffentlichungen seit 2006 können im Internet auf der Seite der LUBW unter <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/2913/> heruntergeladen werden.



