

# Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland

## Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz

Stand 2024

### Daten und Bewertung



## Impressum

Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit  
und Verbraucherschutz (BMUV)  
Postfach 12 06 29  
53048 Bonn

Redaktion: Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

Josef Peter  
Anita Lovsky  
Vanessa Bednarz  
Andreas Balbach

Stand: 2024

**ISSN 1864-2810**

## VORWORT

Die Überwachung der Umweltradioaktivität ist seit über 50 Jahren ein aktuelles Thema mit immer neuen Aspekten und Schwerpunkten. Letztlich ist sie eine Folge der Kernwaffenversuche in den 1950er und 60er Jahren und dem damit verbundenen radioaktiven Fallout. Zur Umsetzung der Verpflichtungen des Euratom-Vertrags von 1957 und im Zuge der großtechnischen friedlichen Nutzung der Kernenergie wurde diese Überwachung ausgeweitet und zunehmend gesetzlich geregelt. Zusätzlich wurde ab 1990 die Überwachung der bergbaulichen Altlasten in den neuen Bundesländern integriert.

Während die Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) die Überwachung von kerntechnischen Anlagen auch nach dem Betriebsende der Kernkraftwerke am 15. April 2023 regelt, wurde die Überwachung der radioaktiven Stoffe in der Umwelt durch das 1986 verabschiedete Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG) vorgegeben. Dieses wurde 2017 durch das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) und abgeleitete Regelungen ersetzt.

Neben den messenden Institutionen kommt den „Leitstellen“ eine wichtige Bedeutung zu. Sie sind jeweils verantwortlich für festgelegte Umweltbereiche, z. B. Luft, Gewässer, Lebensmittel, bzw. für Überwachungsaufgaben bei kerntechnischen Anlagen, z. B. Abluft und Abwasser. Daher wurden sie jeweils in den oberen Bundesbehörden angesiedelt, deren Aufgaben ohnehin in diesen Umweltbereichen liegen.

Die Quantifizierung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und die dazugehörige Bewertung stehen zunehmend im öffentlichen Interesse. Ereignisse wie der Unfall im Kernkraftwerk Tschornobyl im Jahr 1986 und die Reaktorkatastrophe in Fukushima 2011 haben den Fokus der Fachleute und der Öffentlichkeit auf dieses Thema gelenkt. Die Konsequenzen aus diesen Ereignissen fanden und finden auch in gesetzlichen Regelungen ihren Niederschlag.

Um belastbares Datenmaterial zu erhalten, ist nicht nur die Ermittlung von Messwerten selbst, sondern auch deren Qualitätssicherung unerlässlich. Hierzu organisieren die Leitstellen Ringversuche bzw. Vergleichsmessungen, in der Regel unter Verwendung von Referenzmaterialien. Die Teilnahme an diesen Ringversuchen bzw. Vergleichsmessungen dient den teilnehmenden Laboren bzw. Institutionen zur Überprüfung und Validierung der jeweils angewandten Verfahren. Die Ergebnisse dieser Ringversuche bzw. Vergleichsmessungen spiegeln die hohe Qualität der Analysen und Messungen wider.

Die Leitstellen prüfen die ermittelten Messdaten der Messstellen des Bundes und der amtlichen Messstellen der Länder auf Plausibilität, bevor diese in die Berichterstattung gegenüber dem BMUV und der EU einfließen. Die geprüften Daten stehen darüber hinaus über entsprechende Plattformen anderen Institutionen und auch der Öffentlichkeit zur Verfügung und werden für den internationalen Datenaustausch verwendet.

Außerdem arbeiten die Leitstellen ständig an der Optimierung von Analysemethoden. Dabei steht die schnelle Verfügbarkeit von Messergebnissen im Falle eines radiologischen Ereignisses im Vordergrund. Der vorliegende Bericht nimmt auch immer wieder übergreifende Themen auf, die in der Routineberichterstattung keinen Platz finden, z. B. die radiologische Bedeutung des verfrachteten Saharastaubs ([Kapitel 5, Seite 44](#)), die Einleitungen von Abwasser aus dem Fukushimaunfall in den Pazifik ([Kapitel 10, Seite 93](#)) sowie natürliche und medizinische Radionuklide in Abwasser und Klärschlamm ([Kapitel 13, Seite 107](#)).

Der vorliegende Bericht enthält die Beiträge der Leitstellen für die Jahre 2020 bis 2022 (in einigen Fällen bis 2023). Der Schwerpunkt des Berichts liegt, wie auch in den Vorjahren, auf der Darstellung aktueller Untersuchungen, Messergebnisse und (Weiter-)Entwicklungen sowie auf der Betrachtung übergreifender radioökologischer Zusammenhänge.



# LEITSTELLEN ZUR ÜBERWACHUNG DER UMWELTRADIOAKTIVITÄT

## Leitstelle A - Luft und Niederschlag

Der Deutsche Wetterdienst ist eine dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) nachgeordnete Dienststelle mit Sitz der Zentrale in Offenbach am Main und einem weit verzweigten Netz an Messstationen. Die Leitstelle ist im Referat „Radioaktivitätsüberwachung“ der Abteilung „Messnetze und Daten“ eingebunden. Auf Grund der Messprogramme der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) und der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Integrierten Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Umweltradioaktivität (AVV IMIS) ist eine wesentliche Aufgabe des DWD, die erforderlichen Messverfahren zu dokumentieren, weiterzuentwickeln und den Qualitätsstandard zu halten.

## Leitstelle B - Überwachung der atmosphärischen Aktivität

- $\gamma$ -Ortsdosisleistung, In-situ-Gammaspektrometrie
- Spurenanalyse, Neutronenortsdosis(leistung),  $\gamma$ -Ortsdosis

Die Arbeitsschwerpunkte der Abteilung Notfallschutz des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) liegen in der fachlichen Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) in Fragen der Strahlenschutz- und der Notfallvorsorge. Für die beiden Leitstellen bedeutet dies die Erfüllung von Messaufgaben im Rahmen des „Integrierten Mess- und Informationssystems“ (IMIS), die Prüfung und Zusammenfassung von Messdaten sowie die Weiterentwicklung und Dokumentation von Mess- und Analyseverfahren. Insbesondere ist der Betrieb des Frühwarn-Messnetzes für die Überwachung der Gamma-Ortsdosisleistung (ODL-Messnetz) zu gewährleisten und die zugehörige Alarmorganisation (Rufbereitschaft) bereit zu stellen.

### Aktivitätsnormale und Radionuklidaten

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ist das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben. Sie ist als Nachfolgerin der 1887 in Berlin gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen und für die physikalische Sicherheitstechnik. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Sie hat ca. 1800 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, neun wissenschaftlich-technische Abteilungen (davon zwei in Berlin), die sich in rund 200 Arbeitsgruppen gliedern. Ihr Jahresetat beträgt circa 130 Mio Euro (Stand 2014).

## Leitstelle C - Oberflächenwasser, Schwebstoff und Sediment in Binnengewässern

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ist eine dem Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zugeordnete Oberbehörde mit Sitz in Koblenz.

Im Rahmen der Überwachung der Radioaktivität in den Binnengewässern nimmt die BfG seit 1961 die Aufgaben einer Leitstelle wahr. Ab 1986 ist sie zudem als Messstelle des Bundes für die Überwachung der Bundeswasserstraßen (BWaStr) zuständig. Die BWaStr bilden mit circa 7300 km Länge ein wichtiges bundesweites Verkehrswegenetz für die Schifffahrt.

## Leitstelle D - Meerwasser, Meeresschwebstoff und -sediment

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) mit Sitz in Hamburg und Rostock ist eine Bundesoberbehörde für zentrale maritime Aufgaben im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Es wurde 1990 durch die Zusammenlegung des Deutschen Hydrographischen Instituts (DHI) mit dem Bundesamt für Schiffsvermessung gebildet. Die Aufgaben reichen von nautisch-technischen Fragestellungen über die Genehmigung von Offshore-Windkraftanlagen bis zur wissenschaftlichen Beschreibung und Überwachung der Meeresumwelt, hauptsächlich von Nord- und Ostsee. Das BSH unterhält hierfür ein chemisches Laboratorium in Hamburg-Sülldorf.

## Leitstelle E/F - Boden, Bewuchs, Futtermittel und Nahrungsmittel pflanzlicher und tierischer Herkunft

Das Max Rubner-Institut (MRI) ist eine dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) nachgeordnete Dienststelle. Die Leitstelle ist dem Institut für Sicherheit und Qualität bei Milch und Fisch in Kiel angegliedert. Der Aufgabenbereich der Leitstelle wird in einem sehr hohen Maße durch das „Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung durch ionisierende Strahlung (Strahlenschutzgesetz -StrlSchG 2020)“ und die „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI)“ geregelt.

Zu den Aufgaben der Leitstelle gehören Arbeiten im Rahmen der Radioaktivitätsüberwachung und Forschungen auf dem Gebiet der Radioökologie der Nahrungsketten, die von ihrer Erzeugung bis hin zum Verbraucher analysiert werden. Die Leitstelle ist in das bundesweite „Integrierte Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Umweltradioaktivität (IMIS)“ eingebunden und für die Umweltbereiche Boden, Bewuchs, Futtermittel und Nahrungsmittel pflanzlicher und tierischer Herkunft verantwortlich.

### **Leitstelle G - Fisch und Fischereierzeugnisse, Krustentiere, Schalentiere, Meereswasserpflanzen**

Das Johann Heinrich von Thünen-Institut (TI) ist eines von vier Bundesforschungsinstituten im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Mit den Aufgaben der Leitstelle ist das Thünen-Institut für Fischereiökologie (FI) in Bremerhaven betraut. Die erforderlichen Proben von Fischen und Fischnährtieren, in denen die Aktivität radioaktiver Stoffe ermittelt wird, werden auf den Fahrten der drei Fischereiforschungsschiffe und kommerzieller Fischereischiffe in Nord- und Ostsee, aber auch der Barents- und Grönlandsee gewonnen. Gleichzeitig dienen die Reisen der Entwicklung neuer Probennahme- und Aufbereitungstechniken. Zur Analyse der Proben steht ein Laboratorium mit Messplätzen für die Gammaskopimetrie sowie die radiochemische Aufarbeitung für den quantitativen Nachweis von  $^{90}\text{Sr}$ , Pu-Isotopen und  $^{241}\text{Am}$  zur Verfügung. Die Messergebnisse werden neben der Identifikation von Quellen und Verteilungen der Radionuklide auch zur Plausibilisierung entsprechender IMIS-Messdaten der Ländermessstellen herangezogen.

### **Leitstelle H - Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Abfälle und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen**

Diese Leitstelle gehört zu den Gründungsleitstellen, die bereits seit dem Jahre 1961 zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung die Radioaktivität in der Umwelt überwachen. Seit 1994 werden die Aufgaben der Leitstelle vom Fachgebiet „Emissionen und Immissionen: Wasser, Sedimente“ des Fachbereichs Strahlenschutz und Umwelt des BfS in Berlin wahrgenommen. Für eigene Untersuchungen stehen radiochemische Labore zur Probenaufbereitung und Herstellung von Messpräparaten sowie Geräte für die spektrometrische Bestimmung von Radionukliden zur Verfügung. Hier werden unter anderem Messungen zur Kontrolle der Eigenüberwachung radioaktiver Emissionen mit dem Abwasser aus kerntechnischen Anlagen durchgeführt.

### **Leitstelle I - Arzneimittel und deren Ausgangsstoffe sowie Bedarfsgegenstände**

Die Leitstelle für Arzneimittel und deren Ausgangsstoffe sowie Bedarfsgegenstände befindet sich in der Abteilung Umweltradioaktivität des BfS und überwacht routinemäßig vor allem Arzneimittelpflanzen beziehungsweise Pflanzen, die als Ausgangsstoffe für Arzneimittel dienen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Bestimmung der Aktivität gammastrahlender Radioisotope mit besonderem Augenmerk auf das Radionuklid Caesium-137, einem Fall-out-Bestandteil der oberirdischen Kernwaffenversuche sowie des Reaktorunfalls von Tschornobyl.

### **Leitstelle J - Fortluft aus kerntechnischen Anlagen**

Die Leitstelle für Fortluft aus kerntechnischen Anlagen hat ihren Sitz im Fachgebiet „Emissionen und Immissionen: Luft“ des Bundesamtes für Strahlenschutz.

Die Aufgaben der Leitstelle für Fortluft aus kerntechnischen Anlagen leiten sich aus dem Atomgesetz (AtG), dem § 48 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), Fassung 2001 bzw. dem § 103 StrlSchV, Fassung 2018 und der zuletzt 2006 neu gefassten Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) her.

### **Leitstelle K - Fragen der Radioaktivitätsüberwachung bei erhöhter natürlicher Radioaktivität (ENORM)**

Die Aufgaben dieser im BfS Berlin angesiedelten Leitstelle umfassen die Entwicklung und Bereitstellung von Methoden zur Bestimmung der spezifischen Aktivitäten natürlicher Radionuklide in verschiedenen Umweltmedien, beispielsweise in Böden, Sedimente und Baustoffen sowie in industriellen Rückständen (ENORM), um eine zuverlässige Ermittlung der Strahlenexposition durch diese Stoffe zu ermöglichen. Zudem werden Arbeitsfelder betrachtet, bei denen erheblich erhöhte Expositionen durch natürlich terrestrische Strahlungsquellen auftreten können. Das betrifft beispielsweise Arbeitsfelder mit erhöhten Radon-222 Expositionen oder erhöhten Expositionen durch Uran und Thorium und deren Zerfallsprodukte.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Vorwort. ....	3
	Leitstellen zur Überwachung der Umweltradioaktivität .....	5
	Inhaltsverzeichnis .....	7
	Zusammenfassung .....	8
	Summary .....	13
<b>1</b>	Aktivitätsnormale und Spurenstoffe .....	18
<b>2</b>	Ableitungen aus Kernkraftwerken .....	23
<b>3</b>	Die Messnetze für Luft und Niederschlag .....	33
<b>4</b>	Spurenmessung in der bodennahen Luft .....	38
<b>5</b>	Die Ausbreitung von Radionukliden mit Saharastaub .....	44
<b>6</b>	Radioaktive Stoffe in Binnengewässern .....	49
<b>7</b>	Radioaktive Stoffe in Trink- und Grundwasser .....	58
<b>8</b>	Radioaktive Stoffe in Nord- und Ostsee .....	61
<b>9</b>	Radioaktive Stoffe in Fischen .....	85
<b>10</b>	Ende Gelände: Warum tritiumhaltige Wässer aus Fukushima in den Pazifik eingeleitet werden und was es für den Ozean und die Menschen bedeutet .....	93
<b>11</b>	Boden, Pflanzen, Futtermittel, Milch und Gesamtnahrung .....	97
<b>12</b>	Radioaktive Stoffe in Abwasser, Klärschlamm und Abfällen .....	101
<b>13</b>	Radionuklide in Abwasser und Klärschlamm - eine Auswertung von Daten der IMIS-Datenbank .....	107
<b>14</b>	Arzneimittel und deren Ausgangsstoffe sowie Bedarfsgegenstände .....	112
	<b>Anhang</b>	
	Literatur .....	116
	Verwendete Abkürzungen .....	119
	Eigenschaften der im Text erwähnten Radionuklide .....	120
	SI-Einheiten im Strahlenschutz .....	123
	Präfixe .....	123
	Glossar .....	123
	Sachverzeichnis .....	126

# ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht werden Daten zur Radioaktivität in der Umwelt und in der Umgebung kerntechnischer Anlagen aus den Jahren 2020 bis 2022 in einem größeren zeitlichen Rahmen zusammengestellt und bewertet. Die mittlere Strahlenexposition der Bevölkerung betrug in diesen drei Jahren pro Jahr etwa 3,7 mSv. Davon entfielen ca. 2,1 mSv auf die natürliche Strahlenexposition sowie etwa 1,6 mSv auf die zivilisatorische Strahlenexposition. Ausführlicheres Datenmaterial für die einzelnen Jahre ist den Jahresberichten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, und nukleare Sicherheit über „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ zu entnehmen [1].

## Aktivitätsnormale und Spurenstoffe (Kapitel 1)

Zentrale Aufgabe des Fachbereichs „Radioaktivität“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ist die Darstellung der gesetzlichen Einheit „Becquerel“ (Bq) sowie deren Weitergabe. Im Berichtszeitraum wurden Primärnormalmessmethoden zur genauen Aktivitätsbestimmung mehrerer relevanter Radionuklide wie z.B.  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  verbessert und Halbwertszeiten relevanter Isotope gemessen.

Seit einigen Jahren setzt die PTB hochauflösende magnetische Mikrokalorimeter (MMC) bei tiefen Temperaturen (< 20 mK) zur Bestimmung der Form und Endpunktenergie von Beta-Spektren ein und hat begonnen, diese dauerhaft für genaue metrologische Messungen zu etablieren.

Unter den vielen Forschungsarbeiten mit internationalen Partnern koordiniert die PTB das Europäische Forschungsprojekt „MetroPOEM“ zur Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung und Bestimmung radioaktiver und stabiler Umweltschadstoffe mittels Massenspektrometrie. Darüber hinaus wurden im Projekt „traceRadon“ relevante Fortschritte sowohl für die Umweltradioaktivität als auch für die Atmosphären- bzw. Klimaforschung erzielt. Eine vielversprechende Entwicklung aus diesem Projekt sind Detektor-Emanationsquellen-Kombinationen (Integrated Radon Source/Detector, IRSD) mit Aktivitäten von wenigen Becquerel  $^{226}\text{Ra}$ , die eine erhebliche Verbesserung für die Kalibrierung von  $^{222}\text{Rn}$  Aktivitätskonzentrationsmessungen im Bereich von kleinsten Aktivitätskonzentrationen darstellen.

## Ableitung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken, Stilllegung von Kernkraftwerken, Expositionen der Bevölkerung (Kapitel 2)

Im atomrechtlichen Genehmigungsverfahren werden maximale Aktivitätsabgaben mit Fortluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen festgelegt. Die tatsächlichen Ableitungen aus Kernkraftwerken werden erfasst und nach Art und Aktivität bilanziert.

Von 2020 bis Ende 2021 waren in Deutschland noch sechs Kernkraftwerke mit einer elektrischen Bruttoleistung von jährlich etwa 8,5 GW im Leistungsbetrieb. 2022 gab es noch drei aktive Kernkraftwerke mit einer elektrischen Bruttoleistung von jährlich etwa 4,3 GW. Sie haben zur Stromerzeugung etwa 12 bzw. 6 Prozent beigetragen. Die Menge der dabei abgeleiteten radioaktiven Stoffe liegt im Allgemeinen weit unter den Genehmigungswerten. Somit unterschreiten auch die aus den Aktivitätsableitungen berechneten Werte der jährlichen Exposition erheblich die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Dosisgrenzwerte von beispielsweise 0,3 mSv für die effektive Dosis. Die Expositionswerte der Referenzperson in der Umgebung der Kernkraftwerke, die mit den ungünstigen Annahmen, die für die Referenzperson vorgegeben sind, berechnet werden, liegen in der Regel unter 0,01 mSv pro Jahr; mit realistischeren Annahmen ergeben sich deutlich kleinere Dosiswerte.

## Messnetz für Luft und Niederschlag (Kapitel 3)

Die Messnetze des BfS und des DWD sowie dessen radiochemisches Zentrallabor in Offenbach sind Bestandteile des Integrierten Mess- und Informationssystems zur Überwachung der Umweltradioaktivität (IMIS). An 48 Messstellen wird die Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) ständig überwacht. Dazu gehört auch die natürliche Radioaktivität in der Luft als Aktivitätskonzentration der aerosolpartikelgebundenen Radonfolgeprodukte  $^{214}\text{Pb}$  und  $^{214}\text{Bi}$ .

Für künstliche Radionuklide wie zum Beispiel  $^{131}\text{I}$  und  $^{137}\text{Cs}$  liegen im Normalbetrieb die berechneten Nachweisgrenzen der Luftmonitore zwischen  $5 \text{ mBq/m}^3$  und  $10 \text{ mBq/m}^3$ . Zahlreiche erhobene Werte werden im Kapitel grafisch und tabellarisch zusammengefasst. Messergebnisse zu den Nukliden  $U_{\text{nat}}$  ( $^{239+240}\text{Pu}$ ),  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und Tritium sind ebenfalls dargestellt.

## Spurenmessung in der bodennahen Luft (Kapitel 4)

Vom BfS, dem DWD und der PTB werden Untersuchungen im Rahmen der Spurenanalyse durchgeführt. Die Spurenanalyse dient der Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt im Rahmen der gesetzlichen Aufgaben und dem Nachweis von verdeckten nuklearen Aktivitäten.

Bei den Edelgasmessungen werden Luftproben unter anderem auf ihren Gehalt an radioaktivem Xenon und  $^{85}\text{Kr}$  untersucht. Während  $^{85}\text{Kr}$  überwiegend bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen in die Atmosphäre freigesetzt wird, stellt  $^{133}\text{Xe}$  den Hauptbestandteil im bestimmungsgemäßen Betrieb der Edelgasableitungen von Kernkraftwerken und Isotopenproduktionsanlagen dar. Bei den Messungen im Berichtszeitraum fanden sich in der Regel keine auffälligen Ergebnisse. Kurzzeitige Schwankungen im zeitlichen Verlauf der Aktivitätskonzentrationen sind auf Emissionen aus den europäischen Wiederaufbereitungsanlagen für Kernbrennstoffe (La Hague/Frankreich und Sellafield/England) zurückzuführen.

Im Berichtszeitraum gab es keine auffälligen Beobachtungen im Bereich der Spurenanalyse.

## Die Ausbreitung von Radionukliden mit Saharastaub (Kapitel 5)

Wüstenstaub von Saharastaubausbrüchen gelangt regelmäßig nach Deutschland. Im Norden Deutschlands kann man im Mittel Wüstenstaub an ca. 30 Tagen und im Süden an ca. 50 Tagen beobachten. Im März 2022 gab es einen außergewöhnlichen starken Wüstenstaubausbruch.

An zwei Tagen konnten radioaktive Partikel im Saharastaub festgestellt werden. Trajektorienrechnungen des DWD ergaben eine Verfrachtung von Staubpartikeln aus dem Gebiet der französischen oberirdischen Kernwaffentests (Centre saharien d'expérimentations militaires, CSEM) der 1960er Jahre.

Es konnten die Isotope Cs-137, U-234, U-235, U-238, Pu-238, Pu-239 und Am-241 oberhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen nachgewiesen werden, wobei die höchste Aktivitätskonzentration mit  $1,8 \cdot 10^5 \text{ Bq/m}^3$  für Cs-137 am 17.03.2022 vorlag.

## Radioaktive Stoffe in Binnengewässern (Kapitel 6)

Die Radioaktivität wird in Binnengewässern in den Kompartimenten Oberflächenwasser, Schwebstoff und Sediment ermittelt. Die Überwachung der dynamischen Kompartimente Oberflächenwasser und Schwebstoff ermöglicht es, aktuelle Einträge und kurzfristige Veränderungen radioaktiver Kontaminationen in Gewässern zeitnah und mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Die Sedimente stellen hingegen das Langzeitspeichermedium von Radionukliden in Gewässern dar.

Der radiologische Gütezustand der Binnengewässer unterlag in den Jahren 2020 bis 2022 keinen größeren Veränderungen im Vergleich zum vorangegangenen Berichtszeitraum. Bezüglich der radiologischen Auswirkungen zeigt sich, wie in anderen Umweltbereichen auch, dass derzeit die natürlichen Radionuklide im Vergleich zu den künstlichen Radionukliden den wesentlichen Anteil zur Strahlendosis beitragen. Der Dosisanteil der künstlichen Radionuklide geht weiterhin in erster Linie auf die Radionuklide zurück, die über die Fallouts der Kernwaffenversuche und des Reaktorunfalls von Tschernobyl (russ.: Tschernobyl) in die Gewässer gelangten.

## Radioaktive Stoffe in Trink- und Grundwasser (Kapitel 7)

Die im Trink- und Grundwasser in den Jahren 2020, 2021 und 2022 nachgewiesenen Radionuklide sind hauptsächlich natürlichen Ursprungs, wie z. B.  $^{40}\text{K}$  und  $^{238}\text{U}$ . Künstliche Nuklide, z. B.  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$ , treten nur in sehr geringen Konzentrationen bei nicht oder wenig geschützten Rohwässern (z. B. aus Oberflächenwasser, Uferfiltrat oder oberflächennahem Grundwasser) oder im Rahmen der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen auf.

Für Plutoniumisotope werden in der Regel nur Ergebnisse kleiner als die bei der Messung erreichte Nachweisgrenze übermittelt. Die wenigen tatsächlichen Messwerte liegen ausnahmslos mehr als vier Größenordnungen unterhalb der geforderten Nachweisgrenze für Plutoniumisotope im Routinemessprogramm.

## Radioaktive Stoffe in Nord- und Ostsee (Kapitel 8)

Das Kapitel beschreibt den aktuellen Zustand von Nord- und Ostsee hinsichtlich der Kontamination durch künstliche Radionuklide, wie z. B.  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$ . Grundlage der Bewertung sind jährlich zwei Überwachungsfahrten mit eigenen und gecharterten Forschungsschiffen durch das Bundesamt für

Seeschifffahrt und Hydrographie sowie zahlreiche Wasserproben, die regelmäßig auch von anderen Schiffen des Bundes an festgelegten Positionen entnommen werden.

In Nord- und Ostsee können künstliche Radionuklide aus folgenden Quellen nachgewiesen werden:

- Globaler Fallout aus den atmosphärischen Kernwaffentests der 50er und 60er Jahre
- Ableitungen aus den Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield (UK) und La Hague (F)
- Fallout aus dem Reaktorunfall von Tschornobyl im Jahr 1986 und
- Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen wie Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren.

Die Werte der Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  liegen im erwartbaren Schwankungsbereich. Der zeitliche Verlauf der Aktivitätskonzentrationen ist im Kapitel grafisch dargestellt.

### Radioaktive Stoffe in Fischen (Kapitel 9)

Die Messergebnisse im Überwachungszeitraum machen deutlich, dass der Fallout aus der Reaktorkatastrophe von Tschornobyl nach wie vor die dominierende Quelle der Kontamination von Fischen der Ostsee und der Deutschen Binnengewässer mit Radionukliden ist. Die mittleren  $^{137}\text{Cs}$ -Werte in Fischen aus der Ostsee sind auch 2022 weiterhin höher als in Fischen aus Binnenseen. Die effektive Halbwertszeit für die Abnahme in Wasser und Fisch ist mit 6 bis 11 Jahren in der Ostsee etwas größer als diejenige in Binnengewässern mit etwa 7 Jahren. Die relativ langsame Abnahme in Binnengewässern liegt daran, dass bis heute kontinuierlich  $^{137}\text{Cs}$  aus den Böden der Wassereinzugsgebiete in die Gewässer eingetragen wird. Bis ins Jahr 2022 wurde in den Binnenseen dennoch ein deutlicher Rückgang der mittleren spezifischen Aktivität von  $^{137}\text{Cs}$  auf unter 1,0 Bq/kg FM festgestellt.

### Ende Gelände: Warum tritiumhaltige Wässer aus Fukushima in den Pazifik eingeleitet werden und was es für den Ozean und die Menschen bedeutet (Kapitel 10)

Seit der Reaktorkatastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi sind 13 Jahre vergangen. Bereits im Jahr 2013 wurde klar, dass kontaminiertes Wasser aus den Reaktoren den Pazifik erreichen könnte, wenn man es nicht auf dem Gelände des Kernkraftwerks zwischenlagert. Da der Platz auf dem Gelände immer knapper wird, wurde im August 2023 mit dem Einleiten von dekontaminiertem, jedoch noch tritiumhaltigem Wasser in den Pazifik begonnen. Im Kapitel wird erläutert, was das Einleiten von noch mit Tritium kontaminiertem Wasser nach gegenwärtigem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse für die Meeresumwelt bedeutet. Unter den im Kapitel genannten Randbedingungen ist es sehr unwahrscheinlich, dass direkte oder indirekte Strahlenwirkungen bei Meeresorganismen nachweisbar sein werden. Ein Risiko für den Verbraucher wird aus Sicht des Strahlenschutzes ebenfalls als sehr gering eingeschätzt.

### Boden, Pflanzen, Futtermittel, Gesamtnahrung sowie Milch- und Milchprodukte (Kapitel 11)

Die Wanderung der Radionuklide  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  in den Boden hinein erfolgt nur sehr langsam. Auf Grund der langen Halbwertszeit der Radionuklide verändert sich ihre spezifische Aktivität im Boden gegenwärtig von Jahr zu Jahr nur geringfügig. Die Kontamination des Bodens mit  $^{137}\text{Cs}$  war auch in den Jahren 2020 bis 2022 durch die Deposition nach dem Tschornobyl-Unfall geprägt. Die Kontamination des Bodens mit  $^{90}\text{Sr}$  stammen zum überwiegenden Teil noch aus der Zeit der oberirdischen Kernwaffenversuche. Durch Tiefenwanderung in den Boden sowie den physikalischen Zerfall hat im Allgemeinen auch die Kontamination pflanzlichen Materials weiterhin abgenommen. Die Kontamination von Milch und Milchprodukten mit  $^{137}\text{Cs}$  aus dem Kernwaffen- und Tschornobyl-Fallout hatte bereits in den Vorjahren ein sehr niedriges Niveau erreicht und vermindert sich derzeit von Jahr zu Jahr nur noch äußerst geringfügig.

Neben der Messung und Bewertung der Bereiche Boden, Pflanzen, Futtermittel, Milch und Gesamtnahrung führt die Leitstelle am Max Rubner-Institut Vergleichsmessungen für die Messstellen der Bundesländer durch. Die Messstellen der Bundesländer sind nach der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) und der StrlSchV dazu aufgerufen, an entsprechenden Vergleichsmessungen teilzunehmen.

Die Leitstelle führte in den Jahren 2020 bis 2022 drei Vergleichsuntersuchungen in Bereichen für das Umweltmedium „Milch“ durch. An diesen nahmen jeweils ca. 70 nationale und internationale Laboratorien teil und sind bei behördlichen sowie privaten Laboren sehr gefragt. Die Vergleichsanalysen wer-

den in Anlehnung an die DIN 17043 in Verbindung mit der ISO 13528 geplant und ausgewertet. Die Ergebnisse sind tabellarisch und grafisch zusammengefasst und öffentlich verfügbar (<https://www.openagrar.de/>).

### Radioaktive Stoffe in Abwasser, Klärschlamm und Abfällen (Kapitel 12)

Bei der Überwachung der Umweltradioaktivität durch die amtlichen Messstellen der Länder (§ 162 StrlSchG) werden nur solche Abfälle berücksichtigt, die von radioökologischer Bedeutung sein können. Im Wesentlichen werden an diesen Medien gammaskopimetrische Untersuchungen ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) vorgenommen. Im Sickerwasser und in oberflächennahem Grundwasser von Deponien wird darüber hinaus auch Tritium bestimmt.

In 33 % der untersuchten Proben von Hausmülldeponien wurden in den Berichtsjahren 2020 bis 2022  $^{137}\text{Cs}$  nachgewiesen. Die Aktivitätskonzentrationen lagen zwischen 0,003 Bq/l und 0,22 Bq/l; die Größenordnung der berechneten Mediane blieb mit <0,042 Bq/l (2020), 0,04 Bq/l (2021) und <0,04 Bq/l (2022) relativ unverändert. In einem Teil der Abfall- und Reststoffproben konnte das in der Nuklearmedizin angewandte Nuklid  $^{131}\text{I}$ , vereinzelt auch  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{75}\text{Se}$  und  $^{111}\text{In}$ , nachgewiesen werden. Ebenso konnte in zwei Proben  $^{60}\text{Co}$  nachgewiesen werden.

Bezüglich radioaktiver Stoffe in Abwasser und Klärschlamm sieht das Routinemessprogramm die Überwachung von etwa 90 Abwasserreinigungsanlagen in Deutschland vor. Vorwiegend erfolgen gammaskopimetrische Untersuchungen ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ). Darüber hinaus werden über radiochemische Verfahren die Aktivitäten von  $^{90}\text{Sr}$  sowie Plutonium- und Uranisotope bestimmt. In einem Teil der Abwasser- und Klärschlammproben wurden Anwendernuklide, wie das hauptsächlich in der Nuklearmedizin eingesetzte  $^{131}\text{I}$ , festgestellt, in Einzelfällen auch  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  und  $^{177}\text{Lu}$ .

### Radionuklide in Abwasser und Klärschlamm - eine Auswertung von Daten der IMIS-Datenbank (Kapitel 13)

Im Rahmen des vom Öko-Institut e. V. und Nuclear Control & Consulting GmbH (NCC) durchgeführten Forschungsvorhaben „Radioaktivität in Klärschlamm“ wurden nach AVV IMIS im Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2022 erhaltene Ergebnisse in Klärschlamm und Abwasser ausgewertet. Es wurden dabei der Routine- und der Intensivmessbetrieb sowie die ergänzenden Ländermessprogramme berücksichtigt.

Genauer betrachtet wurden dabei die natürlichen Radionuklide Be-7, K-40, die U-238- und Th-232-Zerfallsreihen und im Abwasser H-3, die medizinischen Radionuklide Tc-99m, In-111, I-131 und Lu-177, sowie die Radionuklide der Fallouts der früheren Kernwaffentests sowie des Nuklearunfalls von Tschornobyl Sr-90, Cs-137, Pu-238 sowie Pu-239/40.

In allen drei Nuklidgruppen wurde festgestellt, dass der Anteil am Gesamtdatensatz an Ergebnissen über der Erkennungsgrenze im Klärschlamm für die meisten Nuklide mit über 80 % erheblich höher ist als im Abwasser. Dort liegt dieser Anteil meist bei deutlich unter 50 %.

Der Wertebereich für H-3 beruht auf Messergebnissen von sehr wenigen Kläranlagen, und der Medianwert liegt etwas höher als die H-3 Konzentration im Niederschlag. Die Aktivitätskonzentrationen des kosmogenen Radionuklids Be-7 sind im Abwasser deutlich geringer als die des primordialen K-40; im Klärschlamm besitzen beide Nuklide ähnliche spezifische Aktivitäten. Bei den Radionukliden der Zerfallsreihen sind deutliche Ungleichgewichte und für die U-238-Zerfallsreihe auch Unterschiede zwischen Klärschlamm und Abwasser. In der Th-232-Zerfallsreihe wurden beinahe ausschließlich kurzlebige Zerfallsprodukte von längerlebigen Vorgängern gammaskopimetrisch bestimmt.

Die gemessenen Aktivitätskonzentrationen nuklearmedizinischer Radionuklide reflektieren zum einen die applizierten Aktivitäten, zum anderen die diagnostische oder therapeutische Wirksamkeit.

Von den Radionukliden des Fallouts wurden vor allem von Sr-90 häufig Messwerte oberhalb der Erkennungsgrenze erzeugt. Für Cs-137 und die Plutoniumisotope wurden meist nur Nachweisgrenzen berichtet, wobei Cs-137 deutlich häufiger analysiert wurde.

Die Auswertung zeigte, dass Abwasser und Klärschlamm geeignete Medien darstellen, um den Eintrag von künstlichen Radionukliden in radiologischen Notfällen aber auch in der Routine durch Entwicklungen in Medizin und Forschung abzubilden und zu verfolgen.

## Arzneimittel und deren Ausgangsstoffe sowie Bedarfsgegenstände (Kapitel 14)

Der Schwerpunkt der routinemäßigen Überwachung von vor allem Arzneimittelpflanzen bzw. Pflanzen, die als Ausgangsstoffe für Arzneimittel und Tees dienen, liegt bei gammastrahlenden Radioisotopen, insbesondere  $^{137}\text{Cs}$ , einem Falloutbestandteil der oberirdischen Kernwaffenversuche sowie des Reaktorunfalls von Tschornobyl.

Die spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  können je nach Art und lokalen Gegebenheiten, z. B. der Bodenbeschaffenheit oder -kontamination in den verschiedenen Anbaugebieten der Herkunftsländer, erhebliche Variabilitäten aufweisen. In den letzten drei Jahren lagen die Werte zwischen maximal 2 900 Bq/kg (TM) bei Bitterklee aus der Ukraine und Werten unterhalb der Nachweisgrenze, wie z. B. bei Gänsefingerkraut aus Ungarn.

## SUMMARY

This report compiles and assesses data on radioactivity in the environment and around nuclear facilities from 2020 to 2022 in a broader temporal framework. The average radiation exposure of the population during these three years was approx. 3.7 mSv per year. Of this, about 2.1 mSv was due to natural radiation exposure and about 1.6 mSv to civilisational radiation exposure. More detailed data for the individual years can be found in the annual reports of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety on “Environmental Radioactivity and Radiation Exposure” [1].

### Activity standards and trace substances (Chapter 1)

The main task of PTB's Department “Radioactivity” is the realisation of the legal unit Becquerel (Bq) and its dissemination. During the reporting period, there were improvements to primary standard measurement methods for accurate determination of the activity of several relevant radionuclides such as  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , and measurements were taken of the half-lives of relevant isotopes.

For several years, PTB has been using high-resolution magnetic microcalorimeters (MMCs) at low temperatures (< 20 mK) to determine the shape and endpoint energy of beta spectra and has begun to establish these devices for accurate metrological measurements on a permanent basis.

Among the many research projects carried out with international partners, PTB coordinates the European research project “MetroPOEM” for the development of methods to characterise and determine radioactive and stable environmental pollutants using mass spectrometry. In addition, significant progress has been made in the “traceRadon” project - both for environmental radioactivity and for atmospheric and climate research. One promising development to emerge from this project are Integrated Radon Source/Detector (IRSD) combinations with activities of a few becquerels of  $^{226}\text{Ra}$ , which represent a significant improvement for the calibration of  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration measurements on the scale of extremely small activity concentrations.

### Discharge of radioactive substances from nuclear power plants, decommissioning of nuclear power plants, exposures of the population (Chapter 2)

In the nuclear licensing procedure, maximum activity discharges with exhaust air and waste water from nuclear facilities are specified. Actual discharges from nuclear power plants are recorded and assessed for by type and activity.

From 2020 until the end of 2021, six nuclear power plant units with a gross annual electrical output of approx. 8.5 GW were still in operation in Germany. In 2022 three nuclear power plant units were still operating in Germany with a gross annual output of approx. 4.3 GW. They contributed approx. 12% (2020 and 2021) and 6% (2022) to electricity generation. The amount of radioactive substances discharged in the process is generally far below the licensing values. Thus, the values of annual exposure calculated from the activity discharges also fall considerably below the dose limits of 0.3 Sv for the effective dose specified in the Radiation Protection Ordinance. The exposure values of the reference person in the vicinity of the nuclear power plants calculated with the unfavourable assumptions given for the reference person are usually below 0.01 mSv per year; with more realistic assumptions, significantly smaller dose values result.

### Measuring network for air and precipitation (Chapter 3)

The measurement networks of the BfS and Germany's National Meteorological Service, the Deutscher Wetterdienst (DWD) as well as its radiochemical central laboratory in Offenbach are components of the Integrated Measuring and Information System (IMIS) for monitoring environmental radioactivity. Radioactivity in the air and in precipitation is continually monitored by the DWD at 48 measuring points.

This also includes natural radioactivity in the air as activity concentrations of the aerosol particle-bound radon decay products  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$ .

For artificial radionuclides such as  $^{131}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$ , the calculated detection limits of the air monitors are between  $5 \text{ mBq/m}^3$  and  $10 \text{ mBq/m}^3$  in normal operation. Numerous collected values are summarised graphically and in tabular form in the chapter. Measurement results for the nuclides  $\text{U}_{\text{nat}}$ ,  $^{(239+240)}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , and tritium are also shown.

#### Trace measurement in the air near the ground (Chapter 4)

Investigations are carried out by the BfS, the DWD, and the PTB within the framework of trace analysis. Trace analysis is used for the monitoring radioactive substances in the environment within the framework of legal tasks and the detection of covert nuclear activities.

In the noble gas measurements, air samples are analysed for their content of radioactive xenon and  $^{85}\text{Kr}$ , among others. While  $^{85}\text{Kr}$  is predominantly released into the atmosphere during the reprocessing of nuclear fuels,  $^{133}\text{Xe}$  is the main component in the intended operation of the noble gas discharges of nuclear power plants and isotope production facilities. During the measurements in the reporting period, there were generally no striking results. Short-term fluctuations in the temporal course of activity concentrations are due to emissions from the European nuclear fuel reprocessing plants (La Hague/France and Sellafield/England).

There were no unusual observations in the area of trace analysis during the reporting period.

#### The spread of radionuclides with Sahara dust (Chapter 5)

Desert dust from Sahara dust eruptions regularly reaches Germany. In the north of Germany desert dust can be observed in average on around 30 days and in the south on around 50 days. In March 2022 there was an exceptionally strong desert dust outbreak.

Radioactive particles were detected in the Sahara dust on two days. Trajectory calculations by the DWD showed that dust particles were transported from the area of the French above-ground nuclear weapons tests (Centre Saharien d'expérimentations militaires, CSEM) in the 1960s.

The isotopes  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  were detected above the detection limits, with the highest activity concentration of  $1.8 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$  for  $^{137}\text{Cs}$  on March 17, 2022.

#### Radioactive substances in inland waters (Chapter 6)

In inland waters, radioactivity is determined in the compartments surface water, suspended matter, and sediment. Monitoring of the dynamic surface water and suspended sediment compartments makes it possible to record current inputs and short-term changes in radioactive contamination in water bodies promptly and with high accuracy. The sediments, however, represent the long-term storage medium for radionuclides in aquatic systems.

In the reporting period 2020 to 2022, the radiological quality status of inland waters was not subject to any major changes compared with recent years. With regard to radiological effects, it is evident (as in other environmental areas) that the natural radionuclides currently contribute the major share to the radiation dose compared with the artificial radionuclides. The proportion of artificial radionuclides continues to be primarily due to radionuclides that entered the waters via fallouts from nuclear weapons testing and the Chernobyl (russ.: Chernobyl) reactor accident.

#### Radioactive substances in drinking water and groundwater (Chapter 7)

Radionuclides detected in drinking water and groundwater in 2020, 2021, and 2022 are mainly of natural origin (e. g.  $^{40}\text{K}$  and  $^{238}\text{U}$ ). Artificial nuclides (e. g.  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ ) occur only in negligible concen-

trations in unprotected or poorly protected raw waters (e. g. from surface water, bank filtrate or near-surface groundwater) or in the context of environmental monitoring of nuclear facilities.

For plutonium isotopes, only results smaller than the detection limit reached during the measurement are usually transmitted. The few actual measured values are, without exception, more than four orders of magnitude below the required detection limit for plutonium isotopes in the routine measurement programme.

### Radioactive substances in the North Sea and the Baltic Sea (Chapter 8)

The chapter describes the current state of the North Sea and Baltic Sea with regard to contamination by artificial radionuclides (such as  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ ). The assessment is based on two monitoring surveys per year by the Federal Maritime and Hydrographic Agency using its own and chartered research vessels as well as numerous water samples that are also regularly taken by other federal vessels at specified positions.

Artificial radionuclides can be detected in the North Sea and Baltic Sea from the following sources:

- global fallout from atmospheric nuclear weapons testing in the 1950s and 1960s
- discharges from the reprocessing plants in Sellafield (UK) and La Hague (F)
- fallout from the Chernobyl reactor accident in 1986
- discharges from nuclear facilities such as nuclear power plants and research reactors.

The values of the activity concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  are within the expected range of fluctuation. The temporal course of the activity concentrations is shown graphically in the chapter.

### Radioactive substances in fish (Chapter 9)

The measurement results in the monitoring period make it clear that the fallout from the Chernobyl reactor disaster is still the dominant source of contamination of fish in the inland waters of the Baltic Sea and German with radionuclides. The mean  $^{137}\text{Cs}$  levels in fish from the Baltic Sea continue to be higher than in fish from inland lakes in 2020.

The effective half-life for the decrease in water and fish is slightly longer in the Baltic Sea (6-11 years) than in inland waters (7 years). The fact that decrease in inland waters is also relatively slow is because  $^{137}\text{Cs}$  is still being continuously discharged from the soils of the water catchment areas into the water bodies. By 2022, yet a significant decrease in the mean specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  to below 1.0 Bq/kg FM was observed in inland lakes.

### End of the road: why tritium-containing waters are being discharged from Fukushima into the Pacific and what it means for people and the ocean (Chapter 10)

Thirteen years have passed since the reactor disaster at Japan's Fukushima Daiichi nuclear power station. As early as 2013, it became clear that contaminated water from the reactors could reach the Pacific if it was not temporarily stored on the site of the nuclear power plant. As space on the site is becoming increasingly scarce, workers began to discharge water that has been decontaminated - but that still contains tritium - into the Pacific in August 2023. This chapter explains what the discharge of water that is still contaminated with tritium means for the marine environment according to current scientific knowledge. Under the boundary conditions set out in this chapter, it is very unlikely that direct or indirect effects of radiation will be detectable in marine organisms. The risk to consumers is also considered to be very low from a radiation protection perspective.

## Soil, plants, animal feed, and total food as well as milk and dairy products (Chapters 11)

The migration of the radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  into the soil is negligible. Because of the long half-life of radionuclides, their specific activity in the soil currently changes only slightly from year to year. The soil is still contaminated by  $^{137}\text{Cs}$  due to its accumulation after the Chernobyl disaster, whereas the  $^{90}\text{Sr}$  contamination is still primarily derived from the period of above-ground nuclear weapon testing.

Because of deep migration into the soil as well as physical decay, contamination of plant material has generally also continued to decrease. Contamination of milk and dairy products with  $^{137}\text{Cs}$  from nuclear weapons and Chernobyl fallout had already reached a low level in previous years and is decreasing only extremely slightly from year to year.

In addition to measuring and evaluating the areas of soil, plants, feed, milk, and total food, the federal coordinating office at the Max Rubner-Institute carries out comparative measurements for the measuring stations of the federal states. According to the Guideline concerning Emission and Immission Monitoring of Nuclear Installations (REI) and the Radiation Protection Ordinance (StrlSchV), the measuring stations of the Federal States are called upon to participate in corresponding comparison measurements.

Between 2020 and 2022 the federal coordinating office carried out three comparative tests for the environmental medium “milk”. About 70 national and international laboratories participated in each of these and are very popular among official and private laboratories. The comparative analyses are planned and evaluated in accordance with DIN 17043 in conjunction with ISO 13528. The results are summarised in tabular and graphical form and are publicly available (<https://www.openagrar.de/>).

## Radioactive substances in waste water, sewage sludge, and waste (Chapter 12)

In the monitoring of environmental radioactivity by the official measuring bodies of the Federal States (Section 162 StrlSchG), only waste that may be of radioecological importance is taken into account. Essentially, gamma spectrometry analyses ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) are carried out on these media. Tritium is also determined in leachate and near-surface groundwater from landfills.

$^{137}\text{Cs}$  was detected in 38 % of the analysed samples from domestic waste sites from 2020 to 2022. Activity concentrations ranged from 0.003 Bq/l to 0.22 Bq/l; the magnitude of the calculated medians remained relatively unchanged at < 0.042 Bq/l (2020), 0.04 Bq/l (2021) and < 0.04 Bq/l (2022). In some of the waste and residue samples, the nuclide  $^{131}\text{I}$  used in nuclear medicine was detected as well as  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{75}\text{Se}$  and  $^{111}\text{In}$  in isolated cases. Likewise,  $^{60}\text{Co}$  was detected in two samples.

With regard to radioactive substances in waste water and sewage sludge, the routine measurement programme provides for the monitoring of about 90 waste water treatment plants in Germany. Mainly gamma spectrometry analyses ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) are carried out. In addition, the activities of  $^{90}\text{Sr}$  as well as plutonium and uranium isotopes are determined by radiochemical methods. In some of the waste water and sewage sludge samples, user nuclides such as  $^{131}\text{I}$ , which is mainly used in nuclear medicine, were detected; in individual cases also  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  and  $^{177}\text{Lu}$ .

## Radionuclides in waste water and sewage sludge - an evaluation of data from the IMIS database (Chapter 13)

Within the framework of the research project “Radioactivity in sewage sludge” carried out by Oeko-Institut e. V. and Nuclear Control & Consulting GmbH (NCC), researchers evaluated results obtained in sewage sludge and waste water from the period 01/01/2016 to 31/12/2022 in accordance with AVV IMIS. Account was taken of routine and intensive measurement operations as well as the supplementary national measurement programmes.

As part of this work, a more precise examination was made of the following three nuclide groups: (1) the natural radionuclides Be-7 and K-40, the U-238 and Th-232 decay series and, in waste water, H-3; (2) the medical radionuclides Tc-99m, In-111, I-131 and Lu-177; and (3) the radionuclides from the fallout of previous nuclear weapons tests and the Chernobyl nuclear accident Sr-90, Cs-137, Pu-238 and Pu-239/40.

In all three nuclide groups, the researchers found that, for most nuclides, results above the decision limit accounted for a significantly higher proportion of the total data set in sewage sludge, at over 80%, than in waste water. In waste water, this proportion is typically well below 50%.

The range of values for H-3 is based on measurement results from a very small number of waste water treatment plants, and the median value is slightly higher than the H-3 concentration in precipitation. The activity concentrations of the cosmogenic radionuclide Be-7 in waste water are significantly lower than those of the primordial nuclide K-40; in sewage sludge, both nuclides have similar specific activities. For the radionuclides of the decay series, the results show significant imbalances and differences between sewage sludge and waste water for the U-238 decay series. In the Th-232 decay series, gamma spectrometry was used to determine almost exclusively short-lived decay products of longer-lived precursors.

The measured activity concentrations of nuclear medical radionuclides reflect the applied activities on the one hand and the diagnostic or therapeutic efficacy on the other.

Of the radionuclides present in the fallout, Sr-90 in particular frequently produced measurements above the decision limit. For Cs-137 and the plutonium isotopes, it was usually only the detection limits that were reported. In this context, Cs-137 was analysed much more frequently.

The evaluation showed that waste water and sewage sludge represent suitable media for mapping and tracking the discharge of artificial radionuclides in radiological emergencies as well as in routine situations as a result of developments in medicine and research.

### **Medicinal products and their starting materials as well as consumer goods (Chapter 14)**

The focus of routine monitoring of mainly medicinal plants or plants that serve as starting materials for medicines and teas is on gamma-emitting radioisotopes, in particular  $^{137}\text{Cs}$ , a fallout component of above-ground nuclear weapons testing as well as of the Chernobyl reactor accident.

The specific activities of  $^{137}\text{Cs}$  can show considerable variability depending on the species and local conditions (e. g. soil composition or contamination in the different growing regions of the countries of origin). In the past three years the values range between a maximum of 2,900 Bq/kg (DM) in bitter clover from Ukraine and values below the detection limit (e. g. in the case of goose cinquefoil from Hungary).

**D. Arnold, O. Nähle, K. Kossert, S. Röttger, D. Zapata-Garcia**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig  
Leitstelle für Aktivitätsnormale und Radionuklidaten (Leitstelle B)

Das Mutual Recognition Arrangement (MRA) unter der Schirmherrschaft des Comité International des Poids et Mesures (CIPM) ist eine weltweite Vereinbarung zur länderübergreifenden gegenseitigen Anerkennung von Kalibrierzertifikaten nationaler metrologischer Institute für alle kommerziell oder gesellschaftlich relevanten Messgrößen. Das Abkommen dient dem Abbau von Handelshemmnissen und fordert von den Teilnehmern neben dem Nachweis eines Qualitätsmanagement-Systems auch die Teilnahme an Vergleichsmessungen. Um den Anforderungen des MRA nachzukommen, beteiligt sich auch die PTB als Nationales Metrologie Institut (NMI) Deutschlands regelmäßig an internationalen Vergleichsmessungen, die von dem in Paris angesiedelten Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) organisiert werden.

Zentrale Aufgabe des Fachbereiches „Radioaktivität“ der PTB ist die Darstellung der gesetzlichen Einheit „Becquerel“ (Bq) sowie deren Weitergabe an Forschungsinstitute, Kliniken, Industriebetriebe sowie an die Messstellen zur Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt. Auf Grund der stark unterschiedlichen Zerfallseigenschaften erfordert jedes Radionuklid seine eigenen Messverfahren zur Aktivitätsbestimmung, für die in der PTB geeignete Apparaturen zur Verfügung stehen. Die Weitergabe der Aktivitätseinheit erfolgt überwiegend durch die Abgabe von Aktivitätsnormalen [2] und durch Aktivitätsbestimmungen an eingereichten Proben.

Im Berichtszeitraum wurden Primärnormalmessmethoden für eine Reihe von Radionukliden, deren Relevanz zugenommen hat, entwickelt und bestehende Methoden verbessert. So ist es gelungen, die Aktivität des in der Umweltradioaktivität bedeutsamen  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  genauer zu bestimmen [3]. Auch für die Bestimmung der Aktivität von Radionukliden, die für medizinische Anwendungen von Bedeutung sind, wurden verbesserte Messmethoden entwickelt, die in einigen Fällen sogar im Rahmen von internationalen Vergleichsmessungen eingesetzt wurden [4], [5] und [6].

Eine weitere wichtige Aufgabe des Fachbereichs „Radioaktivität“ ist die Bestimmung von fundamentalen Radionuklidaten wie Emissionswahrscheinlichkeiten [7] und Halbwertszeiten, welche in der PTB im Bereich von einigen Nanosekunden

bis hin zur mehreren Milliarden Jahren bestimmt werden [8]. Im Berichtszeitraum wurden die Halbwertszeiten einiger sehr kurzlebiger Isomerezustände gemessen [9] und die langen Halbwertszeiten von  $^{93}\text{Mo}$  [10] und  $^{40}\text{K}$  [11] mit bisher unerreichter Genauigkeit bestimmt. Auf dem Weg, die Halbwertszeit von  $^{32}\text{Si}$  und  $^{157}\text{Tb}$  zu bestimmen, wurden deutliche Fortschritte erzielt, indem neue und zuverlässige Methoden zur Probenherstellung und Aktivitätsbestimmung entwickelt und angewendet wurden [12], [7]. Viele der genannten Forschungsarbeiten finden in enger Kooperation mit internationalen Partnern statt.

Seit einigen Jahren setzt die PTB auch hochauflösende magnetische Mikrokalorimeter (MMC) bei tiefen Temperaturen ( $< 20$  mK) zur Bestimmung der Form und Endpunktenergie von Beta-Spektren ein. Gemeinsam mit Partnerinstituten in Frankreich und Deutschland wurden die Radionuklide  $^{151}\text{Sm}$  und  $^{99}\text{Tc}$  untersucht. In beiden Fällen konnten die Betaspektren bis hin zu sehr niedrigen Energien ( $< 1$  keV) gemessen werden - ein Bereich, der mit klassischen Detektoren und Magnetspektrometern nicht annähernd abgedeckt werden kann. Die maximale Beta-Energien von  $^{151}\text{Sm}$  (78,430(78) keV) und  $^{99}\text{Tc}$  (295,82(16) keV) wurden mit außerordentlich kleinen und bisher unerreichten Unsicherheiten bestimmt [13], [14]. Diese verbesserten Messungen sind u. a. für Aktivitätsbestimmung mit Flüssigszintillationszählung sehr grundlegend. Die Flüssigszintillationszählung zählt aktuell zu den wichtigsten Methoden der Radionuklidmetrologie.

Mit MMCs lassen sich aber auch weitere Radionuklidaten wie Übergangswahrscheinlichkeiten und Wahrscheinlichkeiten für den Elektroneneinfang bestimmen. Daher hat die PTB begonnen, dieses innovative Forschungsgebiet dauerhaft für genaue metrologische Messungen zu etablieren.

Zur Erweiterung seiner Kalibrier- und Messmöglichkeiten für langlebige Radionuklide in Umweltproben betreibt der Fachbereich „Radioaktivität“ seit 2018 ein Multikollektor induktiv gekoppeltes Plasma Massenspektrometer (MC-ICP-MS). Im Vergleich mit klassischen radiometrischen Messmethoden benötigen massenspektrometrische Messungen deutlich kleinere Messzeiten, und es lassen sich deutlich kleinere Messunsicherheiten erzielen. Darüber hinaus bietet die Massenspek-

trometrie zusätzliche Vorteile wie die gleichzeitige und separate Bestimmung der Plutoniumisotope  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{240}\text{Pu}$ . Zukünftig ist es das Ziel, Umweltprobenreferenzmaterialien für die absolute Isotopenzusammensetzung und Aktivitätskonzentrationen mit Hilfe der Massenspektrometrie zu zertifizieren.

Im Rahmen der Etablierung dieser Messkapazität koordiniert die PTB das Europäische Forschungsprojekt MetroPOEM<sup>1</sup> (Metrologie zur Harmonisierung der Messungen von Umweltschadstoffen in Europa), mit einer Laufzeit von Oktober 2022 bis September 2025 [15]. Dabei geht es in erster Linie um die Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung und Bestimmung radioaktiver und stabiler Umweltschadstoffe (langlebige Radionuklide und stabile toxische Elemente). Bei den langlebigen Radionukliden ist das Ziel, die Lücke zwischen den radiometrischen Techniken und der Massenspektrometrie zu schließen und eine Verbindung zwischen der Messung der Aktivität (Bq) und der Stoffmenge (mol) eines Isotops herzustellen. Durch die Anwendung beider Messtechniken sollen Messunsicherheiten verkleinert und Nachweisgrenzen verbessert werden.

Nicht-radiometrische Techniken zeigen ein großes Potential für die Messungen von radioaktiven Schadstoffen. Allerdings fehlen die Rückführbarkeit und Validierung dieser Methoden. Das MetroPOEM Projekt wird über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik hinaus gehen und die Einsatzmöglichkeiten einer Vielfalt an Massenspektrometern (z. B. ICP-MS/MS, MC-ICP-MS, AMS...) ermitteln. Dies wird erreicht, indem Einzel- und Mischaktivitäts-Normallösungen von Aktiniden, deren Aktivitäten sich unterhalb der relevanten Freigrenzen befinden, mit den genannten Massenspektrometern gemessen werden. Dabei wird ein Fokus auf die Eigenschaften der Geräte mit derzeitigen Messherausforderungen gelegt. Das Ziel ist es, Nachweisgrenzen unterhalb der derzeitigen gesetzlichen Grenzen zu erhalten, die relevant für die Umweltüberwachung sind. Zusätzlich sollen isobare Interferenzen reduziert werden und die Ergebnisse mit denen der klassischen Methoden für die Bestimmung von radioaktiven Isotopen verglichen werden. Zu den Auswahlkriterien für die Radionuklide in diesem Vergleich gehören die Halbwertszeit ( $500 \text{ a} < T_{1/2} < 4 \times 10^9 \text{ a}$ ), die Anwesenheit von

<sup>1</sup> Das Projekt MetroPOEM wird von der Europäischen Partnerschaft für Metrologie gefördert und vom Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont Europa der Europäischen Union sowie von den teilnehmenden Staaten kofinanziert

spektralen Interferenzen, die für eine akkurate Messung überwunden werden müssen und die genaue Bestimmung des Isotopenverhältnisses ( $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$ ,  $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$ ), um Isotopenquellen zuzuordnen zu können.

Bereits vorhandene radioaktive Referenzmaterialien (RM) und zertifizierte Referenzmaterialien (CRM), die für Umweltproben für massenspektrometrische Messungen verwendet werden können, sind sehr begrenzt vorhanden, und normalerweise enthalten die Zertifikate nicht alle relevanten Parameter, z. B. Isotopenverhältnisse. Dieses Projekt wird über den derzeitigen Stand der Wissenschaft hinausgehen und zwei Referenzmaterialien (flüssig und fest) entwickeln. Diese Referenzmaterialien werden Isotope von Uran, Neptunium, Plutonium und Americium enthalten und innerhalb eines Laborvergleichs ihre erste Anwendung finden. Der Laborvergleich wird die unterschiedlichen Parameter der Massenspektrometer aufzeigen wie Nachweisgrenzen, benötigte Probenpräparation, Probeneinlassmethoden, Bearbeitungszeit und Unsicherheitsbudgets. Die eingesetzten Referenzmaterialien sollen zukünftig zur Qualitätssicherung verwendet werden.

Das Metrologieprojekt traceRadon<sup>2</sup>, das im Jahr 2020 gestartet und 2023 erfolgreich beendet wurde, ist im Rahmen von EMPIR als 19ENV01 gefördert worden. Im traceRadon Projekt wurde der Schritt von der bereits niedrigen Raumluftaktivitätskonzentration (MetroRADON) zu der noch um Größenordnungen niedrigeren Außenluftaktivitätskonzentration vollzogen. Dieser Schritt ist für zwei sehr große und bisher völlig getrennt agierende Forschungsgebiete von großer Bedeutung, und zwar sowohl für den Strahlenschutz, genauer gesagt die Umweltradioaktivität, als auch für die Atmosphären- bzw. Klimaforschung, für die Radon als ausgezeichneter Tracer für die treibhausrelevanten Klimagase wie z. B.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$  fungiert.

Eine vielversprechende Entwicklung aus diesem Projekt sind Detektor-Emanationsquellen-Kombinationen (Integrated Radon Source/Detector, IRSD) mit Aktivitäten von wenigen Becquerel  $^{226}\text{Ra}$ .

Für die exakte Bestimmung der niedrigen  $^{226}\text{Ra}$  Aktivität ist eine sehr effiziente Alphaspektrome-

<sup>2</sup> Das Projekt traceRadon wurde aus dem EMPIR-Programm, das von den teilnehmenden Staaten kofinanziert wird, und aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizont 2020“ der Europäischen Union finanziert. 19ENV01 traceRadon bezeichnet die EMPIR-Projektreferenz.

trie unter definiertem Raumwinkel notwendig. Auch für die Online-Bestimmung der Variation der Emanation der Quelle wird ein sehr effizienter Nachweis des  $^{226}\text{Ra}$  sowie der Folgeprodukte des  $^{222}\text{Rn}$  benötigt. Dieses wird durch die direkte Kombination der Quelle mit einem alphaspektrometrischen Detektor erreicht. Zum ersten Mal ist dieses durch thermisches Aufdampfen (PVD) von  $^{226}\text{Ra}$  auf einen ionenimplantierten Siliziumdetektor gelungen.

Dabei wurden bis zu  $150\text{ Bq }^{226}\text{RaCl}_2$  direkt auf die Totschicht des Detektors aufgedampft [16].

Damit ist der Detektor selbst die Quelle des  $^{222}\text{Rn}$ , welches im Wesentlichen durch Rückstoß aus dem Zerfall des  $^{226}\text{Ra}$  emaniert. Gleichzeitig ist er spektrometrischer Detektor für die entstehende Alphastrahlung sowohl des  $^{226}\text{Ra}$  als auch des  $^{222}\text{Rn}$  und dessen Folgeprodukten mit einer Nachweiswahrscheinlichkeit von annähernd 50 %.

Den Vergleich des mit der Alphaspektrometrie unter definiertem Raumwinkel (DSA) zu dem mit dem IRSD aufgenommenen Alphaenergiespektrum zeigt Abbildung 1.1.

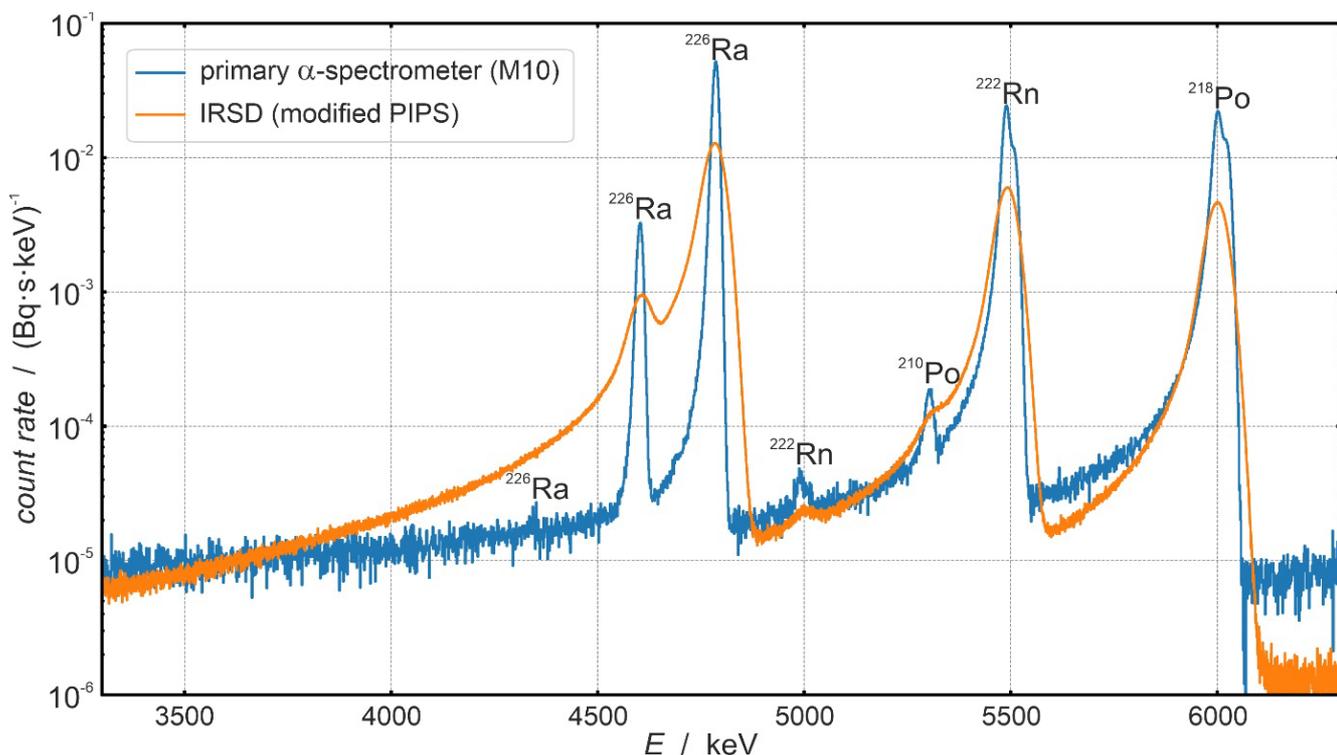


Abbildung 1.1

Quelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt

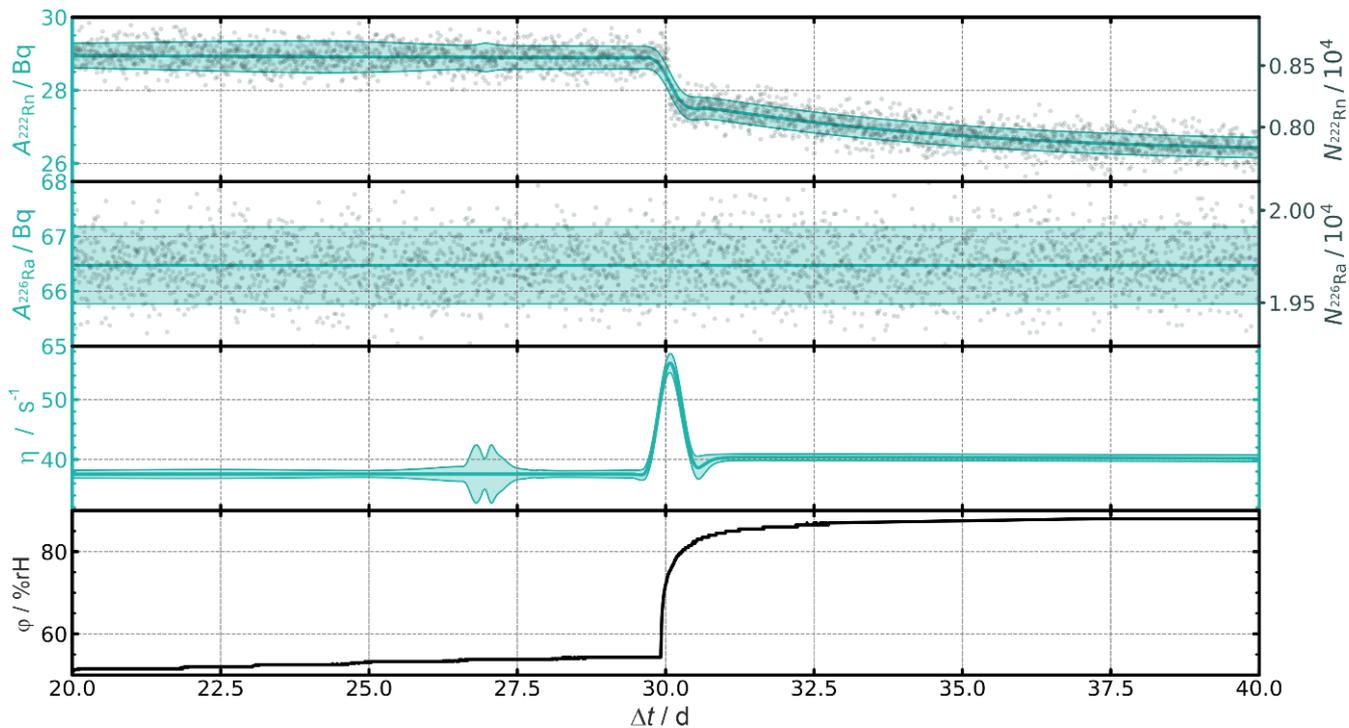
Alphaenergiespektrum einer Quelle-Detektor-Kombination (IRSD, orange) zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs sehr geringer  $^{222}\text{Rn}$  Emanationen im Vergleich zur simultan gemessenen Alphaspektrometrie unter definiertem Raumwinkel (DSA). Die erzielte Halbwertsbreite (FWHM) der Gaußverteilungen für den IRSD beträgt  $\text{FWHM} \approx 40\text{ keV}$  und erlaubt damit die Trennung von  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$  und  $^{218}\text{Po}$ .

Dargestellt ist die Impulshöhenverteilung über der Energie der  $\alpha$ -Teilchen. Aufgrund ihrer Energie identifiziert man  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  und  $^{214}\text{Po}$ .

Da die Gesamtmenge an Radon eine Erhaltungsgröße ist, erlauben die kontinuierlich aufgenommenen  $\alpha$ -Spektren die Menge an freigesetztem Radon zu bestimmen. Diese Art der Messung stellt eine mathematische Inversion dar und benötigt besondere Analyseverfahren. Auf der Basis des Kalman-Filters zur Zustandsschätzung in linear dynamischen Systemen wurden neuartige Algorithmen entworfen und implementiert, mit de-

ren Hilfe sich der zeitliche Verlauf der freigesetzten Aktivität des Radons und die zugeordnete Unsicherheit aus den kontinuierlich gewonnen Messdaten berechnen lassen, siehe Abbildung 1.2. Durch das beschriebene Verfahren lässt sich selbst das Freisetzen von einem Radonatom pro Sekunde (ca.  $2\text{ }\mu\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$ ) im Mittel innerhalb weniger Stunden Integrationszeit noch mit Unsicherheiten um 2 % ( $k = 1$ ) bestimmen [17].

Der IRSD wird zukünftig eingesetzt werden, um Radonmonitore auch im Feld und bei wechselnden klimatischen Bedingungen fortlaufend, automatisiert und rückgeführt zu kalibrieren.



Quelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt

**Abbildung 1.2**

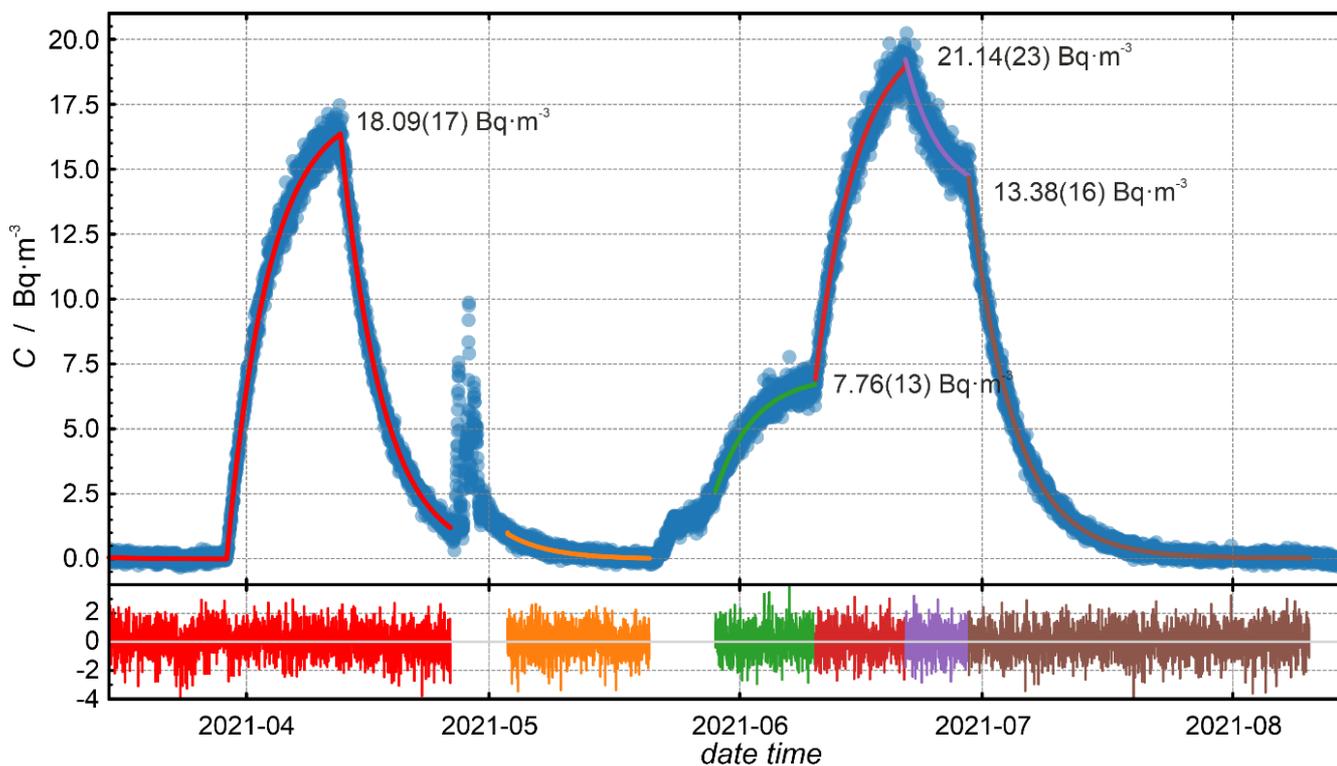
Zeitlicher Verlauf der Emanation von  $^{222}\text{Rn}$  aus der  $^{226}\text{Ra}$  Schicht des IRSD. Die grauen Punkte und schwarzen Linien repräsentieren Messwerte. Die grünen Linien und Bereiche die daraus bestimmten Ergebniswerte mit den zugeordneten Unsicherheitsbereichen ( $k = 1$ ). Von oben nach unten ist dies: verbleibende  $^{222}\text{Rn}$  Aktivität in Bq,  $^{226}\text{Ra}$  Aktivität in Bq, Emanation von  $^{222}\text{Rn}$  Atomen in Atomen pro s und die relative Feuchte in der Umgebung in %RH.

Mit Hilfe der IRSD ist es somit möglich Kalibrieratmosphären für  $^{222}\text{Rn}$  Aktivitätskonzentration unterhalb von  $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  herzustellen und für die Charakterisierung von Außenluft Radonaktivitätskonzentrationsmonitoren zu verwenden, wie sie z. B. bei Treibhausgas Überwachungsnetzwerken wie ICOS im Einsatz sind. Abbildung 1.3 zeigt eine Kalibrierung mit mehreren Emanationsquellen im Vergleich zu einem ANSTO 200 L Detektor Prototyp im  $^{222}\text{Rn}$  Aktivitätskonzentrationsbereich unterhalb von  $25 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Mit dem Abschluss des traceRadon-Projektes ist die Radonmetrologie jedoch nicht beendet. Zur Nutzung der Radonaktivitätskonzentrationsmessung als Tracer für Treibhausgase wird nicht nur eine rückführbare Kalibrierung der Messgeräte benötigt, sondern auch die Kenntnis des genauen, zeitlich variierenden Untergrundes (Baseline) sowie dessen Entwicklung und der Einflussfaktoren. Dazu müssen die atmosphärischen Radonaktivitätskonzentrationen an abgelegenen ozeanischen Orten gemessen werden, um hemisphärisch repräsentative Untergrundwerte zu bestimmen. Dieser Aufgabe widmet sich ein im Rahmen von EURATOM Research and Innovation Actions

gefördertes Projekt NuClim (101166515), welches im Herbst 2024 startet.

Neben Radon in der Außenluft entsteht im Zusammenhang mit moderner Stadtentwicklung eine neue Herausforderung, insbesondere unter dem Aspekt der Notwendigkeit von Energieeinsparung und Energiewende. Die Verringerung des Luftaustauschs in großen Gebäuden bietet Kosteneinsparungen, stößt jedoch aufgrund von Bedenken hinsichtlich des Strahlenschutzes bzgl. Radon auf Widerstand. Da die Radon-Aktivitätskonzentration in der Außenluft in der Regel niedriger ist, ist eine effiziente Belüftung nach wie vor die bewährte Technik zur Verringerung der Exposition. Die verstärkte Belüftung erhöht jedoch den Energieverbrauch und die Wartungskosten und sollte deshalb nur so viel wie nötig eingesetzt werden. Andererseits verbessert sie die Luftqualität in den Innenräumen und reduziert insbesondere die Radon-Aktivitätskonzentrationen. Schwankungen in der Radon-Emanation aus Boden und Baustoffen aufgrund von Temperatur-, Druck- und Feuchtigkeitsschwankungen unterstreichen die Notwendigkeit des Einsatzes intelligenter Sensornetzwerke in vernetzten Gebäuden,



Quelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt

**Abbildung 1.3**

**Aktivitätskonzentrationskalibrierung einer ANSTO 200 L Detektors in der  $\sim 21 \text{ m}^3$  Klimakammer mit Hilfe von drei  $^{222}\text{Rn}$  Emanationsquellen [18]. Die durchgezogenen Linien stellen die aus der Quellemanation berechneten Aktivitätskonzentrationen dar. Die entsprechenden Zahlen sind die zu erreichenden Gleichgewichtsaktivitätskonzentrationen mit Unsicherheiten. Die kreisförmigen, blauen Marker sind die Messwerte des Detektors. Im unteren Bereich der Grafik ist das Residuum als die Differenz zwischen Modell und Messung gezeigt.**

um die Veränderungen der Werte zu überwachen. Diese technologische Anpassung ist zwingend erforderlich, um energieeffiziente Designs für zukünftige Gebäude zu erreichen.

In diesem Zusammenhang steht ein neues Projekt der europäischen Metrologieforschung, welches aus der Stakeholder-Konsultation des Europäischen Metrologie Netzwerkes für den Strahlenschutz (<https://www.euramet.org/european-metrology-networks/radiation-protection>) hervorgegangen ist: „Radon metrology: Sensor networks for big buildings and future cities“ (23IND07, RadonNET<sup>1</sup>)

Der Arbeitsbereich der Gammaskpektrometrie entwickelt sich neben technischen Neuerungen (Detektortypen, Kühlsystemen und Elektronik-

<sup>1</sup> Dieses Projekt wird aus dem EPM-Programm, das von den teilnehmenden Staaten kofinanziert wird, und aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizont 2020“ der Europäischen Union finanziert. 23IND07 RadonNET bezeichnet die EPM-Projektreferenz.

entwicklungen) besonders im Bereich der Auswertung und der Digitalisierung der Abläufe.

Neben der Implementation neuer Verfahren wie full spectrum analysis, DNN deconvolution oder Identifikation via KI hat die PTB deshalb die Entwicklung einer digitalen Dienstleistung zur Validierung von Auswertungsverfahren begonnen.

Angelehnt an den TraCIM Service wird TraGamma ein vollständig automatisiertes Serviceangebot sein, welches mit Hilfe von zur Verfügung gestellten Spektren/Informationen und anhand der Überprüfung der zurückgelieferten Zusammensetzung mittels Referenzdaten, eine Aussage über die Korrektheit der Ergebnisse liefert.

Zur Vorbereitung dieser Dienstleistung werden neue digitale Formate zur Übermittlung der Informationen (Spektren, Kalibrierungen, ...) entwickelt und vorgeschlagen, die auf der Basis des Si digital framework und des Digital Calibration Certificate (DCC) beruhen und durch das XML-Format und Schemata sicherstellen, dass maximale Maschinenlesbarkeit und -interpretierbarkeit gegeben ist [19],[20].

# 2

## ABLEITUNGEN AUS KERNKRAFTWERKEN

A. Heckel<sup>1</sup>, M. Siegfried<sup>2</sup>, U. Gerstmann<sup>3</sup>

Bundesamt für Strahlenschutz

<sup>1</sup>Leitstelle für Fortluft aus kerntechnischen Anlagen (Leitstelle J)

<sup>2</sup>Leitstelle für Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Abfälle und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen (Leitstelle H)

<sup>3</sup>Abteilung Umweltradioaktivität

Die mit Fortluft und Abwasser aus Kernkraftwerken abgeleiteten radioaktiven Stoffe können zur Strahlenexposition der Bevölkerung beitragen. Daher werden diese Ableitungen erfasst und nuklidspezifisch bilanziert. Im atomrechtlichen Genehmigungsverfahren werden maximale Aktivitätsabgaben mit Fortluft und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen festgelegt. Die zulässigen Ableitungen werden dabei so begrenzt, dass die Einhaltung des für die Bevölkerung geltenden Dosisgrenzwertes sichergestellt ist.

### Ausstieg aus der Stromerzeugung durch Kernenergie

Auf Grund der Reaktorkatastrophe in der Kernkraftwerksanlage Fukushima Daiichi in Japan vom 11.03.2011 beschloss die Bundesregierung noch im Juni 2011, die Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität in Deutschland bis zum Ende 2022 zeitlich gestaffelt zu beenden.

Die durch den russischen Angriff auf die Ukraine ausgelöste Gefährdung der Energieversorgung in Deutschland führte dazu, dass die letzten drei Kernkraftwerksblöcke (Isar 2, Emsland, Neckarwestheim 2) noch bis zum 15.04.2023 im sogenannten Streckbetrieb weiterbetrieben wurden und Strom produzierten. Auch in der Nachbetriebs- und Stilllegungsphase werden die Ableitungen der Anlagen grundsätzlich überwacht.

Ausführliche Angaben zur Nutzung der Kernenergie finden sich im „Statusbericht zur Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland 2022“

(<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2023071338507>).

### Ableitungen und Exposition der Bevölkerung

Auf Grund der Umsetzung der Richtlinie 2013/59/Euratom vom 05.12.2013 in nationales Recht wurde das Strahlenschutzrecht ab 2017 neu geordnet. So traten das neue Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) [21] und die novellierte Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [22] überwiegend zum 31.12.2018 in Kraft.

Mit der Inkraftsetzung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) am 08.06.2020 änderte sich die Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung grundlegend: So wurde nun das Lagrange-Partikelmodell für atmosphärische Ausbreitungsrechnungen, die repräsentative Person und realitätsnähere Annahmen beim Verzehr eingeführt. Die Dosisermittlung auf Grundlage der AVV Tätigkeiten wurde erstmals für das Kalenderjahr 2020 umgesetzt.

In den Jahren 2020 und 2021 waren in Deutschland noch sechs Kernkraftwerksblöcke mit einer elektrischen Bruttoleistung von jährlich etwa 8,6 GW in Betrieb. Sie haben zur Stromerzeugung etwa 12 Prozent beigetragen. Im Jahr 2022 reduzierte sich die elektrische Bruttoleistung der drei verbliebenen Kernkraftwerksblöcke auf insgesamt 4,2 GW. In den Tabellen 2.1 und 2.2 sind die bilanzierten Werte der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser aus Kernkraftwerken in den Jahren 2020 bis 2022 zusammengestellt. Die von den zuständigen Behörden ge-

nehmigten jährlichen Aktivitätsabgaben wurden in allen Fällen eingehalten. Die tatsächlichen Jahresableitungen liegen im Allgemeinen weit unter den Genehmigungswerten von beispielsweise ca. 1015 Bq für Edelgase und ca. 1010 Bq für <sup>131</sup>I.

**Tabelle 2.1**  
**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft aus Kernkraftwerken in den Jahren 2020 bis 2022**

Kernkraftwerk	Jahr	Ableitung mit der Fortluft in Bq				
		Edelgase	Schwebstoffe <sup>c)</sup>	<sup>131</sup> I	<sup>14</sup> CO <sub>2</sub>	<sup>3</sup> H
Stade <sup>a)</sup>	2020	n.b.	n.n.	n.b.	n.n.	n.n.
	2021	n.b.	n.n.	n.b.	n.n.	n.n.
	2022	n.b.	n.n.	n.b.	n.n.	n.n.
Biblis Block A <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	3,6 • 10 <sup>9</sup>	1,1 • 10 <sup>11</sup>
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	2,1 • 10 <sup>9</sup>	8,7 • 10 <sup>10</sup>
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	1,8 • 10 <sup>9</sup>	9,4 • 10 <sup>10</sup>
Biblis Block B <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	4,6 • 10 <sup>9</sup>	2,7 • 10 <sup>11</sup>
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	1,4 • 10 <sup>9</sup>	7,4 • 10 <sup>10</sup>
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	1,3 • 10 <sup>9</sup>	5,3 • 10 <sup>10</sup>
Neckarwestheim 1 <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	4,0 • 10 <sup>7</sup>	4,2 • 10 <sup>9</sup>
	2021	n. b.	6,3 • 10 <sup>4</sup>	n. b.	n. n.	3,9 • 10 <sup>9</sup>
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	n. n.	3,8 • 10 <sup>9</sup>
Brunsbüttel <sup>a)</sup>	2020	n. n.	1,7 • 10 <sup>6</sup>	n. n.	4,4 • 10 <sup>9</sup>	1,2 • 10 <sup>10</sup>
	2021	n. n.	1,8 • 10 <sup>6</sup>	n. n.	3,5 • 10 <sup>9</sup>	1,5 • 10 <sup>10</sup>
	2022	n. n.	2,8 • 10 <sup>6</sup>	n. n.	1,1 • 10 <sup>9</sup>	1,2 • 10 <sup>10</sup>
Isar 1 <sup>a)</sup>	2020	n. n.	n. n.	n. n.	3,7 • 10 <sup>8</sup>	8,5 • 10 <sup>9</sup>
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	4,3 • 10 <sup>7</sup>	4,8 • 10 <sup>9</sup>
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	1,6 • 10 <sup>8</sup>	1,7 • 10 <sup>9</sup>
Unterweser <sup>a)</sup>	2020	n. n.	4,8 • 10 <sup>4</sup>	n. b.	6,0 • 10 <sup>8</sup>	2,0 • 10 <sup>10</sup>
	2021	n. b.	4,4 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	1,3 • 10 <sup>9</sup>	2,3 • 10 <sup>10</sup>
	2022	n. b.	4,0 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	5,8 • 10 <sup>8</sup>	8,9 • 10 <sup>9</sup>
Philippsburg 1 <sup>a)</sup>	2020	n. b.	8,0 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	2,5 • 10 <sup>10</sup>	2,5 • 10 <sup>10</sup>
	2021	n. b.	1,3 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	2,0 • 10 <sup>10</sup>	6,3 • 10 <sup>9</sup>
	2022	n. b.	6,3 • 10 <sup>4</sup>	n. b.	1,5 • 10 <sup>10</sup>	9,9 • 10 <sup>8</sup>
Grafenrheinfeld <sup>a)</sup>	2020	9,0 • 10 <sup>9</sup>	2,4 • 10 <sup>4</sup>	n. n.	4,5 • 10 <sup>8</sup>	1,3 • 10 <sup>11</sup>
	2021	n. b.	9,5 • 10 <sup>4</sup>	n. b.	3,4 • 10 <sup>8</sup>	7,7 • 10 <sup>10</sup>
	2022	n. b.	2,0 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	2,3 • 10 <sup>8</sup>	4,6 • 10 <sup>9</sup>
Krümmel <sup>b)</sup>	2020	n. n.	n. n.	n. n.	3,9 • 10 <sup>9</sup>	1,5 • 10 <sup>10</sup>
	2021	n. n.	8,9 • 10 <sup>4</sup>	n. n.	5,4 • 10 <sup>9</sup>	1,5 • 10 <sup>10</sup>
	2022	n. b.	2,1 • 10 <sup>4</sup>	n. b.	9,6 • 10 <sup>8</sup>	2,2 • 10 <sup>10</sup>
Gundremmingen Block B <sup>a)</sup> und C	2020	6,5 • 10 <sup>12</sup>	5,2 • 10 <sup>5</sup>	1,2 • 10 <sup>8</sup>	1,5 • 10 <sup>11</sup>	8,5 • 10 <sup>10</sup>
	2021	6,3 • 10 <sup>12</sup>	4,3 • 10 <sup>5</sup>	6,7 • 10 <sup>7</sup>	2,6 • 10 <sup>11</sup>	1,5 • 10 <sup>11</sup>
	2022	1,3 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	5,3 • 10 <sup>5</sup>	1,0 • 10 <sup>10</sup>	7,0 • 10 <sup>10</sup>

**Tabelle 2.1**
**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft aus Kernkraftwerken in den Jahren 2020 bis 2022**

Kernkraftwerk	Jahr	Ableitung mit der Fortluft in Bq				
		Edelgase	Schwebstoffe <sup>c)</sup>	<sup>131</sup> I	<sup>14</sup> CO <sub>2</sub>	<sup>3</sup> H
Grohnde	2020	1,5 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	n. n.	4,8 • 10 <sup>10</sup>	1,6 • 10 <sup>11</sup>
	2021	n. n.	n. n.	n. n.	3,7 • 10 <sup>10</sup>	1,8 • 10 <sup>11</sup>
	2022	n. n.	n. n.	n. n.	9,8 • 10 <sup>10</sup>	5,3 • 10 <sup>11</sup>
Philippsburg 2	2020	1,3 • 10 <sup>11</sup>	8,4 • 10 <sup>4</sup>	n. n.	8,3 • 10 <sup>10</sup>	6,1 • 10 <sup>11</sup>
	2021	7,3 • 10 <sup>10</sup>	n. n.	n. b.	7,8 • 10 <sup>9</sup>	4,4 • 10 <sup>11</sup>
	2022	1,7 • 10 <sup>10</sup>	n. n.	n. b.	2,9 • 10 <sup>9</sup>	1,9 • 10 <sup>11</sup>
Brokdorf	2020	8,9 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	4,0 • 10 <sup>5</sup>	1,4 • 10 <sup>11</sup>	1,0 • 10 <sup>11</sup>
	2021	2,0 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	n. n.	1,3 • 10 <sup>11</sup>	1,4 • 10 <sup>11</sup>
	2022	1,9 • 10 <sup>10</sup>	3,4 • 10 <sup>5</sup>	n. n.	2,7 • 10 <sup>11</sup>	1,3 • 10 <sup>11</sup>
Isar 2	2020	1,1 • 10 <sup>12</sup>	n. n.	n. n.	2,5 • 10 <sup>11</sup>	1,5 • 10 <sup>11</sup>
	2021	1,6 • 10 <sup>12</sup>	n. n.	n. n.	7,3 • 10 <sup>10</sup>	1,5 • 10 <sup>11</sup>
	2022	1,1 • 10 <sup>12</sup>	n. n.	n. n.	6,2 • 10 <sup>10</sup>	1,9 • 10 <sup>11</sup>
Emsland	2020	1,6 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	n. n.	8,3 • 10 <sup>10</sup>	6,0 • 10 <sup>11</sup>
	2021	1,7 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	n. n.	9,6 • 10 <sup>10</sup>	7,7 • 10 <sup>11</sup>
	2022	1,2 • 10 <sup>11</sup>	3,7 • 10 <sup>4</sup>	n. n.	7,5 • 10 <sup>10</sup>	6,8 • 10 <sup>11</sup>
Neckarwestheim 2	2020	1,4 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	n. n.	1,5 • 10 <sup>11</sup>	2,1 • 10 <sup>11</sup>
	2021	1,1 • 10 <sup>11</sup>	n. n.	n. n.	1,6 • 10 <sup>11</sup>	2,3 • 10 <sup>11</sup>
	2022	9,6 • 10 <sup>10</sup>	n. n.	n. n.	1,1 • 10 <sup>11</sup>	1,9 • 10 <sup>11</sup>
KKR Rheinsberg <sup>a)</sup>	2020	n. b.	4,0 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	n. b.	n. b.
	2021	n. b.	1,6 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	n. b.	n. b.
	2022	n. b.	1,6 • 10 <sup>5</sup>	n. b.	n. b.	n. b.
KGG Gundremmingen <sup>a) d)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. n.	2,5 • 10 <sup>7</sup>	1,9 • 10 <sup>9</sup>
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	1,1 • 10 <sup>7</sup>	9,5 • 10 <sup>8</sup>
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	3,5 • 10 <sup>7</sup>	8,0 • 10 <sup>8</sup>
KWL Lingen <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	n. n.	n. n.
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	n. n.	n. n.
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	n. n.	n. n.
KWO Obrigheim <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	2,2 • 10 <sup>8</sup>	6,9 • 10 <sup>8</sup>
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	2,1 • 10 <sup>8</sup>	3,5 • 10 <sup>8</sup>
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	2,4 • 10 <sup>7</sup>	3,9 • 10 <sup>8</sup>
KWW Würgassen <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	4,8 • 10 <sup>7</sup>	8,9 • 10 <sup>8</sup>
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	4,2 • 10 <sup>7</sup>	7,6 • 10 <sup>8</sup>
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	4,0 • 10 <sup>7</sup>	7,0 • 10 <sup>8</sup>
KGR Greifswald <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.

**Tabelle 2.1**

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Fortluft aus Kernkraftwerken in den Jahren 2020 bis 2022**

Kernkraftwerk	Jahr	Ableitung mit der Fortluft in Bq				
		Edelgase	Schwebstoffe <sup>c)</sup>	<sup>131</sup> I	<sup>14</sup> CO <sub>2</sub>	<sup>3</sup> H
THTR Hamm-Uentrop <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	n. n.	$6,8 \cdot 10^7$
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	n. n.	$5,4 \cdot 10^7$
	2022	n. b.	$7,3 \cdot 10^1$	n. b.	n. n.	$4,4 \cdot 10^7$
KMK Mülheim-Kärlich <sup>a)</sup>	2020	n. b.	n. n.	n. b.	n. n.	$3,7 \cdot 10^8$
	2021	n. b.	n. n.	n. b.	$1,8 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^9$
	2022	n. b.	n. n.	n. b.	$7,7 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^8$

a) Anlage stillgelegt    b) Anlage dauerhaft im Nichtleistungsbetrieb    d) mit Technologiezentrum  
c) Halbwertszeit > 8 Tage, ohne <sup>131</sup>I, einschließlich Strontium und Alphastrahler  
n.n. nicht nachgewiesen (Aktivitätsableitung unter Nachweisgrenze)  
n.b. nicht bestimmt

**Tabelle 2.2**

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken in den Jahren 2020 bis 2022**

Kernkraftwerk	Jahr	Ableitung mit dem Abwasser in Bq		
		Spalt- und Aktivierungsprodukte (außer Tritium)	<sup>3</sup> H	Alpha-Strahler
Neckarwestheim	2020	nn	1,74E+13	nn
	2021	nn	1,94E+13	nn
	2022	nn	1,13E+13	nn
Biblis	2020	1,89E+08	3,12E+12	2,40E+05
	2021	2,47E+07	2,48E+12	nn
	2022	9,94E+06	8,65E+10	3,39E+05
Brokdorf	2020	nn	2,05E+13	nn
	2021	nn	2,85E+13	nn
	2022	8,07E+08	3,42E+12	nn
Gundremming	2020	1,74E+08	9,97E+11	nn
	2021	1,01E+08	1,14E+12	nn
	2022	2,94E+08	7,62E+11	1,73E+05
Greifswald	2020	2,80E+04	1,60E+05	nn
	2021	nn	1,80E+08	nn
	2022	nn	8,30E+07	nn
Brunsbüttel	2020	3,98E+06	2,10E+10	nn
	2021	3,67E+07	3,27E+09	nn
	2022	1,91E+07	4,48E+09	nn
Emsland	2020	1,39E+06	1,36E+13	nn
	2021	3,76E+06	1,58E+13	nn
	2022	9,70E+05	9,89E+12	nn
Grafenrheinfeld	2020	1,20E+06	2,79E+11	8,48E+04
	2021	4,74E+05	6,59E+11	1,21E+05
	2022	3,16E+05	4,08E+11	6,21E+04

**Tabelle 2.2**

**Ableitung radioaktiver Stoffe mit dem Abwasser aus Kernkraftwerken in den Jahren 2020 bis 2022**

Kernkraftwerk	Jahr	Ableitung mit dem Abwasser in Bq		
		Spalt- und Aktivierungsprodukte (außer Tritium)	<sup>3</sup> H	Alpha-Strahler
Isar 1	2020	3,46E+07	1,10E+10	nn
	2021	2,79E+07	4,60E+10	nn
	2022	3,72E+07	2,70E+09	nn
Isar 2	2020	9,00E+04	2,20E+13	nn
	2021	2,40E+05	2,60E+13	nn
	2022	9,30E+04	2,60E+13	nn
Krümmel	2020	1,09E+06	1,84E+10	nn
	2021	7,69E+06	2,57E+10	nn
	2022	4,58E+06	5,07E+09	nn
Philippsburg 1	2020	1,22E+07	1,27E+11	nn
	2021	4,76E+06	6,86E+10	nn
	2022	3,79E+06	1,60E+09	nn
Philippsburg 2	2020	2,11E+08	5,64E+12	nn
	2021	2,78E+07	6,03E+11	nn
	2022	1,16E+07	8,51E+11	nn
Rheinsberg	2020	1,80E+06	nn	6,80E+04
	2021	1,30E+06	2,42E+05	7,43E+04
	2022	2,39E+06	3,95E+05	7,11E+04
Stade	2020	6,99E+03	8,47E+05	9,22E+01
	2021	1,45E+04	3,31E+06	8,82E+01
	2022	1,04E+04	5,90E+06	2,14E+02
Unterweser	2020	3,71E+06	4,64E+10	2,08E+05
	2021	1,12E+07	1,90E+11	2,68E+05
	2022	5,80E+06	3,64E+10	9,43E+04
Mühlheim-Kärlich	2020	4,56E+08	9,31E+06	nn
	2021	6,20E+05	3,62E+06	nn
	2022	1,25E+06	5,93E+06	nn
Grohnde	2020	nn	1,10E+13	nn
	2021	1,90E+06	1,98E+13	nn
	2022	1,13E+07	1,70E+13	nn
Lingen	2020	2,18E+05	2,12E+06	2,03E+03
	2021	6,22E+05	2,70E+07	3,97E+03
	2022	2,13E+03	nn	1,35E+03
Obrigheim	2020	5,16E+05	2,91E+07	5,24E+02
	2021	2,09E+05	1,71E+06	6,59E+02
	2022	nn	nn	nn
Summe	2020	1,09E+09	9,48E+13	6,31E+05
	2021	2,51E+08	1,15E+14	4,68E+05
	2022	1,21E+09	6,98E+13	7,41E+05

Die Daten über die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser aus Kernkraftwerken und die Werte der daraus resultierenden Exposition werden in den jährlichen Berichten der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag über „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ und ausführlicher in den gleichnamigen Jahresberichten des BMUV [1] veröffentlicht.

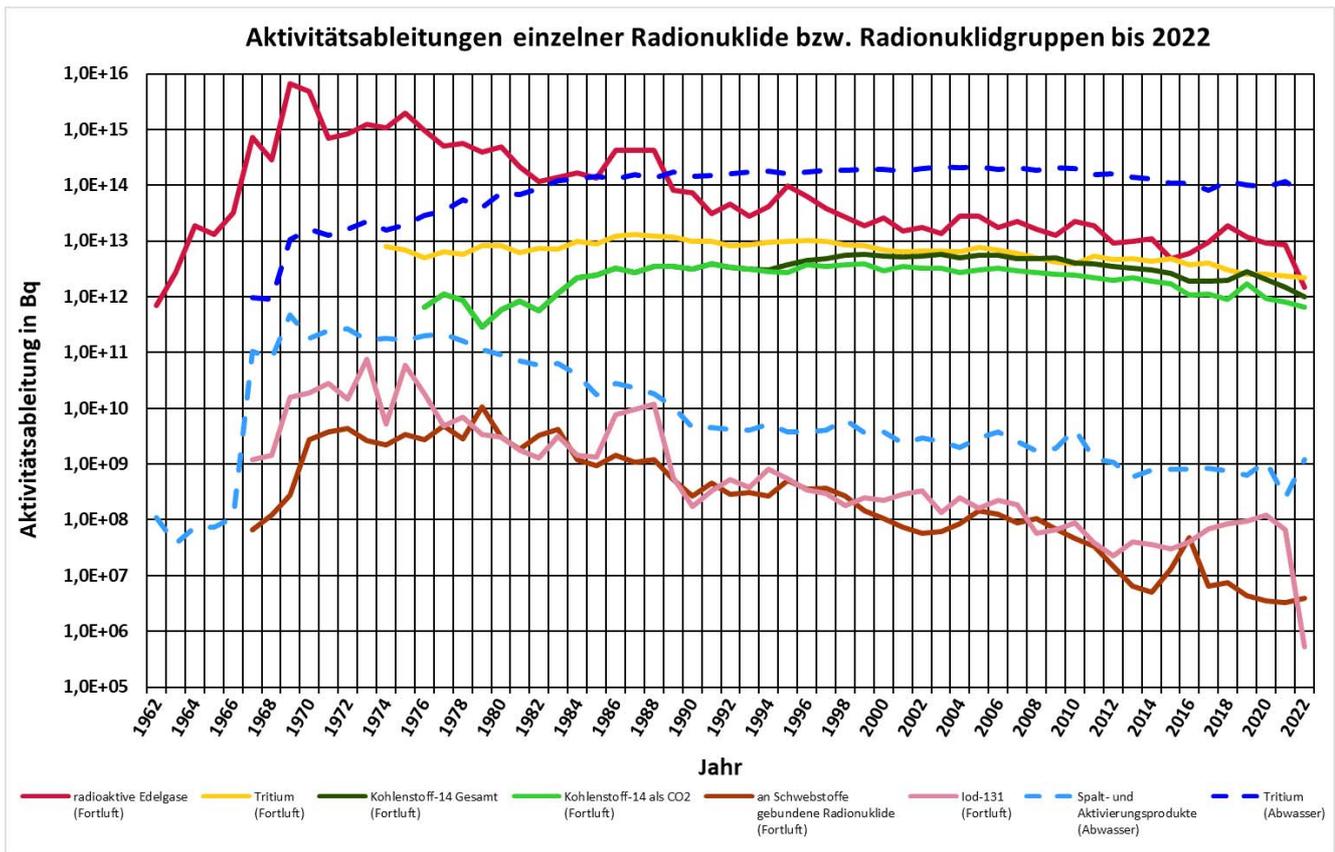
### Bewertung

Die Genehmigungswerte für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Fortluft und Abwasser aus Kernkraftwerken werden in den meisten Fällen nur zu einem geringen Bruchteil ausgeschöpft. Somit unterschreiten auch die aus den Aktivitätsableitungen berechneten Werte der jährlichen Exposition erheblich die in der Strahlenschutzverordnung festgelegten Dosisgrenzwerte von beispielsweise 0,3 mSv für die effektive Dosis. Die mit den ungünstigen Annahmen, die für die Referenzperson vorgegeben sind, berechneten Expositionswerte in der Umgebung der Kernkraftwerke liegen in der Regel unter 0,01 mSv pro Jahr; mit realistischeren Annahmen ergeben sich deutlich kleinere Dosiswerte. Eine effektive Dosis von 0,01 mSv entspricht weniger als einem Hundertstel der jährlichen effektiven Dosis durch natürliche Strahlenquellen, die in Deutschland im Mittel 2,1 mSv beträgt und je nach örtlichen Gegebenheiten bis zu 10 mSv erreichen kann.

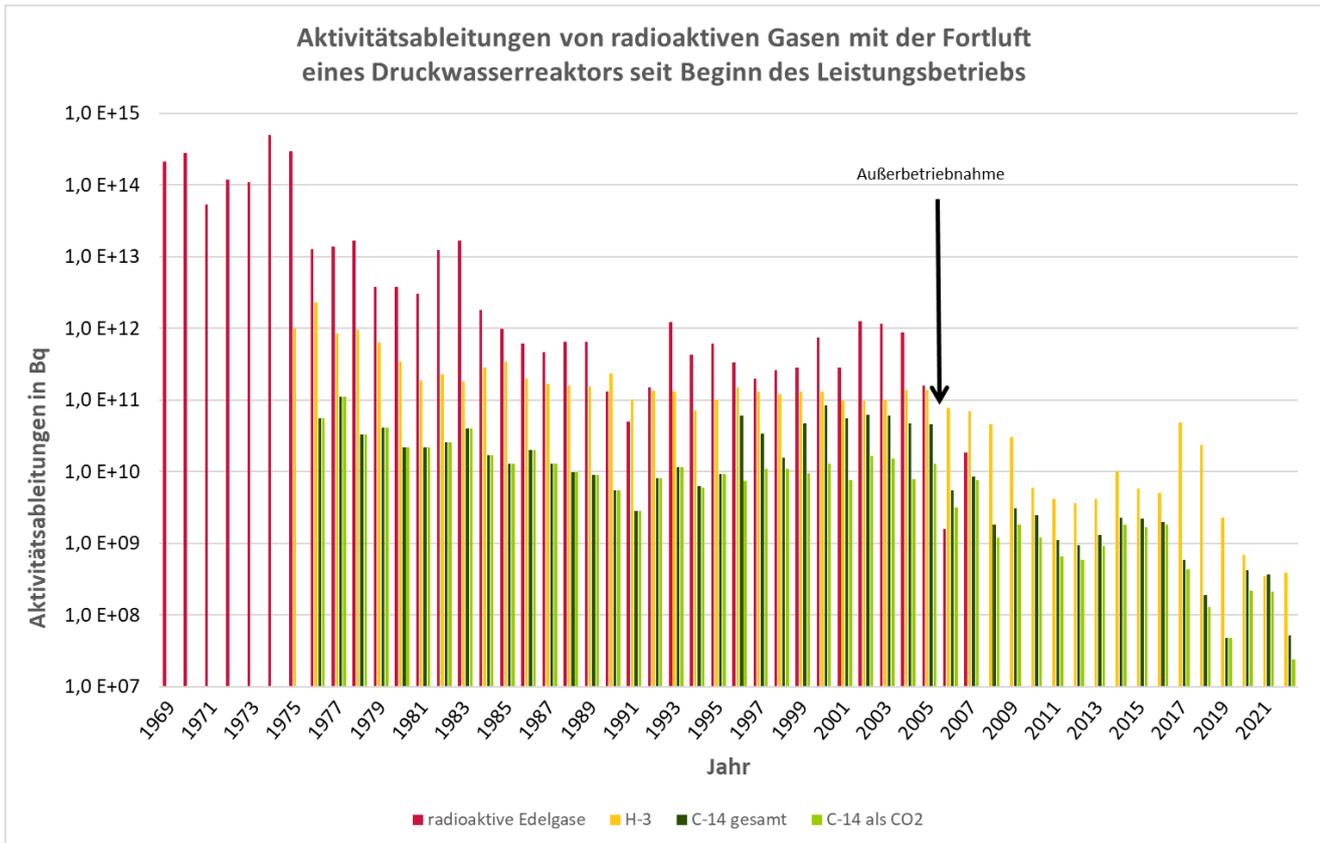
### Rückblick auf 60 Jahre friedliche Nutzung der Kernenergie

Im Jahr 1962 ging mit dem Versuchskernkraftwerk Kahl der erste Siedewasserreaktor (SWR) und im Jahr 1969 mit dem Kernkraftwerk Obrigheim der erste Druckwasserreaktor (DWR) in den Leistungsbetrieb. Im Jahr 1989 nahm dann mit Neckarwestheim II der jüngste Kernkraftwerksreaktor seinen Betrieb auf. Einhergehend mit dem Ausbau der friedlichen Nutzung der Kernenergie

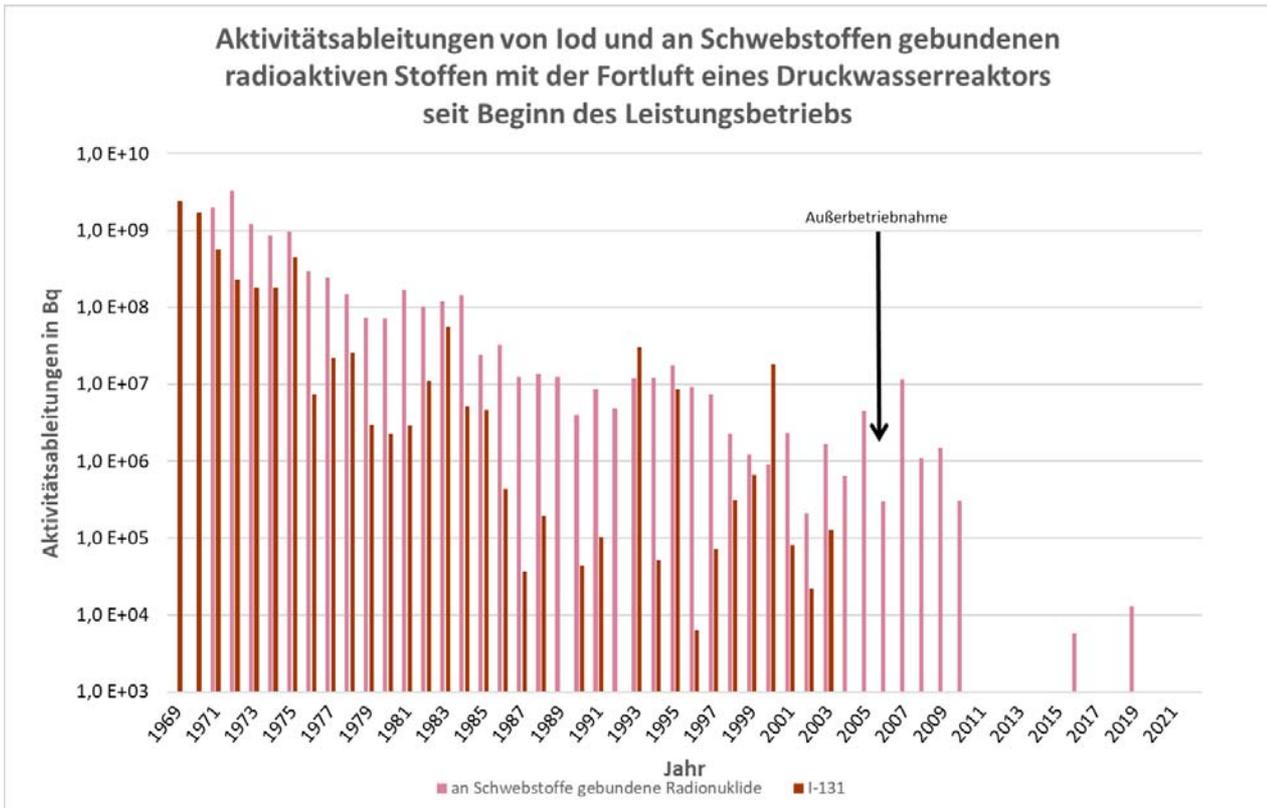
in Deutschland, sprich der Inbetriebnahme von Kernkraftwerken (oder formal-juristisch mit „der ortsfesten Errichtung und dem Betrieb von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zum Zwecke der gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“), und der Verabschiedung der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) wurde der Kreis der Leitstellen des Bundes für die Überwachung der Umweltradioaktivität um die Leitstellen für die Überwachung von Ableitungen aus Kernkraftwerken über die Abluft und über Abwässer erweitert. Beide Funktionen werden heute vom Bundesamt für Strahlenschutz wahrgenommen, die auch die Zusammenführung und Berichterstattung umfassen. Während ihrer gesamten Laufzeit wurden die kerntechnischen Anlagen technisch kontinuierlich verbessert, um die Ableitungen mit der Fortluft und dem Abwasser und damit die Exposition der Bevölkerung über den Luft- und Wasserpfad zu reduzieren. Abbildung 2.1 zeigt die jährlichen Aktivitätsableitungen einzelner Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen mit der Fortluft und dem Abwasser summiert über alle Kernkraftwerke von 1962 bis 2022. In den Abbildungen 2.2 und 2.3 sind beispielhaft die Aktivitätsableitungen mit der Fortluft eines Druckwasserreaktors von Inbetriebnahme bis heute aufgezeigt, in Abbildung 2.4 die entsprechenden Ableitungen mit dem Abwasser. Aus diesen Abbildungen ist ersichtlich, dass auch nach Außerbetriebnahme des Kernkraftwerks radioaktive Stoffe mit der Fortluft, aber auch mit dem Abwasser abgeleitet werden. Deshalb ist eine Emissionsüberwachung auch über den Zeitpunkt der Abschaltung hinaus notwendig. Die Standorte der Kernkraftwerke und die Bruttostromerzeugung in den Jahren 2020 bis 2022 sind aus Abbildung 2.1 zu ersehen.



**Abbildung 2.1**  
**Jährliche Aktivitätsableitungen einzelner Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen mit der Fortluft und dem Abwasser von 1962 bis 2022, jeweils bezogen auf alle Kernkraftwerke.**

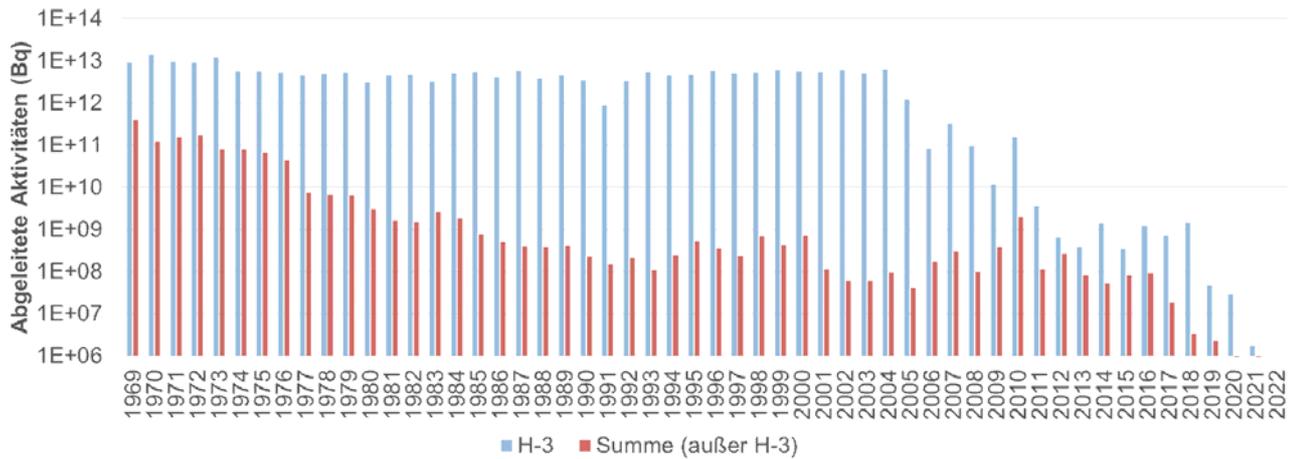


**Abbildung 2.2**  
**Jährliche Aktivitätsableitungen von radioaktiven Gasen mit der Fortluft eines Druckwasserreaktors, seit Beginn des Leistungsbetriebs und mit Angabe der Außerbetriebnahme.**



**Abbildung 2.3**  
 Jährliche Aktivitätsableitungen von Iod-131 und an Schwebstoffen gebundenen radioaktiven Stoffen mit der Fortluft eines Druckwasserreaktors, seit Beginn des Leistungsbetriebs und mit Angabe der Außerbetriebnahme.

**Abgeleitete Aktivitäten von H-3 und allen restlichen radioaktiven Stoffen mit dem Abwasser aus einem Druckwasserreaktor seit Beginn des Leistungsbetriebes**



**Abbildung 2.4**  
**Jährliche Aktivitätsableitungen von Tritium und anderen radioaktiven Stoffen mit dem Abwasser aus einem Druckwasserreaktor, seit Beginn des Leistungsbetriebes.**

# 3

## DIE MESSNETZE FÜR LUFT UND NIEDERSCHLAG

A. Dalheimer, R. Haas-van den Heuvel, M. Mirsch, H. Diedrich-Roesch, G. Frank

Deutscher Wetterdienst, Zentrale Offenbach/Main  
Leitstelle für Luft und Niederschlag (Leitstelle A)

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), der Deutsche Wetterdienst (DWD) und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) sind mit der Überwachung der Radioaktivität in der Atmosphäre gesetzlich beauftragt.

Die Messnetze des BfS und des DWD sowie dessen radiochemisches Zentrallabor in Offenbach sind Bestandteile des Integrierten Mess- und Informationssystems zur Überwachung der Umweltradioaktivität (IMIS). Detaillierte Angaben zu den Messnetzen finden sich im Internet unter [www.bfs.de/DE/themen/ion/notfallschutz/bfs/umwelt/imis.html](http://www.bfs.de/DE/themen/ion/notfallschutz/bfs/umwelt/imis.html) bzw. auf den Folgeseiten von [www.dwd.de/radioaktivitaet](http://www.dwd.de/radioaktivitaet) sowie in den Berichten der vorangegangenen Jahre.

Zusätzlich werden vom BfS, dem DWD und der PTB Untersuchungen im Rahmen der Spurenanalyse durchgeführt (Kapitel 4). Die erhobenen Daten werden nicht nur für IMIS verwendet, sondern auch im Rahmen der europaweiten Überwachung der Umweltradioaktivität für den internationalen Datenaustausch und die EU-Berichterstattung bereitgestellt.

Weiterhin ist der DWD durch Messungen von  $^{222}\text{Rn}$  und  $^7\text{Be}$  auf der Zugspitze in ein spezielles Messprogramm (Global Atmosphere Watch Programme, GAW) der Weltorganisation der Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) eingebunden.

### Radioaktive Stoffe in der Luft und im Niederschlag

Die Radioaktivität in der Luft und im Niederschlag wird an 48 Messstellen durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) ständig überwacht. Dazu gehört auch die natürliche Radioaktivität in der Luft als Aktivitätskonzentration der aerosolpartikelgebundenen Radonfolgeprodukte  $^{214}\text{Pb}$  und  $^{214}\text{Bi}$ . Für künstliche Radionuklide wie zum Beispiel  $^{131}\text{I}$  und  $^{137}\text{Cs}$  liegen im Normalbetrieb die berechneten Nachweisgrenzen der Luftmonitore zwischen  $5\text{ mBq/m}^3$  und  $10\text{ mBq/m}^3$ . An allen Messstellen werden über einen Zeitraum von einer Woche zu dem Filter mit einem hohen Luftdurchsatz besaugt und diese im Anschluss gammaspektrometrisch untersucht. Die Nachweisgrenzen liegen zwischen  $0,2\text{ }\mu\text{Bq/m}^3$  und  $1\text{ }\mu\text{Bq/m}^3$  bezogen auf das Radionuklid  $^{137}\text{Cs}$ . Weitere Untersuchungen

der Luft- und Niederschlagsproben erfolgen im radiochemischen Labor in Offenbach.

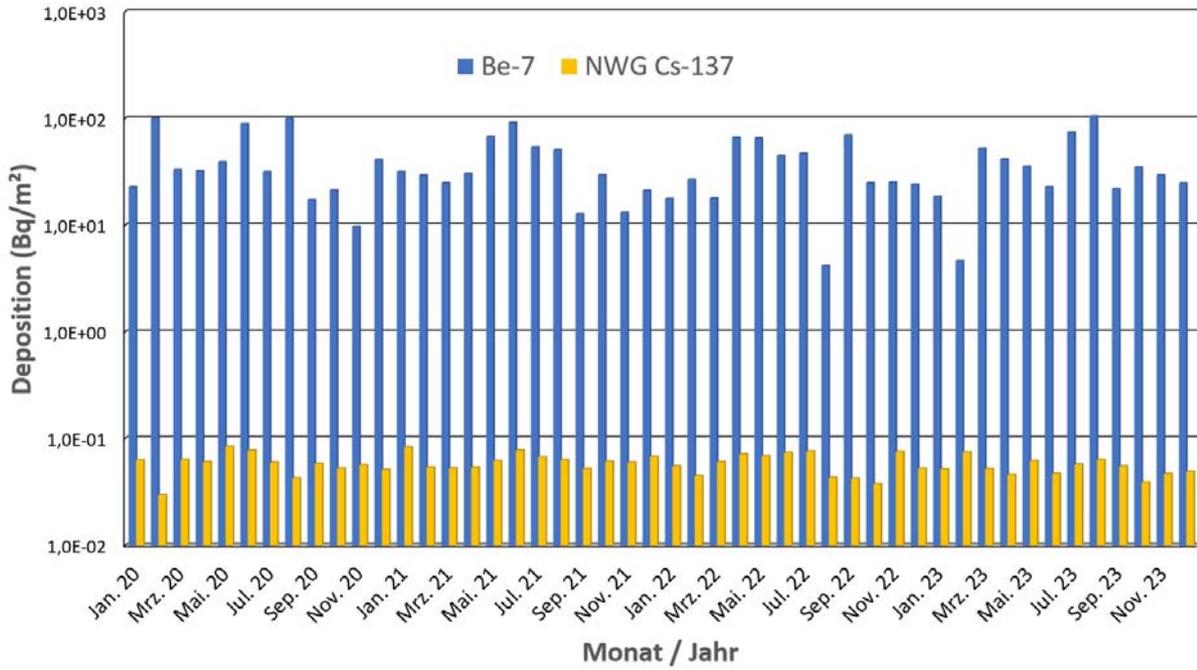
Die Werte für die auf einzelne Radionuklide bezogene Deposition wurden anhand der vollständig eingedampften Monatsniederschlagsproben gammaspektrometrisch ermittelt. Exemplarisch zeigt Abbildung 3.1 für die Jahre 2020 bis 2023 anhand der Messstationen Potsdam und Offenbach die Messergebnisse für die Deposition von  $^7\text{Be}$  und  $^{137}\text{Cs}$ . Für  $^{137}\text{Cs}$  wurde kein Wert oberhalb der Nachweisgrenze festgestellt. Die errechneten Nachweisgrenzen sind dabei abhängig vom jeweiligen Standort, der Niederschlagsmenge und dem für die Messung verwendeten Detektor.

Mittels radiochemischer Trennverfahren wurden im Labor Analysen der Aerosol- und der Niederschlagsproben von den Stationen München, Offenbach, Potsdam und Schleswig, bezogen auf ein Sammelintervall von einem Monat, zur Bestimmung von  $^{90}\text{Sr}$  und einzelner Uran-, Plutonium- und Americium-Isotope sowie für Tritium im Niederschlag durchgeführt. Für die  $^{90}\text{Sr}$ -Bestimmung und zur Analyse der Alpha-Strahler wird die Extraktionschromatographie bzw. ein Ionenaustauschverfahren eingesetzt.

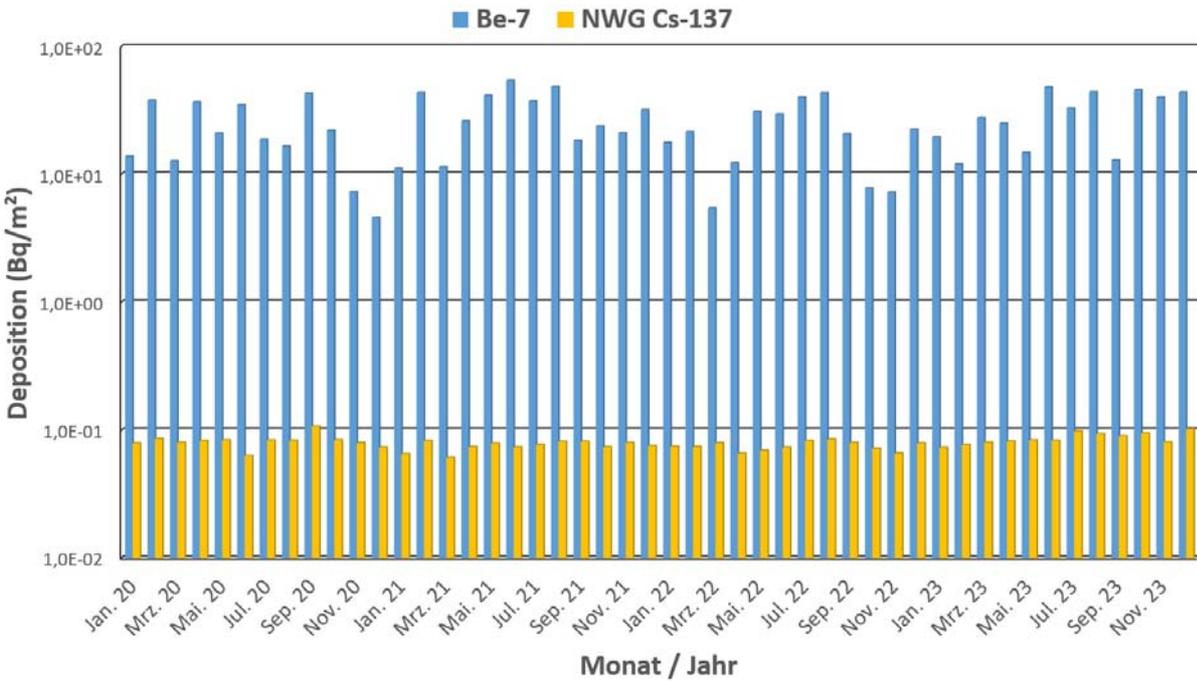
Die erreichten Nachweisgrenzen für die Messung der Aerosol- und der Niederschlagsproben sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Nachweisgrenzen für  $^{90}\text{Sr}$  konnten durch eine Änderung des Messverfahrens ab Januar 2022 gesenkt werden, was sich insbesondere bei den Niederschlagsproben bemerkbar macht. Bei geringen Niederschlagsmengen liegen die erreichten Nachweisgrenzen deutlich über den im Schnitt erreichten Nachweisgrenzen. Bei den Urannukliden  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  handelt es sich um natürliche Isotope, die in der Luft oder im Niederschlag immer in Spuren nachzuweisen sind.

Die Messergebnisse für die Aktivitätskonzentrationen dieser natürlichen Nuklide liegen im erwarteten Bereich und sind der Übersichtlichkeit halber zusammengefasst als Summe für die Stationen Offenbach und Potsdam in Abbildung 3.2 dargestellt. Auf natürlichem Weg entstehen durch Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Atomen der hohen Atmosphärenschichten neue radioaktive Nuklide, wie z. B. Tritium. Durch die dauernde Neubildung und den radioaktiven Zerfall in der Atmosphäre und den damit in stän-

**DWD-Station Offenbach**  
Nuklidspezifische Messungen Niederschlagsdeposition



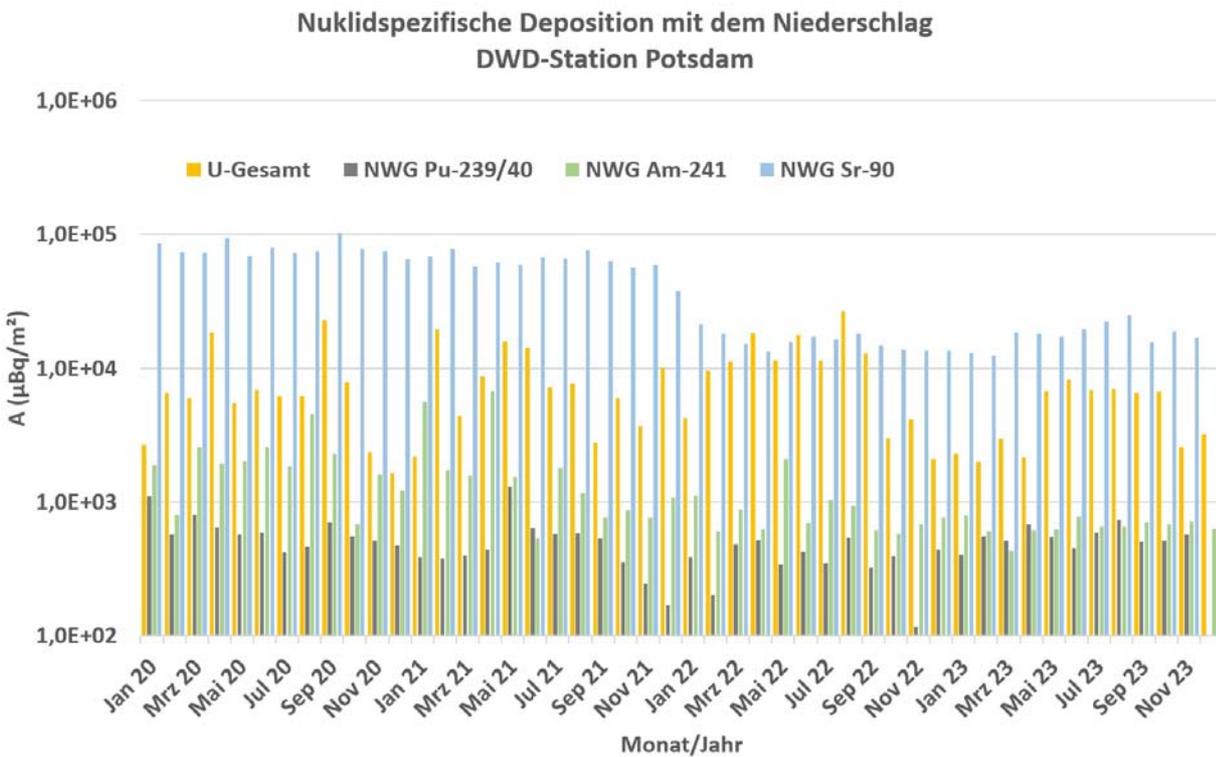
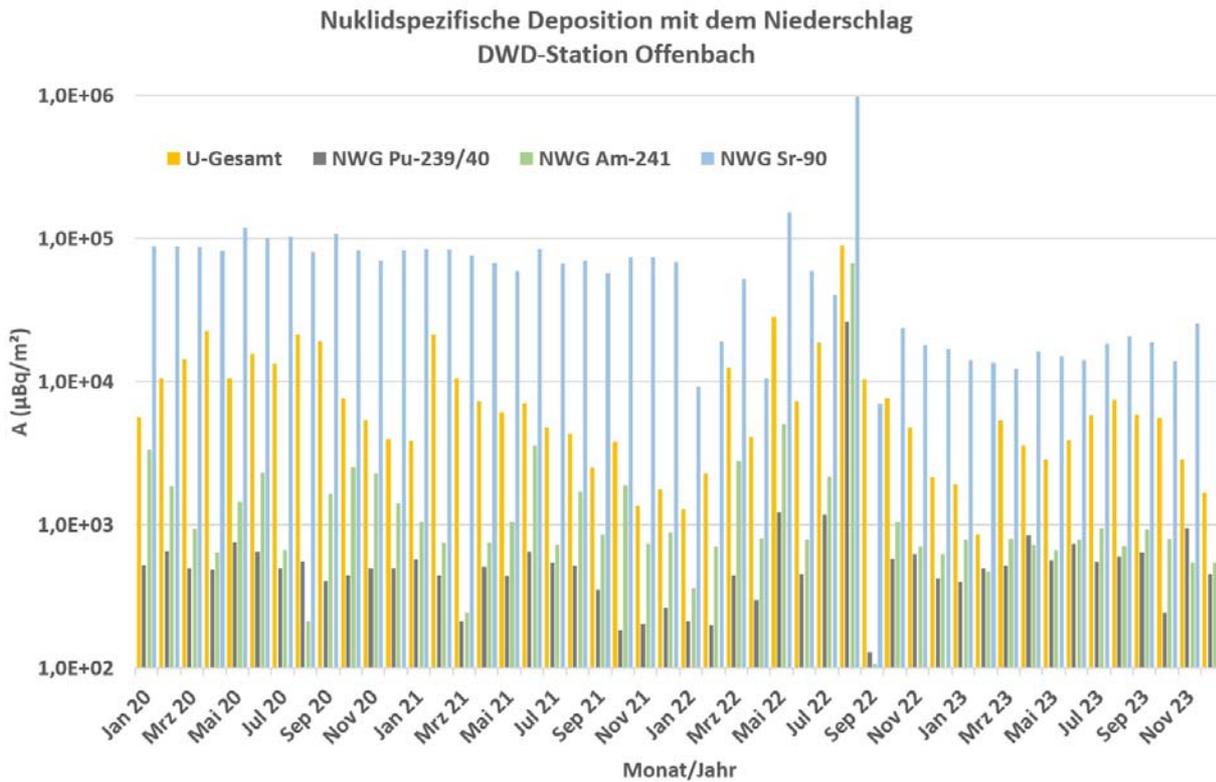
**DWD-Station Potsdam**  
Nuklidspezifische Messungen Niederschlagsdeposition



Quelle: Deutscher Wetterdienst

**Abbildung 3.1**

Dem Erdboden im Mittel pro Monat durch Niederschläge in den Jahren 2020 bis 2023 zugeführte Aktivität von <sup>7</sup>Be und <sup>137</sup>Cs in Bq/m<sup>2</sup> an den DWD-Stationen Offenbach und Potsdam



Quelle: Deutscher Wetterdienst

**Abbildung 3.2**

Dem Erdboden im Mittel pro Monat durch Niederschläge in den Jahren 2020 bis 2023 zugeführte Aktivität von Uran ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ),  $(^{239+240})\text{Pu}$ -,  $^{241}\text{Am}$  und  $^{90}\text{Sr}$  in  $\mu\text{Bq}/\text{m}^2$  an den DWD-Stationen Offenbach und Potsdam

digem Austausch stehenden Ozeanen und biologischen Systemen bildet sich ein Gleichgewicht aus. Seit 1944 wurden zudem große Mengen von

Radionukliden, wie z. B. auch Tritium, bei der militärischen und der zivilen Nutzung der Kernenergie in die Umwelt freigesetzt.

**Tabelle 3.1**

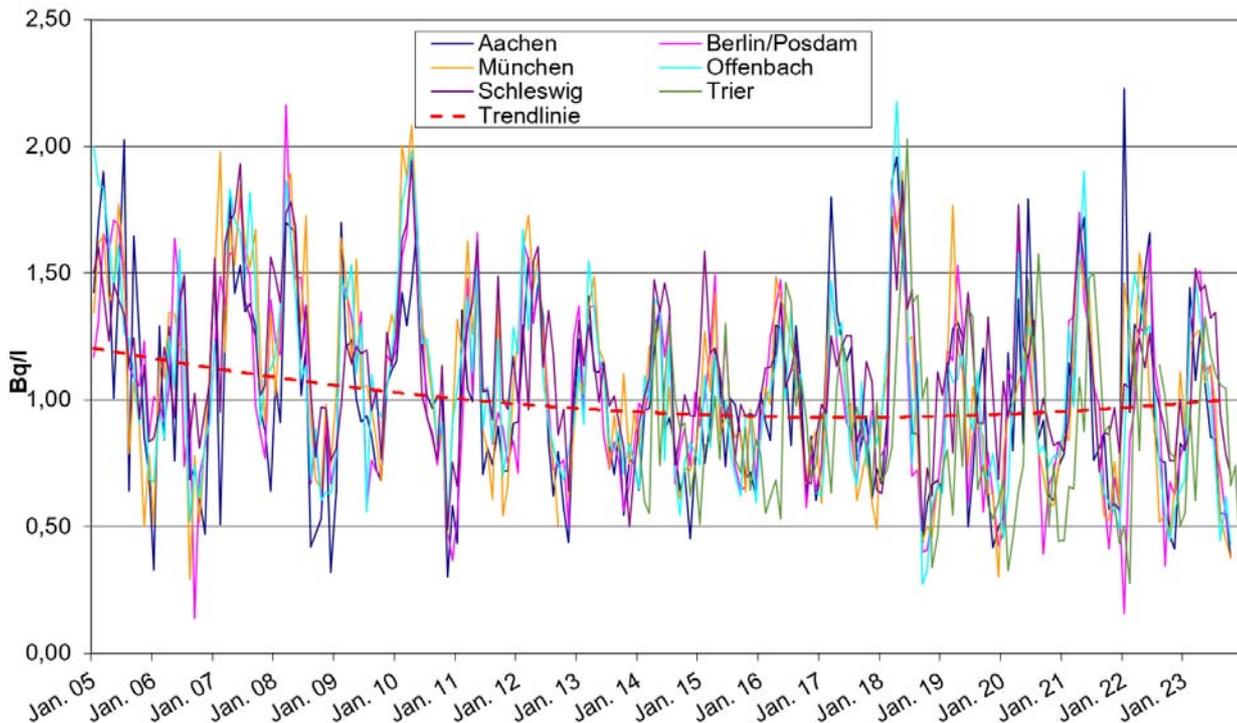
**Geforderte und erreichte Nachweisgrenzen für  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{(239+240)}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Am}$**

	Nachweisgrenze	$^{90}\text{Sr}$	$^{234}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$	$^{(239+240)}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Luft	gefordert nBq/m <sup>3</sup>	1000	100	100	100
	erreicht nBq/m <sup>3</sup>	38 - 5963	2 - 211	1 - 138	1 - 1681
Niederschlag	gefordert µBq/l	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	erreicht µBq/l	382 - 117818	24 - 21581	95 - 26261	106 - 67244

So lässt sich die derzeit gemessene Aktivitätskonzentration von Tritium im Niederschlag auch heute noch zum Teil auf die oberirdischen Kernwaffenversuche zurückführen. Seit 2005 werden beim DWD Tritiumbestimmungen über elektrolytische Anreicherung im Niederschlag durchgeführt. Durch das elektrolytische Anreicherungs-

verfahren konnte die Nachweisgrenze von 3 Bq/l bei der Direktmessung auf ca. 0,3 Bq/l nach der Anreicherung gesenkt werden. An den Spurenmessstellen Aachen, München, Offenbach, Schleswig, Berlin (ab 2010 Potsdam) und Trier (ab 2014) wird der Niederschlag in speziellen Niederschlagsauffangwannen gesammelt. Regelmäßige

**Tritiumaktivität im Niederschlag an den Messstellen Aachen, Berlin/Potsdam, München, Offenbach, Trier Monatsproben 2005-2023**



Quelle: Deutscher Wetterdienst

**Abbildung 3.3**

**Aktivitätskonzentration von Tritium im Niederschlag an den DWD-Stationen Aachen, München, Offenbach, Potsdam, Schleswig und Trier in den Jahren 2005 bis 2023**

Vergleichsmessungen mit dem Bundesamt für Gewässerkunde fanden an der Messstelle Trier statt. Ein Aliquot des Niederschlages wird als Monatsmischprobe im Labor in Offenbach aufgearbeitet und für die Elektrolyse vorbereitet. Anschließend werden die Monatsmischproben elektrolytisch angereichert und mittels Flüssigszintillationszähler (LSC) der Tritiumgehalt in der Probe bestimmt.

Abbildung 3.3 zeigt die Tritium-Aktivitätskonzentrationen der Monatsmischproben im Niederschlag nach elektrolytischer Anreicherung an den RA-Messstellen Aachen, Potsdam, München, Offenbach, Schleswig und Trier von 2005 bis 2023

mit Messwerten zwischen 0,4 Bq/l und 2,3 Bq/l. Generell variieren derzeit je nach Jahreszeit und den kontinentalen Luftmassenverfrachtungen die Tritiumgehalte an den 6 Spurenmessstellen von 0,4 Bq/l bis 1,5 Bq/l.

Die aufwändigen Messverfahren lassen bereits frühzeitig auch nur langsam stattfindende Veränderungen weit unterhalb des aus heutiger Sicht radiologischen Gefährdungspotenzials erkennen. Daher liegt auch weiterhin ein besonderes Augenmerk auf der fortgesetzten Verbesserung von Probenentnahme- und Messverfahren, die eine schnelle Datenauswertung erlauben.

## 4 SPURENMESSUNG IN DER BODENNAHEN LUFT

J. Bieringer<sup>1</sup>, A. Dalheimer<sup>2</sup>, R. Haas-van den Heuvel<sup>2</sup>, D. Zapata-Garcia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bundesamt für Strahlenschutz

Leitstelle für die Überwachung der atmosphärischen Radioaktivität (Leitstelle B)

<sup>2</sup>Deutscher Wetterdienst, Zentrale Offenbach/Main

Leitstelle für Luft und Niederschlag (Leitstelle A)

<sup>3</sup>Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

Leitstelle für Aktivitätsnormale und Radionuklidaten

Eine ausführliche Darstellung der Messergebnisse für die Jahre 2020 bis 2023 ist den Berichten des BMUV über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung zu entnehmen [23].

### Spurenmessstelle Freiburg/Schauinsland (BfS)

#### Edelgase

Bei den im Rahmen der Spurenanalyse durchgeführten Edelgasmessungen werden Luftproben unter anderem auf ihren Gehalt an radioaktivem Xenon und <sup>85</sup>Kr untersucht. Während <sup>85</sup>Kr überwiegend bei der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen in die Atmosphäre freigesetzt wird, stellt <sup>133</sup>Xe mit einer Halbwertszeit von 5,27 Tagen den Hauptbestandteil im bestimmungsgemäßen Betrieb der Edelgasableitungen von Kern-

kraftwerken und Isotopenproduktionsanlagen dar.

Die beim BfS in Freiburg durchgeführten Messungen des radioaktiven Xenons und Kryptons ergaben im Berichtszeitraum in der Regel keine auffälligen Ergebnisse. Die Messwerte der Aktivitätskonzentrationen von <sup>133</sup>Xe lagen zwischen 1 und 100 mBq/m<sup>3</sup> Luft. Die höchste <sup>133</sup>Xe-Aktivitätskonzentration wurde mit  $64 \pm 25$  mBq/m<sup>3</sup> in der Wochenprobe vom 23.10.2023 bis 30.10.2023 in Trier nachgewiesen. Diese Probe wurde mit dem nuklidspezifischen Messsystem „Sauna-Lab“ ge-

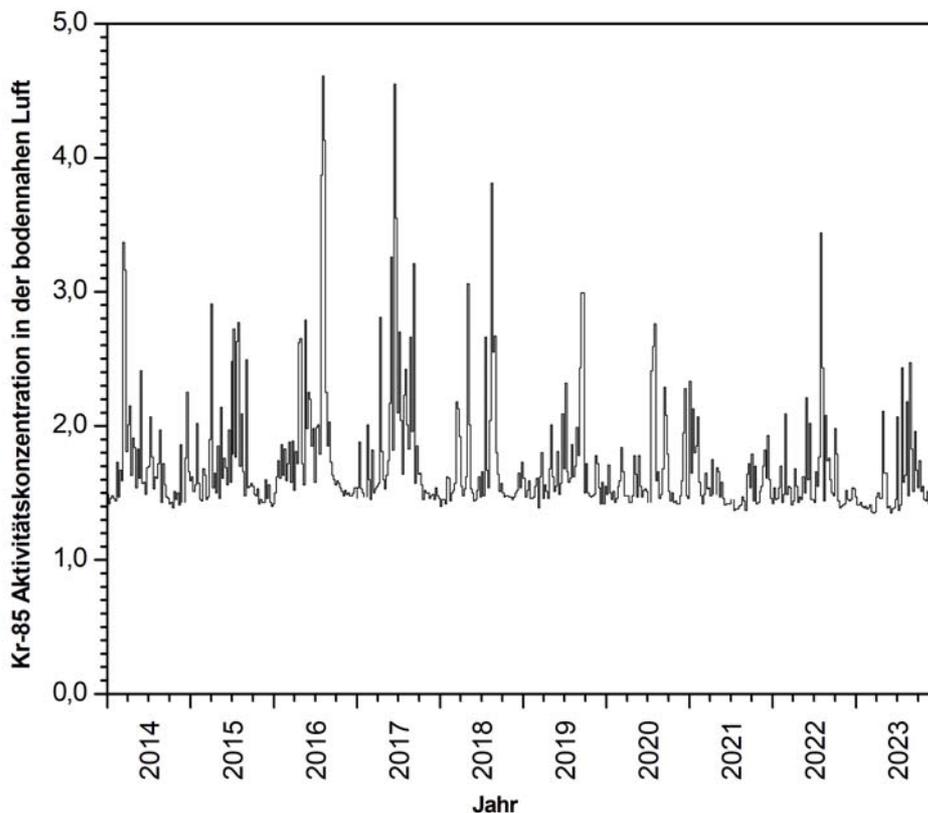


Abbildung 4.1

Zeitverlauf der <sup>85</sup>Kr-Aktivitätskonzentration an der BfS-Messstation auf dem Schauinsland

Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz

messen. Aufgrund der sehr kleinen stabilen Xenonmenge liegt der Messwert außerhalb des akkreditierten Bereichs, ist jedoch plausibel. Als eine mögliche Quelle kommt hier das Kernkraftwerk Cattenom in Betracht.

Als Beispiel ist in Abbildung 4.1 die Zeitreihe der Aktivitätskonzentration von  $^{85}\text{Kr}$  an der Messstation Schauinsland dargestellt. Der Medianwert der  $^{85}\text{Kr}$ -Aktivitätskonzentration an der Messstation Schauinsland lag in den letzten Jahren bei ca.  $1,5 \text{ Bq/m}^3$ . Kurzzeitige Schwankungen im zeitlichen Verlauf der Aktivitätskonzentrationen sind auf Emissionen aus den europäischen Wiederaufbereitungsanlagen für Kernbrennstoffe (La Hague/Frankreich und - für die zurückliegenden Jahre - auch auf Sellafield/England) zurückzuführen.

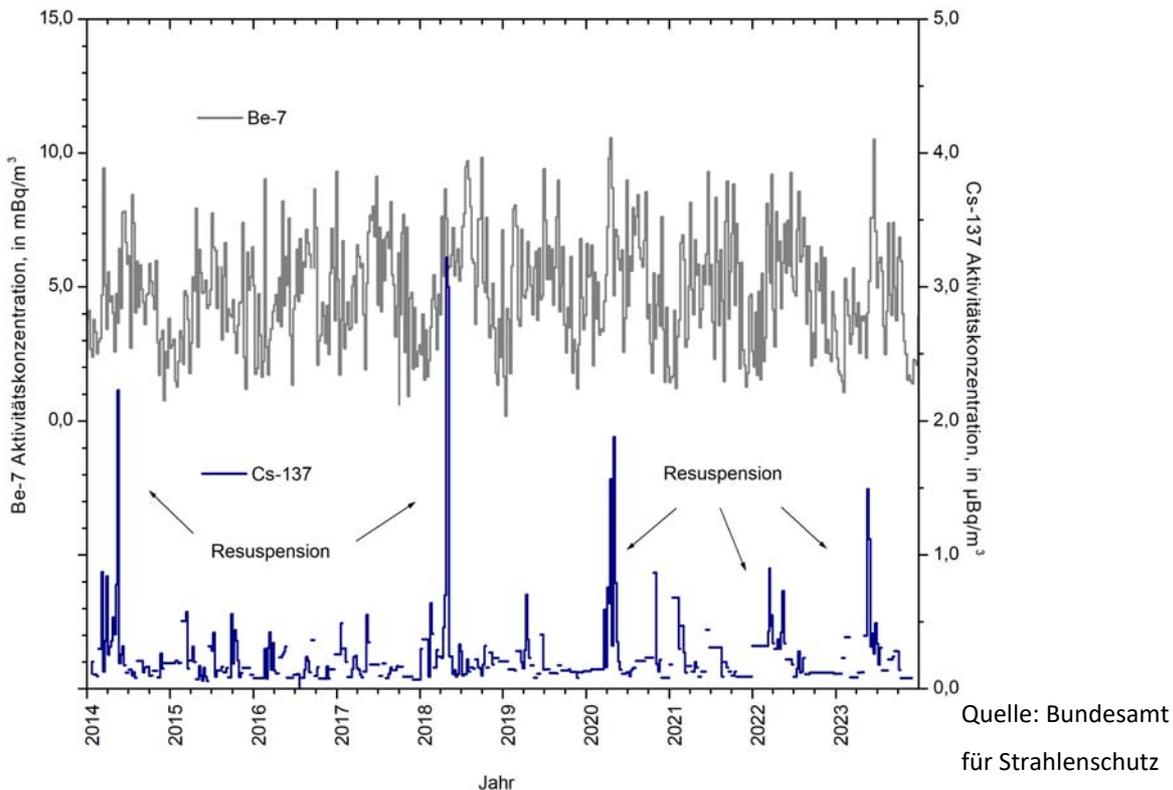
Von Zeit zu Zeit werden erhöhte  $^{85}\text{Kr}$ -Aktivitätskonzentrationen in der bodennahen Luft an einzelnen oder zeitweise auch allen deutschen Sammelstationen beobachtet. Ein Beispiel für erhöhte Messwerte an mehreren deutschen Stationen ist der Probenentnahmezeitraum vom 21.08.2023 bis 28.08.2023; dabei wurde die höchste  $^{85}\text{Kr}$ -Aktivitätskonzentration mit  $3,81 \text{ Bq/m}^3$  in Potsdam (DWD) erreicht. Weitere Spurenmessstellen waren im selben Sammelzeitraum mit Aktivitätskonzentrationen von  $2,47 \text{ mBq/m}^3$  (Schauinsland) bis  $3,31 \text{ Bq/m}^3$  (Trier) ebenfalls erhöht. Diese Beob-

achtung passt zu den  $^{85}\text{Kr}$ -Emissionswerten der Wiederaufbereitungsanlage in La Hague, die auf eine hohe Auslastung der Anlage im August hindeuten.

Unabhängig von den Spurenmessungen des BfS wird im Rahmen der Überwachung der Einhaltung des Kernwaffenteststoppabkommens (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT) an der Station Schauinsland des BfS eine Radionuklidmessstation (RN 33) betrieben. Sie ist die einzige derartige Station in Mitteleuropa und beinhaltet automatisch arbeitende Systeme für den nuklid-spezifischen Nachweis aerosolpartikelgebundener Radioaktivität (RASA-System) sowie für den Nachweis der radioaktiven Xenon-Isotope  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  und  $^{131\text{m}}\text{Xe}$  (SPALAX-System). In den Tagesproben werden mit dem RASA-System typischerweise Nachweisgrenzen von ca.  $1,6 \text{ }\mu\text{Bq/m}^3$  Luft für das aerosolgebundene  $^{137}\text{Cs}$  erreicht. Für die radioaktiven Xenon-Isotope liegen die Nachweisgrenzen zurzeit bei ca.  $0,3 \text{ mBq/m}^3$  Luft, bezogen auf  $^{133}\text{Xe}$ .

### Aerosolpartikelgebundene Radionuklide

Für spurenanalytische Messungen der aerosolgebundenen Radioaktivität werden wöchentlich beaufschlagte Staubfilter verwendet, die zunächst gammaspektrometrisch ausgewertet werden.



**Abbildung 4.2**  
Zeitverlauf der Aktivitätskonzentrationen von  $^7\text{Be}$  und  $^{137}\text{Cs}$  an der BfS-Messstation auf dem Schauinsland

Hierzu werden an der Messstation auf dem Schauinsland und in Freiburg Hochvolumensammler betrieben. Die Nachweisgrenzen für diese Messungen liegen für  $^{137}\text{Cs}$  bei etwa  $0,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Im Jahresmittel liegen die Aktivitätskonzentrationen an der Station Schauinsland bei etwa  $0,2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und in Freiburg bei  $0,8 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Zeitweise beobachtete geringfügige Erhöhungen der  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration lassen sich in der Regel durch erhöhte Resuspension von Bodestaub in die Atmosphäre erklären.

In Abbildung 4.2 sind die Zeitreihen der Aktivitätskonzentrationen des anthropogenen  $^{137}\text{Cs}$  und des kosmogenen  $^7\text{Be}$  an der Station Schauinsland

dargestellt; die Messwerte lagen in dem für die Station üblichen Schwankungsbereich.

Die mittlere Aktivitätskonzentration für  $^{90}\text{Sr}$  lag bei ca.  $0,03 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Im Februar 2021 wurde der höchste Wert im Berichtszeitraum mit  $0,09 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  ermittelt.

Die gemessenen Aktivitätskonzentrationen für die Uranisotope  $^{234}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  lagen zwischen  $0,008 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und  $0,62 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Deren Nachweisgrenzen bewegten sich zwischen  $0,0002 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und  $0,004 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . Auch hier wurde im Februar 2021 der höchste Wert im Berichtszeitraum mit  $0,62 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  für U-234 ermittelt (vgl. Abbildung 4.3).

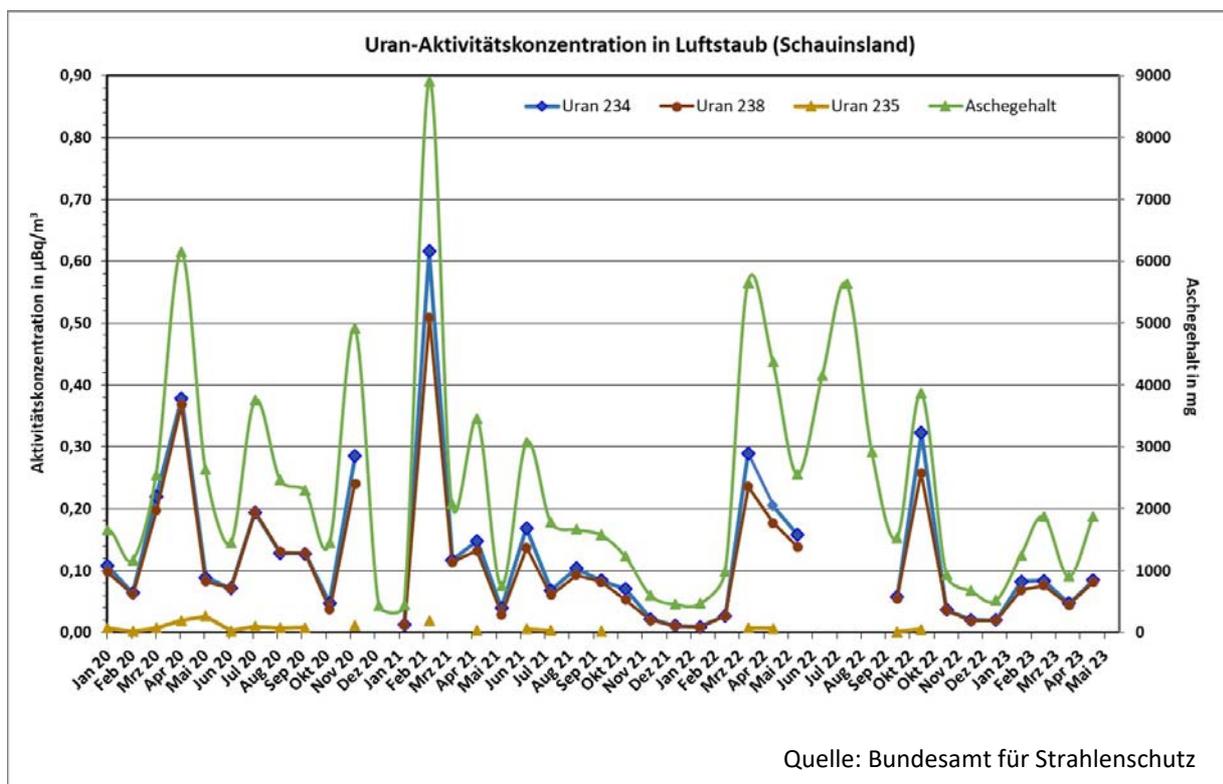


Abbildung 4.3

Zeitverlauf der Aktivitätskonzentrationen von  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  an der BfS-Messstation auf dem Schauinsland

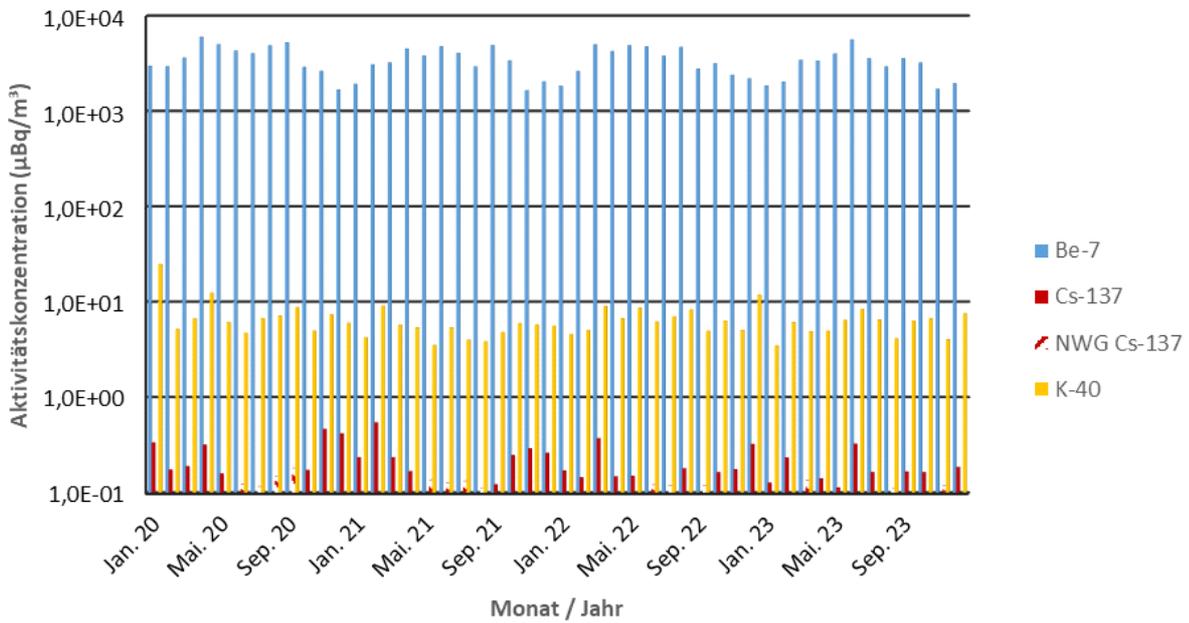
Das Radionuklid  $^{235}\text{U}$  wurde mit Aktivitätskonzentrationen zwischen  $0,001 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und  $0,03 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  nachgewiesen, die Nachweisgrenzen lagen zwischen  $0,0002 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und  $0,01 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .

Für  $^{238}\text{Pu}$  sowie für  $^{(239+240)}\text{Pu}$  konnten im Berichtszeitraum zeitweise Aktivitätskonzentrationen oberhalb der Nachweisgrenzen gemessen werden. Der höchste Wert im Berichtszeitraum wurde ebenfalls im Februar 2021 mit  $0,01 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  ermittelt. Für  $^{238}\text{Pu}$  sowie für  $^{(239+240)}\text{Pu}$  lagen

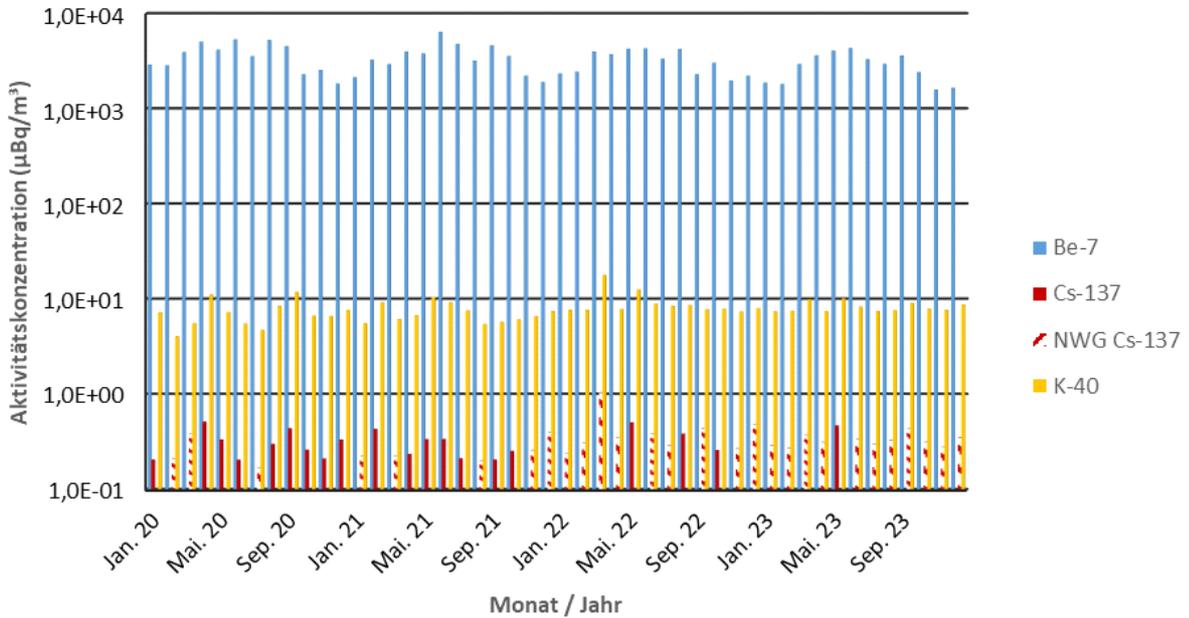
die erreichten Nachweisgrenzen im Berichtszeitraum zwischen  $0,0002 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und  $0,01 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .

Die erhöhten Werte im Februar 2021 lassen sich auch für diese Radionuklide durch eine wetterbedingte erhöhte Resuspension mit verstärktem Eintrag von Bodestaub in die Atmosphäre erklären. Die Luftstaubmenge in dieser Probe entsprach etwa dem Vierfachen des Jahresdurchschnittswerts. Dies ist höchstwahrscheinlich auf den Eintrag von Staub aus der Sahara zurückzuführen, was durch die, in diesem Zeitraum eben-

### DWD-Station Offenbach Nuklidspezifische Messungen Aerosolfilter



### DWD-Station Potsdam Nuklidspezifische Messungen Aerosolfilter

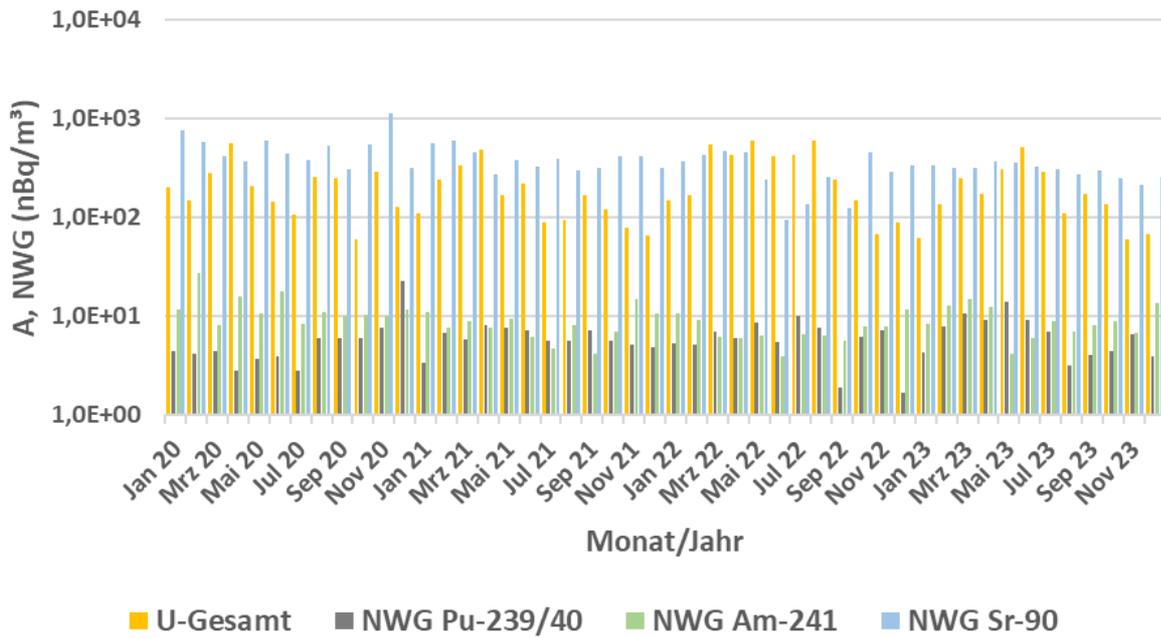


Quelle: Deutscher Wetterdienst

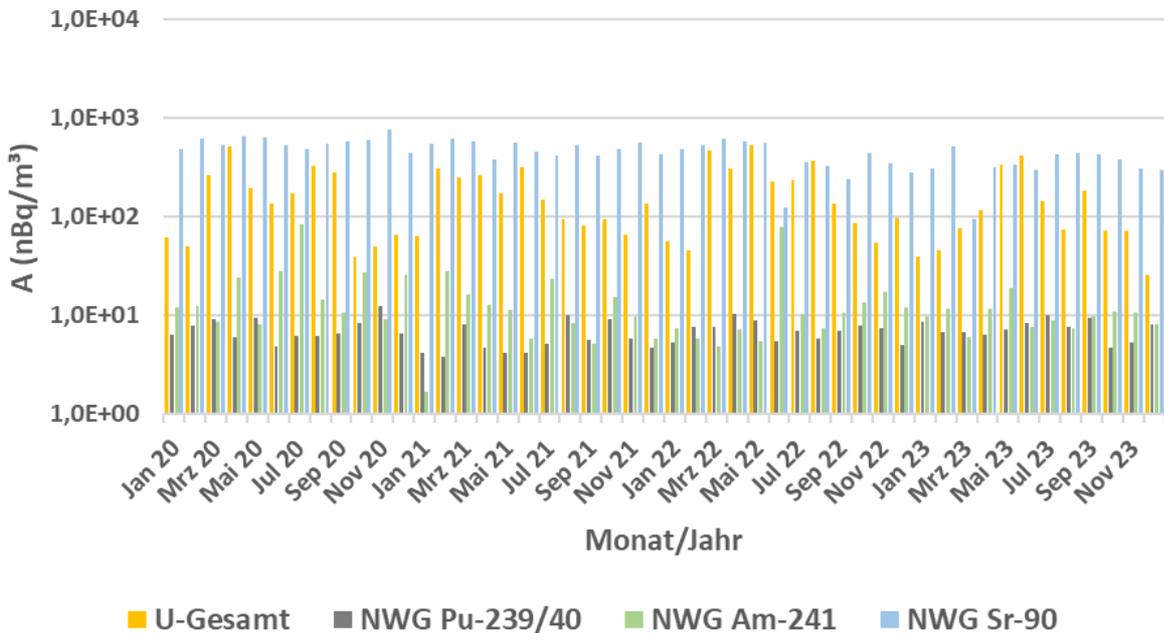
Abbildung 4.4

Zeitlicher Verlauf der mittleren wöchentlichen Aktivitätskonzentrationen von  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  an den Spurenmessstellen des DWD in Potsdam und Offenbach

## Nuklidspezifische Aktivitätskonzentrationen in der Luft DWD-Station Offenbach



## Nuklidspezifische Aktivitätskonzentrationen in der Luft DWD-Station Potsdam



Quelle: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 4.5

Zeitlicher Verlauf der mittleren monatlichen Aktivitätskonzentrationen von  $U_{\text{nat}}$ ,  $^{239/240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  und  $^{90}\text{Sr}$  an den Spurenmessstellen des DWD in Potsdam und Offenbach

falls leicht erhöhten,  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentrationen bestätigt wird.

### Spurenmessstellen Potsdam und Offenbach (DWD)

Gammastrahlende künstliche Radionuklide mit Aktivitätskonzentrationen von nur wenigen Mikrobecquerel pro Kubikmeter Luft ließen sich nur anhand von Schwebstofffiltern messen, die mit Luftdurchsätzen von mehreren  $100\text{ m}^3/\text{h}$  über eine Woche beaufschlagt wurden. An den Spurenmessstellen Potsdam und Offenbach sind (im Rahmen der EU-Berichterstattung) Aerosolsammler mit einem Luftdurchsatz von ca.  $1000\text{ m}^3/\text{h}$  im Einsatz. Hier reduziert sich die Nachweisgrenze für die gammaspektrometrischen Messungen um den Faktor 10 auf ca.  $0,2\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  bezogen auf  $^{137}\text{Cs}$ . Die Nachweisgrenze für  $^{90}\text{Sr}$  lag bei  $0,5\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und für  $(^{239}+^{240})\text{Pu}$  bei  $0,05\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .

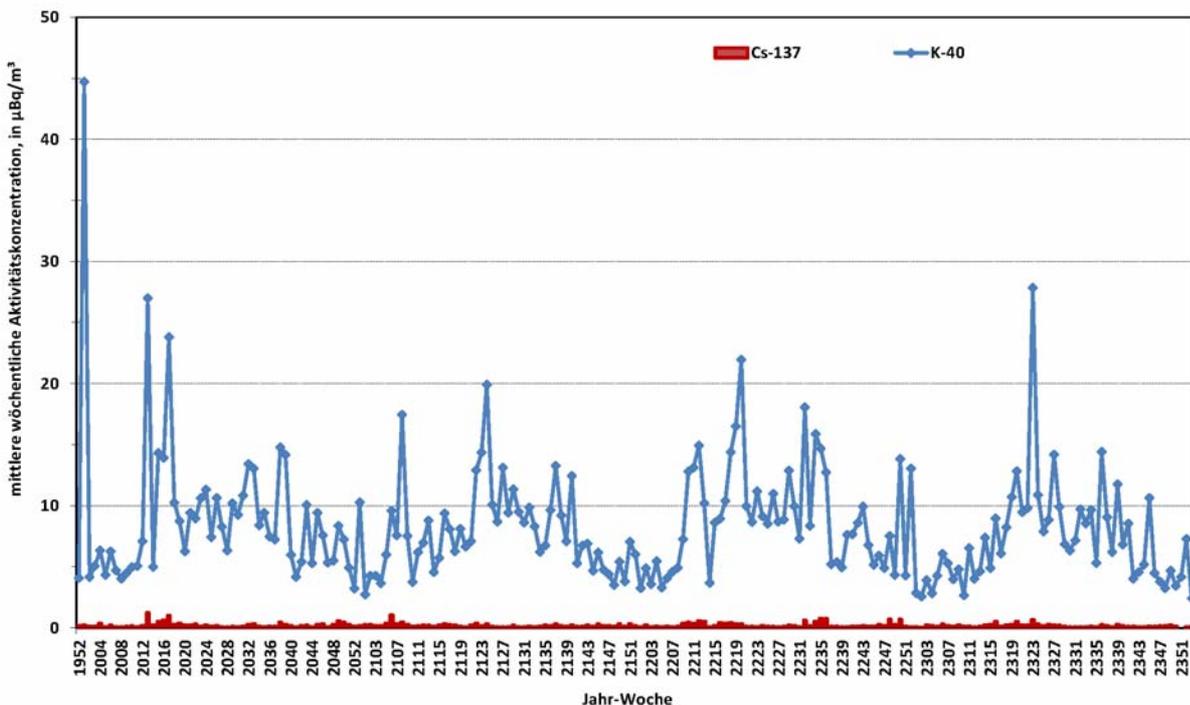
Tatsächliche Messwerte für  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{234}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  sind in der Regel auf resuspendierten Feinstaub zurückzuführen, der abhängig von meteorologischen Bedingungen atmosphärisch verfrachtet wird. Für die Spurenmessstellen Potsdam und Offenbach werden exemplarisch für die Jahre 2020, 2021, 2022 und 2023 die Ergebnisse der Messungen von  $^7\text{Be}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  gra-

phisch dargestellt (Abbildungen 4.4 und 4.5). Die normalerweise auftretende typische Erhöhung der  $^7\text{Be}$ -Aktivitätskonzentration im Frühjahr und Sommer tritt auch in den Jahren 2020, 2021, 2022 und 2023 schwach ausgeprägt auf.

### Spurenmessstelle Braunschweig (PTB)

Die Spurenmessstelle Braunschweig betreibt einen Hochvolumensammler mit einem Luftdurchsatz von ca.  $1000\text{ m}^3/\text{h}$  im Einsatz. Die Nachweisgrenzen der gammaspektrometrischen Messungen der beprobten Aerosole beträgt etwa  $0,04\text{ }\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  (bezogen auf Co-60), und die Ergebnisse zeigen keine Auffälligkeiten im Berichtszeitraum. In Abbildung 4.6 sind die Zeitreihen der Aktivitätskonzentrationen des Cs-137 und K-40 dargestellt.

Anfang 2019 wurde das Radiochemielabor der PTB-Spurenmessstelle zur Durchführung umfangreicher Umbau und Sanierungsmaßnahmen bis Mitte 2022 außer Betrieb genommen. Bei den Arbeiten nach der Wiederinbetriebnahme lag der Schwerpunkt auf der Kontrolle der Laborsauberkeit nach Anspruch der Spurenanalytik sowie der Aufgaben zur Qualitätssicherung der Methoden. Daher liegen für den Berichtszeitraum keine Messergebnisse für Alpha- und Betaemittierende Radionuklide vor.



Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz

Abbildung 4.6

Mittlere wöchentliche Aktivitätskonzentrationen von  $^{40}\text{K}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{137}\text{Cs}$  im Zeitraum 2020 - 2023 an der Spurenmessstelle der PTB in Braunschweig

# 5 DIE AUSBREITUNG VON RADIONUKLIDEN MIT SAHARASTAUB

J. Bieringer<sup>1</sup>, A. Dalheimer<sup>2</sup>, D. Zapata-Garcia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bundesamt für Strahlenschutz

*Leitstelle für die Überwachung der atmosphärischen Radioaktivität (Leitstelle B)*

<sup>2</sup>Deutscher Wetterdienst, Zentrale Offenbach/Main

*Leitstelle für Luft und Niederschlag (Leitstelle A)*

<sup>3</sup>Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

*Leitstelle für Aktivitätsnormale und Radionuklidaten (Leitstelle B)*

## Saharastaub in Deutschland

Zwischen 5- und 15-mal pro Jahr kommt es zu einem Transport von feinem Wüstensand aus der Sahara nach Deutschland. An bis zu 60 Tagen, vor allem im Frühling und im Sommer, findet sich der feine Staub in der Luft, wobei dies meistens nur mit Messgeräten nachweisbar ist.

Ursache dafür sind Wetterlagen, bei denen es in Nordafrika trocken und windig ist, so dass Staub mehrere Kilometer hoch in die Atmosphäre gewirbelt wird und zeitgleich ein Tiefdruckgebiet über Nordeuropa liegt. Diese Konstellation führt dann zu einer Verfrachtung von Luft und Staub aus Nordafrika nach Norden.

## Französische Kernwaffentests in der Sahara

In den Jahren 1960 bis 1961 führte die damalige Kolonialmacht Frankreich auf dem Kernwaffentestgelände „Centre Saharien des Expérimentations Militaires (CSEM)“ in der algerischen Provinz Adrar vier oberirdische Kernwaffentests durch.

Alle vier Wolken mit radioaktivem Fallout wehten in die Richtung 300 km südwestlich bis 300 km östlich des Ortes Hamoudia, einer damals fast menschenleeren Gegend der Sahara. Die radioaktiven Ablagerungen lassen sich dort bis heute messtechnisch nachweisen.

Weitere französische Kernwaffentests in Algerien wurden unterirdisch durchgeführt. Dabei kam es 1962 in am Testort Ekker zu einem Zwischenfall, bei dem die Abdichtung des Stollens der Explosion nicht standhielt und eine Wolke aus radioaktiven Gasen und Staub eine Höhe von bis zu 2600 m erreichte. Die Verfrachtung erfolgte ca. 150 km ostwärts in die Sahara, wo der radioaktive Fallout noch in einigen hundert km Entfernung gemessen werden konnte.

## Saharastaubereignis 2022

Zwischen dem 11. und dem 20. März 2022 kam es zu einem außergewöhnlich starken Saharastaub-

ereignis, bei dem Staub aus der algerischen Wüste nach Mitteleuropa transportiert wurde. Mittels Flugzeug- und Ceilometermessungen konnte an der DWD-Station Hohenpeißenberg eine Maximalkonzentration an Staubpartikeln von 2,2 mg/m<sup>3</sup> in einer Höhe von 2 km ü. N.N. gemessen werden. Das entspricht einem Faktor von 200 gegenüber den Normalwerten. Ein solch starkes Ereignis tritt nur sehr selten auf, zuletzt kam es im Mai/Juni 2008 zu einer ähnlich hohen Saharastaubkonzentration.

## Verfrachtung nach Deutschland

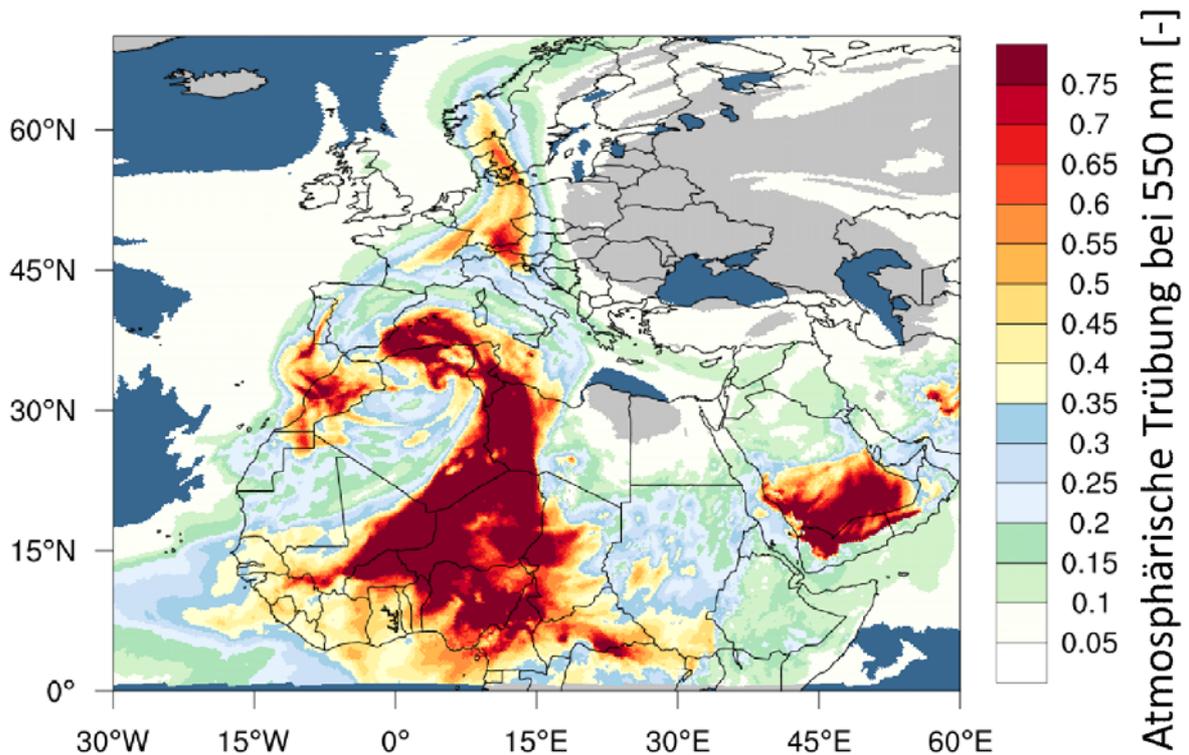
Saharastaub-Ereignisse werden vom DWD routinemäßig mit Ausbreitungsrechnungen vorhergesagt und genau beobachtet, um z. B. Photovoltaik-Betreiber zu informieren. Für Photovoltaikanlagen ist der Saharastaub ein großes Problem. Solange er den Himmel verdunkelt, sinkt die Stromerzeugung um zehn bis 20 %. Ein weiteres Problem ist die Verschmutzung der Anlagen durch die Ablagerung von Staub.

Zur Verifizierung der Ausbreitungsrechnungen des DWD werden üblicherweise Messungen mit bodengestützten Ceilometern vorgenommen. Im März 2022 wurde zusätzlich eine begleitende Flugzeugmesskampagne durchgeführt, die ein genaues Höhenprofil der Staubpartikelverteilung ermöglichte.

Die Herkunft von Staubpartikeln in der Luft lässt sich durch Messungen der Aerosolpartikeleigenschaften bestimmen. Dazu gehören die Partikelmassenkonzentration, die Partikelanzahlkonzentration, Strahlungseigenschaften der Partikel (Absorptions-, Streu-, Extinktionskoeffizient) und der Radioaktivität, sowohl in der Luft als auch im Regenwasser.

Die Analyse der Streuparameter und der Partikelgrößenverteilung belegten eindeutig eine Verfrachtung aus der Sahara für den o. g. Zeitraum.

Die Ausbreitung der Saharastaubwolke im März 2022 ist in Abbildung 5.1 zu sehen.



**Abbildung 5.1**  
Saharastaubwolke am 17.03.2022 12:00 UTC berechnet mit dem ICON-ART Modell des DWD. Die Atmosphärische Trübung ist eine meteorologische Größe ohne Einheit.

#### Messwerte des DWD

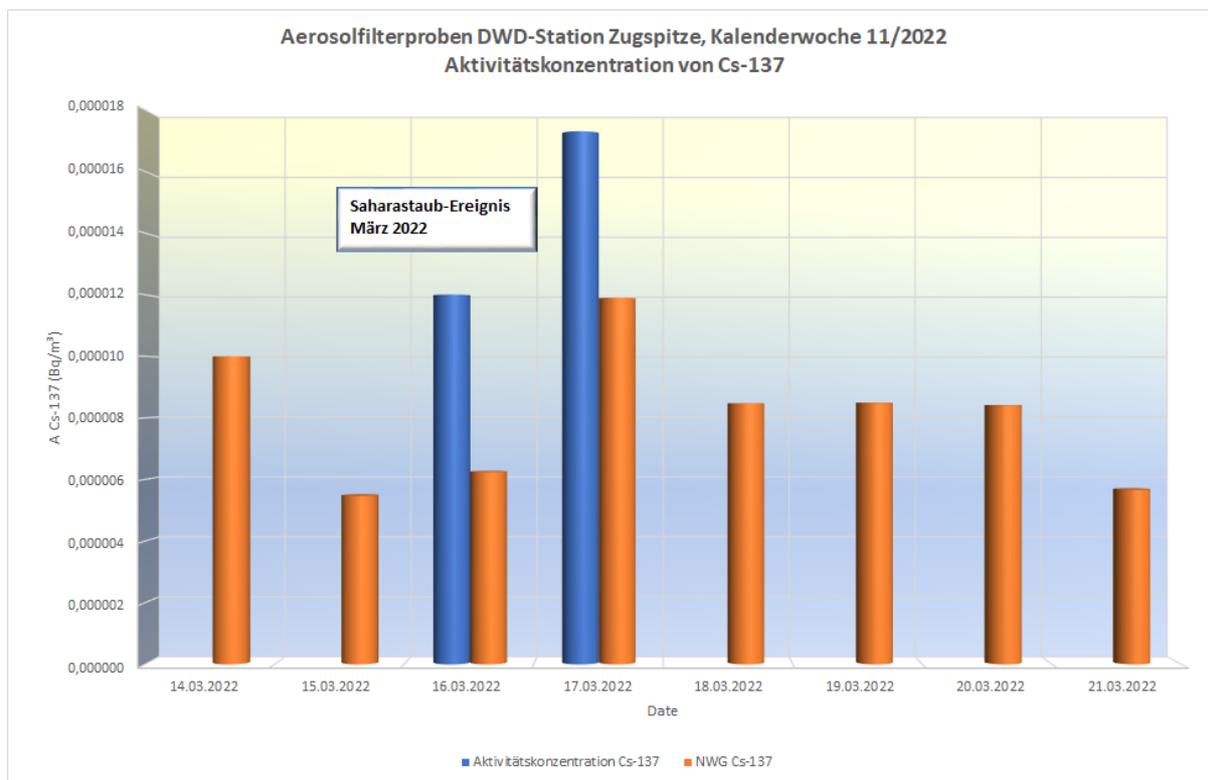
Die Sahara hat eine Fläche von über 9 Mio. km<sup>2</sup> und ist damit etwa 26-mal so groß wie Deutschland. Für eine genauere Analyse der Herkunft des Staubes müssen also weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Insbesondere die Bestimmung der Radioaktivität im Staub erlaubt den Rückschluss auf die Herkunft der Staubpartikel aus den mit radioaktivem Fallout belasteten Gebieten der Sahara.

Der DWD betreibt auf der Zugspitze eine Messstelle, an der sowohl wöchentlich als auch täglich Aerosolfilter beaufschlagt und anschließend gammaspektrometrisch gemessen werden. Aus dem Verlauf der Cs-137-Aktivität auf den Tagesfiltern lassen sich Rückschlüsse auf die Herkunft der Staubmassen ziehen.

Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf der Aktivitätskonzentration von Cs-137 in den Tagesfiltern von der Station Zugspitze mit einem Maximum von 17,3 µBq m<sup>-3</sup> am 17.03.2022.

Eine radiochemische Analyse des Wochenfilters von der gleichen Station zeigte auch für Pu-239/240 eine Aktivitätskonzentration oberhalb der Nachweisgrenze (NWG). Der Messwert für Am-241 liegt oberhalb der Erkennungsgrenze (EKG) und nur knapp unterhalb der NWG. Auch in den Monatsniederschlagsproben der Station München konnte für den Monat März eine gegenüber den üblichen Werten erheblich erhöhte Aktivitätskonzentration von Pu-239/240 festgestellt werden. Diese typischen Fallout-Nuklide liefern einen deutlichen Hinweis auf eine Verfrachtung des Staubes in der Kalenderwoche 11/2022 aus dem Gebiet der französischen Atomwaffentests.



**Abbildung 5.2**  
**Tagesfilter der Station Zugspitze - Verlauf der Cs-137 Aktivitätskonzentration**

Für den 17.03.2022 wurde daher zusätzlich auch eine Vorwärtstrajektorie mit dem Start auf dem Gebiet des CSEM berechnet (Abbildung 5.3). Diese Trajektorie deckt sich gut mit den in Deutschland erfassten Messwerten, insbesondere wenn man eine Staubaufwirbelung bis in den Höhenbereich von 6 - 9 km annimmt.

### Messungen des Bfs

Das Bundesamt für Strahlenschutz (Bfs) betreibt für die Analysen aerosolgebundener Radionuklide in der bodennahen Luft sowohl eine Probenentnahmestelle im Naturschutzgebiet auf dem Berg Schauinsland (1200 m ü. NHN) als auch eine Probenentnahmestelle auf dem Dach der Dienststelle in Freiburg (240 m ü. NHN) im Breisgau. Der Hochvolumensammler auf dem Schauinsland liegt i. d. R. oberhalb der planetaren Grenzschicht und oberhalb von sich im Winter immer wieder bildenden Inversionen, was entscheidend für die Analyse des weiträumigen Transports von Radionukliden ist. Im Gegensatz dazu ist es durch das Betreiben des zweiten Hochvolumensammlers in Freiburg i. Br. möglich, im urbanen Gebiet lokale Einflüsse und bspw. den Transport von Radionukliden entlang des Rheintals zu erfassen.

In KW 11/2022 wurden an der Messstation Schauinsland Proben vom 14.03. bis 17.03.2022 und 17.03. bis 21.03.2022 genommen, um den Einfluss durch den Saharastaubeintrag in der ersten Wochenhälfte besser beobachten zu können. In der Probe mit dem Saharastaubeintrag (14.03. bis 17.03.2022) wurde ca. die 10fache Menge an K-40 gegenüber den durchschnittlichen Aktivitätskonzentrationen nachgewiesen, die Cs-137-Aktivitätskonzentration war im Vergleich zum Vorjahresmittel um ca. 20 % erhöht.

In der Vegetationsperiode sind, insbesondere bei längerer Trockenheit, die Cs-137- und K-40-Aktivitätskonzentrationen auf dem Schauinsland gegenüber den Wintermonaten erhöht, so dass die beobachteten gammaspektrometrischen Messergebnisse ohne weitere Zusatzinformationen keine eindeutige Zuordnung zu der Verfrachtung von Saharastaub erlauben.

Allerdings konnte in den radiochemischen Analysen der entsprechenden Luftstaubproben der Messstation auf dem Schauinsland vom März 2022 Pu-(239+240) nachgewiesen werden (Abbildung 5.4), was auf den Eintrag von Kernwaffen-

fallout und damit auf den Saharastaub aus dem entsprechenden Gebiet hinweist.

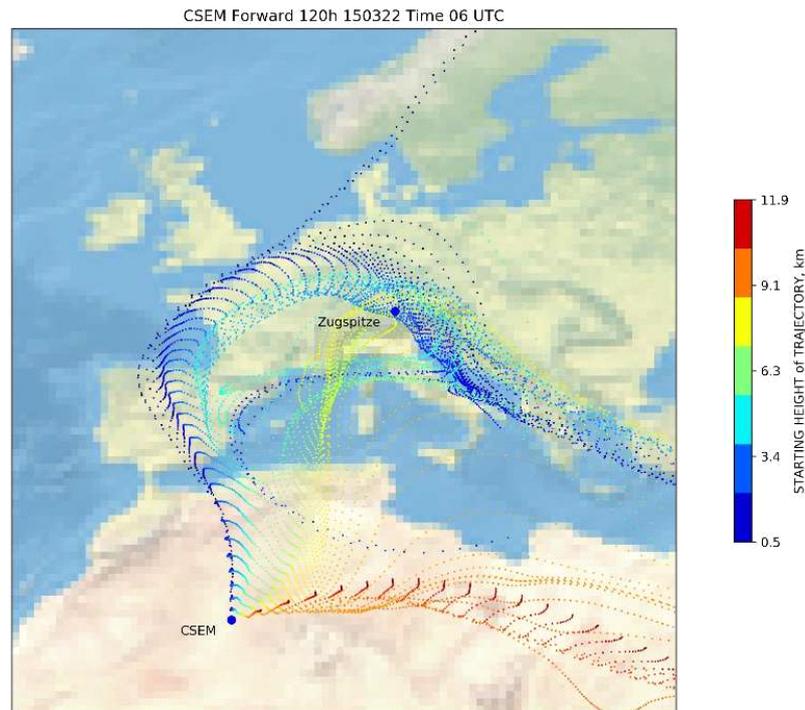


Abbildung 5.3 Vorwärtstrajektorie vom 17.03.2022 mit Startpunkt CSEM

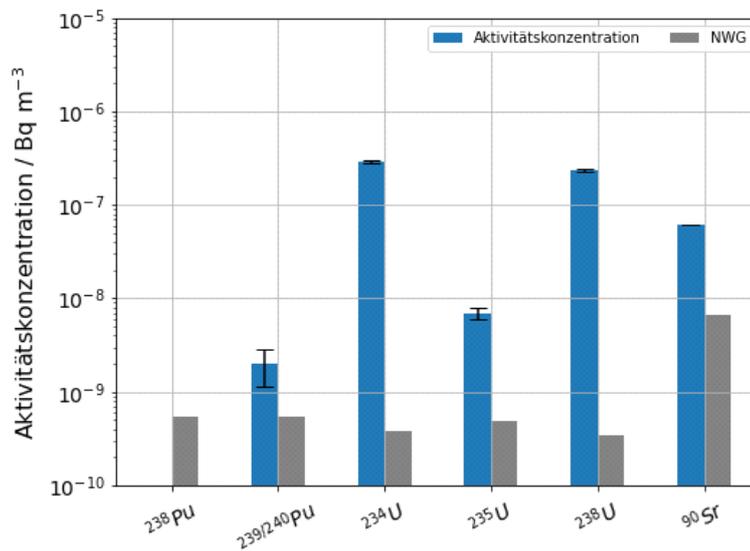


Abbildung 5.4 Alpha- und Betastrahler in der Monatsprobe vom März 2022 an der Messstation Schauinsland des BfS

### Messungen der PTB

Die Physikalisch-technische Bundesanstalt (PTB) betreibt einen Hochvolumensammler auf dem Gelände, mit dem Aerosole zur Messung der aerosolgebundenen Radionuklide in der bodenna-

hen Luft mittels Polypropylen-Filter auf wöchentliche Basis gesammelt werden. Die Filter werden gamma-spektrometrisch gemessen und anschließend radiochemisch analysiert.

Bei der Saharastaubereignis 2022 wurden die Luftstaubmassen aus der Sahara jedoch nicht bis zur Messstation in Braunschweig transportiert, sodass an der PTB ermittelte Messwerte für z. B. Cs-137 dementsprechend keine Auffälligkeiten im Vergleich zum Jahresmittel zeigten.

#### Fazit

Der mit Hilfe von Ausbreitungsrechnungen vorhergesagte Eintrag von Saharastaub aus den kontaminierten Gebieten in Deutschland wurde

mittels verschiedener Analysemethoden bestätigt. Hierbei wurden sowohl die Ergebnisse der Analyse der Streuparameter und der Partikelgrößenverteilung des Luftstaubs herangezogen als auch die Zusammensetzung und Aktivitätskonzentration der im Luftstaub nachgewiesenen Radionuklide.

# 6 RADIOAKTIVE STOFFE IN BINNENGEWÄSSERN

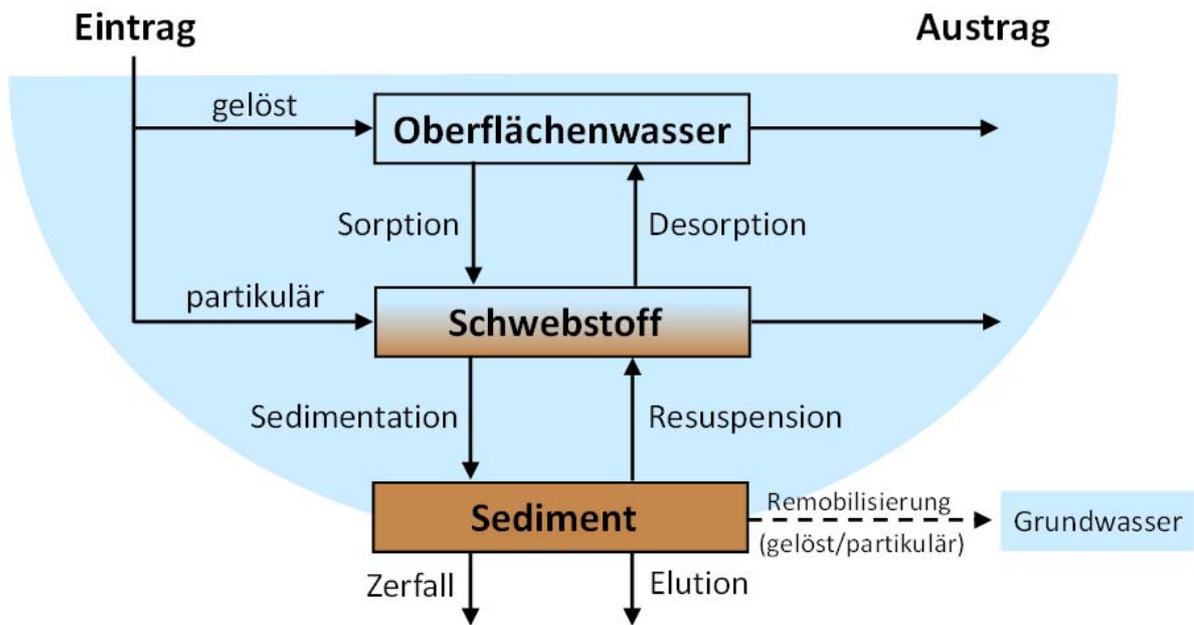
J. Wiederhold, A. Schmidt

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz

Leitstelle für Oberflächenwasser, Schwebstoff und Sediment in Binnengewässern (Leitstelle C)

Die Radioaktivität in Binnengewässern entsteht durch den Zerfall von natürlichen und künstlichen Radionukliden in Wasser, Schwebstoffen und Sediment. Zu den relevanten natürlichen Radionukliden zählen einerseits das aus der Verwitterung von Gesteinen freigesetzte sehr langlebige  $^{40}\text{K}$  sowie die Bestandteile der Zerfallsreihen von  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{232}\text{Th}$ . Zum anderen tragen auch kosmogene Nuklide, die ständig neu gebildet und über die Atmosphäre in Gewässer eingetragen werden, zur natürlichen Radioaktivität bei (z. B.  $^3\text{H}$  und  $^7\text{Be}$ ). Die wichtigsten künstlichen Radionuklide, die in Binnengewässern vorkommen, sind  $^3\text{H}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  und  $^{137}\text{Cs}$ . Tritium ( $^3\text{H}$ ) stammt heutzutage, neben dem natürlichen kosmogenen Anteil, aus den Ableitungen kerntechnischer Anlagen und Isotopen verarbeitender Betriebe.

Die langlebigen Spaltprodukte  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{137}\text{Cs}$  wurden hauptsächlich durch die Fallouts der oberirdischen Kernwaffenversuche und des Reaktorunfalls von Tschornobyl im Jahr 1986, hier insbesondere  $^{137}\text{Cs}$ , in die Gewässer eingetragen. Signifikante Einträge des Reaktorunfalls von Fukushima im Jahr 2011 konnten dagegen in Binnengewässern in Deutschland nicht nachgewiesen werden. In geringem Umfang werden die aus dem Normalbetrieb kerntechnischer Anlagen stammenden Aktivierungsprodukte  $^{58}\text{Co}$  und  $^{60}\text{Co}$  in Gewässern gefunden. Das vergleichsweise kurzlebige  $^{131}\text{I}$  (HWZ: 8 Tage) stammt dagegen meist aus nuklearmedizinischen Anwendungen.



Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

**Abbildung 6.1**  
Verhalten von Radionukliden in Fließgewässern

In Binnengewässern wird die Radioaktivität in den Kompartimenten Oberflächenwasser, Schwebstoff und Sediment ermittelt (Abbildung 6.1). Die Überwachung der dynamischen Kompartimente Oberflächenwasser und Schwebstoff ermöglicht es, aktuelle Einträge und kurzfristige Veränderungen radioaktiver Kontaminationen in Gewässern zeitnah und mit hoher Genauigkeit zu erfassen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Radionuklide in Fließgewässern in gelöster Form oder partikulär gebunden mit Wasser bzw. Schwebstoffen über weite Strecken flussabwärts verfrachtet werden können. Die Sedimentation von Schwebstoffen erfolgt bevorzugt in Stillwasserbereichen, wie sie z. B. Häfen, Bühnenfelder, Altarme, Stauhaltungen und Uferböschungen darstellen, was

dort zu einer Anreicherung von Radionukliden im Sediment führen kann. Die Sedimente stellen das Langzeitspeichermedium von Radionukliden in Gewässern dar. In Sedimenten lassen sich somit die langfristigen Auswirkungen radioaktiver Kontaminationen verfolgen. Um präzise Rückschlüsse über zeitliche Trends ziehen zu können, ist jedoch eine Altersbestimmung der genommenen Sedimentproben erforderlich. Eine spätere Weiterverfrachtung bereits abgelagerter Radionuklide infolge Resuspension von Sedimenten, beispielsweise bei Hochwasserereignissen, ist möglich und kann wiederum über Schwebstoffmessungen verfolgt werden. Die Verteilung verschiedener Radionuklide zwischen der Wasserphase und der

Festphase (Schwebstoffe/Sedimente) sowie ihr Transportverhalten in Fließgewässern lässt sich aus dem geochemischen Verhalten der jeweiligen chemischen Elemente ableiten. So wird  $^3\text{H}$  als Bestandteil des Wassermoleküls relativ schnell transportiert und eignet sich daher gut für Traceranwendungen in der Hydrologie, während beispielsweise  $^{60}\text{Co}$  und  $^{137}\text{Cs}$  eine starke Affinität zur Bindung an Partikeloberflächen aufweisen, wodurch sie sich überwiegend in Schwebstoffen und Sedimenten finden und entsprechend langsamer transportiert werden. Ein kleiner Teil der Radionuklide in Binnengewässern wird von Biota aufgenommen (z. B. Wasserpflanzen, Fische) und kann somit in die Nahrungskette gelangen.

**Tabelle 6.1**  
**Typische Aktivitätskonzentrationen bzw. spezifische Aktivitäten natürlicher Radionuklide in Binnengewässern (Daten aus dem Routinemessprogramm zum StrlSchG)**

Kompartiment	Radionuklid	Wertebereich
Oberflächenwasser (Bq/l)	$^3\text{H}$ (kosmogener Anteil)	0,5 bis 1
	$^7\text{Be}$	bis 0,5
	$^{40}\text{K}$	0,01 bis 5
	$^{232}\text{Th}$	bis 0,1
	$^{235}\text{U}$	bis 0,05
	$^{238}\text{U}$	bis 0,1
Schwebstoff und Sediment (Bq/kg TM)	$^7\text{Be}$	bis 1000
	$^{40}\text{K}$	50 bis 1000
	$^{232}\text{Th}$	bis 100
	$^{235}\text{U}$	bis 10
	$^{238}\text{U}$	bis 100

Regionale Unterschiede in den Gehalten natürlicher Radionuklide in Binnengewässern (Tabelle 6.1) sind im Wesentlichen auf den geogenen Hintergrund des jeweiligen Einzugsgebietes sowie auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen. So reichte im Berichtszeitraum 2020 bis 2022 etwa die Spanne der mittleren Aktivitätskonzentration von  $^{40}\text{K}$  in Oberflächenwasser von 0,02 Bq/l in der Sösetalsperre (Harz, Niedersachsen), deren ionenarmes Wasser natürlicherweise einen geringen Härtegrad aufweist, bis hin zu 4,1 Bq/l in der durch den Kalibergbau beeinflussten Werra (Gerstungen, km 137,5, Thüringen). Hohe mittlere Aktivitätskonzentrationen von  $^{40}\text{K}$  in Schwebstoff und Sediment wurden im Berichtszeitraum im Schwarzbach (Contwig, km 10,1, Rheinland-

Pfalz) mit 1018 Bq/kg Trockenmasse (TM) in Schwebstoff und 917 Bq/kg TM in Sediment sowie in der Werra (Gerstungen, km 137,5, Thüringen) mit 616 Bq/kg TM in Schwebstoff und 855 Bq/kg TM in Sediment gemessen. Die historischen Folgen des Uranbergbaus lassen sich beispielsweise in Oberflächenwasser der Weißen Elster (Bad Köstritz, km 126,0, Thüringen) mit mittleren Aktivitätskonzentrationen im Berichtszeitraum von 0,037 Bq/l  $^{238}\text{U}$  bzw. 0,0020 Bq/l  $^{235}\text{U}$  erkennen. Die Gehalte natürlicher Radionuklide in Binnengewässern unterliegen jedoch nur relativ geringen zeitlichen Schwankungen und bedürfen daher normalerweise keiner besonderen Überwachung.

Die kontinuierliche Überwachung der Binnengewässer auf radioaktive Stoffe konzentriert sich daher insbesondere auf die künstlichen Radionuklide. Es gilt ihre Veränderungen innerhalb der Gewässer zu erfassen sowie mögliche Auswirkungen auf Menschen und Umwelt abzuschätzen. Die entsprechenden Überwachungsprogramme basieren auf dem Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) sowie der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und sind in der AVV IMIS sowie der REI näher ausgeführt. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) betreibt mit Unterstützung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ein Bundesmessnetz mit 40 Stationen an den Bundeswasserstraßen. Die Messstellen der Länder überwachen die weiteren Fließgewässer sowie stehende Gewässer (Seen, Talsperren), wobei jeweils in regelmäßigen Abständen (z. B. monatlich oder quartalsweise) Proben von Oberflächenwasser, Schwebstoffen und Sediment den Gewässern entnommen und untersucht werden. Eine ausführlichere Darstellung der ermittelten Messergebnisse im Berichtszeitraum findet sich in den jeweiligen Jahresberichten des BMUV zur „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“, [23]. Eine zusammenfassende Bewertung des radiologischen Gütezustands der Binnengewässer ergibt für den vorliegenden Berichtszeitraum 2020 bis 2022 folgendes Bild:

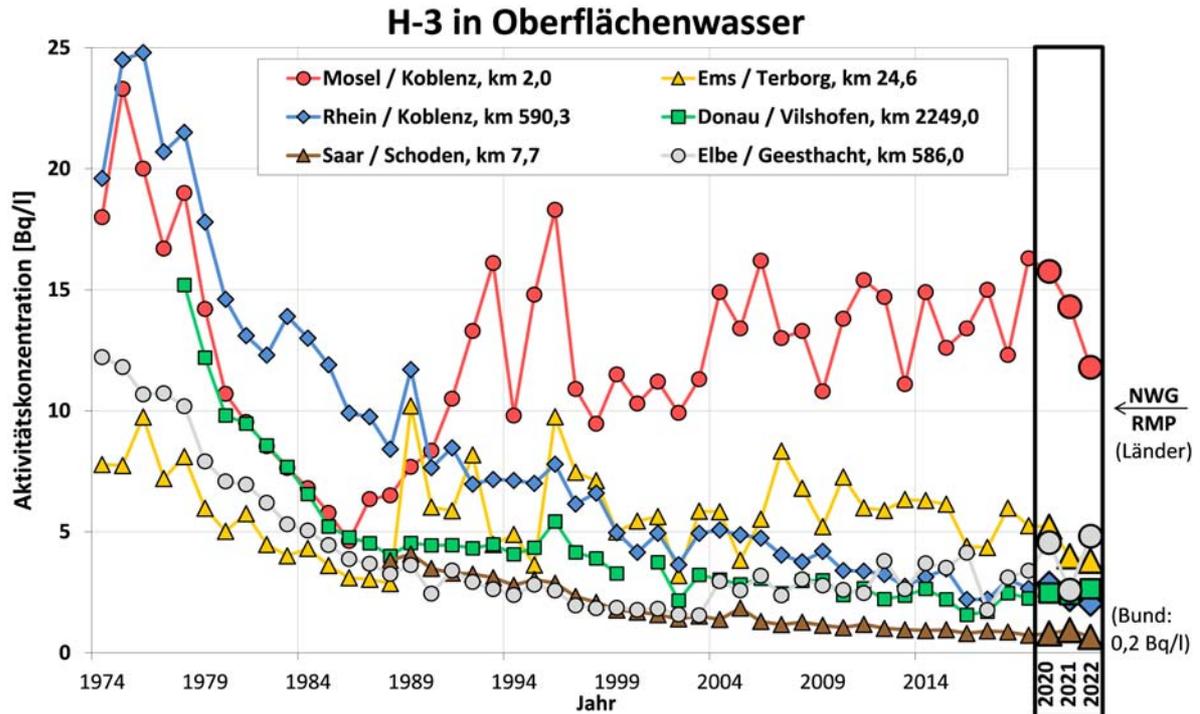
In **Oberflächenwasser** lagen die Aktivitätskonzentrationen von Tritium ( $^3\text{H}$ ) im Jahresmittel überwiegend unterhalb der im Routinemessprogramm (RMP) für die Messstellen der Länder geforderten Nachweisgrenze (NWG) von 10 Bq/l (Abbildung 6.2). Leicht höhere Werte wurden lediglich in Flüssen gemessen, in die eine genehmigte Ableitung von  $^3\text{H}$  aus kerntechnischen Anlagen erfolgt, aber auch hier lagen die Jahresmittelwerte im Berichtszeitraum 2020 bis 2022 bei maximal 37 Bq/l (Mosel, Wincheringen km 222,2) bzw. 20 Bq/l (Ems, Geeste km 106,3). Diese Werte nahmen im weiteren Verlauf flussabwärts jeweils auf maximal 16 Bq/l (Mosel, Koblenz km 2,0) bzw. 5 Bq/l (Ems, Terborg km 24,6) ab. In der historischen Übersicht in Abbildung 6.2 lässt sich die Inbetriebnahme des KKW Cattenom 1986 (Mosel), des KKW Emsland 1988 (Ems) und des KKW Temelin im Jahr 2002/03 (Elbe) erkennen. Die in den 1970er Jahren erhöhten und dann gleichmäßig abfallenden  $^3\text{H}$ -Werte lassen sich dagegen überwiegend auf die Nachwirkungen der oberirdischen Kernwaffentests zurückführen.

Die mittleren Aktivitätskonzentrationen von  $^{90}\text{Sr}$  in Oberflächenwasser lagen meist unter der NWG des RMP von 0,01 Bq/l. Maximale Einzelwerte be-

trugen 0,026 Bq/l in Fließgewässern (Elbe, Cuxhaven, km 163,2) bzw. 0,021 Bq/l in stehenden Gewässern (Starnberger See, Bayern). Die in Abbildung 6.3 hervorgehobenen Jahresmittelwerte für  $^{90}\text{Sr}$  in Oberflächenwasser aus verschiedenen Fließgewässern scheinen einen Rückgang der Messwerte innerhalb des Berichtszeitraums 2020 bis 2022 zu zeigen, nachdem in den vorherigen Jahren (2017-2019) ein leichter Anstieg beobachtet wurde. Eine Ursache für die über die letzten Jahre schwankenden Jahresmittelwerte für  $^{90}\text{Sr}$  in Oberflächenwasser ist nicht bekannt, wobei alle Werte in einem sehr niedrigen Bereich liegen und die relativ hohen relativen Messungenauigkeiten von 30-40 % für diesen Wertebereich berücksichtigt werden müssen. Messungen von  $^{90}\text{Sr}$  in Sedimenten wurden nur sehr vereinzelt durchgeführt, v. a. im Rahmen der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), wobei als maximaler Einzelwert eine spezifische Aktivität von 5,56 Bq/kg Trockenmasse (TM) in der Mosel (Perl/Apach, km 242,6) gemessen wurde.

Das Vorkommen von  $^{137}\text{Cs}$  in Oberflächenwasser ist vor allem im historischen Kontext des Tschornobyl-Unfalls zu betrachten. In der logarithmischen Auftragung der Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  in verschiedenen Fließgewässern (Abbildung 6.4) lassen sich die stark erhöhten Werte im Jahr 1986 erkennen, gefolgt von einem relativ raschen Rückgang auf Werte unterhalb der geforderten NWG des RMP von 0,01 Bq/l (Bund) bzw. 0,05 Bq/l (Länder). In der Donau, die stärker als andere Flüsse vom Tschornobyl-Fallout betroffen war, verlief dieser Rückgang etwas langsamer; seit etwa 2000 bewegen sich aber auch hier die Werte in einem tiefen Hintergrundbereich. Im Berichtszeitraum konnte in der überwiegenden Zahl der Oberflächenwasserproben aus Fließgewässern und stehenden Gewässern kein  $^{137}\text{Cs}$  nachgewiesen werden. In diesem Fall wurden die Jahresmittelwerte aus den erreichten NWG berechnet (weißer Symbolinhalt in Abbildung 6.4), dies stellt somit eine obere Grenze und eine Überschätzung der tatsächlichen Werte dar. Maximale Einzelwerte für  $^{137}\text{Cs}$  in Oberflächenwasser wurden im Berichtszeitraum für Fließgewässer mit 0,025 Bq/l in der Elbe (Billwerder Bucht, km 618,0) und für stehende Gewässer mit 0,037 Bq/l im Arendsee (Sachsen-Anhalt) gemessen.

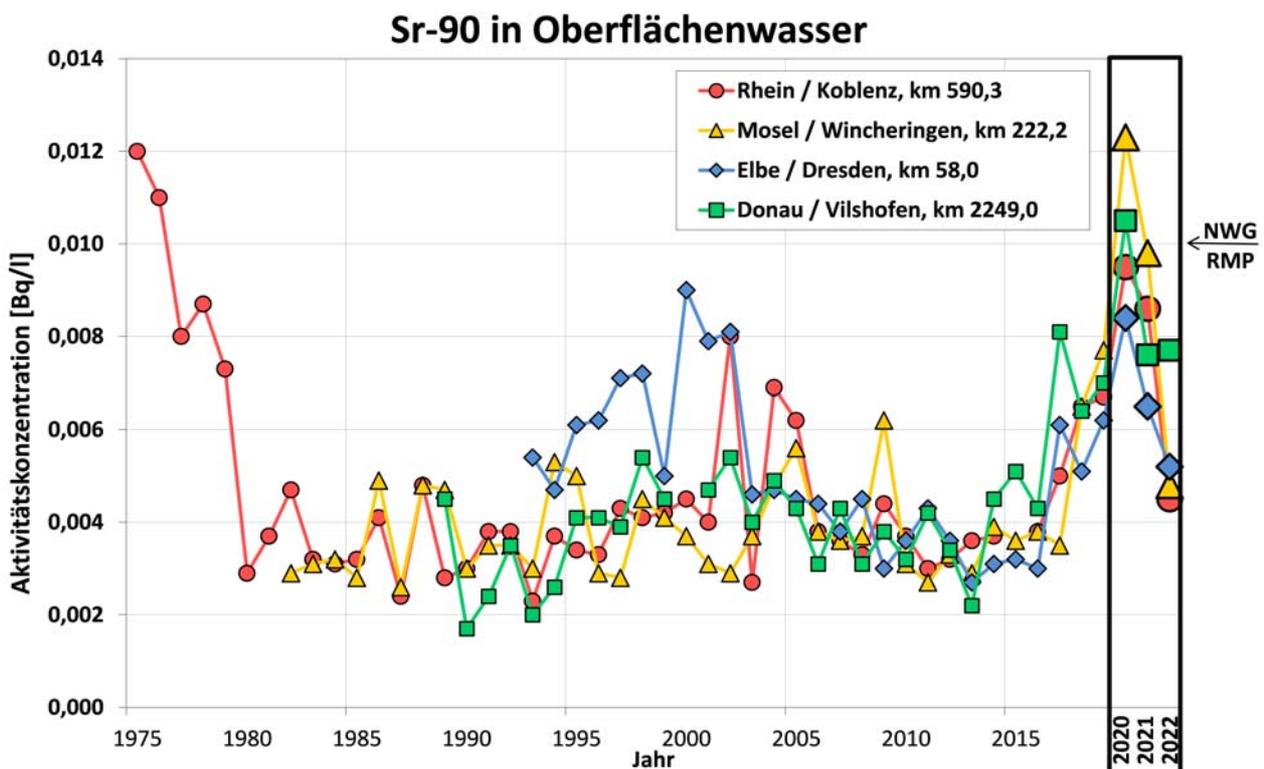
Auch in den Kompartimenten Schwebstoff und Sediment sind die spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  überwiegend auf die Nachwirkungen des Tschornobyl-Unfalls zurückzuführen, wobei auch heute noch regional erhöhte Werte gemessen werden. Aus den wiederum logarithmisch aufge-



Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Abbildung 6.2

Zeitlicher Verlauf der Aktivitätskonzentrationen (Bq/l) von  $^3\text{H}$  in Oberflächenwasser ausgewählter Binnengewässer (Jahresmittelwerte) mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum



Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Abbildung 6.3

Zeitlicher Verlauf der Aktivitätskonzentrationen (Bq/l) von  $^{90}\text{Sr}$  in Oberflächenwasser ausgewählter Binnengewässer (Jahresmittelwerte) mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum

## Cs-137 in Oberflächenwasser (logarithmische Skala)

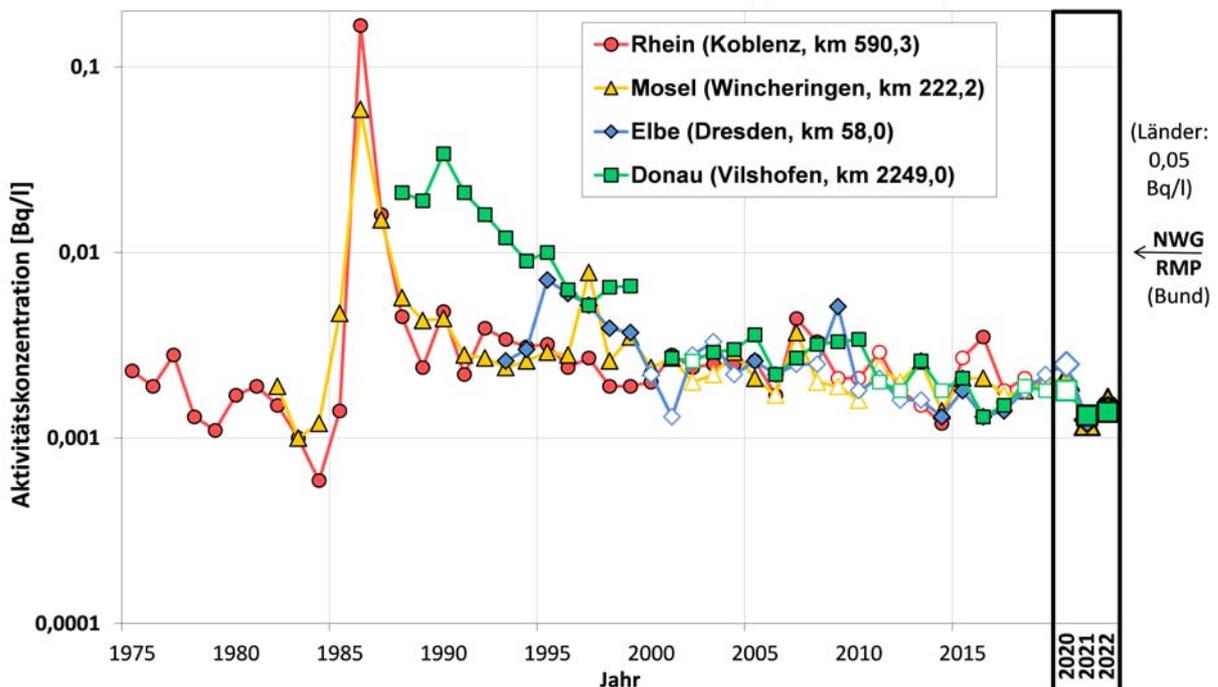


Abbildung 6.4

Zeitlicher Verlauf der Aktivitätskonzentrationen (Bq/l) von  $^{137}\text{Cs}$  in Oberflächenwasser ausgewählter Binnengewässer (Jahresmittelwerte) mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum. Weißer Symbolinhalt kennzeichnet Datensätze mit allen Werten  $< \text{NWG}$

Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

tragenen spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  in Schwebstoffen (Abbildung 6.5) lassen sich die stark erhöhten Werte ab 1986 gefolgt von einem gegenüber dem Oberflächenwasser langsamer verlaufenden Rückgang erkennen. Auch im Berichtszeitraum lagen die meisten Werte in Schwebstoffproben noch oberhalb der NWG des RMP von 5 Bq/kg TM und beispielsweise in der Donau auch noch deutlich über den Werten von vor 1986 (Abbildung 6.5). Die höchsten Einzelwerte der spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  in Schwebstoffen lagen in Fließgewässern bei 91,1 Bq/kg TM (Ems, Lingen, km 96,6). In stehenden Gewässern wurde der Maximalwert mit 274 Bq/kg TM im Steinhuder Meer (Niedersachsen) gefunden. Letzterer kann darauf zurückgeführt werden, dass das langlebige Nuklid  $^{137}\text{Cs}$  in einem Mudden geprägten, grundwassergespeisten Flachsee mit geringem Abfluss und viel Wassersport als sedimentbürtiger Schwebstoff remobilisiert wird.

Die spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  in Sedimenten (Abbildung 6.6) zeigen einen ähnlichen zeitlichen Verlauf in Bezug auf den Tschornobyl-Unfall wie die Schwebstoffproben (Abbildung 6.5). Auch hier lagen die Werte im Berichtszeitraum 2020-2022 überwiegend oberhalb der NWG des RMP von 5 Bq/kg TM. Maximale Einzelwerte für  $^{137}\text{Cs}$

in Fließgewässern wurden mit 255 Bq/kg TM in der Mosel (Koblenz, km 4,0) und 77,0 Bq/kg TM in der Saale (Köditz, km 24,1) gemessen. In stehenden Gewässern wurden die höchsten spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  in Sedimenten im Frillensee (Bayern) mit bis zu 244 Bq/kg TM gemessen. Weitere Beispiele für erhöhte Sedimentgehalte von  $^{137}\text{Cs}$  in stehenden Gewässern, die sich auf verstärkte atmosphärische Deposition durch lokale Niederschlagsereignisse kurz nach dem Tschornobyl-Unfall zurückführen lassen, stellen der Scholener See (Sachsen-Anhalt), das Steinhuder Meer (Niedersachsen), der Wittensee, der Großensee und das Ostroher Moor (Schleswig-Holstein) sowie der Königssee und der Starnberger See (Bayern) mit jeweils mehreren Messwerten  $> 100$  Bq/kg TM im Berichtszeitraum dar.

Die von kerntechnischen Anlagen eingeleiteten anlagenspezifischen Spalt- und Aktivierungsprodukte waren abgesehen von  $^3\text{H}$  (siehe oben) im Fernbereich der jeweiligen Anlagen in Binnengewässern im Allgemeinen nicht nachweisbar oder wegen der Vorbelastung aus anderen Quellen (Fallouts, Nuklearmedizin) nicht eindeutig zuordenbar. Ausnahmen stellen der vereinzelte Nachweis von  $^{58}\text{Co}$  und  $^{60}\text{Co}$  in Schwebstoffen und Sedimenten dar, wobei die mittleren spezifischen Aktivitäten alle unterhalb der geforderten NWG

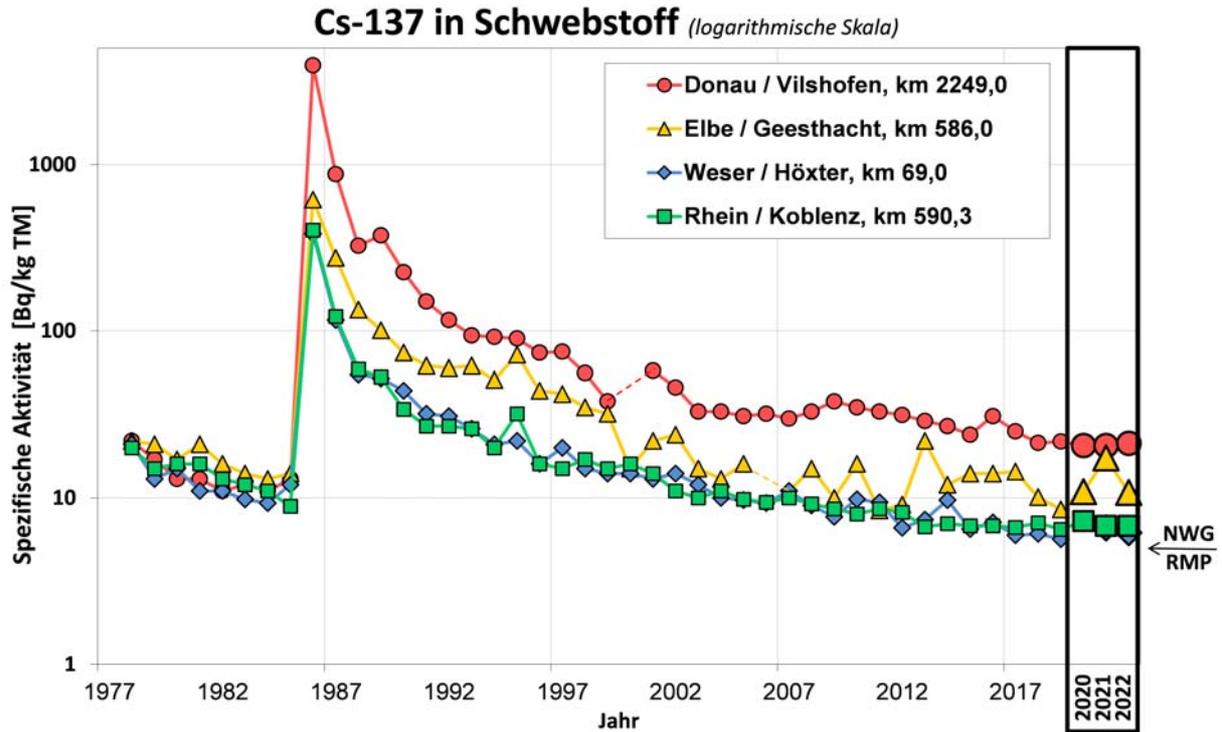


Abbildung 6.5  
 Zeitlicher Verlauf der spezifischen Aktivitäten (Bq/kg TM) von <sup>137</sup>Cs in Schwebstoffproben ausgewählter Binnengewässer (Jahresmittelwerte) mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum  
 Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

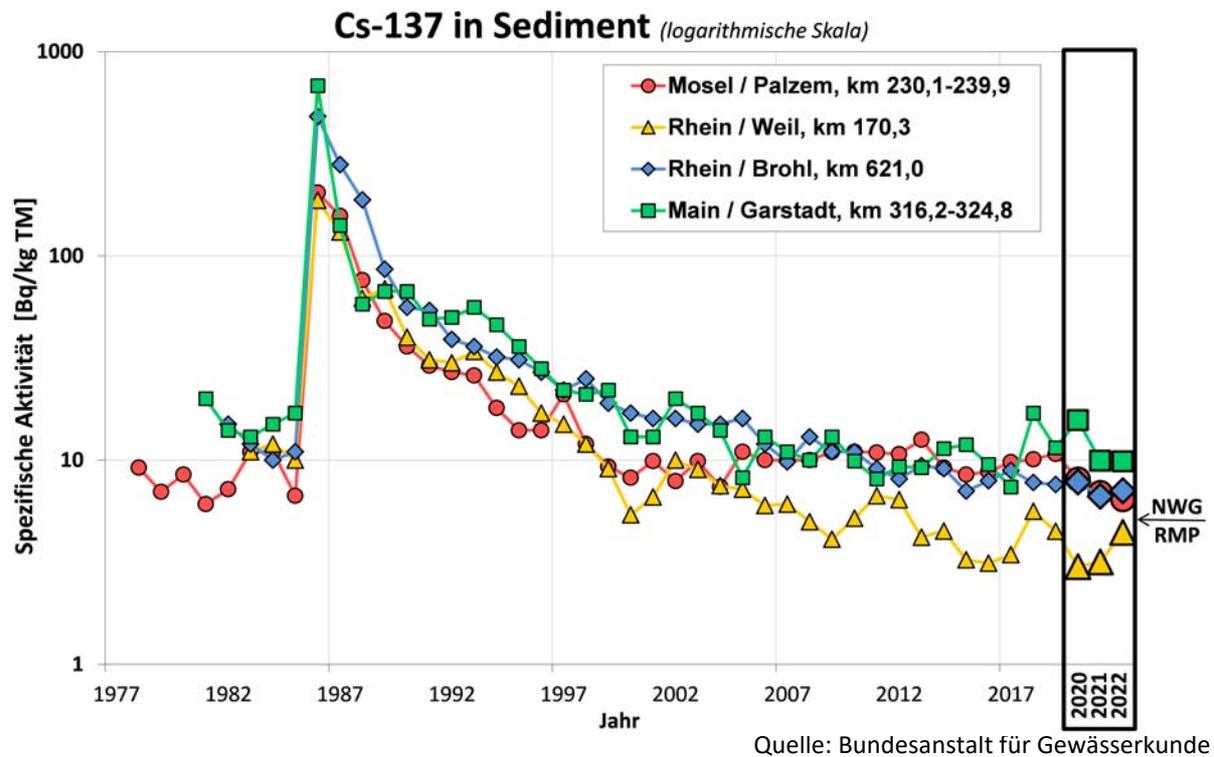


Abbildung 6.6  
 Zeitlicher Verlauf der spezifischen Aktivitäten (Bq/kg TM) von <sup>137</sup>Cs in Sedimentproben ausgewählter Binnengewässer (Jahresmittelwerte) mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum  
 Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

des RMP (Länder) von 5 Bq/kg TM lagen. Maximalwerte wurden jeweils an der Mosel (Perl, km 241,96) mit spezifischen Aktivitäten von 4,1 Bq/kg TM für  $^{58}\text{Co}$  und 4,5 Bq/kg TM für  $^{60}\text{Co}$  gemessen. Das künstliche Radionuklid  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  wurde in Schwebstoffen und Sedimenten im Berichtszeitraum 2020 - 2022 nur in wenigen Einzelproben mit spezifischen Aktivitäten bis 1,3 Bq/kg TM (Rhein, Breisach, km 232,8) nachgewiesen, welches genauso wie das in einer Einzelprobe des Rheins (Philippsburg, km 389,7) mit 0,75 Bq/kg TM nahe an Ausläufen bzw. Entwässerungskanälen in Sedimenten nachgewiesene  $^{54}\text{Mn}$  vermutlich aus den Ableitungen der jeweiligen kerntechnischen Anlagen stammt. Aus den historischen Trends der Jahresmittelwerte von  $^{60}\text{Co}$  in ausgewählten Fließgewässern in Schwebstoffen (Abbildung 6.7) und Sedimenten (Abbildung 6.8) lässt sich erkennen, dass die Messwerte im Berichtszeitraum, wie bereits seit ungefähr dem Jahr 2000, überwiegend unterhalb der erreichten NWG lagen. Die im letzten Berichtszeitraum (2017-2019) leicht ansteigenden Messwerte von  $^{60}\text{Co}$  in Sedimenten der Mosel gingen im aktuellen Berichtszeitraum (2020-2022) wieder in den tieferen Bereich der Vorjahre zurück (Abbildung 6.8)

Ein Bereich, der in letzter Zeit auch in Binnengewässern stärker an Bedeutung gewonnen hat, sind künstliche Radionuklide, die aus der Nuclearmedizin stammen. Dabei handelt es sich überwiegend um relativ kurzlebige Nuklide wie beispielsweise  $^{131}\text{I}$  (HWZ: 8 Tage),  $^{177}\text{Lu}$  (HWZ: 6,6 Tage) oder  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  (HWZ: 6 Stunden), die in der Medizin zu diagnostischen Zwecken oder zur Behandlung eingesetzt werden. Das Abwasser nuklearmedizinischer Einrichtungen wird zwar erst nach einer längeren Abklingphase kontrolliert abgeleitet, jedoch kommt es durch die Ausscheidungen der behandelten Patienten nach der Entlassung aus der Klinik über die Kläranlagen zu Einträgen von Radionukliden in Gewässer. Bedingt durch die relativ kurzen HWZ stellen die Zeitspanne zwischen Probenahme und Messbeginn sowie die Probenart (z. B. Einzel- oder Mischprobe) wichtige Parameter für den Nachweis von Radionukliden aus medizinischen Anwendungen in Gewässern dar. Da in vielen Fällen Monatsmischproben mit Bezugsdatum Monatsmitte untersucht werden, können kurzlebige Nuklide wie beispielsweise  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  in Binnengewässern in der Regel nicht nachgewiesen werden.

Insbesondere  $^{131}\text{I}$  wird aber in den letzten Jahren an einzelnen Messstationen regelmäßig in Schwebstoffen und vereinzelt auch in Oberflä-

chenwasser und Sedimenten nachgewiesen. Auch wenn es sich bei  $^{131}\text{I}$  um ein Nuklid handelt, welches als Spaltprodukt in kerntechnischen Anlagen entsteht und dem im Zusammenhang mit Freisetzungen durch Unfälle (z. B. Tschornobyl) eine große Bedeutung zukommt, so wird inzwischen die Nuclearmedizin als Hauptquelle des in den letzten Jahren in Binnengewässern nachgewiesenen  $^{131}\text{I}$  angenommen. Die Jahresmittelwerte der spezifischen Aktivitäten von  $^{131}\text{I}$  in Schwebstoffproben der Mosel und des Rheins zeigten im Berichtszeitraum keinen Anstieg (Abbildung 6.9B), der Anteil von Proben mit Gehalten oberhalb der NWG nahm jedoch an einigen Stationen tendenziell zu (Abbildung 6.9A). Die maximalen Einzelwerte betragen 147 Bq/kg TM an der Mosel (Palzem, km 299,9) bzw. 30 Bq/kg TM am Rhein (Weil, km 173,0). Weitere Fließgewässer mit mehreren Messwerten  $>10$  Bq/kg TM für  $^{131}\text{I}$  in Schwebstoffen waren im Berichtszeitraum z. B. die Spree (Berlin, km 27,2) und die Saar (Schoden, km 7,7). In Oberflächenwasser wurde  $^{131}\text{I}$  nur selten mit Aktivitätskonzentrationen von maximal 0,05 Bq/l gemessen. Das medizinische Radionuklid  $^{177}\text{Lu}$  wurde im Berichtszeitraum in Schwebstoff insbesondere in Proben aus Weil am Rhein (km 173,0) gefunden, wo in etwa einem Drittel der untersuchten Schwebstoffproben  $^{177}\text{Lu}$  nachgewiesen und mit spezifischen Aktivitäten von bis zu maximal 129 Bq/kg TM gemessen werden konnte.

Radioaktive Stoffe bzw. die von ihnen ausgehende ionisierende Strahlung können auf verschiedenste Weise zum Menschen gelangen und eine innere oder äußere Strahlenexposition bewirken. Im Folgenden sollen beispielhaft für die im aquatischen Bereich sensitiven Expositionspfade „Trinkwasser“ und „Aufenthalt auf Spülfeldern (Sediment)“ effektive Strahlendosen in Anlehnung an § 99 der StrlSchV abgeschätzt werden.

Legt man für zur Trinkwassergewinnung genutzte Flussabschnitte  $^3\text{H}$ -Gehalte von 10 Bq/l sowie  $^{90}\text{Sr}$ - und  $^{137}\text{Cs}$ -Gehalte von je 0,01 Bq/l zu Grunde, so kann der auf dem Expositionspfad „Trinkwasser“ hypothetisch zu erwartende Beitrag zur effektiven Dosis für Erwachsene ( $> 17$  Jahre; 350 l Jahreskonsum von nicht aufbereitetem Wasser) zu ca. 0,21  $\mu\text{Sv/a}$  abgeschätzt werden. Für Kleinkinder ( $< 1$  Jahr; 215 l Jahreskonsum) beträgt die Dosis hier ca. 0,68  $\mu\text{Sv/a}$ . Allein der auf das natürliche Radionuklid  $^{40}\text{K}$  für einen typischen Gehalt von 0,4 Bq/l zu erwartende Dosisbeitrag liegt mit ca. 0,87 bzw. 5,3  $\mu\text{Sv/a}$  fast eine Größenordnung höher. Die hier angenommenen Trinkwasser-Ver-

zehrmenen sind der StrlSchV (Stand 2018), Anlage 11 Teil B Tabelle 1 entnommen.

In Sedimenten war insbesondere  $^{137}\text{Cs}$  noch deutlich nachweisbar. Würde Sediment mit einem  $^{137}\text{Cs}$ -Gehalt von 100 Bq/kg TM bei Ausbaumaßnahmen für die Schifffahrt gebaggert und an Land gelagert, so kann die auf dem Expositionspfad „Aufenthalt auf Spülfeldern“ für Erwachsene (> 17 Jahre) zu erwartende zusätzliche effektive Dosis mit ca. 11  $\mu\text{Sv/a}$  abgeschätzt werden. Der Dosisbeitrag der natürlichen Radionuklide  $^{40}\text{K}$ ,  $\text{Th}_{\text{nat}}$  und  $\text{U}_{\text{nat}}$  bei typischen Gehalten von 500, 40 und 40 Bq/kg TM liegt für diesen Expositionspfad mit insgesamt ca. 28  $\mu\text{Sv/a}$  deutlich höher. Zum Vergleich: Der Dosisgrenzwert nach § 99 der StrlSchV für Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen beträgt 300  $\mu\text{Sv/a}$ .

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der radiologische Gütezustand der Binnengewässer im Berichtszeitraum 2020 - 2022 keinen größeren Veränderungen im Vergleich zu den letzten Vorjahren unterlag. Bezüglich der radiologischen Auswirkungen zeigt sich, wie in anderen Umweltbereichen auch, dass derzeit die natürlichen Radionuklide im Vergleich zu den künstlichen Radionukliden den wesentlichen Anteil zur Strahlendosis beitragen. Der Dosisanteil der künstlichen Radionuklide geht weiterhin in erster Linie auf die Radionuklide zurück, die über die Fallouts der Kernwaffenversuche und des Reaktorunfalls von Tschornobyl in die Gewässer gelangten.

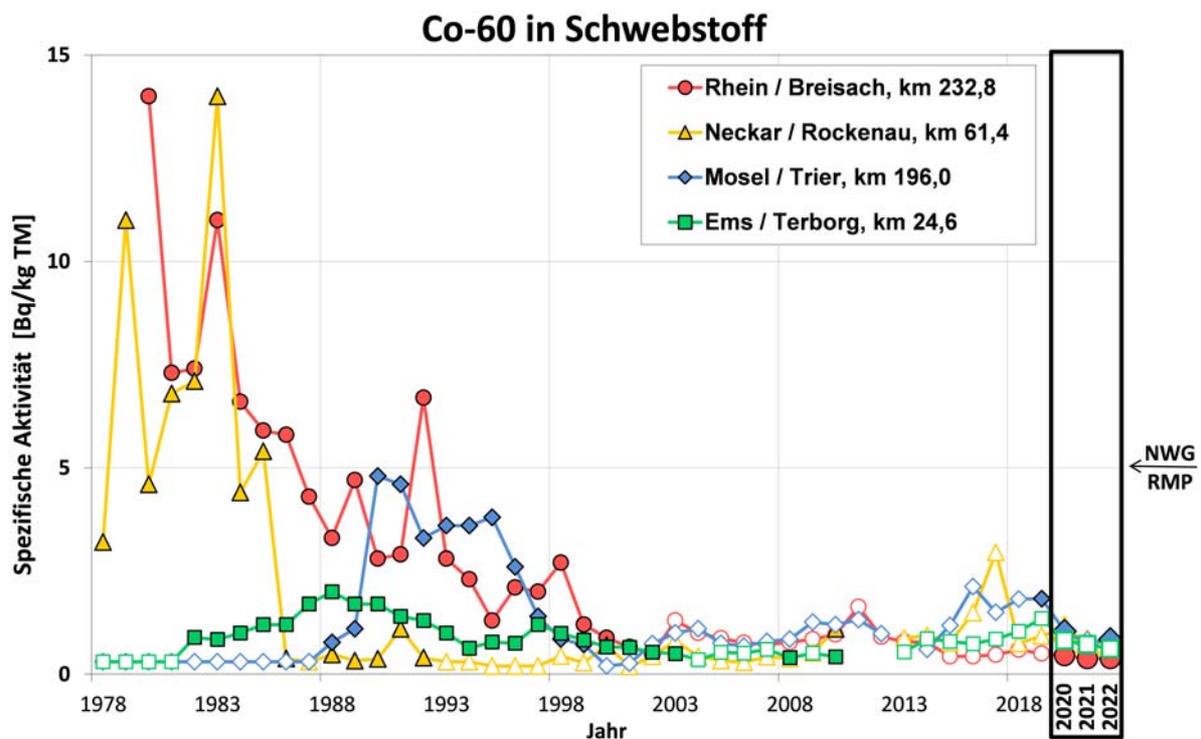
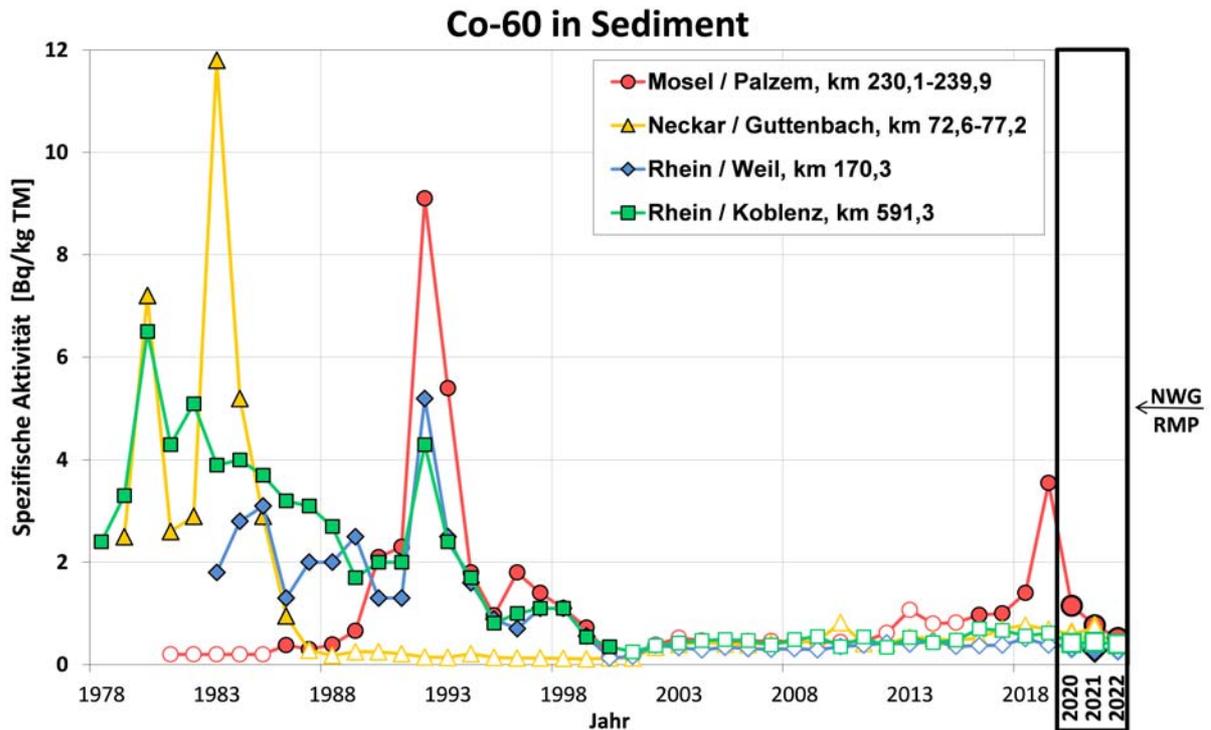


Abbildung 6.7

Zeitlicher Verlauf der spezifischen Aktivitäten (Bq/kg TM) von  $^{60}\text{Co}$  in Schwebstoffproben ausgewählter Binnengewässer (Jahresmittelwerte) mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum. Weißer Symbolinhalt kennzeichnet Datensätze mit allen Werten <NWG

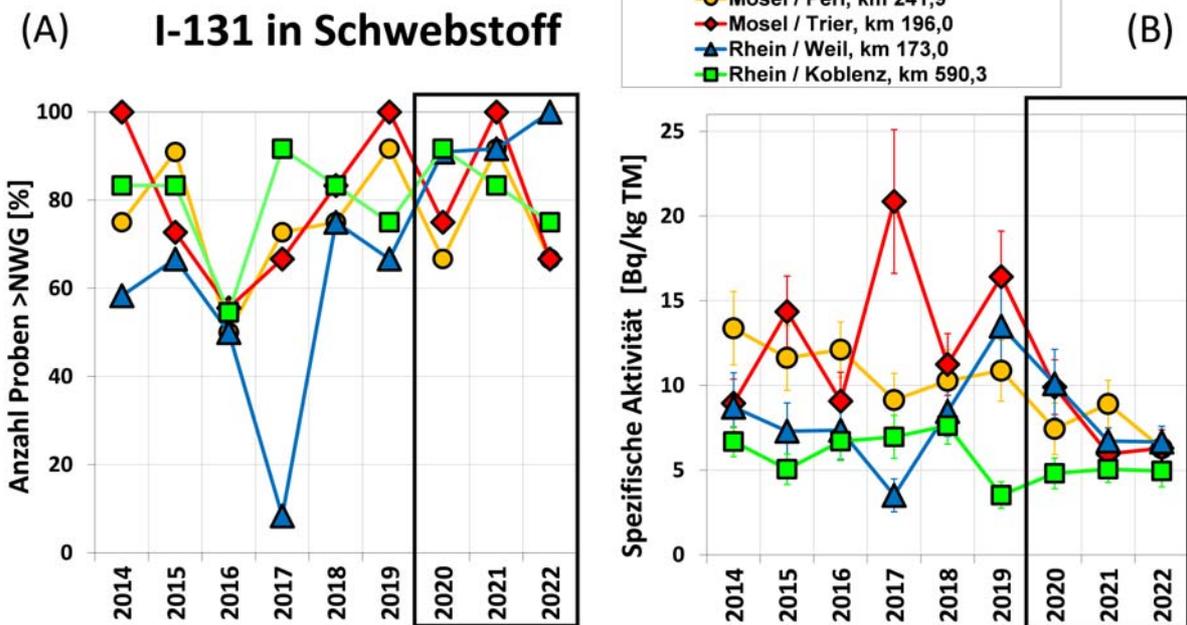
Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde



Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Abbildung 6.8

Zeitlicher Verlauf der spezifischen Aktivitäten (Bq/kg TM) von  $^{60}\text{Co}$  in Sedimentproben ausgewählter Binnengewässer (Jahresmittelwerte) mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum. Weißer Symbolinhalt kennzeichnet Datensätze mit allen Werten  $< \text{NWG}$



Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Abbildung 6.9

Zeitlicher Verlauf von  $^{131}\text{I}$  in Schwebstoffproben ausgewählter Binnengewässer mit hervorgehobenen Werten für den Berichtszeitraum: (A) Anteil der Proben mit Messwerten oberhalb der NWG und (B) Jahresmittelwerte der spezifischen Aktivitäten (Bq/kg TM). Fehlerbalken kennzeichnen die gemittelte Messungengenauigkeit

# 7 RADIOAKTIVE STOFFE IN TRINK- UND GRUNDWASSER

P. Hofmann, K. Schmidt, C. Wittwer

Bundesamt für Strahlenschutz

Leitstelle für Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Abfälle und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen (Leitstelle H)

## Überwachung nach StrlSchG und StrlSchV

Im Rahmen der Überwachung der Umweltradioaktivität (§ 162 StrlSchG) untersuchen die amtlichen Messstellen der Bundesländer entsprechend der AVV IMIS routinemäßig viertel- bis halbjährlich Trinkwasser- und Grundwasserproben an bundesweit jeweils 60 bis 80 Entnahmestellen in Deutschland. Die Auswahl der Probenentnahmeorte wurde unter Berücksichtigung geologische Gegebenheiten und insbesondere der unterschiedlichen Beeinflussung der Grundwässer durch Niederschlag und Oberflächenwasser getroffen.

Im Rahmen der Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen (§ 103 StrlSchV) werden in deren Umgebung bundesweit weitere ca. 50 Trink- und 150 Grundwasserentnahmestellen viertel- bis halbjährlich beprobt.

Die Proben werden vorwiegend mittels Gamma-spektrometrie untersucht und hierbei die Aktivitätskonzentrationen von z. B.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$  ermittelt. Des Weiteren werden über radiochemische Verfahren die Aktivitätskonzentrationen für Tritium ( $^3\text{H}$ ) und  $^{90}\text{Sr}$  sowie – im Rahmen der Überwachung der Umweltradioaktivität – zusätzlich der Uran- und Plutoniumisotope bestimmt.

In Tabelle 7.1 sind die Gehalte an  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , Gesamt-Alpha und Tritium ( $^3\text{H}$ ) im Trinkwasser und Grundwasser in Deutschland für die Jahre 2020 bis 2022 zusammengestellt. Zum Vergleich sind auch die Messwerte für das natürliche Radionuklid  $^{40}\text{K}$  in den Tabellen aufgeführt. Angegeben werden jeweils die Gesamtanzahl der untersuchten Proben, die Anzahl der untersuchten Proben mit dem Ergebnis kleiner Nachweisgrenze (NWG), sowie der kleinste und größte bestimmte tatsächliche Messwert.

Um einen besseren Überblick über die zeitliche Entwicklung der Daten zu erhalten, ist zusätzlich für jedes Berichtsjahr berechnete parameter-spezifische Median in der Tabelle dokumentiert. Für dessen Kalkulation wird ein Ergebnis kleiner Nachweisgrenze gleichrangig wie ein tatsächlicher Messwert berücksichtigt, indem dieser mit dem Wert der Nachweisgrenze gleichgesetzt wird. Für die Daten aus dem Jahr 2020 wird zu-

sätzlich auf den bereits veröffentlichten Jahresbericht „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ des BMUV [23] verwiesen.

## Trinkwasser

Für Trinkwasser sind für den genannten Berichtszeitraum für nahezu alle übermittelten  $^{137}\text{Cs}$ -Ergebnisse (mehr als 99 %) die erreichten Nachweisgrenzen angegeben worden. Als Nachweisgrenze im Trinkwasser werden in beiden Messprogrammen in der Routine 0,05 Bq/l bezogen auf  $^{60}\text{Co}$  gefordert. Die insgesamt drei ermittelten  $^{137}\text{Cs}$ -Messwerte für die Berichtsjahre 2020 bis 2022 reichten von 0,00033 bis 0,0039 Bq/l und lagen damit im Vergleich weit unterhalb der geforderten Nachweisgrenze für  $^{60}\text{Co}$ .

$^{90}\text{Sr}$ , hauptsächlich aus dem Fallout der Kernwaffenversuche in den 1950er und 1960er Jahren stammend, konnte in etwa 38 % der Trinkwasserproben mit Aktivitätskonzentrationen von 0,00007 Bq/l bis 0,034 Bq/l nachgewiesen werden. Als Nachweisgrenze wird im Routinemessprogramm zur Überwachung der Umweltradioaktivität für Trinkwasser und Grundwasser 0,01 Bq/l und im Rahmen der Emissions- und Immissionsüberwachung für Trinkwasser 0,02 Bq/l gefordert.

Die übermittelten Daten für die Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration entstammen alle ausschließlich von Proben aus der Umgebungsüberwachung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Die für die Jahre 2020 bis 2022 jeweils aus sämtlichen Ergebnissen berechneten Mediane sind vergleichbar.

Die Maximalwerte der Tritium-Aktivitätskonzentration wurden in den Jahren 2020 bis 2022 mit 16, 13 und 11 Bq/l im Rahmen der Umgebungsüberwachung bei kerntechnischen Anlagen des KIT ermittelt. Diese Proben stammten aus Einzelwasserversorgungen in der Nähe eines Altrheinarms, der in der Fließrichtung von Grund- und Oberflächenwasser aus dem Bereich des KIT, Campus Nord, liegt. Selbst unter der Annahme, dass der gesamte Trinkwasserbedarf mit Wasser aus diesen Einzelwasserversorgungen gedeckt werden würde, ergäbe sich nur eine unwesentliche Erhöhung der Exposition für Einzelpersonen der Bevölkerung gegenüber der natürlichen Strahlenexpo-

sition. Das Trinkwasser aus öffentlichen Wasserversorgungen in den Ortschaften in der Umgebung des KIT weist Tritium-Aktivitätskonzentrationen von <10 Bq/l auf. Der mit der geänderten Trinkwasserverordnung (TrinkwV) vom 18. November 2015 an geltende Parameterwert für Tritium von 100 Bq/l wird damit vollumfänglich eingehalten [24]. Bezüglich der Grundlagen zur Radioaktivität im Grund- und Trinkwasser und der daraus resultierenden Exposition für die Bevölkerung wird auf [25] verwiesen.

### Grundwasser

Im Grundwasser wurde für  $^{137}\text{Cs}$  für das Berichtsjahr 2021 ein Messwert in Hamburg mit 0,00023 Bq/l (Nachweisgrenze 0,00042 Bq/l) ermittelt. Im Berichtsjahr 2022 wurde in Gundelfingen a.d. Donau im Rahmen der Umgebungsüberwachung der kerntechnischen Anlage Gundremmingen ein Messwert von 0,078 Bq/l (Nachweisgrenze: 0,033 Bq/l) gemessen.

$^{90}\text{Sr}$  konnte in 45 % der Grundwasserproben mit Aktivitätskonzentrationen zwischen 0,00011 Bq/l und 0,087 Bq/l bestimmt werden. Der für 2020 bis 2022 jeweilig berechnete Median betrug 0,0036 Bq/l, 0,004 Bq/l und <0,003 Bq/l.

Messwerte für die Gesamt-Alpha-Aktivitätskonzentration stammen ausschließlich aus der Umgebungsüberwachung des KIT in Baden-Württemberg. Die hierbei übermittelten Ergebnisse der zu betrachtenden Berichtsjahre stimmen gut miteinander überein. Im Rahmen der Umgebungsüberwachung des Brennelemente-Zwischenlagers in Ahaus in Nordrhein-Westfalen und der Überwachung der Umweltradioaktivität in den Gemeinden Bleckede und Lamspringe in Niedersachsen

wurden lediglich Nachweisgrenzen für die Gesamt-Alpha-Aktivität übermittelt.

In etwa 10 % der Grundwasserproben wurden im Berichtszeitraum 2020 bis 2022 Messwerte für Tritium in der Größenordnung zwischen 0,72 Bq/l und 12 Bq/l bestimmt. Die höchsten Tritium-Aktivitätskonzentrationen wurden im Rahmen der Umgebungsüberwachung des Kernkraftwerks Philippsburg gemessen mit 11 Bq/l (2021) und 12 Bq/l (2020). Alle weiteren übermittelten Messwerte liegen unterhalb der in beiden Messprogrammen geforderten Nachweisgrenze für Tritium von 10 Bq/l.

Die Exposition der Bevölkerung durch künstliche radioaktive Stoffe auf dem Weg über das Trinkwasser ist sehr niedrig gegenüber der Exposition, die durch natürliche Radionuklide insgesamt verursacht wird. Legt man jeweils den Maximalwert für  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  für den Berichtszeitraum 2020 bis 2022 zu Grunde (Tabelle 7.1), ergeben sich bei einem angenommenen jährlichen Trinkwasserverzehr von 700 Liter für den Erwachsenen nach StrlSchV Ingestionsdosen von 0,035  $\mu\text{Sv/a}$  bzw. 0,67  $\mu\text{Sv/a}$ . Im Vergleich hierzu beträgt die mittlere Ingestionsdosis (Medianwert) für Erwachsene durch den Verzehr von Trinkwasser in Deutschland einer vom BfS durchgeführten Studie zufolge 8,6  $\mu\text{Sv/a}$  [26]. In der Trinkwasser-Studie wurden insgesamt 582 Trinkwasserproben aus weiten Teilen Deutschlands auf natürliche Radionuklide ( $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ) untersucht und die Exposition durch die Aufnahme dieser natürlichen Radionuklide mit dem Trinkwasser bestimmt. Im Unterschied zur TrinkwV [24] enthält die ermittelte Ingestionsdosis der BfS-Studie auch den Beitrag von  $^{222}\text{Rn}$ .

**Tabelle 7.1**  
**Überwachung von Trinkwasser und Grundwasser in Deutschland 2020-2022**

Nuklid	Anzahl		Minimalwert	Maximalwert	Median <sup>a</sup>		
	gesamt	< NWG					
<b>Trinkwasser (Bq/l)</b>							
<b>2020 - 2022</b>					<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>
<sup>40</sup> K	1527	972	0,0023	4,2	<0,18	0,17	<0,2
<sup>137</sup> Cs	1516	1513	0,00033	0,0039	<0,008	<0,0077	<0,0089
<sup>3</sup> H	937	823	0,71	16	<4,1	<3,7	<4,4
<sup>90</sup> Sr	425	262	7,0E-05	0,034	<0,0043	0,0043	<0,004
G-Alpha	18	0	0,027	0,056	0,036	0,035	0,033
<b>Grundwasser (Bq/l)</b>							
<b>2017 - 2019</b>					<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
<sup>40</sup> K	1149	648	0,015	23	0,38	<0,45	0,4
<sup>137</sup> Cs	1215	1213	0,00023	0,078	<0,016	<0,017	<0,016
<sup>3</sup> H	1379	1238	0,72	12	<5,7	<5,5	<5,3
<sup>90</sup> Sr	227	125	0,00011	0,087	0,0036	0,004	<0,003
G-Alpha	115	46	0,017	0,14	0,037	0,042	0,027

a Der angegebene Median berücksichtigt das Messergebnis „<NWG“ so, als wäre ein tatsächlicher Messwert gleich der NWG erhalten worden.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Leitstelle für Meerwasser, Meeresschwebstoff und -sediment (Leitstelle D)

In diesem Kapitel wird der aktuelle Zustand von Nord- und Ostsee hinsichtlich der Kontamination durch künstliche Radionuklide in den Jahren 2020 bis 2023 beschrieben. Grundlage der Bewertung sind jährlich zwei bis drei Überwachungsfahrten mit eigenen und gecharterten Forschungsschiffen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie sowie zahlreiche Wasserproben, die regelmäßig auch von anderen Schiffen des Bundes an festgelegten Positionen entnommen werden. Damit sind sowohl Aussagen über die räumliche Verteilung als auch über die zeitlichen Trends möglich. Wegen coronabedingter Maßnahmen fand im Jahr 2020 keine Fahrt in die Ostsee und im Jahr 2021 keine Fahrt in die Nordsee statt.

In Nord- und Ostsee können künstliche Radionuklide aus folgenden Quellen nachgewiesen werden:

- Globaler Fallout der atmosphärischen Kernwaffentests der 1950er und 1960er Jahre,
- Ableitungen aus den Wiederaufbereitungsanlagen in Sellafield und La Hague,
- Fallout des Reaktorunfalls von Tschernobyl (russ.: Tschernobyl) im Jahr 1986 und
- Ableitungen kerntechnischer Anlagen wie zum Beispiel Kernkraftwerke und Forschungsreaktoren.

Seit Beginn der 1970er Jahre bestimmten die kontrollierten und genehmigten Einleitungen radioaktiver Abwässer der europäischen Wiederaufbereitungsanlagen für Kernbrennstoffe La Hague (Frankreich) in den Englischen Kanal und Sellafield (Großbritannien) in die Irische See die Aktivitätskonzentration künstlicher Radionuklide in der Nordsee. Diese Kontaminationen werden von Meeresströmungen in andere Meeresgebiete verfrachtet und können dort auch über Entfernungen von mehreren tausend Kilometern nachgewiesen werden. Entsprechend der langen Transportdauern sind nur langlebige Radionuklide mit Halbwertszeiten größer als ein Jahr von Interesse. Die künstliche Radioaktivität in der Ostsee wurde vor dem Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl durch den Fallout der atmosphärischen Kernwaffentests der 1960er Jahre sowie durch den Einstrom kontaminierten Nordseewassers aus dem Skagerrak und Kattegat durch die Beltsee bestimmt.

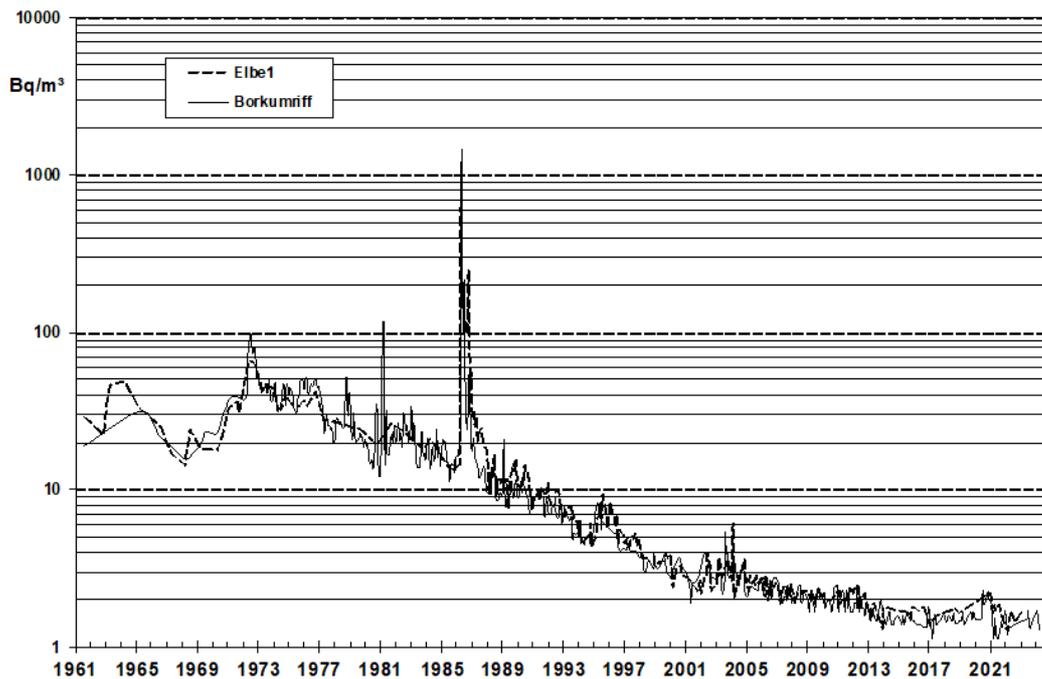
Einleitungen aus Kernkraftwerken oder anderen kerntechnischen Anlagen spielen für das Aktivitätsinventar der Nord- und Ostsee eine untergeordnete Rolle. Sie sind hauptsächlich in unmittelbarer Umgebung dieser Anlagen nachzuweisen.

Dies gilt auch für die bis 1982 durchgeführte Versenkung schwach-radioaktiver Abfälle in mehr als 4 000 Metern Tiefe im Nordostatlantik. Auch die früheren Versenkungen radioaktiver Abfälle durch die ehemalige UdSSR in der Barents- und Karasee sowie das 1989 gesunkene russische Atom-U-Boot „Komsomolets“ in einer Tiefe von etwa 1 700 Metern in der Norwegensee führt zu keiner erhöhten Belastung dieser Meeresgebiete oder gar der Nordsee – eine erhöhte Kontamination konnte im Jahr 2019 nur in unmittelbarer Umgebung der „Komsomolets“ nachgewiesen werden [27].

Die Einleitungen aus den Wiederaufbereitungsanlagen La Hague und Sellafield lagen in den 1970er Jahren um mehrere Größenordnungen höher als in den letzten Jahren. Erhebliche Anstrengungen der Betreiber auf Grund internationalen Drucks führten dazu, dass die Einleitungen beider Wiederaufbereitungsanlagen für fast alle Radionuklide stark reduziert wurden. Dies führt auch im Meerwasser der Nordsee zu deutlich geringeren Konzentrationen der meisten künstlichen Radionuklide. So nahm bis Ende der 1990er Jahre die Aktivitätskonzentration des  $^{137}\text{Cs}$  in der mittleren Nordsee mit einer durch den Transport bedingten Verzögerung von zwei bis drei Jahren kontinuierlich ab und erreicht nahezu die Hintergrundkonzentration des globalen Fallouts im Wasser des Nordatlantiks.

Durch den sehr geringen Wasseraustausch der Ostsee mit der Nordsee durch die dänischen Meerengen ist die durch den Tschernobyl-Unfall eingetragene Aktivität im Meerwasser der Ostsee über einen längeren Zeitraum verblieben. Die Menge des Zuflusses an salzreichem und radioaktivitätsarmem Nordseewasser durch die Bodenschicht des Kattegats ist dabei von Jahr zu Jahr variabel – abhängig von meteorologischen Ereignissen und den Ein- und Ausstromereignissen durch die Beltsee. Der zeitliche Verlauf schwankt geringer im Bereich der Arkonasee, wo der Ein- und Ausstrom weniger deutlich zum Ausdruck kommt. Kompensiert wird der Zufluss an

### Zeitreihe der Cs-137-Aktivitätskonzentration an zwei Positionen in der Deutschen Bucht



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.1**

**Zeitlicher Verlauf der  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) an den Positionen der ehemaligen Feuerschiffe „Borkumriff“ und „Elbe 1“ in der Deutschen Bucht**

Nordseewasser durch einen stetigen Ausfluss an Oberflächenwasser aus der Ostsee in den Skagerrak. Die Ostsee stellt dadurch seit einigen Jahren die stärkste Quelle für  $^{137}\text{Cs}$  im Nordatlantik dar. Die Dauer für einen vollständigen Wasseraustausch der Ostsee wird mit 20 bis 30 Jahren angenommen. Inzwischen nimmt jedoch auch in der Ostsee die  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration deutlich ab.

#### Meerwasser in der Nordsee

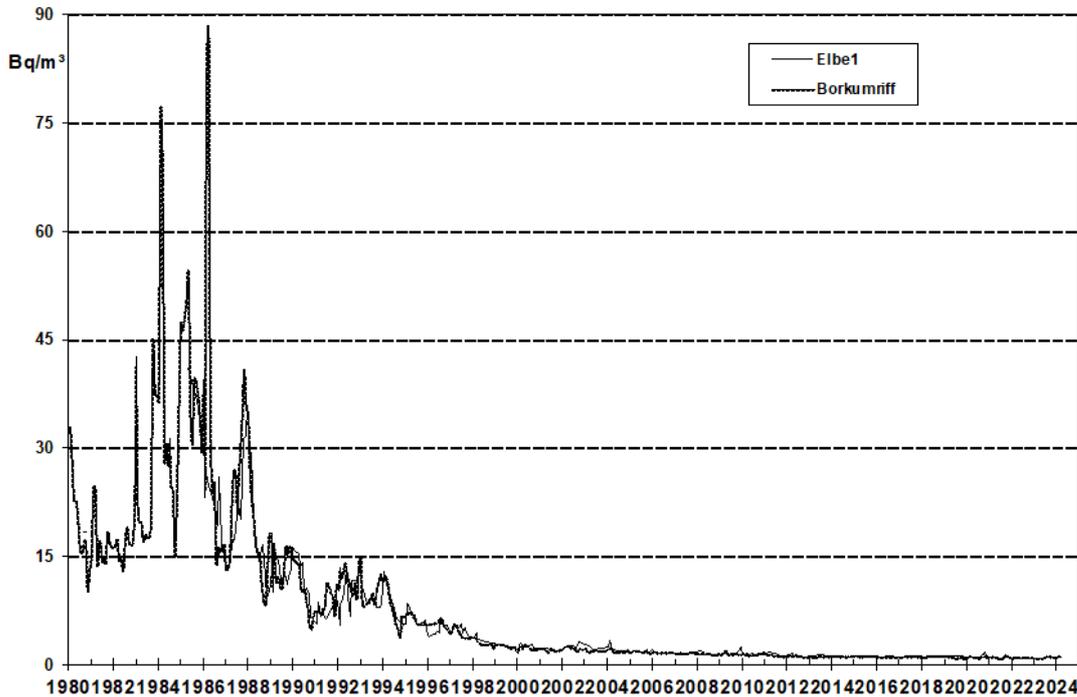
Zusätzlich zu den Überwachungsfahrten werden an den Positionen der früheren Feuerschiffe *Borkumriff* und *Elbe 1* in der Deutschen Bucht Proben möglichst monatlich entnommen.

Die Zeitreihen der Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  an den oben genannten Stationen seit 1961 bzw. 1980 sind in den Abbildungen 8.1 und 8.2 gezeigt. Bereits seit einigen Jahren sind nur noch sehr niedrige Werte messbar. Der Grund dafür ist, dass aus den Wiederaufbereitungsanlagen Sellafield und La Hague nur noch sehr gering kontaminierte Ableitungen dieser beiden Radionuklide zu verzeichnen sind. Zeitverzögert infolge des Reststroms innerhalb der europäischen Schelfmeere liegen die Konzentrationen nur noch geringfügig über den Aktivitätskonzentrationen

des Oberflächenwassers des Atlantiks. Dieses ist im Wesentlichen durch die Reste des Fallouts der oberirdischen Kernwaffentests der 1960er Jahre gekennzeichnet. Ein Eintrag von  $^{137}\text{Cs}$  aus der Elbe ist nicht zu erkennen. Der Fallout von Tschornobyl mit seinem charakteristischen Verhältnis der Radionuklide  $^{134}\text{Cs}$  zu  $^{137}\text{Cs}$  war in der Deutschen Bucht bereits zwei bis drei Jahre nach dem Unfall nicht mehr zu messen.  $^{134}\text{Cs}$  ist im Wasser der Nordsee ebenfalls nicht mehr nachweisbar mit einer Nachweisgrenze kleiner  $0,3 \text{ Bq}/\text{m}^3$ .

Die Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  des Oberflächenwassers in der Deutschen Bucht (Abbildungen 8.3, 8.4 und 8.5) liegt zwischen  $1,3 \text{ Bq}/\text{m}^3$  an der Elbemündung bis  $2,6 \text{ Bq}/\text{m}^3$  in der äußeren Deutschen Bucht. Im Vergleich zu den 1990er Jahren sind die Konzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  um den Faktor 6 bis 10 niedriger. Eine eindeutige Zuordnung zu einer Quelle ist bei diesen geringen Werten kaum noch möglich. Dagegen ist die Aktivitätskonzentration von  $3,7 \text{ Bq}/\text{m}^3$  am Ausgang des Skagerraks eindeutig dem Ausstrom aus der Ostsee zuzuordnen (Abbildung 8.6 und 8.7). Am Ausgang des Skagerraks wird regelmäßig an ausgewählten Stationen auch die Wassersäule bis in Tiefen von etwa 500 Metern beprobt. Anhand dieser Profile ist die unterschiedliche Schichtung

**Zeitreihe der Strontium-90-Aktivitätskonzentration an zwei Positionen in der Deutschen Bucht**



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.2**

**Zeitlicher Verlauf der  $^{90}\text{Sr}$ -Aktivitätskonzentration ( $\text{Bq/m}^3$ ) an den Positionen der ehemaligen Feuerschiffe „Borkumriff“ und „Elbe 1“ in der Deutschen Bucht**

des Meerwassers – oben Ostseewasser mit höheren Aktivitätskonzentrationen an  $^{137}\text{Cs}$ , unten Nordseewasser mit niedrigeren Aktivitätskonzentrationen an  $^{137}\text{Cs}$  – zu erkennen.

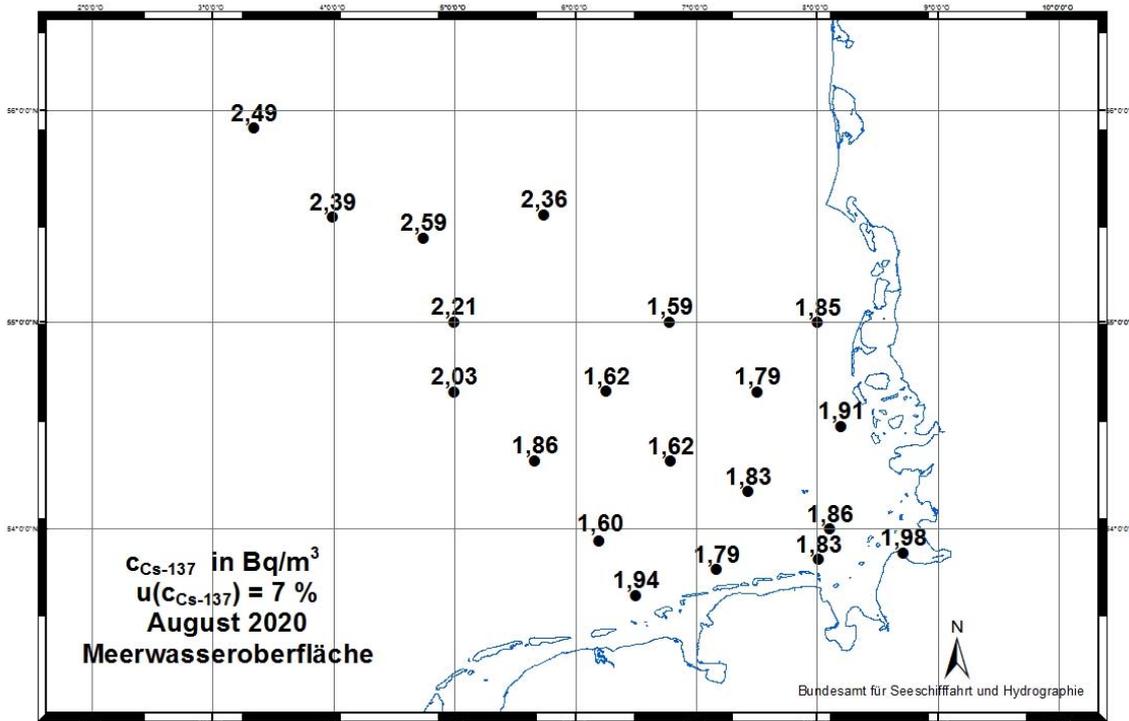
Die  $^{90}\text{Sr}$ -Aktivitätskonzentrationen sind räumlich relativ homogen verteilt (Abbildungen 8.8 bis 8.12). Die gegenüber  $^{137}\text{Cs}$  geringeren Konzentrationen sind auf die unterschiedliche Spaltausbeute der beiden Radionuklide bei der Kernspaltung zurückzuführen und weisen oberirdische Kernwaffenversuche der 1960er Jahre als Hauptquelle aus.

Die Aktivitätskonzentrationen des Tritiums ( $^3\text{H}$ ) sind in Abbildungen 8.13 bis 8.16 dargestellt. Sie ist grundsätzlich um etwa drei Größenordnungen höher als die der radiotoxikologisch relevanten Nuklide  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$ . Offensichtlich sind die Küstengewässer der Deutschen Bucht höher kontaminiert als die zentrale Nordsee. Dies ist zurückzuführen sowohl auf die Einleitungen der Anlage La Hague als auch auf die Ableitungen der kontinentalen kerntechnischen Anlagen über die Flüsse. Durch den zusätzlichen Verdünnungseffekt während des langen Transportweges nördlich um die britischen Inseln herum ergeben sich für die zentrale Nordsee sehr geringe Konzentrationen.

Die nördlichen Gewässer der britischen Inseln weisen  $^3\text{H}$ -Aktivitätskonzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze auf.

### Meerwasser in der Ostsee

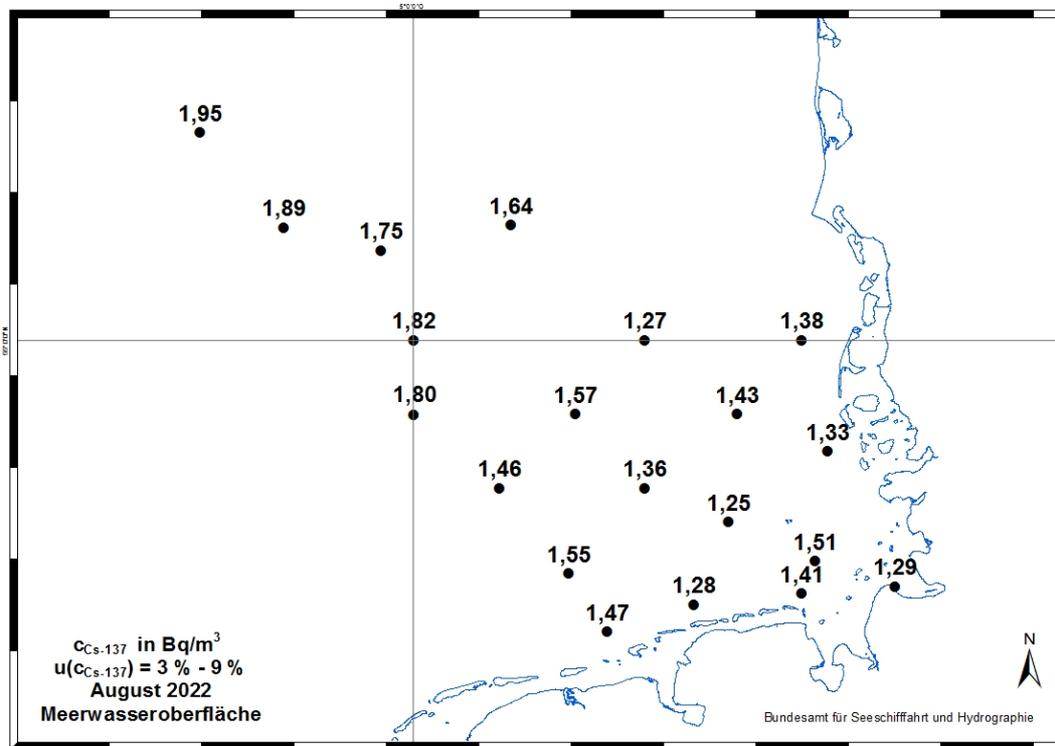
Der Eintrag von Fallout durch den Reaktorunfall von Tschornobyl war in der Ostsee hoch. Der Schwerpunkt des Eintrages lag in der südlichen Bottensee, im Finnischen Meerbusen und – in geringerem Maße – in der Lübecker Bucht. Wegen des nur geringen Wasseraustausches mit dem Weltozean dauert es Jahrzehnte, bis Schadstoffe aus der Ostsee entfernt werden. Dies ist seit über 30 Jahren auch mit dem Radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  aus Tschornobyl zu beobachten. Die Ostsee ist das größte Brackwassermeer der Welt. Insgesamt besteht ein Süßwasserüberschuss, der mit dem salzarmen Oberflächenwasser über die Beltsee in die Nordsee ausgetragen wird. In der Tiefenschicht findet der Einstrom salzreichen Ozeanwassers statt. Dieses Wechselspiel spiegelt sich auch in den Konzentrationen des Radionuklids  $^{137}\text{Cs}$  wider: Im Oberflächenwasser befinden sich die höheren Konzentrationen aus dem Tschornobyl-Fallout, im Tiefenwasser finden sich meist etwas niedrigere Konzentrationen bei höherem Salzgehalt. Besonders deutlich ist dies im Bereich des



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.3

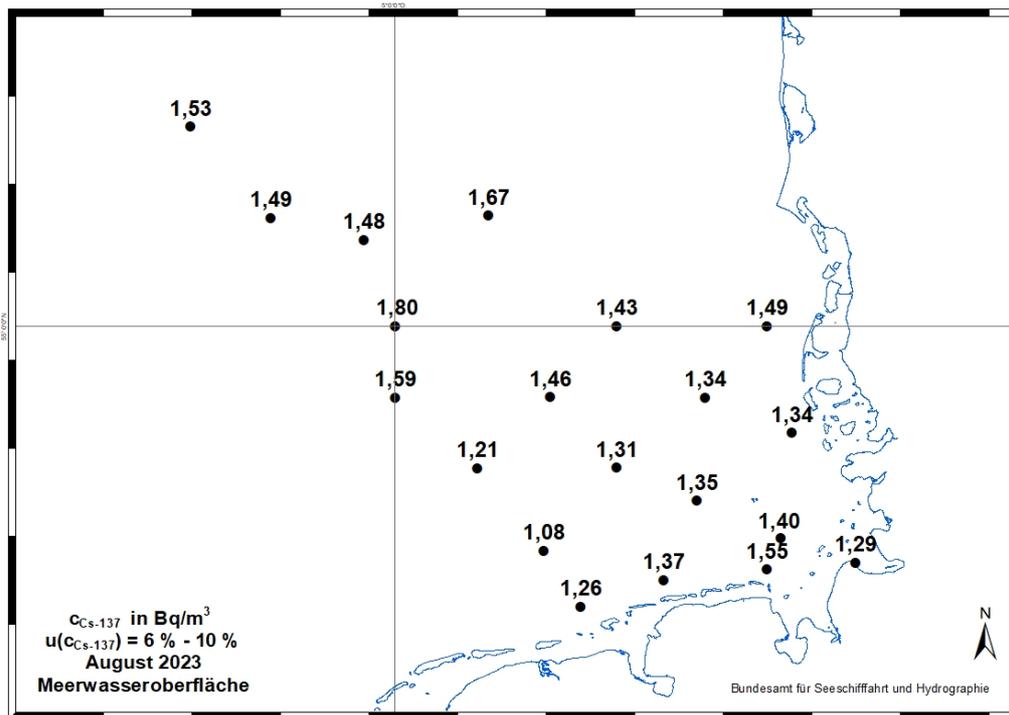
Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  im August 2020 in der Nordsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.4

Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  im August 2022 in der Nordsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.5**  
 Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  im August 2023 in der Nordsee

Großen Belts zu sehen. Aktuelle Berechnungen zeigen, dass das Vor-Tschornobyl-Niveau der  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration von  $15 \text{ Bq/m}^3$  im westlichen Teil der Ostsee voraussichtlich zwischen 2025 und 2030 wieder erreicht werden wird.

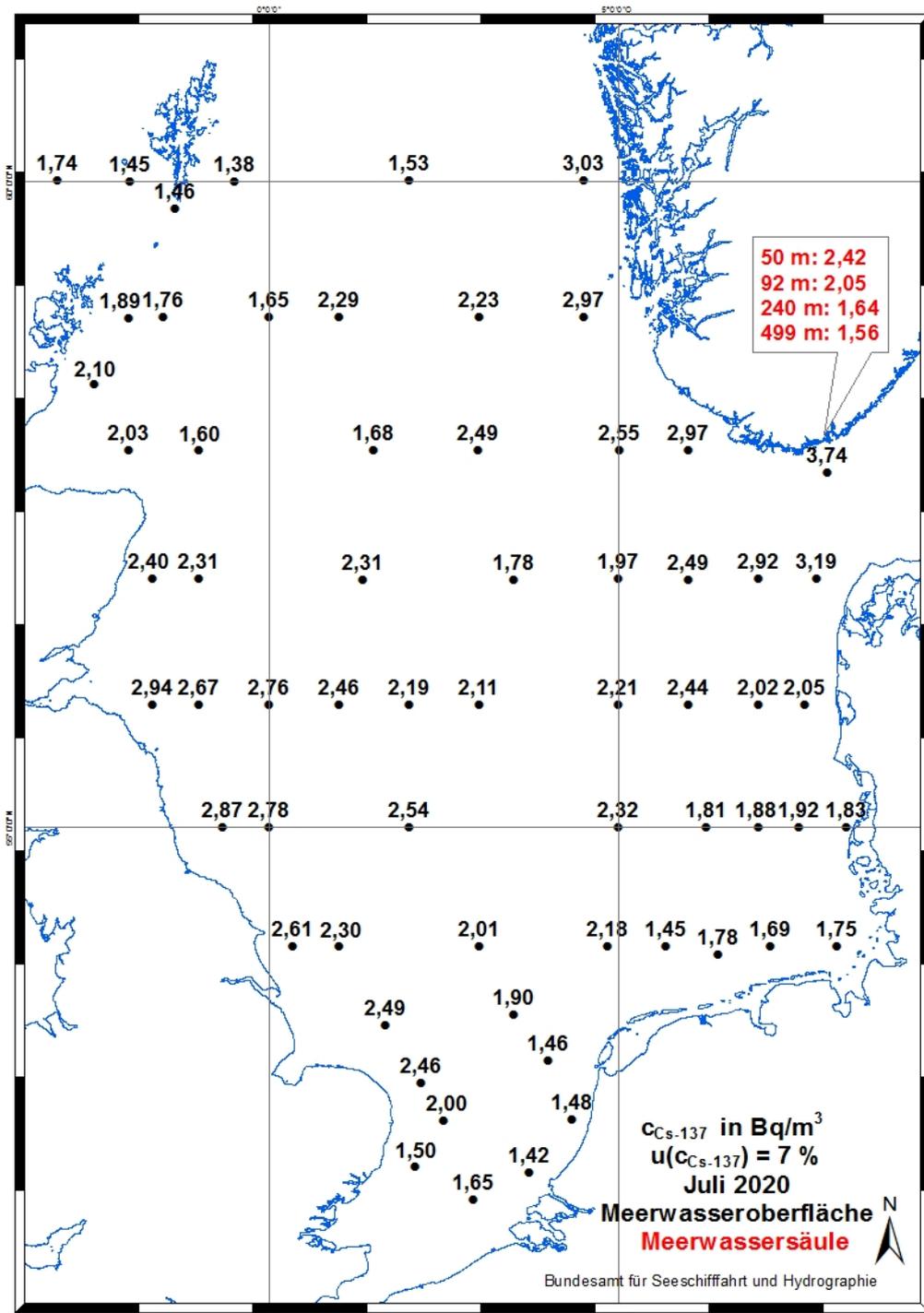
In [Abbildung 8.17](#) ist der zeitliche Verlauf der Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  im Oberflächenwasser an der Position Schleimündung in der Ostsee zu sehen. Deutlich zu erkennen sind die höheren Konzentrationen beider Nuklide in den 1960er Jahren und die höhere Konzentration des  $^{137}\text{Cs}$  seit dem Tschornobyl-Unfall. Die jahreszeitlichen Schwankungen der  $^{137}\text{Cs}$ -Konzentrationen sind bestimmt durch den jahreszeitlich schwankenden Ein- und Ausstrom des Ostseewassers.

Die Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  an der Meerwasseroberfläche lag unter  $15 \text{ Bq/m}^3$  im westlichen und über  $15 \text{ Bq/m}^3$  im östlichen Teil der westlichen Ostsee ([Abbildungen 8.18 bis 8.20](#)). Vor dem Jahr 2020 lag sie noch über  $20 \text{ Bq/m}^3$ . Die Konzentrationen nehmen nach Osten nach wie vor leicht zu – in Richtung des Schwerpunktes des Tschornobyl-Fallouts. Obwohl die

Kontamination der westlichen Ostsee sich gegenüber den Vorjahren verringert hat, liegt sie immer noch um den Faktor 10 über derjenigen der Deutschen Bucht. Während die Wassersäule der Ostsee im überwiegenden Teil bis hinunter zum Meeresboden eine große Homogenität der Aktivitätskonzentration aufweist, lässt sich im bodennahen Wasser der Beltsee der Einstrom des Nordseewassers durch die deutlich geringere Konzentration an  $^{137}\text{Cs}$  nachweisen.

Die Aktivitätskonzentrationen von  $^{90}\text{Sr}$  liegen in der westlichen Ostsee zwischen  $3,9 \text{ Bq/m}^3$  und  $6,7 \text{ Bq/m}^3$  und damit bis um den Faktor 5 höher als in der Deutschen Bucht ([Abbildungen 8.21 bis 8.23](#)). Die Quelle des  $^{90}\text{Sr}$  ist nahezu ausschließlich der globale Fallout aus den 1960er Jahren. Die Kombination aus hoher Mobilität des  $^{90}\text{Sr}$  mit dem sehr umfangreichen Einzugsgebiet der Ostsee und dem damit verbundenen hohen Süßwasserzufluss führen zu einem höheren Gehalt an  $^{90}\text{Sr}$ . Im bodennahen Wasser der Beltsee ist der Einstrom des geringer an  $^{90}\text{Sr}$  kontaminierten Nordseewassers erkennbar.

Die Aktivitätskonzentrationen des Tritiums ([Abbildungen 8.24 bis 8.26](#)) sind in der westlichen

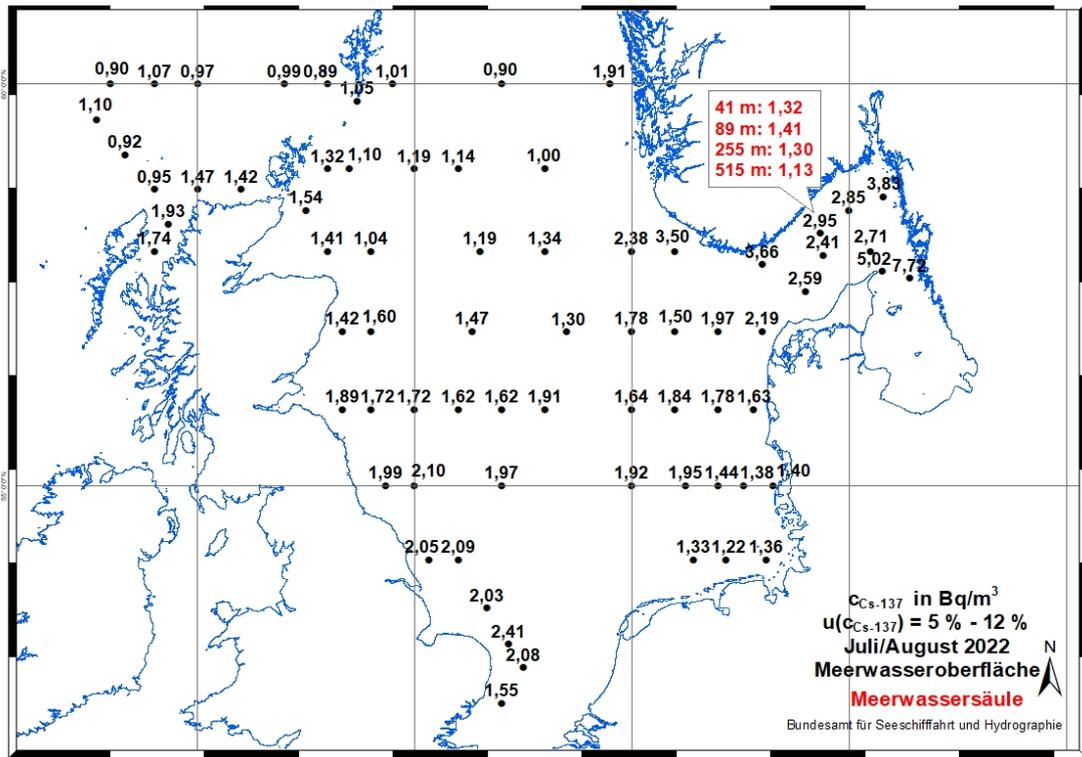


Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.6**  
Aktivitätskonzentration von <sup>137</sup>Cs an der Wasseroberfläche und in der Wassersäule im Juli 2020 in der Nordsee

Ostsee sehr homogen, weil sie vom Kernwaffenfallout und von natürlichen Quellen und nicht vom Tschernobyl-Unfall bestimmt werden. Es gibt im Einzugsbereich der Ostsee keine kerntechnische Anlage, die vergleichbar hohe Tritiumaktivitätskonzentrationen einleitet wie zum Beispiel die Anlage La Hague im englischen Kanal. Deswe-

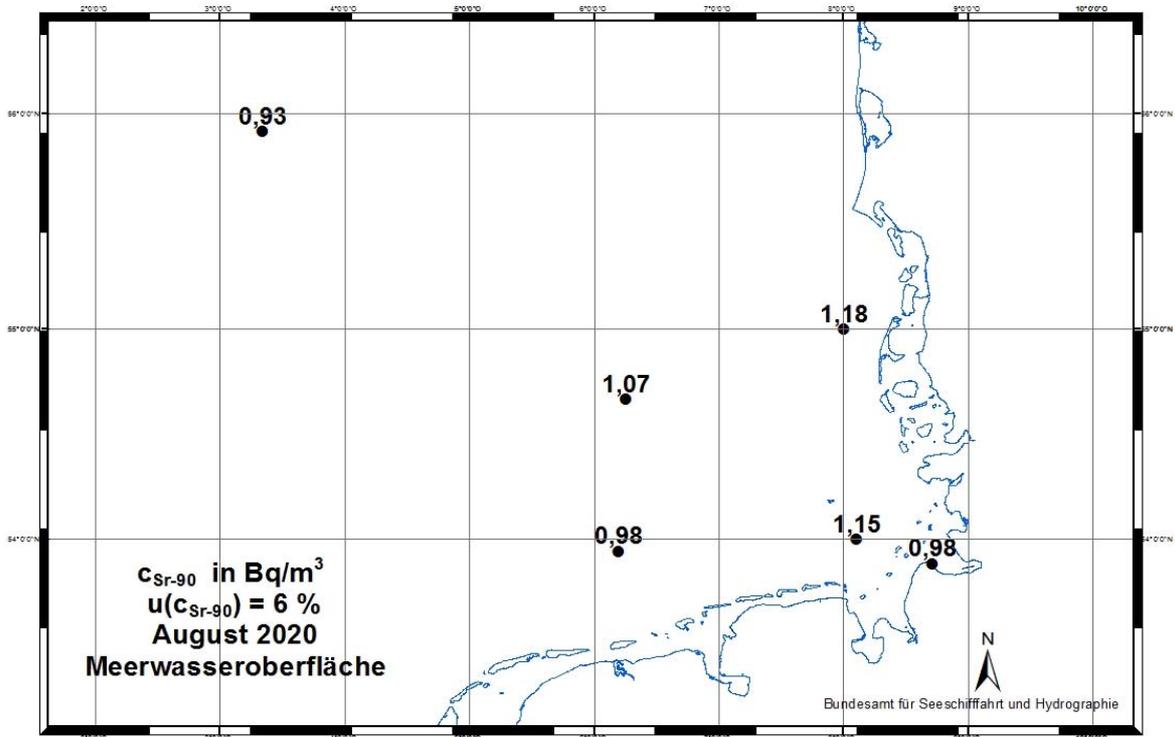
gen ist das Nordseewasser höher an <sup>3</sup>H kontaminiert als Ostseewasser, was sich in den höheren Aktivitätskonzentrationen des bodennahen Meerwassers in der Beltsee zeigt. Die Aktivitätskonzentrationen von Tritium haben sich seit dem Jahr 2000 um etwa die Hälfte verringert.



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.7

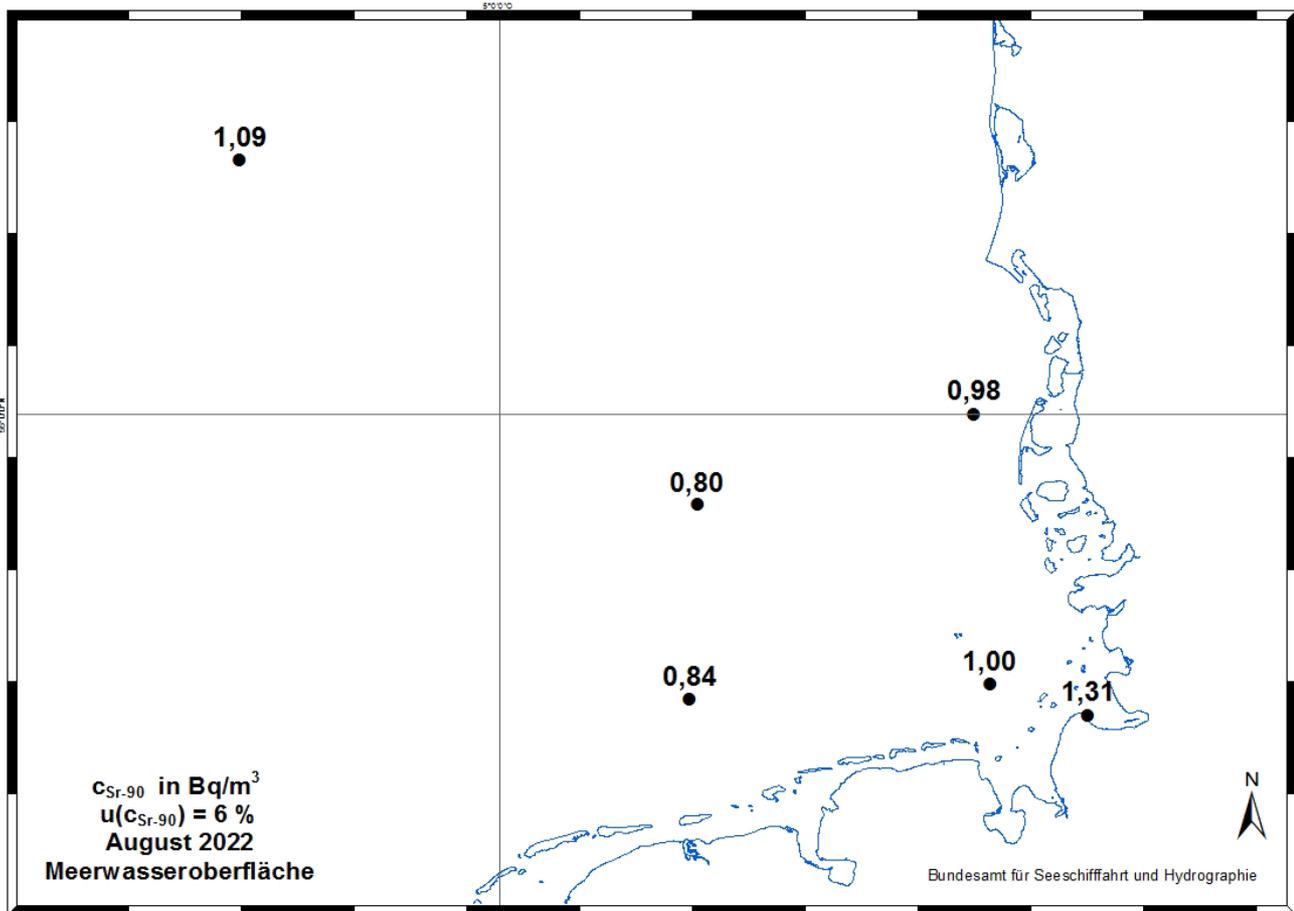
Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  an der Wasseroberfläche und in der Wassersäule im August 2022 in der Nordsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.8

Aktivitätskonzentration von  $^{90}\text{Sr}$  an der Wasseroberfläche in der Deutschen Bucht im August 2020



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.9

Aktivitätskonzentration von <sup>90</sup>Sr an der Wasseroberfläche in der Deutschen Bucht im August 2022

### Sedimente in der Nordsee

Die Sedimente der Nordsee sind zum überwiegenden Teil sandig; nur lokal finden sich Schlickablagerungen, die nennenswerte Kontaminationen von Radionukliden aufweisen. Sedimentproben wurden auf zwei Positionen – in der mittleren Deutschen Bucht und in der Nähe von Helgoland – genommen. Der Maximalwert der spezifischen <sup>137</sup>Cs-Aktivität betrug  $(2,2 \pm 0,1)$  Bq/kg TM, das Inventar bis in 18 cm Sedimenttiefe bis zu  $(0,27 \pm 0,03)$  kBq/m<sup>2</sup>.

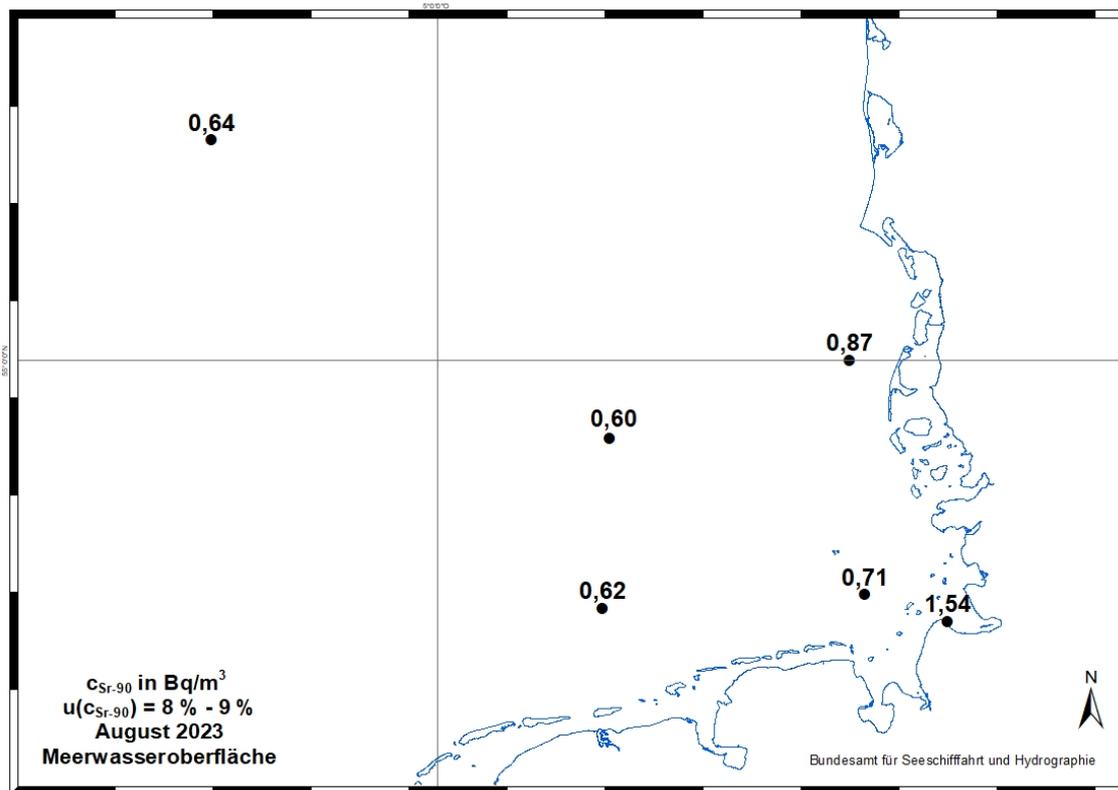
Im Vergleich mit Daten aus dem Jahr 2008 zeigt sich, dass sich die Aktivitätskonzentrationen auf beiden Stationen jeweils etwa halbiert haben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zwischen Meerwasser und Meeressediment ein Gleichgewicht besteht. In der Nordsee führt der ständige Zustrom von sehr gering kontaminiertem Wasser dazu, dass lösliche Substanzen – in diesem Fall <sup>137</sup>Cs – aus dem Sediment resuspendiert werden. Allerdings läuft dieser Prozess in Zeitskalen von

Jahrzehnten ab. Im Vergleich zur Ostsee sind die höchsten spezifischen Aktivitäten des <sup>137</sup>Cs in der Deutschen Bucht um etwa einen Faktor 40 geringer. In den Abbildungen 8.27 bis 8.29 ist das Inventar in kBq/m<sup>2</sup> oben genannter Stationen gezeigt.

### Sedimente in der Ostsee

Das <sup>137</sup>Cs aus dem Tschernobyl-Unfall wurde in den Sedimenten der westlichen Ostsee regional sehr unterschiedlich deponiert. Die höchste spezifische Aktivität findet sich meist nicht mehr an der Sedimentoberfläche, sondern je nach Ort in verschiedenen Tiefen. Dafür beispielhaft ist das Sedimentprofil der Station in der Neustädter Bucht in Abbildung 8.30: Die höchste spezifische Aktivität von etwa 84 Bq/kg TM wurde in einer Kerntiefe von vier bis sechs Zentimetern im Jahr 2023 gefunden.

Das Inventar an <sup>137</sup>Cs betrug zwischen 0,2 kBq/m<sup>2</sup> und 6,5 kBq/m<sup>2</sup>, wobei die höchsten Werte in den wasseraustauscharmen Buchten zu finden



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.10**

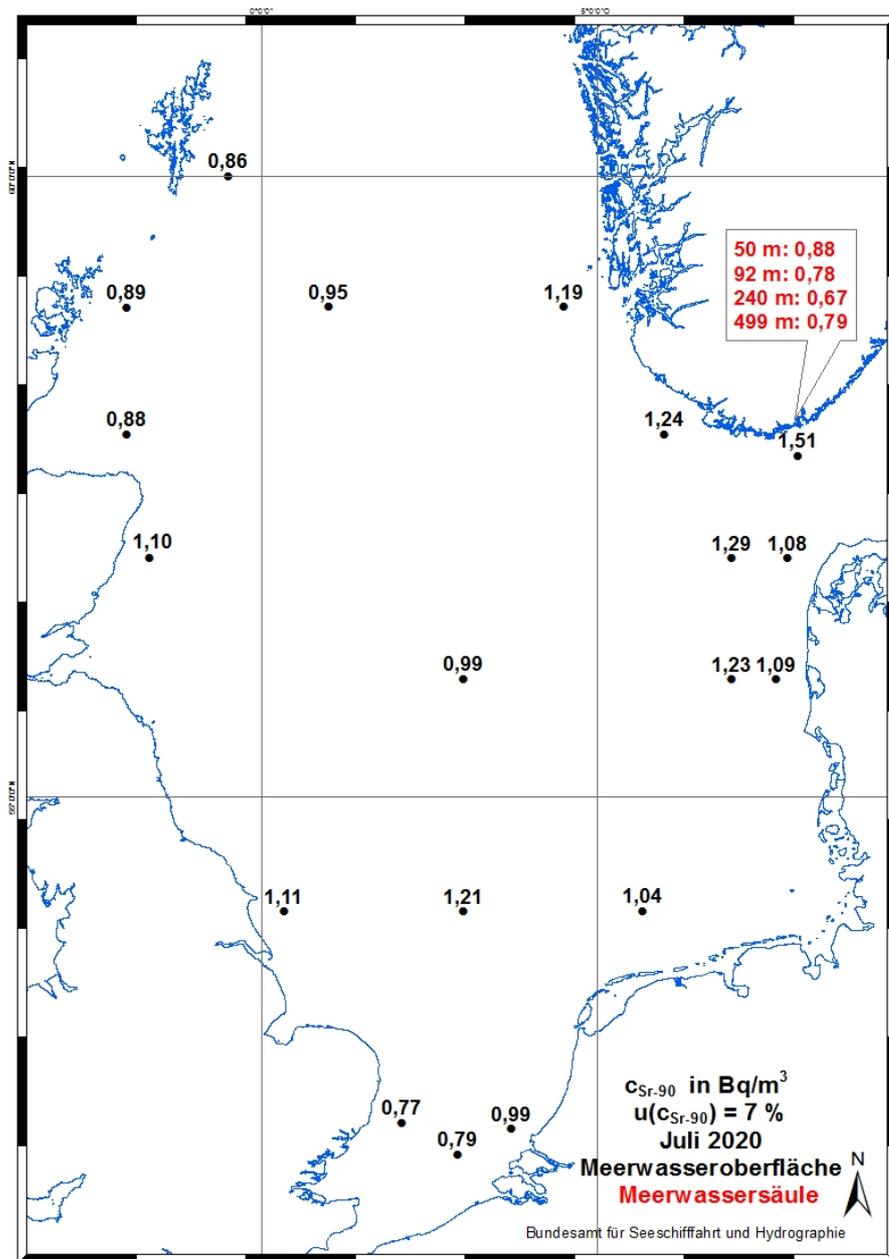
**Aktivitätskonzentration von  $^{90}Sr$  an der Wasseroberfläche in der Deutschen Bucht im August 2023**

sind (Abbildungen 8.31 bis 8.33). Die Inventare hängen stark von der Körnigkeit der Sedimente und nicht direkt von den umgebenden Aktivitätskonzentrationen des Meerwassers ab.

### Schwefstoffe in der Ostsee

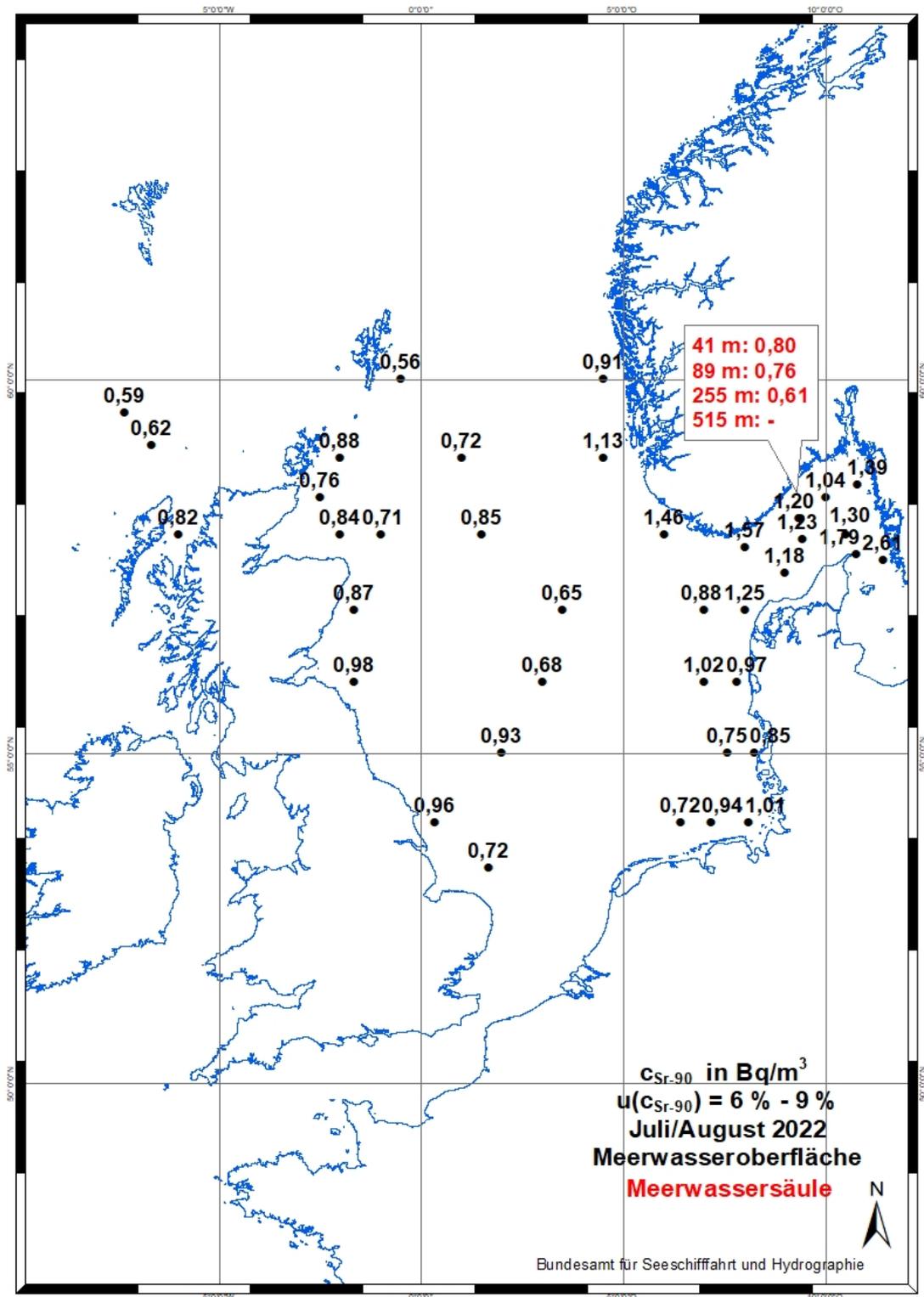
Die spezifische Aktivität des  $^{137}Cs$  in Schwefstoffen an einigen Stationen in der westlichen Ostsee ist in den Abbildungen 8.34 und 8.35 gezeigt. Die geringere Anzahl an Proben im Jahr 2023 ist Schlechtwetterbedingungen geschuldet: Die Zen-

trifuge, die für die Probenentnahme von Schwefstoff verwendet wird, kann bei zu starken Schiffsbewegungen nicht betrieben werden. Die Werte liegen im Schwankungsbereich der letzten zwölf Jahre. Die gegenüber den anderen Stationen erhöhte spezifische Aktivität im Greifswalder Bodden wird seit einigen Jahren beobachtet und variiert von Jahr zu Jahr stark. Auch die im Jahr 2021 gemessene spezifische Aktivität von  $95 Bq/kg$  TM liegt im Schwankungsbereich der letzten zwölf Jahre.



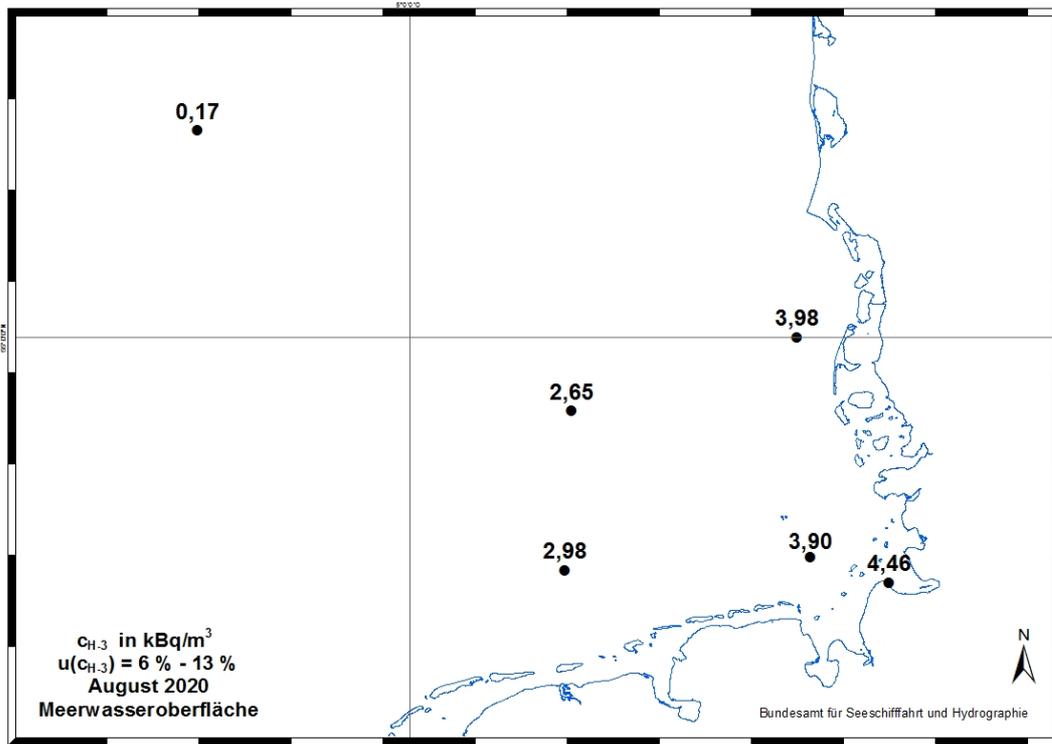
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.11**  
Aktivitätskonzentration von  $^{90}Sr$  an der Wasseroberfläche und in der Wassersäule im Juli 2020 in der Nordsee



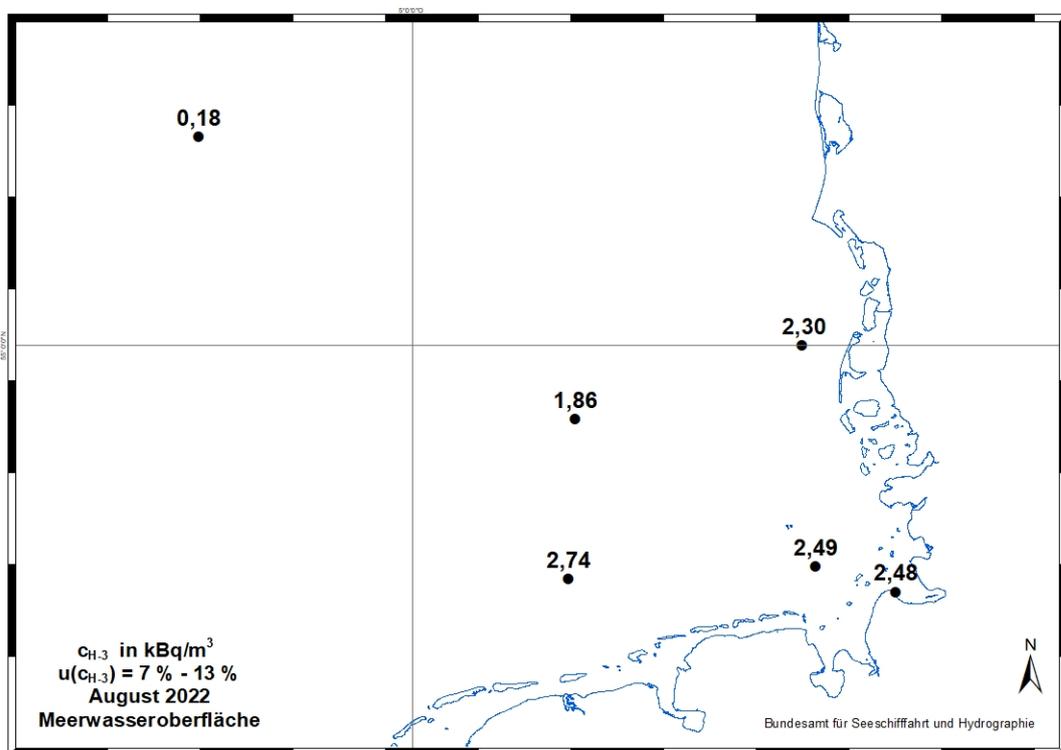
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.12**  
 Aktivitätskonzentration von  $^{90}Sr$  an der Wasseroberfläche und in der Wassersäule im Juli/August 2022 in der Nordsee



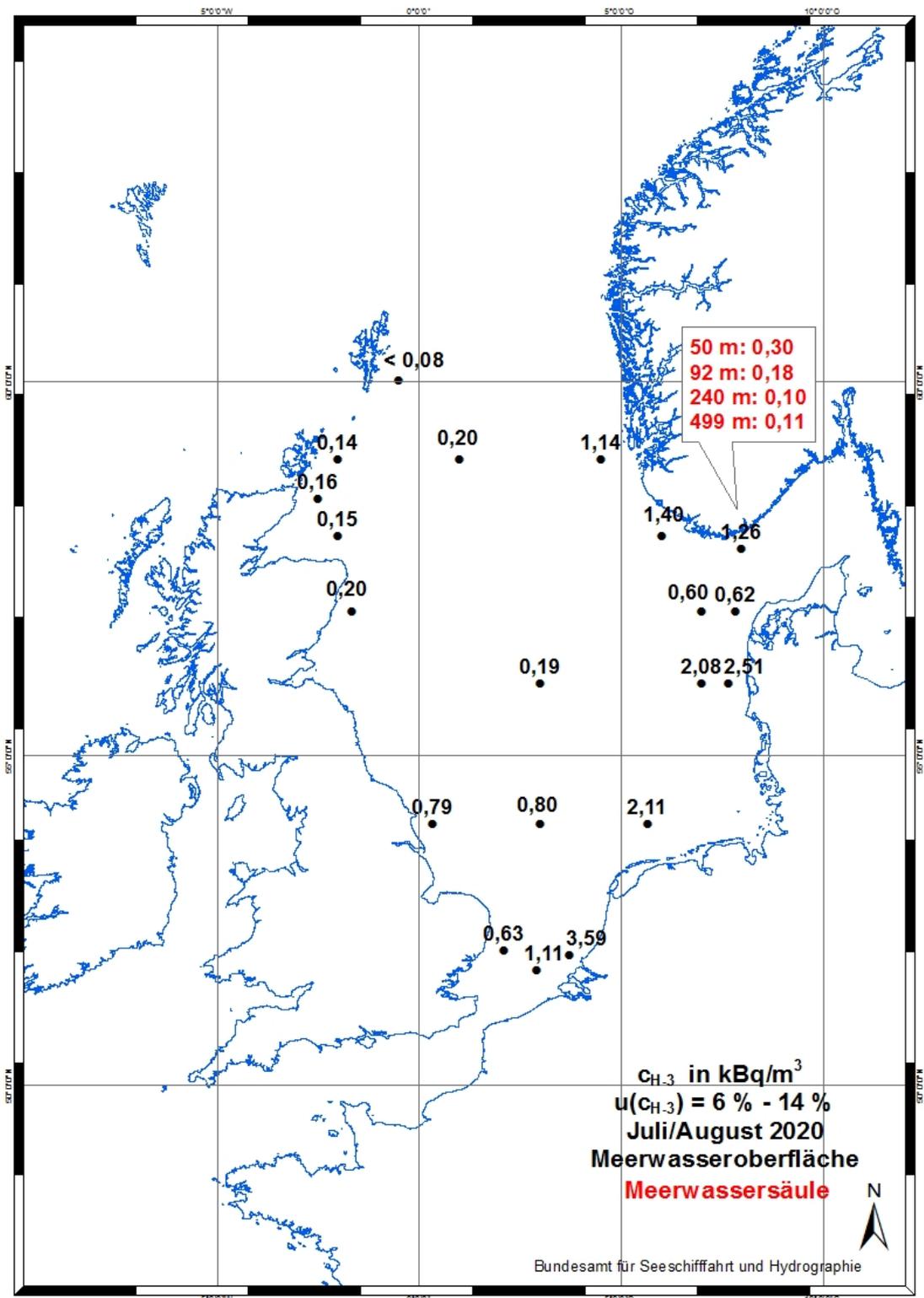
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.13**  
 Aktivitätskonzentration von <sup>3</sup>H an der Wasseroberfläche und im August 2020 in der Deutschen Bucht



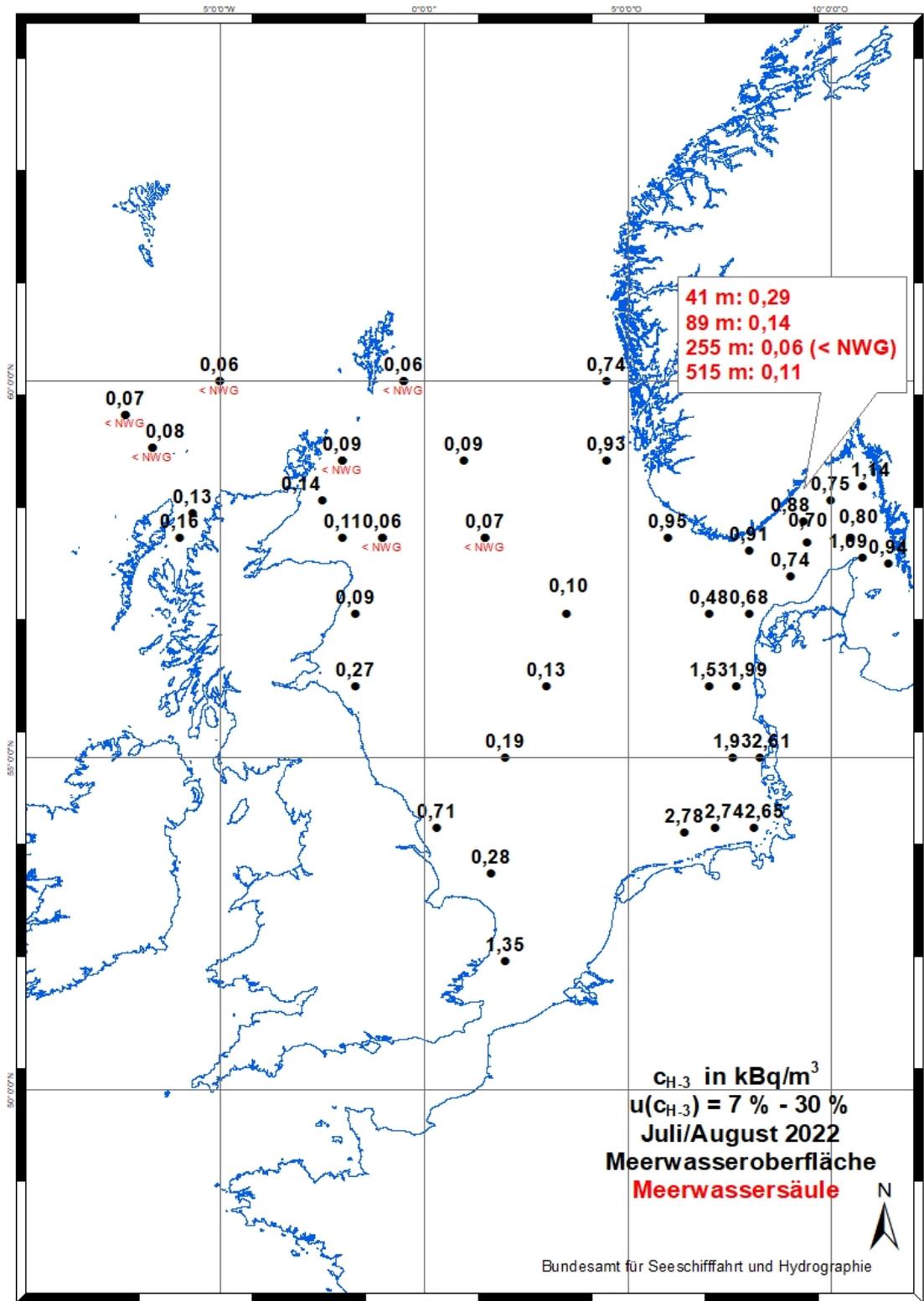
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.14**  
 Aktivitätskonzentration von <sup>3</sup>H an der Wasseroberfläche im August 2022 in der Deutschen Bucht



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

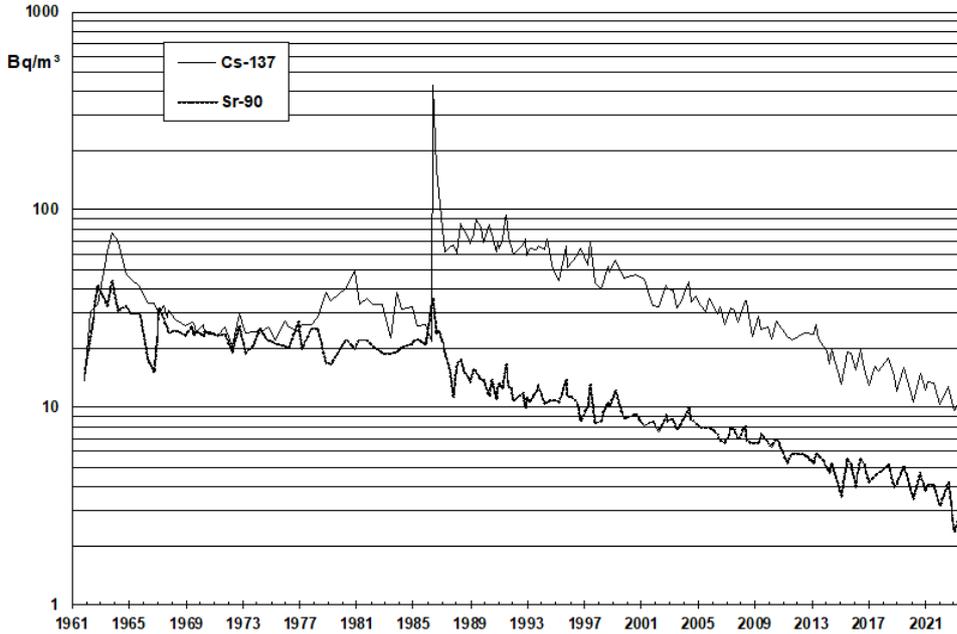
**Abbildung 8.15**  
 Aktivitätskonzentration von  $^3\text{H}$  an der Wasseroberfläche und in der Wassersäule im Juli/August 2020 in der Nordsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

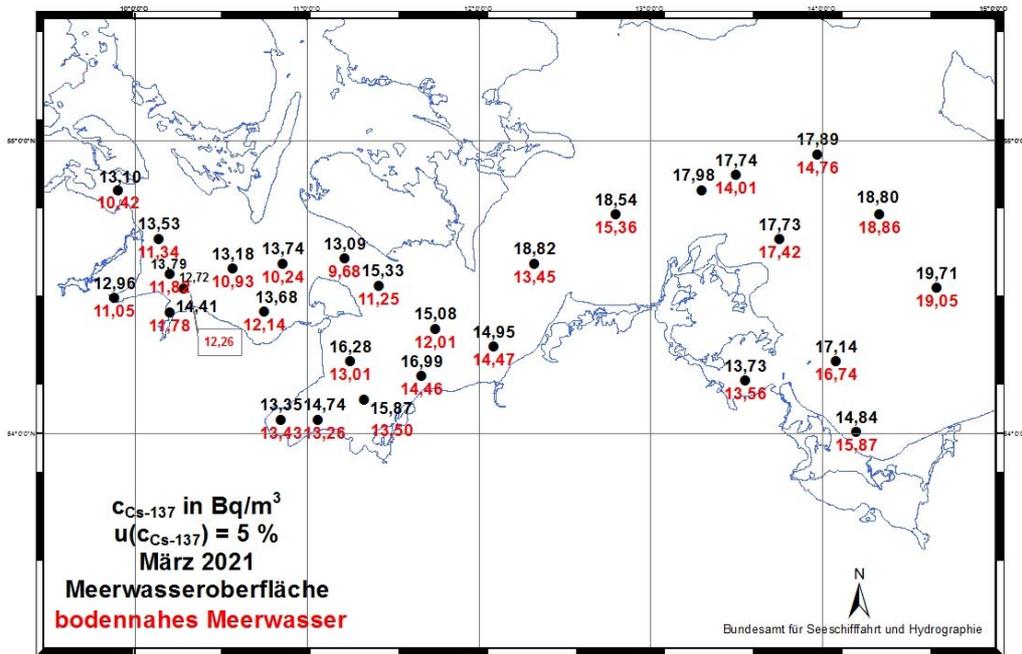
**Abbildung 8.16**  
Aktivitätskonzentration von  $H^3$  an der Wasseroberfläche und in der Wassersäule im Juli/August 2022 in der Nordsee

Zeitreihe der Cs-137- und Sr-90-Aktivitätskonzentrationen an der Position SCHLEI 54°40 N 10°08 O



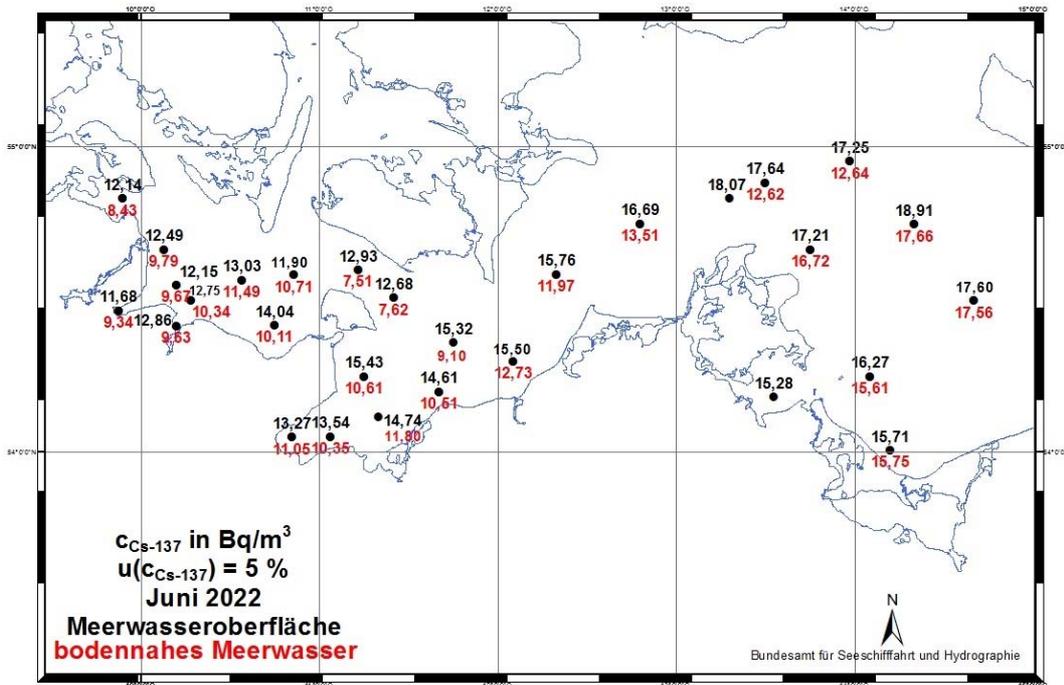
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.17  
Zeitreihe der <sup>137</sup>Cs und <sup>90</sup>Sr-Aktivitätskonzentration an der Position SCHLEI 54°40 N 10°08 O



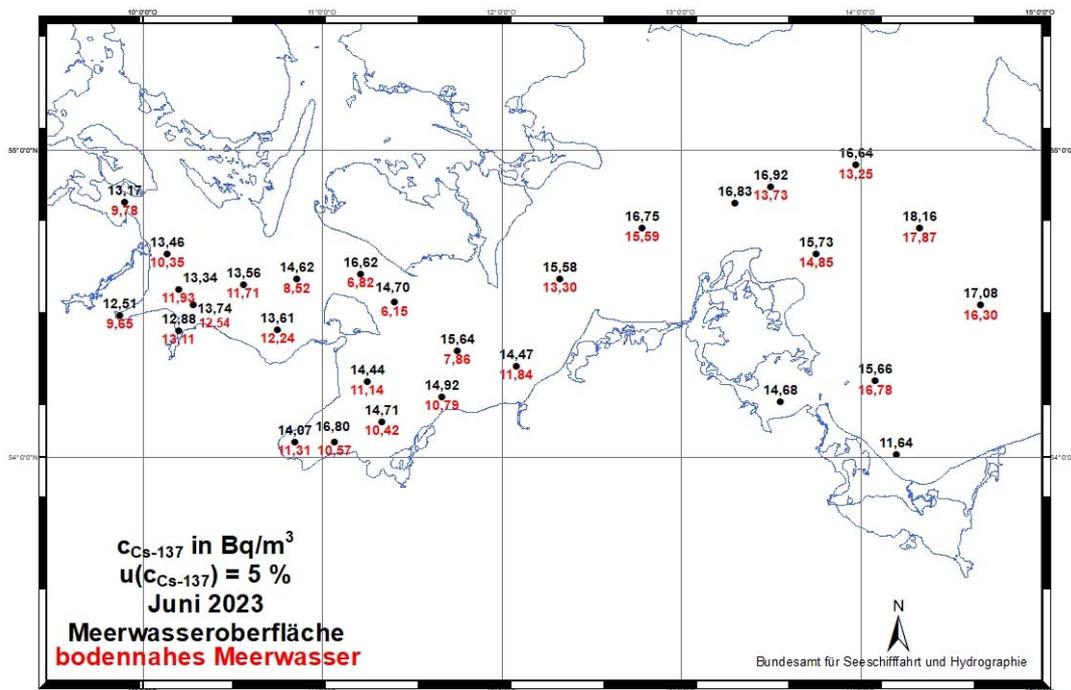
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.18  
Aktivitätskonzentration von <sup>137</sup>Cs an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im März 2021 in der Ostsee



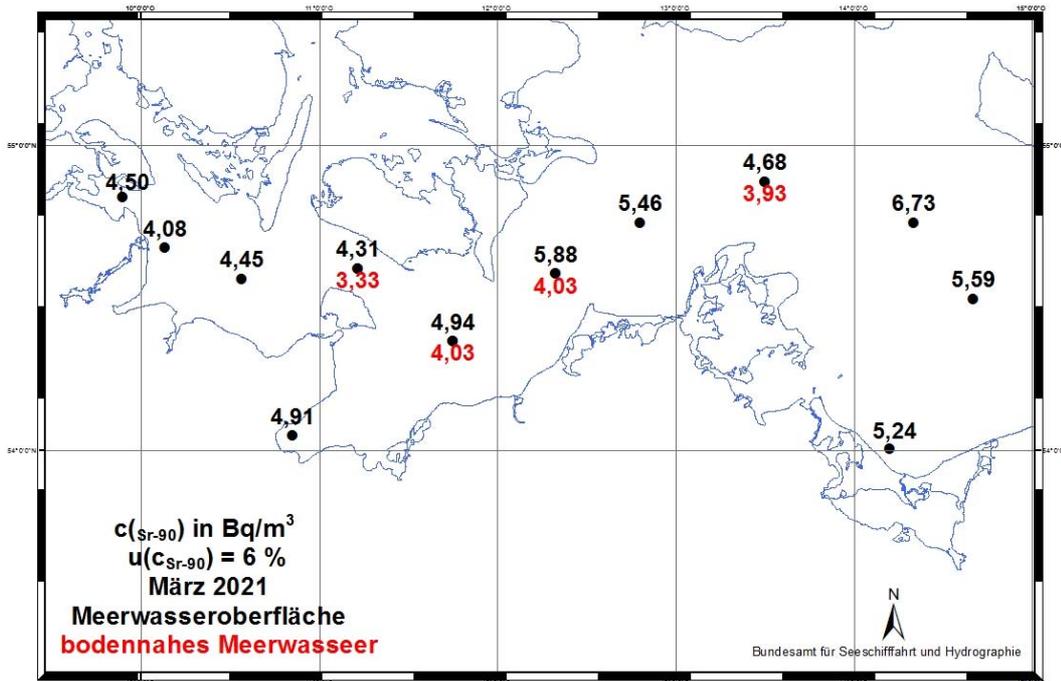
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.19  
Aktivitätskonzentration von  $^{137}Cs$  an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im Juni 2022 in der Ostsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

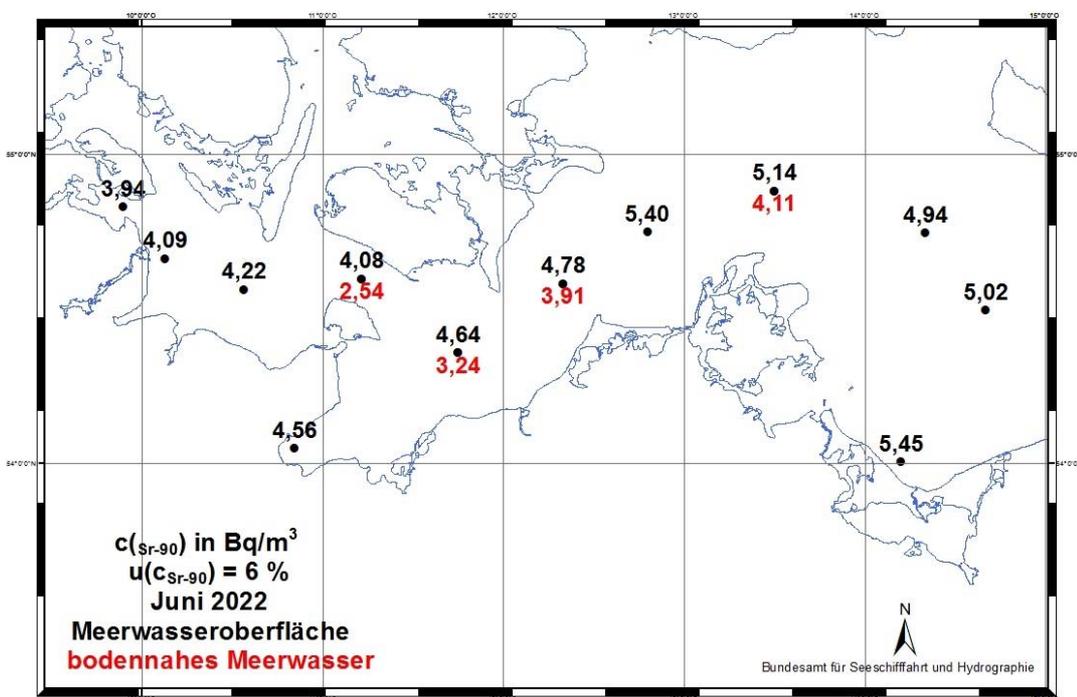
Abbildung 8.20  
Aktivitätskonzentration von  $^{137}Cs$  an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im Juni 2023 in der Ostsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.21

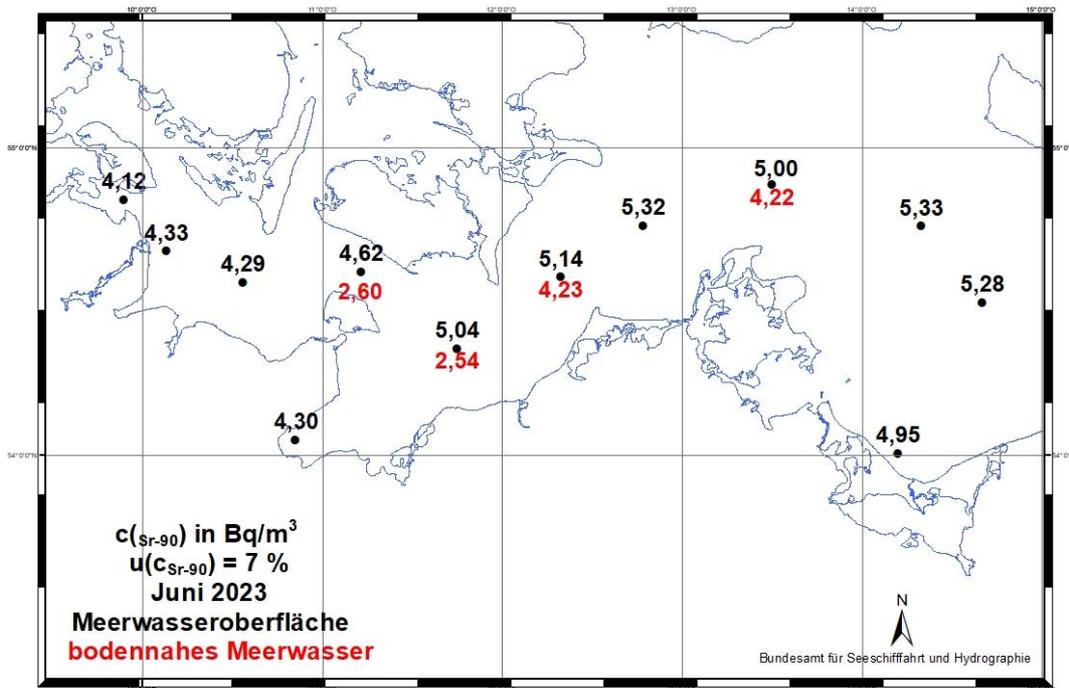
Aktivitätskonzentration von <sup>90</sup>Sr an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im März 2021 in der Ostsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.22

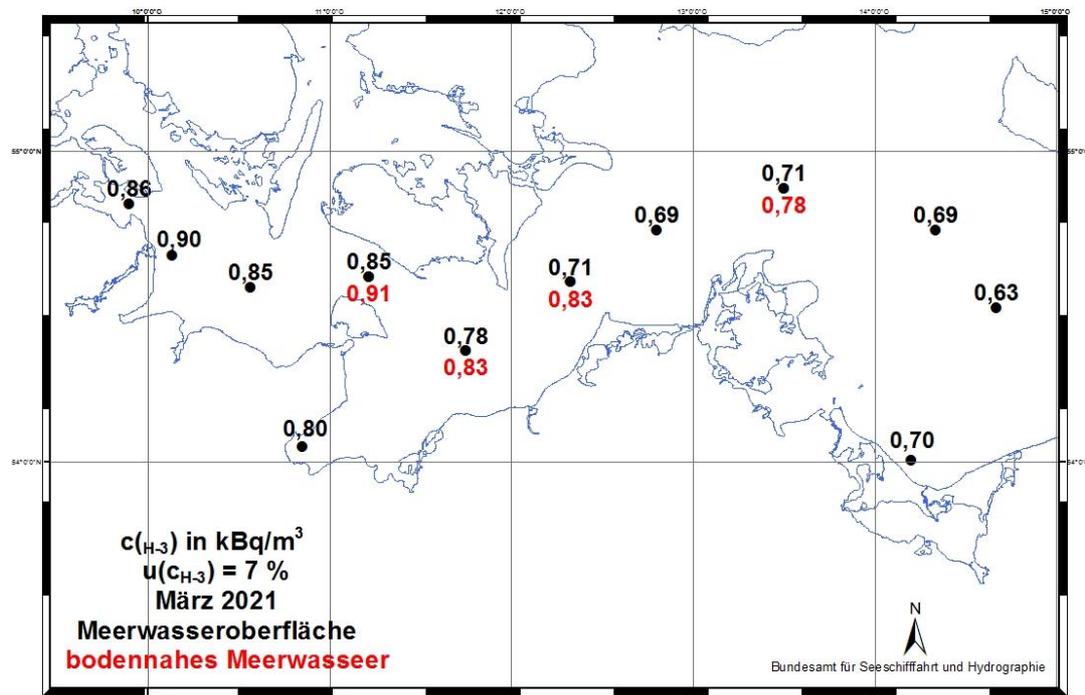
Aktivitätskonzentration von <sup>90</sup>Sr an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im Juni 2022 in der Ostsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.23

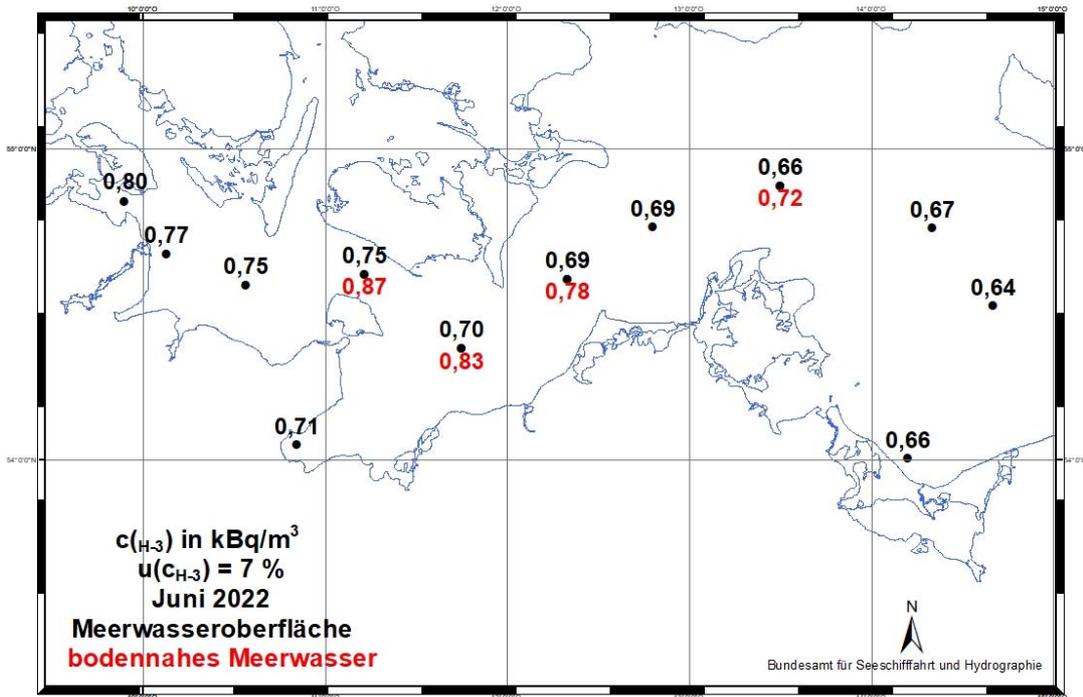
Aktivitätskonzentration von  $^{90}Sr$  an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im Juni 2023 in der Ostsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.24

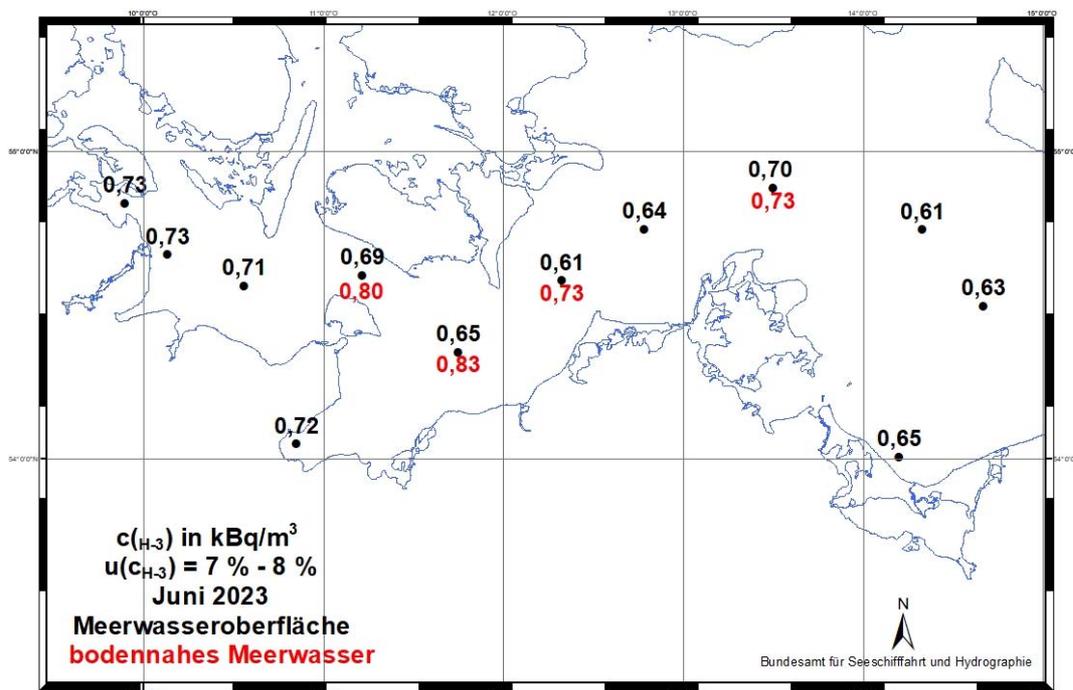
Aktivitätskonzentration von  $^3H$  an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im März 2021 in der Ostsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.25

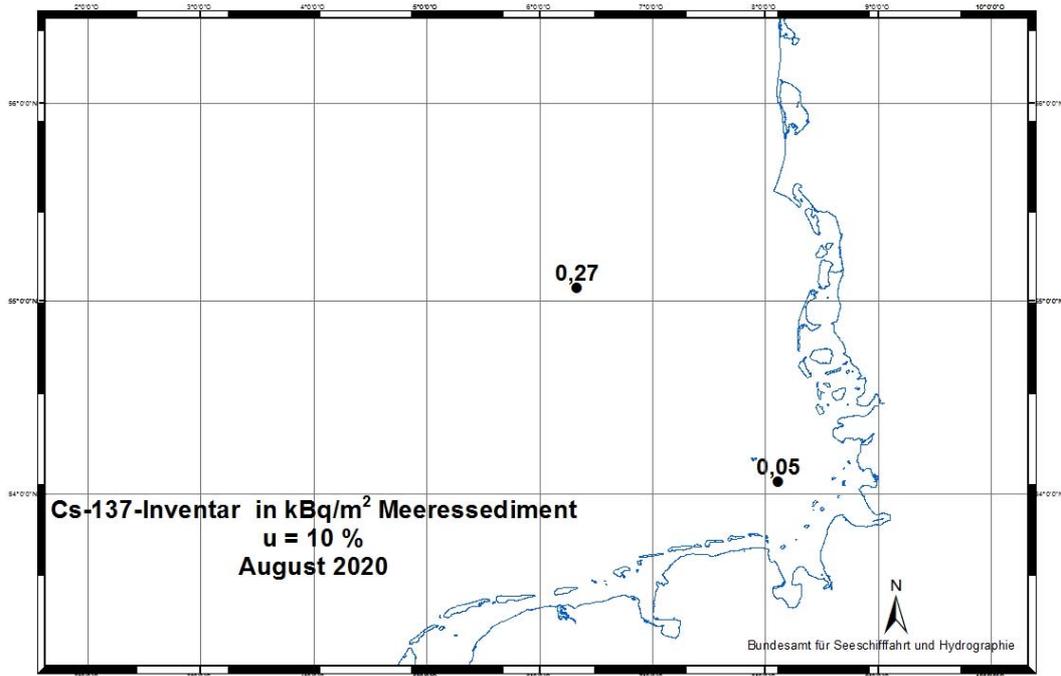
Aktivitätskonzentration von  $^3\text{H}$  an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im Juni 2022 in der Ostsee



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

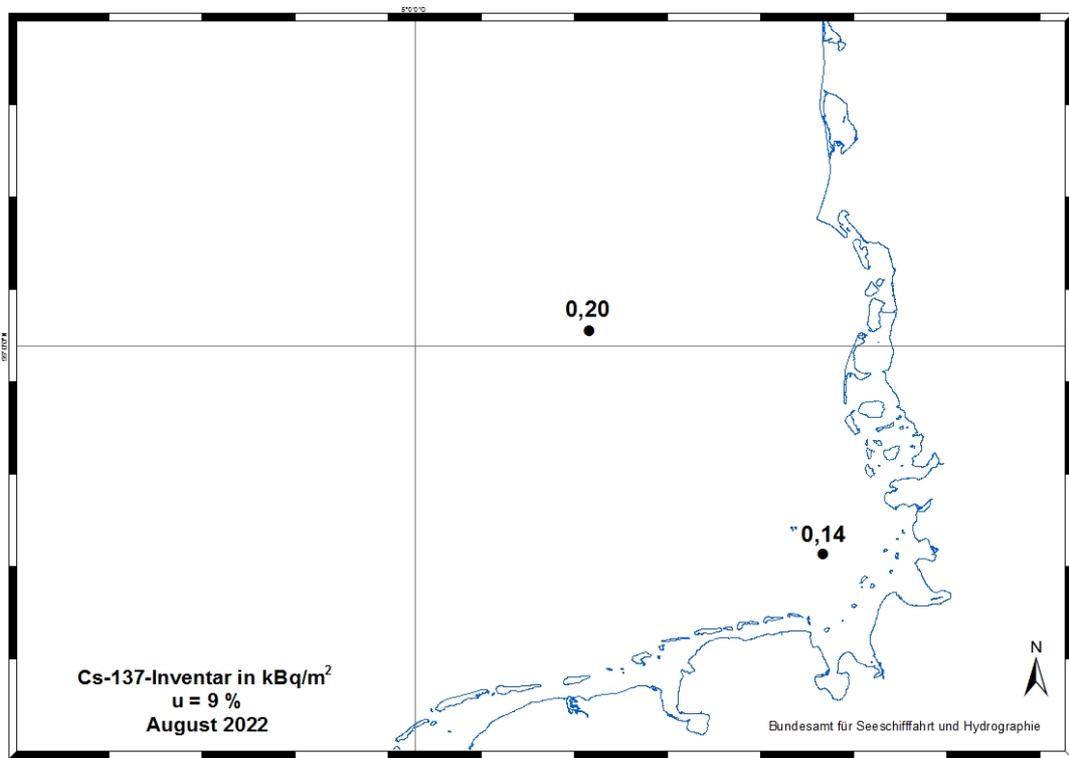
Abbildung 8.26

Aktivitätskonzentration von  $^3\text{H}$  an der Wasseroberfläche und im bodennahen Wasser im Juni 2023 in der Ostsee



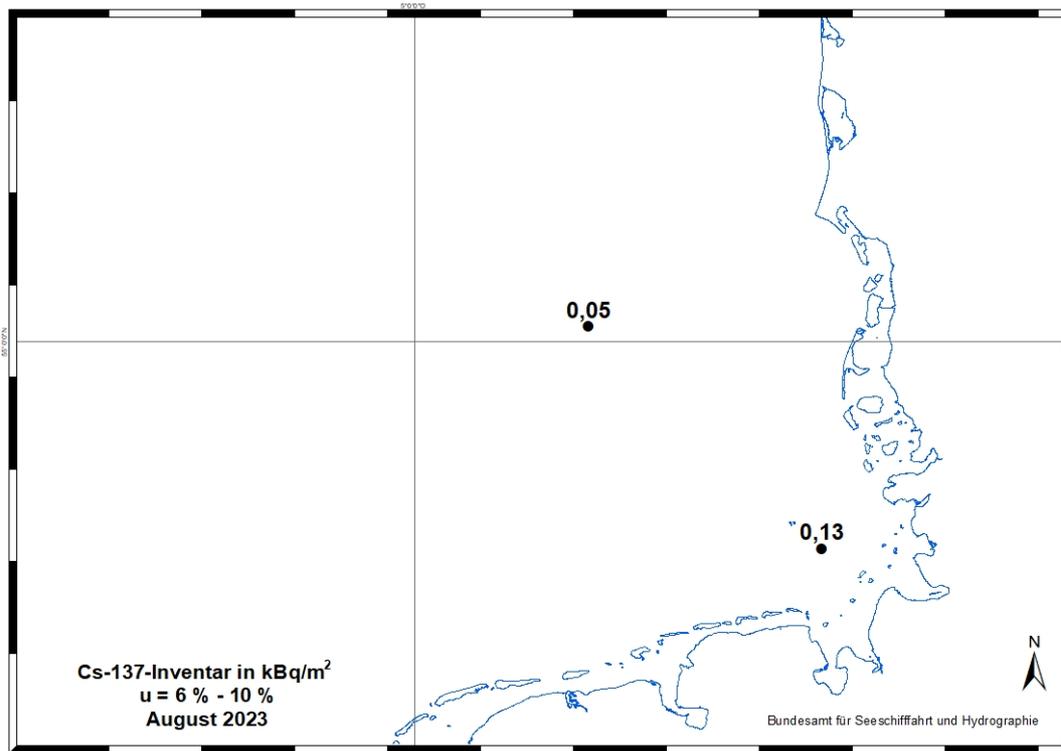
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.27**  
Cs-137-Inventar in kBq/m<sup>2</sup> Meeressediment im August 2020



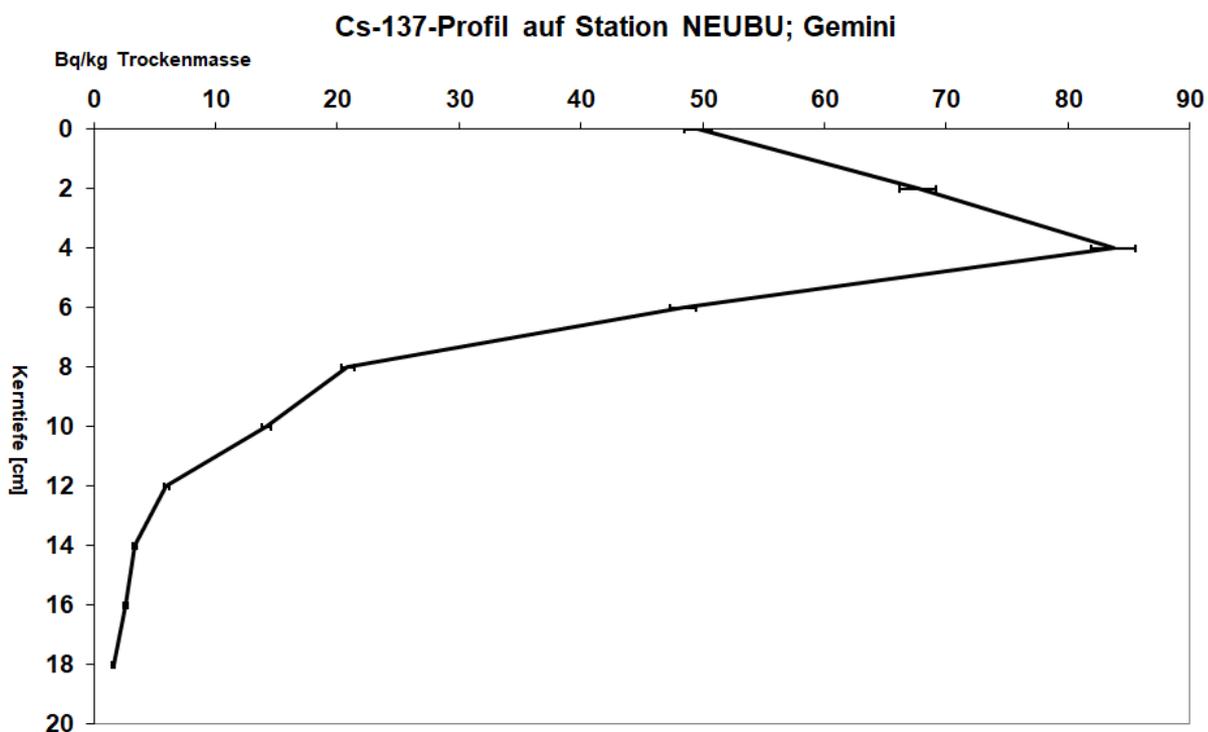
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.28**  
Cs-137-Inventar in kBq/m<sup>2</sup> Meeressediment im August 2022



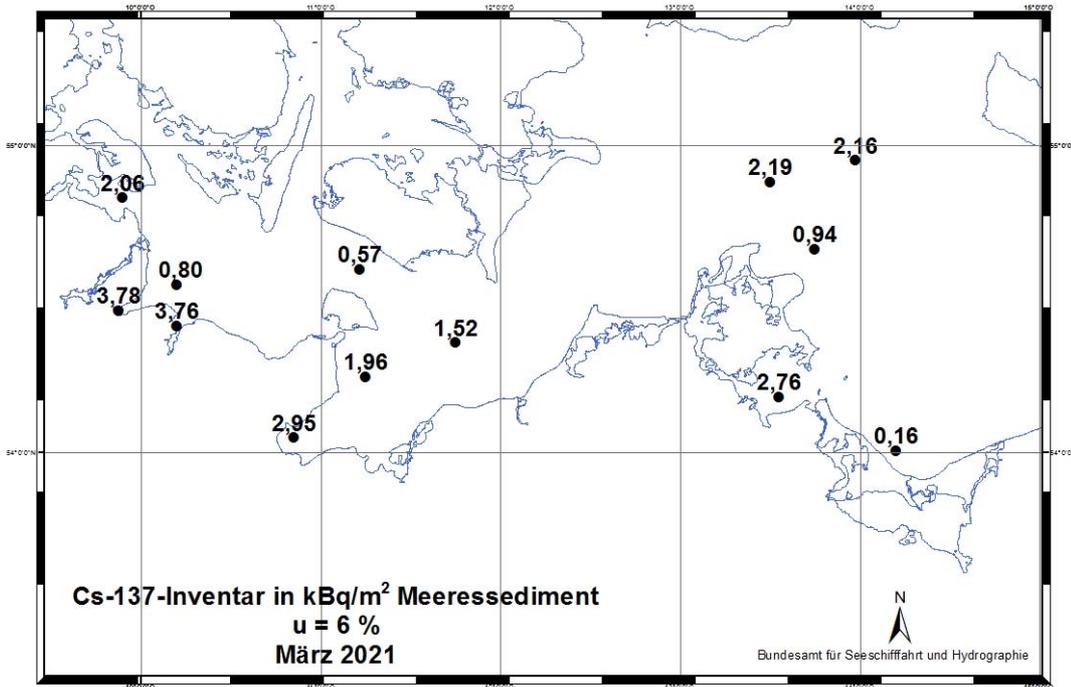
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.29  
 Cs-137-Inventar in kBq/m<sup>2</sup> Meeressediment im August 2023



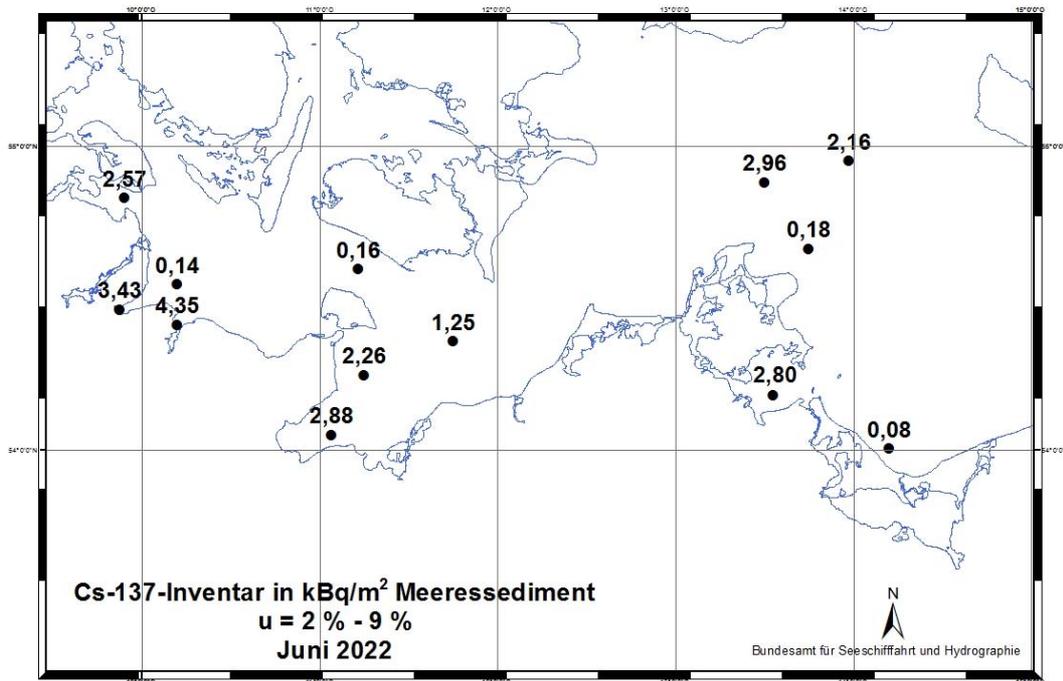
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Abbildung 8.30  
 Cs-137-Profil auf Station NEUBU; Gemini



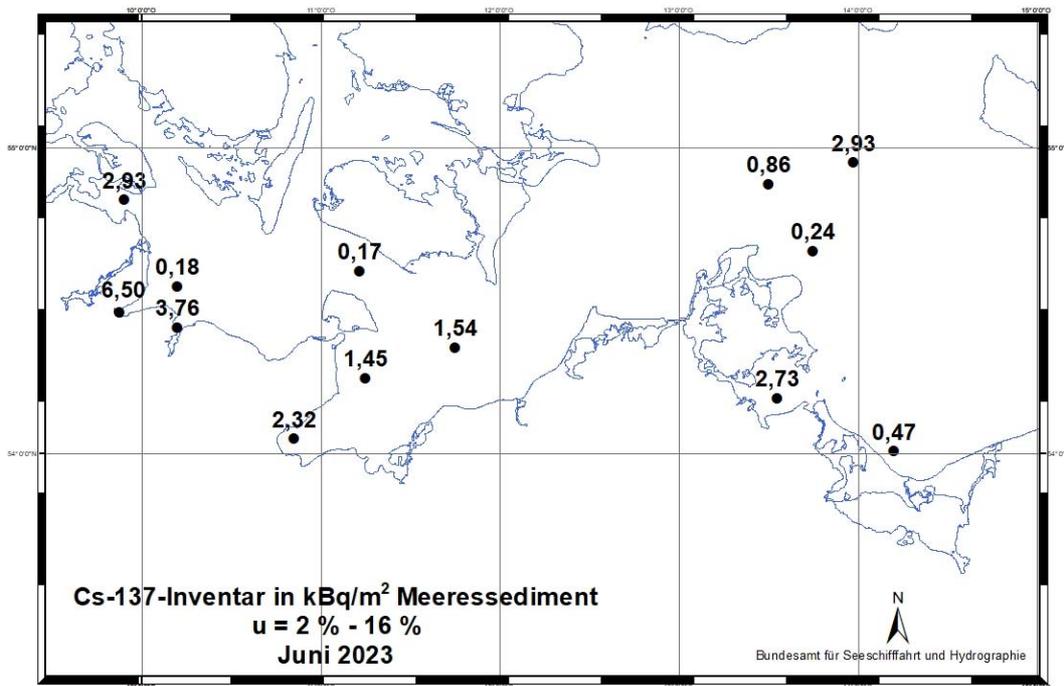
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.31**  
 Cs-137-Inventar in kBq/m<sup>2</sup> Meeressediment im März 2021



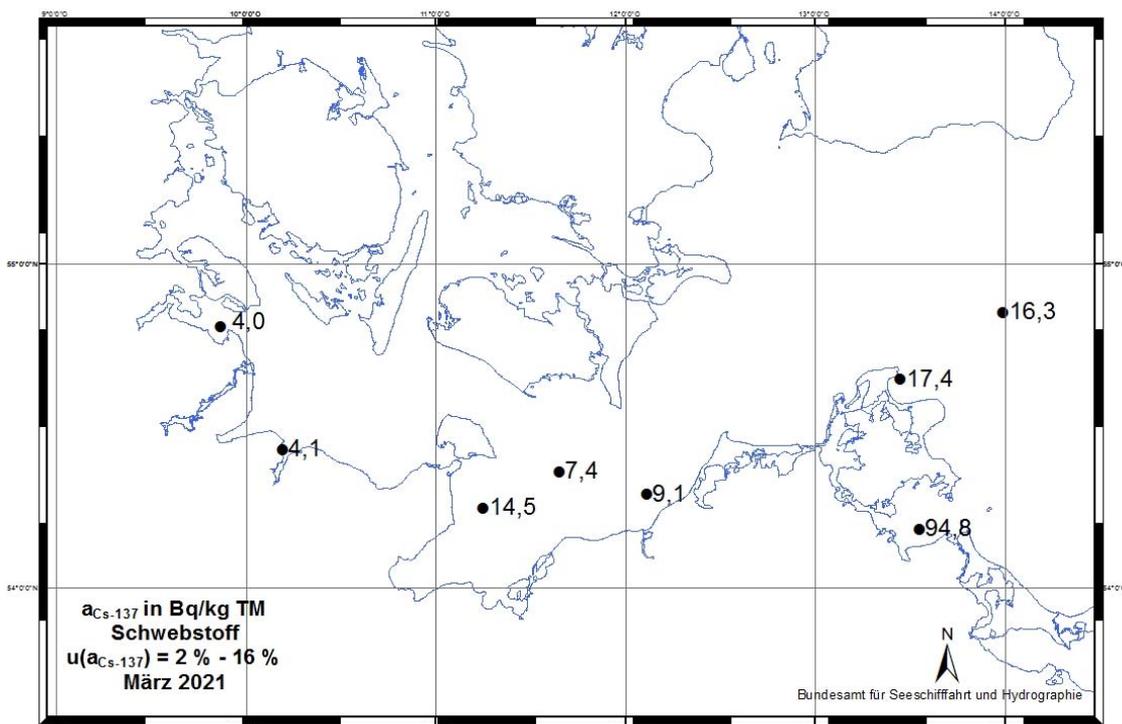
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.32**  
 Cs-137-Inventar in kBq/m<sup>2</sup> Meeressediment im Juni 2022



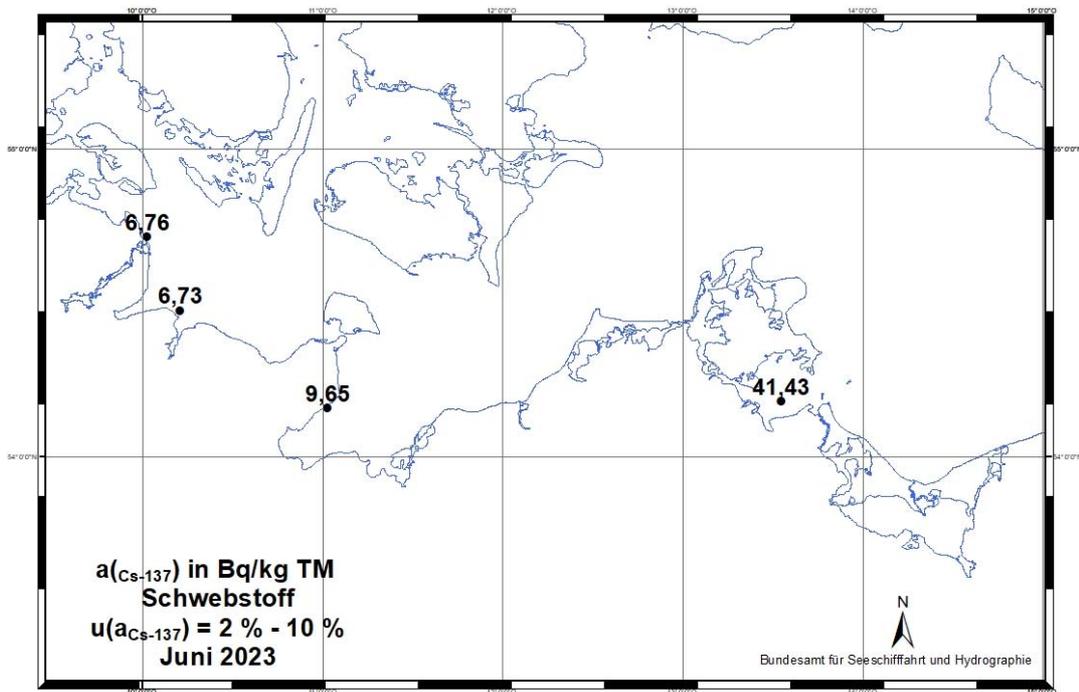
Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.33**  
**Cs-137-Inventar in kBq/m<sup>2</sup> Meeressediment im Juni 2023**



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.34**  
**Aktivitätskonzentration von <sup>137</sup>Cs in Bq/kg TM im Schwebstoff im März 2021**



Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Abbildung 8.35**  
 Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  in Bq/kg TM im Schwebstoff im Juni 2023

M.-O. Aust, P. Nogueira

Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Fischereiökologie

Leitstelle für Fisch und Fischereierzeugnisse, Krustentiere, Schalentiere, Meereswasserpflanzen (Leitstelle G)

Fische und Fischereiprodukte sowie Krusten- und Schalentiere aus deutschen Binnengewässern werden durch die amtlichen Messstellen der Bundesländer auf radioaktive Stoffe untersucht und die Messwerte in das Integrierte Mess- und Informationssystem des Bundes (IMIS) übertragen. Das Thünen-Institut für Fischereiökologie als zuständige Leitstelle des Bundes nimmt sowohl die Plausibilisierung als auch die Zusammenführung und Bewertung dieser Messwerte vor. Zusätzlich ist das Thünen-Institut für Fischereiökologie mit der Überwachung der Radionuklidkonzentrationen in Organismen auf der Hohen See betraut. Die Probenentnahme in Nord- und Ostsee erfolgt im Rahmen zweier jährlich stattfindender Fischereiforschungsausfahrten an Bord von FFS Walther Herwig III. Zusätzliche Proben, zum Teil auch aus anderen Meeresgebieten wie der Grönlandsee, werden u. a. von den Thünen-Instituten für Seefischerei und Ostseefischerei bereitgestellt.

### Binnenseen

Die mittlere spezifische Aktivität von  $^{137}\text{Cs}$  in Fischen aus Binnenseen ist seit 1986, als die Messwerte in Süddeutschland (Baden-Württemberg und Bayern) 200 Bq/kg Feuchtmasse (FM) überstiegen, deutlich gesunken. Im Zeitraum 2018 bis 2022 schwankte sie um den Wert von 1 Bq/kg FM (siehe Abbildung 9.1). In denselben Zeiträumen verringerte sich die mittlere spezifische Aktivität von  $^{137}\text{Cs}$  in Binnenseen Norddeutschlands (Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen, Bremen, ab 1991 auch Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern) von 90 Bq/kg FM ebenfalls auf etwa 1 Bq/kg FM.

Das Maximum im Jahr 1986 und die hohen Messwerte der nachfolgenden Jahre sind auf den Eintrag aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl zurückzuführen. Süddeutschland war damals wesentlich stärker betroffen als die norddeutschen Bundesländer. Durch das physikalische Abklingen des Cäsiums mit einer Halbwertszeit von 30,2 Jahren und die Verdünnung in einigen der Seen verringerte sich die spezifische Aktivität auch in Fischen deutlich. Dieses Abklingen fand in zwei Phasen statt [28]. Die erste Phase war geprägt durch eine effektive Halbwertszeit von 0,7 Jahren, die zweite von 7 Jahren.

### Fließgewässer

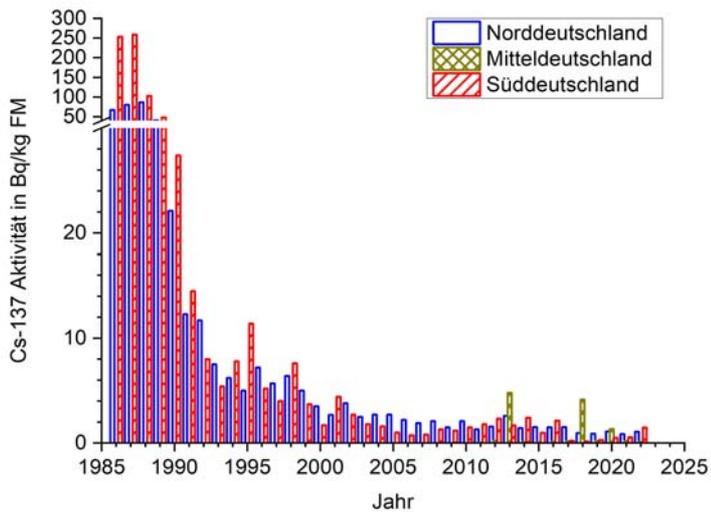
Die mittleren spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  in Fischen aus Fließgewässern Nord- und Süddeutschlands sanken seit den 1980er Jahren von maximal 30 Bq/kg FM, infolge des Ereignisses in Tschernobyl, auf Werte stabil unter 0,5 Bq/kg FM (inklusive Mitteldeutschland; siehe Abbildung 9.3). Aktuell sind die ermittelten spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  in Fischen aus Fließgewässern Nord- und Süddeutschlands etwa um den Faktor fünf niedriger als jene aus Binnenseen, was bedeutet, dass sich die Werte der beiden Gewässertypen immer weiter annähern.

### Fischteiche

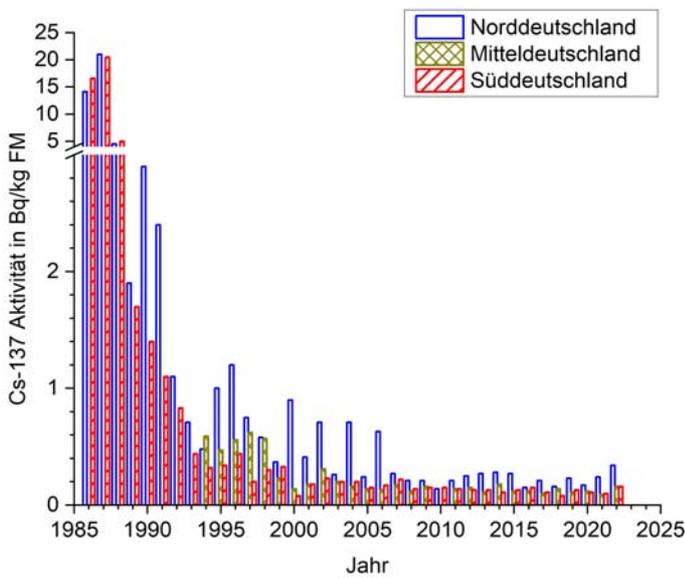
In Fischen aus Teichhaltung in Nord- und Süddeutschland wurden in den 1980er Jahren mittlere spezifische  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitäten von maximal 22 Bq/kg FM ermittelt, während die heutigen mittleren Messwerte maximal 0,5 Bq/kg FM betragen (inklusive Mitteldeutschland; Abbildung 9.2). Der zeitliche Verlauf der mittleren spezifischen  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität in Fischen aus Teichhaltung (Fischwirtschaften, Angelteiche, Baggerseen) verhält sich damit qualitativ ähnlich der Entwicklung in Fließgewässern (siehe Abbildung 9.3). Bis 1989 waren die in Fischteichen gefundenen Mittelwerte der spezifischen Aktivität etwa um die Hälfte niedriger als in Fließgewässern. Seit 1990 ist praktisch kein Unterschied mehr nachweisbar.

### Karpfen und Forellen

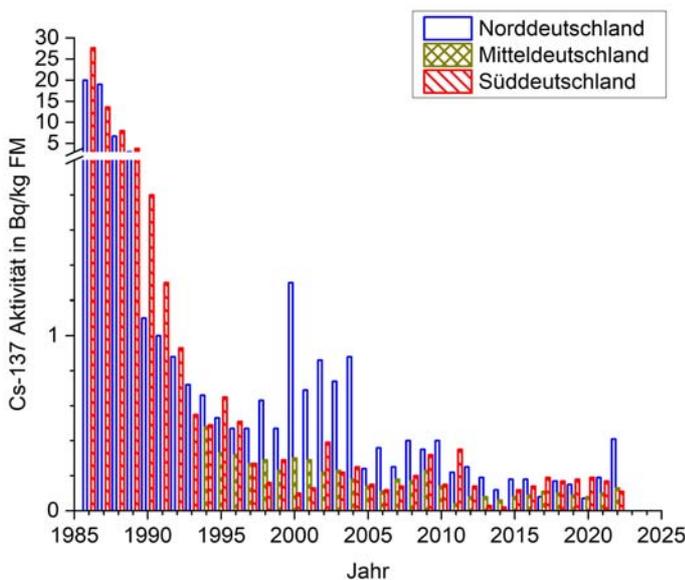
Eine Einzelbetrachtung der beiden wirtschaftlich bedeutendsten in Aquakultur erzeugten Fischarten Karpfen und Forelle ist in Abbildung 9.4 dargestellt. Die mittleren spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  nahmen seit ihrem Maximum von etwa 16 Bq/kg bzw. 7 Bq/kg in den Jahren 1986 und 1987 kontinuierlich ab und liegen seit dem Jahr 2012 unterhalb von 0,2 Bq/kg. Im Jahr 2022 wurden so viele Werte unterhalb der Nachweisgrenze berichtet, dass der Mittelwert unterhalb der Nachweisgrenze von 0,15 Bq/kg lag. Da jeweils Forellen und Karpfen aus verschiedenen Binnengewässern gemeinsam ausgewertet wurden, zeigen sich in der Zeitreihe der Karpfen gelegentlich höhere Messwerte, wenn die Fische vermehrt aus Binnenseen entnommen wurden.



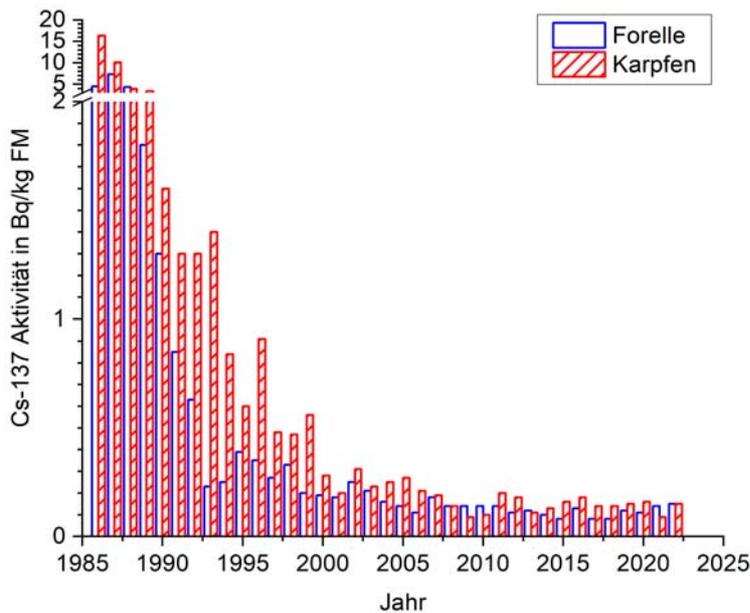
**Abbildung 9.1**  
 Jahresmittelwerte der <sup>137</sup>Cs-Aktivität  
 in Fischen aus Binnenseen in  
 Bq/kg FM



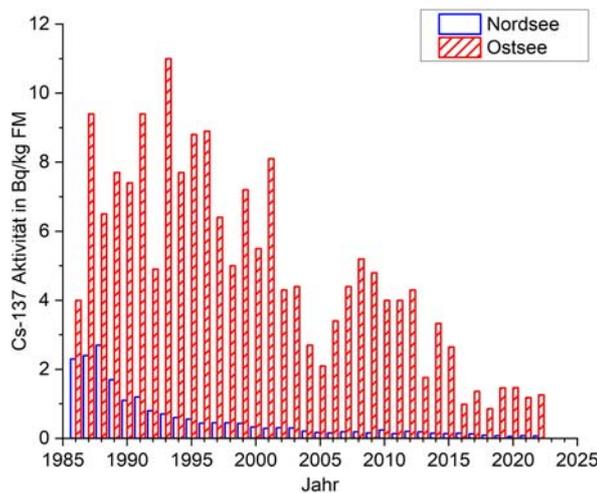
**Abbildung 9.2**  
 Jahresmittelwerte der <sup>137</sup>Cs-Aktivität  
 in Fischen aus Fischteichen in  
 Bq/kg FM



**Abbildung 9.3**  
 Jahresmittelwerte der <sup>137</sup>Cs-Aktivität  
 in Fischen aus Fließgewässern  
 in Bq/kg FM



**Abbildung 9.4**  
 Jahresmittelwerte der <sup>137</sup>Cs-Aktivität  
 in Karpfen und Forellen in Bq/kg FM



**Abbildung 9.5**  
 Jahresmittelwerte der <sup>137</sup>Cs-Aktivität  
 in Fischen aus Nord- und Ostsee  
 in Bq/kg FM

Quelle: Johann Heinrich von Thünen-Institut

### Nord- und Ostsee

Die mittlere spezifische Aktivität von <sup>137</sup>Cs in Fischen aus der Nordsee sank im Zeitraum 1987 bis 2019 von knapp 3 Bq/kg FM auf Werte unterhalb 0,1 Bq/kg FM (siehe Abbildung 9.5), wobei der Maximalwert im Jahr 1987 wiederum dem Reaktorunfall von Tschornobyl geschuldet ist. Allerdings wurde in Fischen der Nordsee bereits vor dem Reaktorunfall von Tschornobyl eine spezifische <sup>137</sup>Cs-Aktivität von etwa 2 Bq/kg gemessen, weil ein Teil der Ableitungen der europäischen Wiederaufarbeitungsanlagen durch die Nordsee transportiert wird [29].

Insgesamt ist der Einfluss des Fallouts aus dem Reaktorunfall von Tschornobyl wegen des raschen Abtransports der Radionuklide mit dem Wasser der Nordsee gering. Von 1988 bis Mitte

der 1990er Jahre wurde im Wasser der Nordsee eine Aktivitätsabnahme verzeichnet, während die Messwerte der spezifischen <sup>137</sup>Cs-Aktivität in Fischen dort anschließend nahezu stagnierten. Die Abnahme über den gesamten Zeitraum ist im Wesentlichen mit der kontinuierlichen Verringerung der Ableitungen aus der englischen Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield verbunden [30]. Seit der zweiten Hälfte der 1990er Jahre stagniert die spezifische <sup>137</sup>Cs-Aktivität. Vorher wurden die Ableitungen aus der Wiederaufbereitungsanlage Sellafield deutlich reduziert, durch das Gleichgewicht zwischen den Konzentrationen von <sup>137</sup>Cs in Wasser und Sediment wird seitdem <sup>137</sup>Cs, das vorher an das Sediment der Irischen See angelagert wurde, wieder freigesetzt [31]. Dieses remobilisierte <sup>137</sup>Cs gelangt zusammen mit den Resten des sogenannten „globalen Fallouts“ (siehe auch Kapitel

„Radioaktive Stoffe in Nord- und Ostsee“) mit den Meeresströmungen in die Nordsee und damit, angereichert um einen Faktor von etwa 100, in den dort lebenden Fisch.

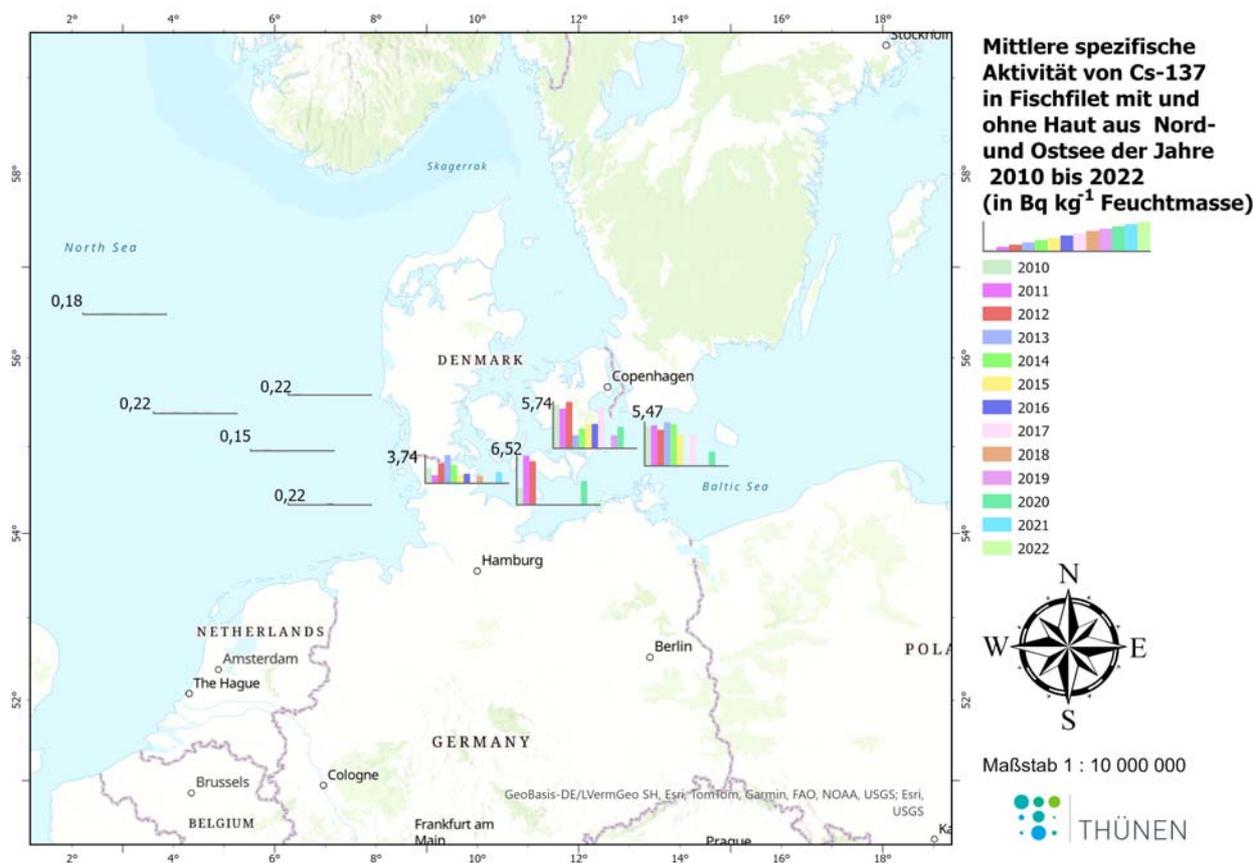
Die ermittelte mittlere spezifische Aktivität von  $^{137}\text{Cs}$  in Fischen der Ostsee ist mit aktuell bis zu 1,2 Bq/kg deutlich höher als jene der Nordsee (siehe Abbildung 9.5). Grund dafür sind etwa 4700 TBq  $^{137}\text{Cs}$ -Fallout aus dem Reaktorunfall von Tschornobyl [32]. Damit war und ist die Ostsee deutlich stärker von dem Reaktorunfall in Tschornobyl betroffen als die Nordsee. Im Vergleich zum Maximalwert hat sich die spezifische  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität in der Ostsee bis zum Jahr 2022 um eine Größenordnung reduziert. Der deutlich langsamere Anstieg, die starken Schwankungen wie auch die deutlich langsamere Abnahme haben verschiedene Ursachen. Zuallererst wurde der Tschornobyl-Fallout sehr ungleichmäßig über die Ostsee verteilt. Die Bottnische See und der Golf von Finnland waren damals am stärksten betroffen. Eine Konzentrationsabnahme durch Verdünnung findet aber nur sehr langsam statt, weil die Wasserbewegung innerhalb der Ostsee wie auch der Austausch des Wassers mit der Nordsee wesentlich geringer sind als vergleichbare Prozesse in der Nordsee. Im Rahmen des Untersuchungsprogrammes des Thünen-Instituts für Fischereiökologie wurden im Jahr 1991 in den östlich gelegenen Untersuchungsgebieten der Ostsee innerhalb der Deutschen deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone maximale spezifische  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitäten knapp über 29 Bq/kg FM im Jahr 1991 im Fischfilet gefunden; im Jahr 2022 waren es nur noch maximal 2,2 Bq/kg FM. Im Gegensatz dazu wurden in der Kieler Bucht seit 1986 Maximalwerte bis 9 Bq/kg FM ermittelt, während diese aktuell etwa 1 Bq/kg FM betragen. Damit liegen die aktuellen Messwerte von Fischen aus der Kieler Bucht im Bereich der vor dem Reaktorunfall in Tschornobyl gemessenen Werte [33]. In Abbildung 9.6 werden die jährlichen Mittelwerte der in Filets von Dorsch/Kabeljau, Wittling, Scholle, Flunder und Makrele ermittelten spezifischen Aktivitäten der Jahre 2010 bis 2022 gezeigt. Sie geben sowohl die unterschiedlichen Niveaus der spezifischen Aktivität von  $^{137}\text{Cs}$  in Nord- und Ostsee als auch die Verteilung der Cs-Werte innerhalb der Ostsee wieder.

### Konzentrationsfaktoren von $^{137}\text{Cs}$ in Dorschartigen aus der Ostsee

Mittels Konzentrationsfaktoren kann die Aufnahme radioaktiver Stoffe aus dem Wasser oder über die Nahrung in den Fisch abgeschätzt werden.

Im Falle von Ereignissen mit möglichen nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen sind sie wichtige Parameter, weil so Ausbreitungsrechnungen und Dosisabschätzungen über die Menge radioaktiver Ableitungen möglich sind. Für ihre Ermittlung ist ein Gleichgewicht (stationärer Fall) zwischen der Aktivitätskonzentration im Wasser der spezifischen Aktivität in Fisch erforderlich. Da dieser stationäre Fall auch in der Ostsee seit Anfang der 1990er Jahre gegeben ist, werden die Konzentrationsfaktoren im vorliegenden Fall aus dem Verhältnis der spezifischen  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität in Fisch (Bq/kg) zur  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration in Meerwasser (Bq/L) berechnet.

Abbildung 9.7 zeigt die Verläufe der mittleren Aktivitätskonzentration in Wasser und der mittleren spezifischen Aktivität in Fisch sowie die daraus berechneten Konzentrationsfaktoren in drei Gebieten der Ostsee (Kieler Bucht, Mecklenburger Bucht und Rügen/Arkonasee) im Zeitraum 1990 bis 2018. Die mittleren Konzentrationsfaktoren in Dorschartigen (Kabeljau und Wittling) betragen zwischen etwa 90 L/kg und 300 L/kg. Diese Schwankungsbreite ist geringer als jene, die Steele [34] zwischen 1978 und 1985 in Dorschfilet der Nordsee ermitteln konnte (8 L/kg bis 1100 L/kg). Die mittleren Konzentrationsfaktoren im Zeitraum 1990 bis 2022 betragen für die Kieler Bucht 135 L/kg, für die Mecklenburger Bucht 140 L/kg sowie 200 L/kg in der Arkonasee (Abbildung 9.7). Die in der Ostsee ermittelten mittleren Konzentrationsfaktoren sind damit höher als der Wert 100 L/kg, den die IAEA als mittleren Anreicherungsfaktor für Fisch empfiehlt [35]. Dagegen sind die hier angegebenen Konzentrationsfaktoren in derselben Größenordnung wie sie Steele [34] in Dorschfilet aus der Nordsee ermittelte. Ähnlich den spezifischen Aktivitäten in Fisch der Ostsee stiegen auch die mittleren Konzentrationsfaktoren von West nach Ost an (Vergleich Abbildungen 9.6 und 9.7). Das liegt hauptsächlich an der von West nach Ost abnehmenden Salinität der Ostsee und der damit einhergehenden Verringerung des Kalium-Angebotes. Ereignisse wie Tschornobyl sind aus den Verläufen nur schlecht erkennbar, weil sich i. d. R. innerhalb des Beobachtungszeitraumes sowohl die Aktivitätskonzentration im Wasser als auch die spezifischen Aktivitäten in Fisch in ähnlicher Weise ändern. Ob Wanderungen der Fische, Beprobung unterschiedlicher Fischbestände (wie in der Arkonasee Vermischung des östlichen und westlichen Dorschbestandes der Ostsee) oder Süßwassereinbrüche für die kurzfristigen Schwankungen der ermittelten Konzentrationsfaktoren verantwortlich sind, wird zukünftig weiter zu evaluieren sein.



**Abbildung 9.6**  
**Mittlere spezifische Aktivität von <sup>137</sup>Cs der Jahre 2010 bis 2022, ermittelt in Fischfilet von Dorsch/Kabeljau, Wittling, Scholle, Flunder und Makrele mit und ohne Haut in verschiedenen Untersuchungsgebieten von Nord- und Ostsee. Die Zahlen an den Achsen geben den Maximalwert an der jeweiligen Station über den Beobachtungszeitraum an.**

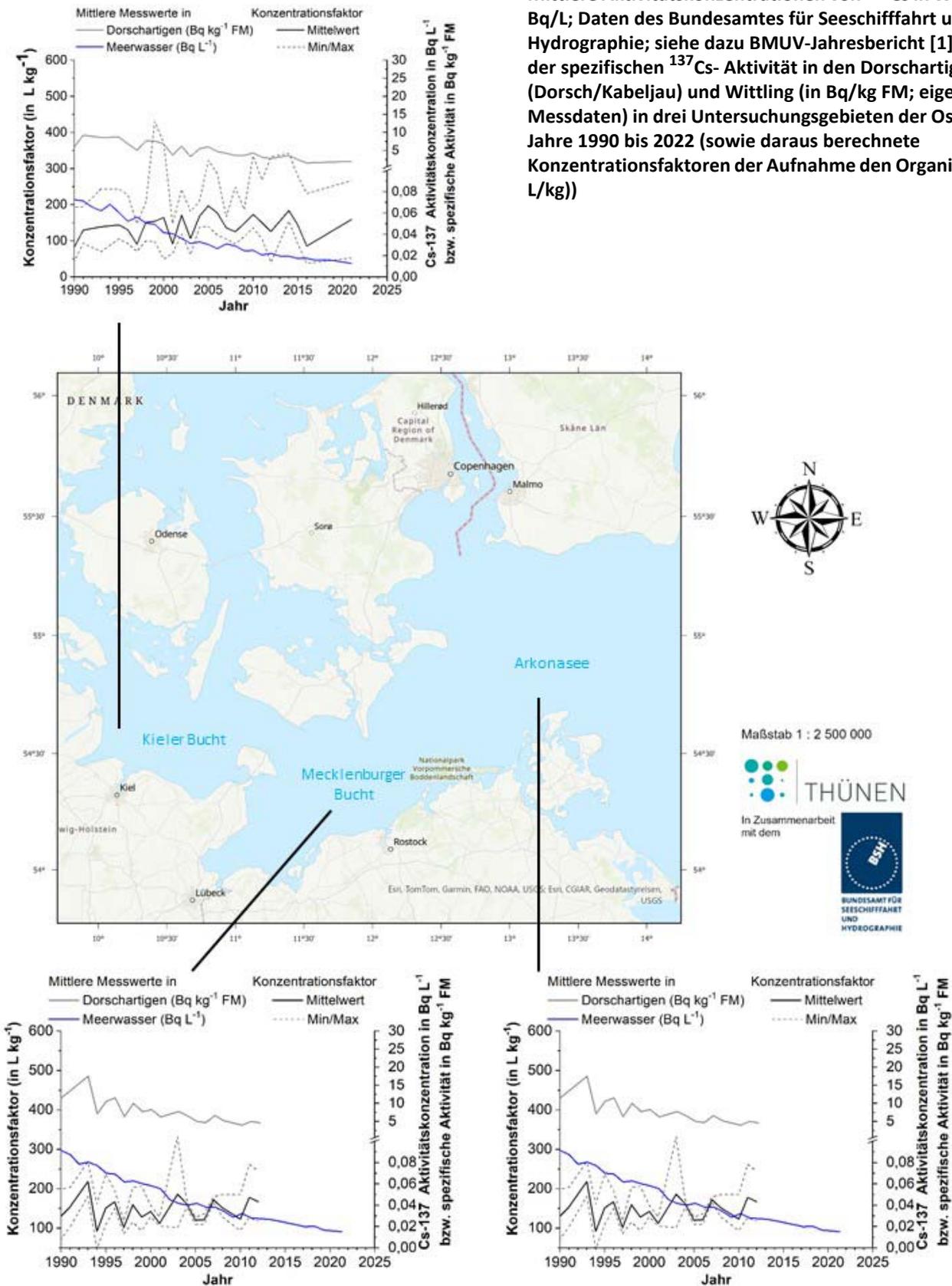
**Fazit**

Die Ergebnisse machen deutlich, dass der Fallout aus der Reaktorkatastrophe von Tschornobyl die dominierende Quelle der Kontamination von Fischen der Ostsee und der deutschen Binnengewässer mit Radionukliden war und ist. Die mittleren <sup>137</sup>Cs-Werte in Fischen aus der Ostsee sind auch 2022 weiterhin höher als in Fischen aus Binnenseen. Die effektive Halbwertszeit für die Abnahme in Wasser und Fisch ist mit 6 bis 11 Jahren in der Ostsee [36] etwas größer als diejenige in Binnengewässern mit etwa 7 Jahren [28]. Dass auch die Abnahme in Binnengewässern relativ langsam erfolgt, liegt daran, dass bis heute kontinuierlich <sup>137</sup>Cs aus den Böden der Wassereinzugsgebiete in die Gewässer eingetragen wird. Dabei war der Einfluss des Fallouts aus der Reaktorkatastrophe von Tschornobyl in den Binnengewässern zunächst höher, wobei hier die größten Auswirkungen auf Fische aus Binnenseen beobachtet wurden. Bis 2022 wurde in den Binnenseen aller-

dings ein deutlicher Rückgang der mittleren spezifischen Aktivität von <sup>137</sup>Cs auf unter 1 Bq/kg FM festgestellt. Im Vergleich dazu war die Kontamination von Fischen aus Teichen und Fließgewässern nur etwa halb so groß. Die spezifischen <sup>137</sup>Cs-Aktivitäten in Fischen aus Fließgewässern und Teichen nahmen von den 1990er Jahren bis etwa zum Jahr 2005 nur noch langsam ab und schwanken seitdem geringfügig auf dem erreichten niedrigen Niveau.

Ein wichtiger Parameter zur Einschätzung der aktuellen Kontaminationssituation ist zudem die Strahlenexposition der Bevölkerung, beispielsweise durch den Verzehr von Fisch und Produkten des Meeres. Diese wurde im Jahr 2010 für einen überdurchschnittlich hohen Verzehr von jährlich 90 kg Meeresfisch aus der Ostsee (im Mittel 8 Bq/kg FM für <sup>137</sup>Cs) mit einem Wert von etwa 10 µSv im Jahr angegeben [33]. Dieses entspricht weniger als 0,04 % der mittleren natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung. Unter Ver-

**Abbildung 9.7**  
 Mittlere Aktivitätskonzentrationen von  $^{137}\text{Cs}$  in Wasser (in  $\text{Bq/L}$ ; Daten des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie; siehe dazu BMUV-Jahresbericht [1]) und der spezifischen  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität in den Dorschartigen (Dorsch/Kabeljau) und Wittling (in  $\text{Bq/kg FM}$ ; eigene Messdaten) in drei Untersuchungsgebieten der Ostsee der Jahre 1990 bis 2022 (sowie daraus berechnete Konzentrationsfaktoren der Aufnahme den Organismus (in  $\text{L/kg}$ ))



wendung der oben angegebenen Mittelwerte der Aktivitätskonzentration von  $^{137}\text{Cs}$  sind durch Verzehr von Fischen aus Binnengewässern noch niedrigere Strahlenexpositionen zu erwarten. Für den Verzehr von Fisch, Krusten- und Weichtieren aus der zentralen Nordsee wurde für 2012 mit Hilfe eines Kompartimentmodells [37] eine Strahlenexposition der Bevölkerung von etwa  $0,05 \mu\text{Sv}$  im Jahr abgeschätzt, was etwa  $0,0022 \%$  der mittlere-

ren natürlichen Strahlenexposition entspricht. Dabei wurde ein Fischverzehr von  $5,6 \text{ kg}$  im Jahr und ein mittlerer Konsum von Krusten- und Weichtieren von je  $0,55 \text{ kg}$  im Jahr zugrunde gelegt, was den mittleren Verzehrswerten der vergangenen Jahre entspricht.



# 10 ENDE GELÄNDE: WARUM TRITIUMHALTIGE WÄSSER AUS FUKUSHIMA IN DEN PAZIFIK EINGELEITET WERDEN UND WAS ES FÜR DEN OZEAN UND DIE MENSCHEN BEDEUTET

M.-O. Aust<sup>1</sup>, P. Nogueira<sup>1</sup>, S. A. K. Schmied<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Fischereiökologie  
*Leitstelle für Fisch und Fischereierzeugnisse, Krustentiere, Schalentiere, Meereswasserpflanzen (Leitstelle G)*

<sup>2</sup> Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie,  
*Leitstelle für Meerwasser, Meeresschwebstoff und -sediment (Leitstelle D)*

Seit der Reaktorkatastrophe im japanischen Kernkraftwerk Fukushima Daiichi sind 13 Jahre vergangen. Bereits im Jahr 2013 wurde klar, dass kontaminiertes Wasser aus den Reaktoren den Pazifik erreichen könnte, wenn es nicht auf dem Gelände des KKW zwischenlagert wird. Da der Platz auf dem Gelände immer knapper wird, wurde nach einer langen Diskussion im August 2023 mit dem Einleiten des Wassers in den Pazifik begonnen. Nachfolgend soll erläutert werden, was das nach gegenwärtigem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse für die Meeresumwelt bedeutet.

## Der Unfall

Am 11.03.2011 löste ein Erdbeben der Stärke 9,0 auf der Momenten-Magnituden-Skala vor der Küste Japans einen Tsunami aus. Beide Ereignisse setzten die Kühlsysteme in vier Reaktoren des Kernkraftwerkes Fukushima Daiichi außer Funktion. Sämtliche Versuche der Wiederherstellung eines Kühlsystems scheiterten, so dass es in den Reaktoren 1 bis 3 zu Kernschmelzen und im Abklingbecken über Reaktor 4 zu einer Überhitzung der Brennelemente kam. In deren Folge ereigneten sich mehrere Wasserstoffexplosionen. Durch die strukturellen Schäden an den Reaktoren fiel bzw. fällt kontaminiertes Wasser einerseits bei der Kühlung der zerstörten Reaktorkerne, andererseits durch einen unkontrollierten Grundwasserzutritt zu den Reaktorgebäuden an.

Durch technische Maßnahmen konnte der unkontrollierte Zustrom des Wassers aus der Umgebung zwar deutlich reduziert werden, allerdings ist weiterhin eine Absenkung des umliegenden Grundwasserspiegels notwendig, um das Entweichen radioaktiver Stoffe in die Umwelt zu verhindern. Das abgepumpte Grund- und Kühlwasser enthält verschiedene Radionuklide in unterschiedlichen Konzentrationen. Zur besseren Handhabung wird es mit einem fortschrittlichen System zur Entfernung von in Flüssigkeiten gelöster Radionuklide (Advanced Liquid Processing System, kurz: ALPS) behandelt. Die Entfernung des Tritiums ist jedoch nicht möglich, weil dieses

als Isotop des Wasserstoffs in die Wassermoleküle eingebaut ist. Deshalb werden etwa 1,32 Millionen Tonnen tritiumhaltiges Wasser (Stand Januar 2023) in Tanks auf dem Reaktorgelände gelagert.

Allerdings gibt es mittlerweile Konkurrenz um die Nutzung der Flächen auf dem Gelände: Es ist beispielsweise der Rückbau der havarierten Anlage notwendig, um die Gefahr einer weiteren Kontamination der Umwelt zu verringern. Dafür werden große Flächen benötigt, um das Personal auf dem Gelände effektiv vor ionisierender Strahlung zu schützen. Erschwerend kommt hinzu, dass die vorhandenen Tanks für kontaminiertes Wasser nicht dauerhaft ausgelegt sind und regelmäßig überprüft bzw. ausgetauscht werden müssen. Daher wurde bereits im Jahr 2017 begonnen, ein Konzept für den Umgang mit dem kontaminierten Wasser zu erarbeiten.

## Was ist eigentlich Tritium?

Bei Tritium handelt es sich um ein in der Natur in Spuren vorkommendes Isotop des Wasserstoffs; in der Antarktis wurden in Niederschlags- und Meerwasser beispielsweise Konzentrationen zwischen  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$  und  $4000 \text{ Bq m}^{-3}$  ermittelt [38]. Im Gegensatz zum „normalen“ Wasserstoff, dessen Atomkern nur ein Proton besitzt, besteht der Tritium-Kern aus einem Proton und zwei Neutronen – Tritium wird deshalb auch als „überschwerer“ Wasserstoff bezeichnet. In der Natur werden jährlich  $72 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$  Tritium in der oberen Atmosphäre neu gebildet. Das zugehörige globale „Gleichgewichts“-Inventar wird mit  $1275 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$  bis  $2200 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$  angegeben; dies entspricht Massen zwischen 3,6 kg und 6,2 kg Tritium ([38]; [39]). Etwa 99 % davon liegen in Wasser gebunden vor.

Das ist aber nur ein Aspekt: Tritium entsteht auch als Nebenprodukt der Kernspaltung in Siedewasserreaktoren, wie sie im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi verbaut wurden. Die Ableitung des entstehenden Tritiums mit dem Abwasser oder der Abluft einer kerntechnischen Anlage wird in

festgelegtem Umfang durch die jeweiligen Aufsichtsbehörden genehmigt. So werden allein die Ableitungen aller Wiederaufbereitungsanlagen bis zum Jahr 2010 auf  $410 \cdot 10^{15}$  Bq geschätzt, von denen im Jahr 2010 noch  $45 \cdot 10^{15}$  Bq in der Umwelt vorhanden waren [39].

Tritium – egal ob aus natürlichen oder anthropogenen Quellen - ist ein radioaktiver Stoff, der Beta-Strahlung (Elektronen) niedriger Energie aussendet. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren zu stabilem, also nicht radioaktivem, Helium-3. Der Dosiskoeffizient von Tritium ist mit  $1,8 \cdot 10^{-11}$  Sv Bq<sup>-1</sup> etwa tausendfach niedriger als der der Cäsium-Isotope 134 und 137, die während der Reaktorkatastrophe in Fukushima ebenfalls freigesetzt wurden und ins Meer gelangten. Aufgrund dieses sehr niedrigen Dosiskoeffizienten darf es in engen Grenzen auch in sogenannten Consumer-Produkten (z. B. Leuchtziffern von Uhren, leuchtende Angelköder) eingesetzt werden. Der Dosiskoeffizient wird in Sv Bq<sup>-1</sup> (Sievert pro Becquerel) angegeben und ist ein Maß für die Wirkung eines radioaktiven Isotops auf den Körper einer Person, die den Stoff aufnimmt.

### Wohin mit dem kontaminierten Wasser?

Für den langfristigen Umgang mit dem kontaminierten Wasser wurden fünf Vorgehensweisen vorgeschlagen und diskutiert: Verpressung im Untergrund, kontrollierte Freisetzung ins Meer, kontrolliertes Verdampfen, Wasserstofffreisetzung sowie Verfestigung mit untertägiger Endlagerung. Nach intensiver Abwägung der möglichen Risiken, der technischen Umsetzbarkeit und der zeitlichen Integration in die Rückbaumaßnahmen der Reaktoren fiel die Entscheidung für eine Einleitung ins Meer. Risiken für die Meeresumwelt werden als gering erachtet, da

- 1) die Abwässer, in denen die Radionuklidkonzentration die amtlichen Grenzwerte überschreiten, mittels ALPS-System gereinigt werden, so dass die Grenzwerte mit Ausnahme von Tritium anschließend unterschritten werden,
- 2) die Tritium-Konzentration im abgeleiteten Wasser durch Verdünnung auf  $1500$  Bq L<sup>-1</sup> reduziert wird,
- 3) das jährlich abgegebene Tritium-Inventar auf  $22 \cdot 10^{12}$  Bq (entspricht einer Masse von 60 mg) begrenzt wird. Das entspricht der Menge an Ableitungen, die TEPCO vor dem Unfall für den Betrieb des Kernkraftwerks Fukushima genehmigt wurde.

Die Internationale Atomenergiebehörde hat den Bericht des ALPS-Komitees (SHALPS[40]) begutachtet und schließt sich dieser Meinung an, liefert aber auch zusätzliche Begründungen und Klarstellungen, die die Einleitung des kontaminierten Wassers ins Meer ([41], [42]) rechtfertigen. Insbesondere soll eine Kommunikationsstrategie erarbeitet und der Austausch mit Betroffenen und Verbänden intensiviert werden.

### Wie verhält sich Tritium in Organismen?

Tritium wird in organisches Material eingebaut, weil es sich wie normaler Wasserstoff verhält. Im menschlichen Körper – und wahrscheinlich auch im Tier – wird Tritium schnell wieder ausgeschieden (Halbwertszeit ca. 10 Tage). Daher wird in der Fachliteratur eine Gesundheitsgefährdung durch Tritium für Mensch und Tier als gering eingeschätzt ([38], [39]). Allerdings ist es noch nicht wissenschaftlich gesichert, ob die Gefahr durch Fehler in der Erbsubstanz, die nach Einbau von Tritium in die DNS entstehen können, bislang unterschätzt wurde ([43], [44]).

Tritium wird nach Angaben der Internationalen Atomenergie-Organisation [35] nicht in Fisch angereichert, d. h. die Konzentrationen in Fisch und Wasser sind identisch. Im Gegensatz dazu wird Cäsium in Fisch hundertfach gegenüber der Konzentration im Wasser angereichert. Während Tritium in Fisch relativ schwer nachweisbar und auch kaum vom natürlichen Hintergrund zu unterscheiden ist, lässt sich die Konzentration von Tritium im Wasser vergleichsweise leicht ermitteln. Anders als bei Fisch kann beim Nachweisverfahren in Wasser eine nahezu beliebig große Wassermenge nach einer Anreicherung auf dessen Tritium-Aktivitätskonzentration analysiert werden. Durch die Anreicherung erhöht sich die Tritium-Aktivitätskonzentration im Messpräparat so, dass das Messgerät auch einen gültigen Messwert erzeugt bzw. der in der Probe enthaltene natürliche Hintergrund „ausgeblendet“ werden kann.

Im Zuge der Havarie im Kernkraftwerk Fukushima wurden etwa  $1,6 \cdot 10^{15}$  Bq Tritium über einen kurzen Zeitraum in den Pazifik eingeleitet. Diese waren im Juni 2011 im Wasser in 40 km Entfernung zum Kernkraftwerk gut nachweisbar, obwohl die eingeleiteten Mengen deutlich geringer waren als beispielsweise die des globalen Kernwaffenfalls oder den Einleitungen von Wiederaufbereitungsanlagen für Kernbrennstoffe ([39]). Auf Basis der Modellierungen der Cäsium-Freisetzungen aus dem Kernkraftwerk Fukushima (z. B. [45]) wird erwartet, dass sich das jetzt eingeleitete Tritium aufgrund der geringen Konzentration und

der starken Strömungen im Pazifik höchstens in direkter Umgebung der Einleitstelle nachweisen lässt.

**Begleitende Überwachungsmaßnahmen**

Bereits im Zeitraum 1973 bis 2021 wurden über 10.000 Messungen der Aktivitätskonzentration von Meerwasser im Pazifik durchgeführt und in der MARIS-Datenbank der Internationalen Atomenergiebehörde abgelegt ([46]; Abbildung 10.1). Die Auswertung zeigt, dass es durch den Eintrag kontaminierten Abwassers aus dem havarierten Kernkraftwerk Fukushima Daiichi in den Jahren 2011 bis 2013 zwar erhöhte Maximalwerte im Bereich der Anlage selbst ergab, die Median-Werte aber mit dem Zeitraum vor dem Reaktorunfall vergleichbar waren (Tabelle 10.1). Für die aktuelle Bewertung liegt damit eine große Menge an frei zugänglichen Vergleichswerten vor. Um den Effekt der Einleitungen auf die Meeresumwelt zu untersuchen, soll die Überwachung in den betroffenen Gebieten ausgebaut werden. Die Betreiberfirma TEPCO ist dabei für Untersuchungen auf dem Gelände der Anlage zuständig, die staatliche Regulierungsbehörde NRA (National Regulation Authority) übernimmt die Bereiche Meerwasser

und Meeressediment und die japanische „Fisheries Agency“ die marinen Organismen.

TEPCO stellt alle Experimente und Messwerte zur Verfügung, die im Vorfeld bzw. während der Tritium-Freisetzung erhalten werden, unter:

<https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/index-e.html>.

Die Ergebnisse des Monitorings der NRA und der „Fisheries Agency“ werden – nach Themenbereichen sortiert – unter folgenden Internetseiten veröffentlicht:

<https://radioactivity.nra.go.jp/en/> und <https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html>.

Um die Wirkung der Ableitungen auf die Meeresumwelt zu erfassen und mit den Prognosen abgleichen zu können, ist vorgesehen, in einer ersten Phase nur vergleichsweise kleine Abwassermengen in den Pazifik abzugeben. Erst wenn bestätigt werden kann, dass keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Meeresumwelt eintreten, wird die Ableitung der tritiumhaltigen Wässer fortgesetzt. Dabei muss sichergestellt werden, dass alle Radionuklide im eingeleiteten Wasser möglichst vollständig erfasst werden [47].

**Tabelle 10.1**  
**Ergebnisse von Tritium-Messungen im Meerwasser des Pazifiks an den Probenahmestellen aus**  
**Abbildung 1; die Zusammenstellung wurde IAEA (2024) [46] entnommen; N= Anzahl von**  
**Messungen; nn= Anzahl Messungen unter der Nachweisgrenze**

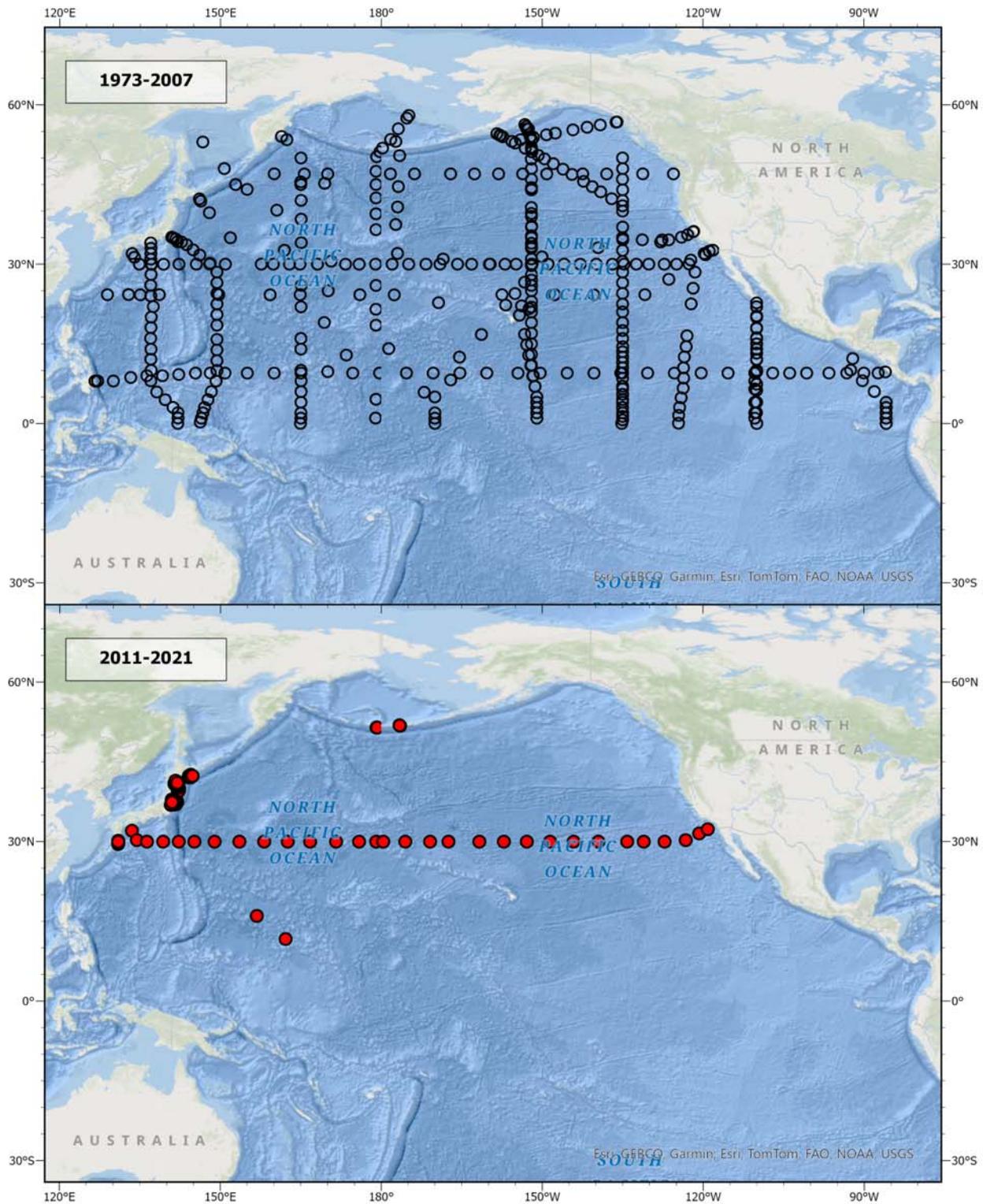
Zeitraum	Probenanzahl		Aktivitätskonzentration (Bq m <sup>-3</sup> )		
	N	nn	Min	Max	Median
1973 - 2007	5951	0	0,118	1704	89,7
2011 - 2021	5068	2427	0,118	68000	80,0

**Fazit**

Tritium ist ein Radionuklid, das in großen Mengen natürlich gebildet wird und dessen wesentlicher Anteil im Wasser gebunden vorliegt. Die jetzigen Ableitungen aus den Tanks des havarierten Kernkraftwerks Fukushima werden die Ableitungen, die für den Betrieb des intakten Kernkraft Fukushima genehmigt wurden, unterschreiten. Damit sind sie im Vergleich zur Menge natürlich vorkommenden Tritiums gering. Tritium wird, sofern es

von Meeresorganismen aufgenommen wird, schnell ausgeschieden; eine Anreicherung findet nicht statt.

Unter den oben genannten Randbedingungen ist es unwahrscheinlich, dass die Tritium-Einleitungen Auswirkungen auf Meeresorganismen haben werden. Ein Risiko für den Verbraucher wird aus Sicht des Strahlenschutzes ebenfalls als gering eingeschätzt.



**Abbildung 10.1**  
**Probennahmepunkte von Tritium-Messungen im Meerwasser; die Zusammenstellung wurde IAEA (2024) [46] entnommen.**

# 11 BODEN, PFLANZEN, FUTTERMITTEL, MILCH UND GESAMTNAHRUNG

F. Ober, T. Gil Haenelt, T. Vagt

Max Rubner-Institut, Institut für Sicherheit und Qualität bei Milch und Fisch

Leitstelle für Boden, Bewuchs, Futtermittel und Nahrungsmittel pflanzlicher und tierischer Herkunft (Leitstelle E/F)

## Boden, Pflanzen und Futtermittel

Die Kontamination des Bodens mit  $^{137}\text{Cs}$  ist fast ausschließlich auf die Deposition nach dem Tschornobyl-Unfall zurückzuführen, während die Kontamination mit  $^{90}\text{Sr}$  zum überwiegenden Teil noch aus der Zeit der oberirdischen Kernwaffenversuche stammt.

In Abbildung 11.3 und Abbildung 11.4 sind die Landesmittelwerte für die  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentration in Ackerböden und die entsprechenden Werte für Böden, die als Weiden und Wiesen genutzt werden, dargestellt. Die Wanderung der Radionuklide  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  in den Boden hinein erfolgt sehr langsam. Da beide Radionuklide eine lange Halbwertszeit aufweisen, verändert sich ihre spezifische Aktivität im Boden gegenwärtig von Jahr zu Jahr nur geringfügig. Gelegentliche stärkere Schwankungen der Messwerte an einem Ort gehen auf unterschiedliche Methoden der Probenahme zurück.

In den Vegetationsperioden 2020 bis 2022 wurden verschiedene Pflanzenproben  $\gamma$ -spektrometrisch gemessen. Im Vordergrund standen dabei

Proben solcher Pflanzen, die als Futtermittel dienen, insbesondere Weide- und Wiesenbewuchs. In einigen Bundesländern werden zudem auch Futtermittelrohstoffe überwacht. Diese Produktgruppe schließt ein: Mais und Maissilage, Futterrüben, Futtergetreide, Futterkartoffeln, Grünfütterpflanzen, Erbsen, Raps, Ölkuchen/Ölschrote, Sonnenblumen, Kraftfuttermischungen und Silage. Im Mittel liegen die Werte zwischen  $<0,1$  und  $0,4 \text{ Bq/kg TM}$  für  $^{137}\text{Cs}$ . Für Mais und Maissilage wird ein Maximalwert von  $3,4 \text{ Bq/kg TM}$  für  $^{137}\text{Cs}$  angegeben.

Im Allgemeinen hat die Kontamination pflanzlichen Materials weiterhin abgenommen. Dies ist vor allem auf Tiefenwanderung in den Boden sowie den physikalischen Zerfall zurückzuführen. Allerdings führt wiederholtes Pflügen zu einer annähernd homogenen Verteilung atmosphärisch eingetragener Radionuklide bis zur Pflugschartiefe, dadurch ist theoretisch nur ein langsamer Wegtransport der Aktivität durch Oberflächen-erosion von Bodenpartikeln einerseits und Transport in größere Tiefen an der unteren Grenz-

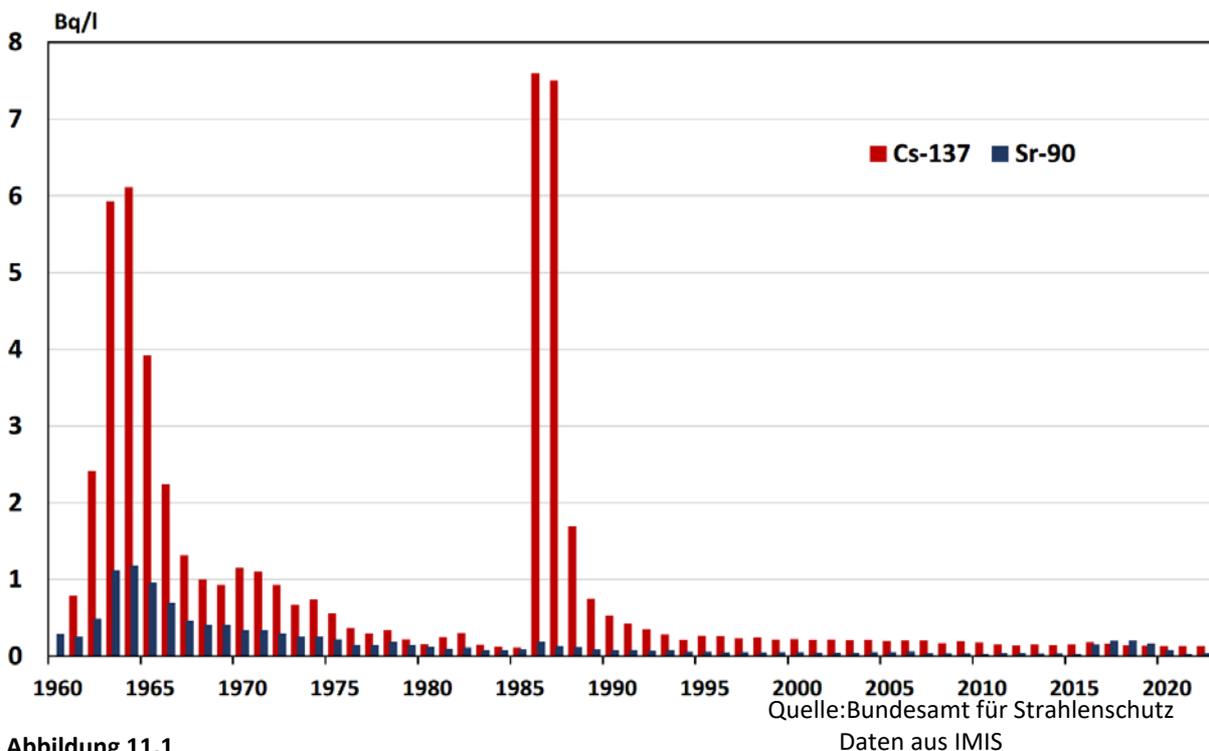


Abbildung 11.1  
Jahresmittelwerte der  $^{90}\text{Sr}$ - und  $^{137}\text{Cs}$ -Konzentrationen in Rohmilch (Bundesgebiet)

schicht der gepflügten Bodensäule andererseits zu erwarten.

### Radioaktive Stoffe in Milch und Milchprodukten

Die Kontamination von Milch und Milchprodukten mit  $^{137}\text{Cs}$  aus dem Kernwaffen- und Tschornobyl-Fallout hatte bereits in den Vorjahren ein sehr niedriges Niveau erreicht. Derzeit vermindert sie sich von Jahr zu Jahr nur noch äußerst geringfügig. Die  $^{90}\text{Sr}$ -Aktivitätskonzentration ist in den Jahren 2020 - 2022 auf sehr niedrigem Niveau ebenfalls nahezu konstant geblieben. Andere störfallrelevante Radionuklide wie  $^{131}\text{I}$  und  $^{134}\text{Cs}$ , die nach dem Tschornobyl-Unfall deponiert wurden, wurden wegen ihrer kurzen Halbwertszeiten von acht Tagen bzw. zwei Jahren in den letzten Jahren nicht mehr nachgewiesen. Abbildung 11.1 zeigt den Verlauf der Jahresmittelwerte der  $^{90}\text{Sr}$ - und  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentrationen der Milch für den Zeitraum von 1960 bis 2022. Weitere Informationen zu verschiedenen Milchprodukten sind in den Tabellen in den Jahresberichten zur Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung [1] beigefügt.

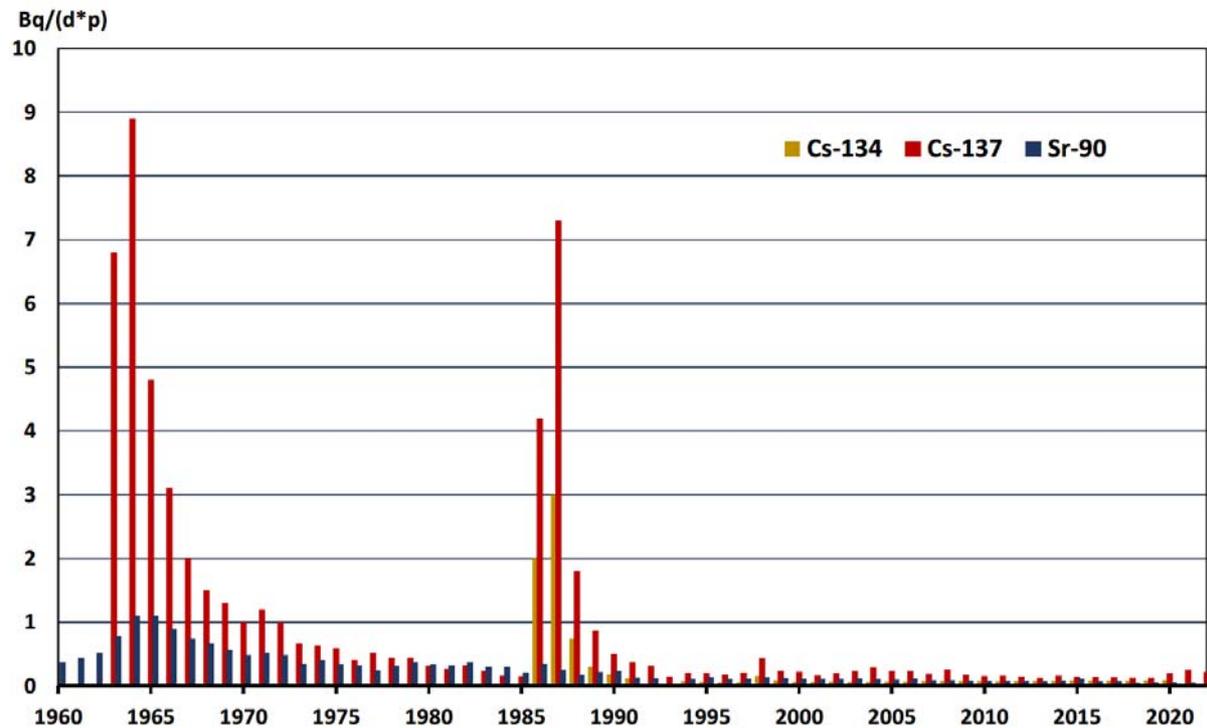
### Gesamtnahrung, Säuglings- und Kleinkindernahrung

Die Beprobung der Gesamtnahrung dient der Abschätzung der ingestionsbedingten Strahlendosis

gesunder Erwachsener in der Bundesrepublik Deutschland. Dazu werden verzehrfertige Menüs der Gemeinschaftsverpflegung aus Kantinen, Heimen, Krankenhäusern und Restaurants erfasst. Daraus resultiert eine Mittelung der Verzehrmenge und der Zusammensetzung. Bei den Gesamtnahrungsproben handelt es sich um Tagesrationen für gesunde Erwachsene.

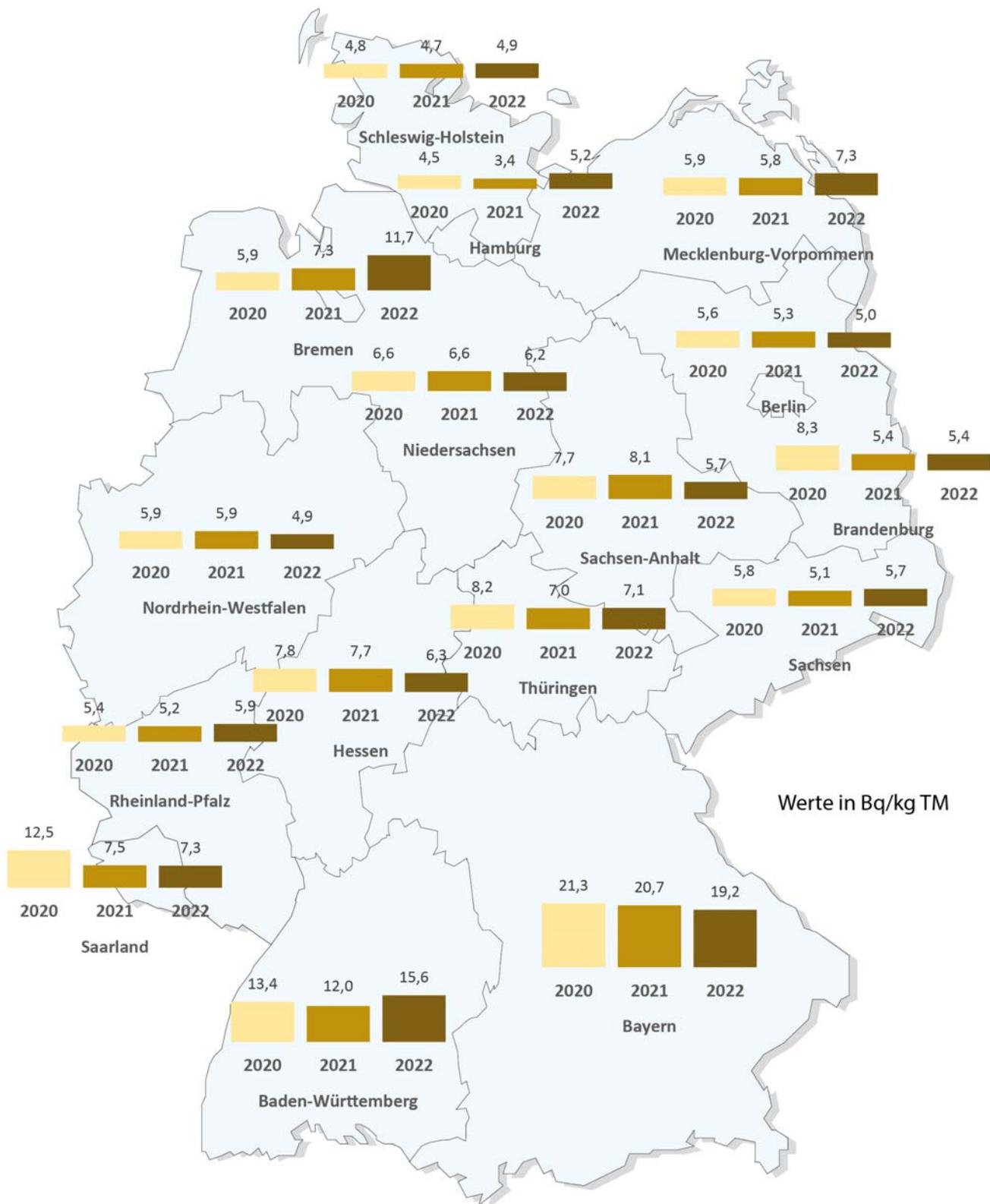
Tabellen über die spezifische Aktivität in Bq/kg FM (Feuchtmasse) für  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{137}\text{Cs}$  für einige ausgewählte Lebensmittel sowie für Säuglings- und Kleinkindernahrung finden sich in den Jahresberichten über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung [1].

Die mittlere tägliche  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätszufuhr einer Person über die Nahrung wird in Bq pro Tag und Person (Bq/dxp) ausgedrückt. Für die Jahre 2020 bis 2022 wurden Werte von  $<0,25$  Bq/(dxp),  $<0,25$  Bq/(dxp) und  $<0,22$  Bq/(dxp) ermittelt. Somit zeigen sich kaum Veränderungen zu den Vorjahren (Abbildung 11.2). Da in diese Ermittlung ein hoher Prozentsatz von Messwerten unterhalb der Nachweisgrenzen eingeht, wird der Wert der Aktivitätszufuhr überschätzt, was bei einer Interpretation des Wertes berücksichtigt werden muss.



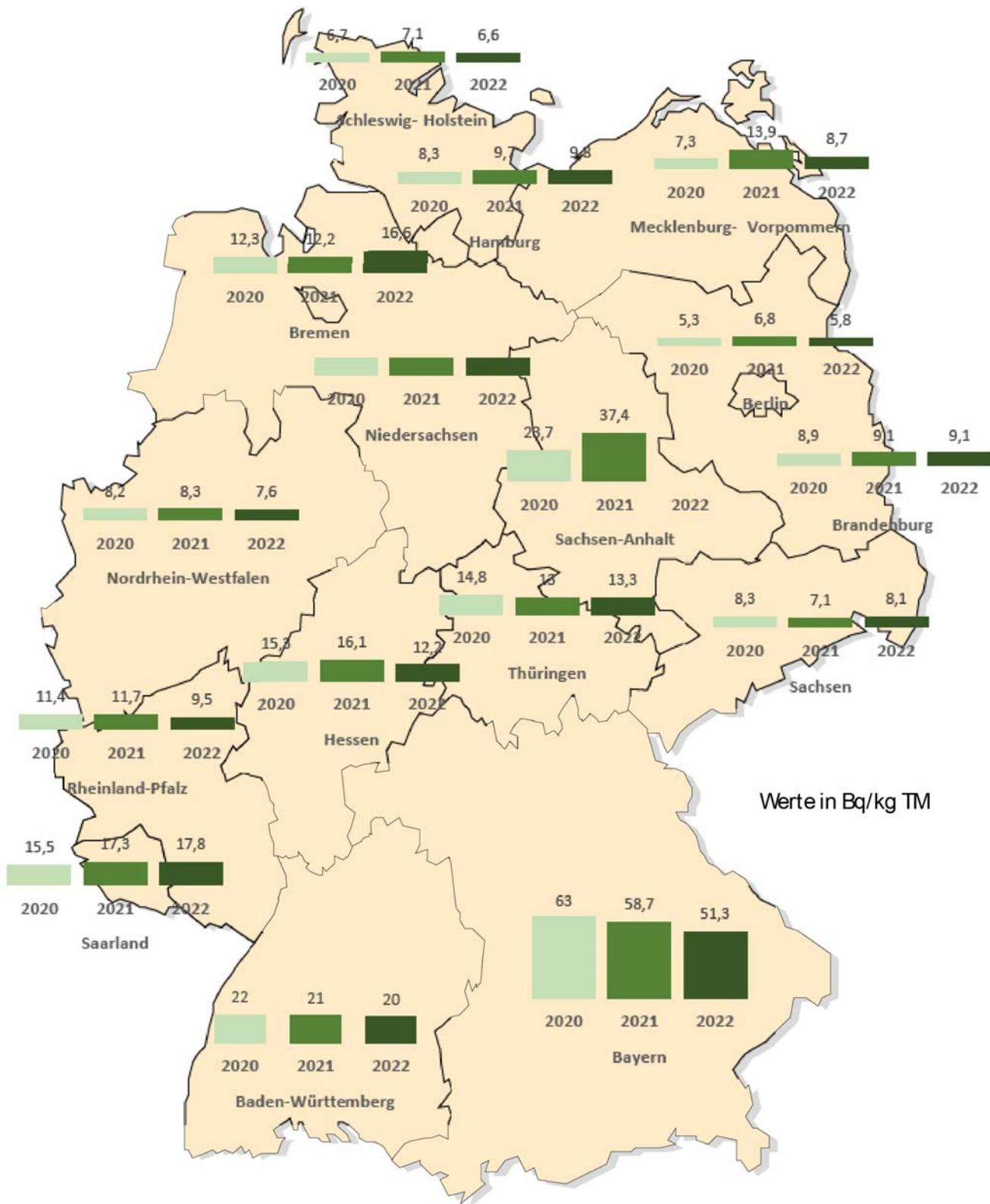
Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz  
Daten aus IMIS

Abbildung 11.2  
Jahresmittel der Aktivitätszufuhr von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  mit der Gesamtnahrung pro Tag und Person



Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz  
Daten aus IMIS

**Abbildung 11.3**  
Radioaktive Kontamination von Ackerböden mit <sup>137</sup>Cs in den Jahren 2020 bis 2022 nach Messungen der Bundesländer (Mittelwerte in Bq/kg TM)



Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz  
Daten aus IMIS

**Abbildung 11.4**  
Radioaktive Kontamination von Weideböden mit  $^{137}\text{Cs}$  in den Jahren 2020 bis 2022 nach Messungen der Bundesländer (Mittelwerte in Bq/kg TM)

# 12 RADIOAKTIVE STOFFE IN ABWASSER, KLÄRSCHLAMM UND ABFÄLLEN

P. Hofmann, K. Schmidt, C. Wittwer

Bundesamt für Strahlenschutz

Leitstelle für Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Abfälle und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen (Leitstelle H)

## Radioaktive Stoffe in Abfällen

Abfälle fallen bei vielen häuslichen, kommunalen und gewerblichen einschließlich industriellen Tätigkeiten an. Bevor ein Teil dieser Abfälle auf einer Deponie gelagert werden kann, muss aus abfallrechtlicher Sicht geprüft werden, ob eine vorherige Behandlung (z. B. thermische Verwertung von Hausmüll, Kompostierung organischer Abfälle) oder eine Rückführung der Stoffe (z. B. Bauschutt, Glas, Metallschrott) oder einzelner Bestandteile in den Stoffkreislauf möglich ist. Demnach schließt in diesem Kontext der Begriff „Abfälle“ sowohl die Abfälle zur Beseitigung als auch die wiederzuverwertenden Reststoffe gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz mit ein. Bei der Überwachung der Umweltradioaktivität durch die amtlichen Messstellen der Länder (§ 162 StrlSchG) werden nur solche Abfälle berücksichtigt, die von radioökologischer Bedeutung sein können. In diesem Zusammenhang werden entsprechend des Routinemessprogramms (der AVV IMIS) in Deutschland Proben folgender Medien untersucht:

- Sickerwasser und oberflächennahes Grundwasser von Hausmülldeponien,
- Asche, Schlacke, feste und flüssige Rückstände aus Rauchgasreinigungen von Verbrennungsanlagen für Klärschlamm und Hausmüll sowie
- in den Handel gelangender Kompost aus Kompostierungsanlagen.

Im Wesentlichen werden an diesen Medien gammaspektrometrische Untersuchungen vorgenommen und hierbei z. B. die Aktivitätskonzentration bzw. spezifische Aktivität von  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{40}\text{K}$  bestimmt. Im Sickerwasser und in oberflächennahem Grundwasser von Deponien wird darüber hinaus auch die Aktivitätskonzentration Tritium ( $^3\text{H}$ ) gemessen.

Tabellen mit Messwerten von  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{131}\text{I}$  und Tritium in den überwachten Medien sind exemplarisch für das Jahr 2020 im Jahresbericht „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ des BMUV [23] enthalten.

Tritium im Sickerwasser bzw. oberflächennahen Grundwasser von Hausmülldeponien stammt vor-

wiegend aus Altlasten der Uhren- und Gerätefertigung. Die Aktivitätskonzentrationen von Tritium in den untersuchten Proben lagen in den Jahren 2020 bis 2022 zwischen 1,2 Bq/l und 210 Bq/l; die Mediane bei 14 Bq/l bis 17 Bq/l. In 33 % der untersuchten Proben von Hausmülldeponien wurden in den Berichtsjahren 2020 bis 2022  $^{137}\text{Cs}$  nachgewiesen. Die Aktivitätskonzentrationen lagen zwischen 0,003 Bq/l und 0,22 Bq/l; die Größenordnung der berechneten Mediane blieb mit <0,042 Bq/l (2020), 0,04 Bq/l (2021) und <0,04 Bq/l (2022) relativ unverändert.

In einem Teil der Abfall- und Reststoffproben konnte das in der Nuklearmedizin angewandte Nuklid  $^{131}\text{I}$ , vereinzelt auch  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{75}\text{Se}$  und  $^{111}\text{In}$  nachgewiesen werden. Für  $^{131}\text{I}$  reichen die Messwerte beispielsweise für das Medium Flugasche/Filterstaub von 0,2 Bq/kg TM bis 170 Bq/kg TM in den Jahren 2020 bis 2022. Die dazugehörigen Mediane sind jedoch vergleichbar niedrig und stabil mit <0,74 Bq/kg TM bis <1,0 Bq/kg TM. Für die spezifischen Aktivitäten des natürlich vorkommenden Nuklids  $^{40}\text{K}$  wurden in diesem Zeitraum für Flugasche/Filterstaub Messwerte im Bereich von 290 Bq/kg TM bis 5200 Bq/kg TM berichtet.

Messwerte für  $^{60}\text{Co}$  wurden ausschließlich für das Berichtsjahr 2020 von zwei Proben der Verbrennungsanlage Ingolstadt mit 0,97 Bq/kg TM und 2,6 Bq/kg TM übermittelt. Alle weiteren Untersuchungen ergaben das Ergebnis „kleiner Nachweisgrenze“. Im Routinemessprogramm ist eine Nachweisgrenze von 5 Bq/kg TM bezogen auf  $^{60}\text{Co}$  gefordert.

Der Gehalt von  $^{137}\text{Cs}$  in Reststoffen und Abfällen stammt weiterhin im Wesentlichen aus dem Fallout nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl im Jahr 1986. Dies kommt, wie auch bei Klärschlamm, durch höhere Werte östlich bzw. südlich der Linie Radolfzell – Eichstätt – Regensburg – Zwiesel im Vergleich zur übrigen Bundesrepublik Deutschland zum Ausdruck. Da eine regionale Abhängigkeit aufgrund der geringen Menge an Datenpunkten im südlichen Raum jedoch nicht valide zu stützen ist, werden in der Auswertung nur die Daten des gesamten Bundesgebietes betrachtet. Die Mediane der spezifischen Aktivität

für Flugasche/Filterstaub aus Verbrennungsanlagen lagen in den Jahren 2020, 2021 und 2022 bei 16 Bq/kg TM, 16 Bq/kg TM und 15 Bq/kg TM.

Die Untersuchung des Kompostes ergab für  $^{137}\text{Cs}$  spezifische Aktivitäten zwischen 1,0 Bq/kg TM und 40 Bq/kg TM in den zu betrachtenden Berichtszeitraum. Zur radiologischen Beurteilung des Kompostes aus Kompostierungsanlagen ist anzumerken, dass dieser im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Nutzung des Klärschlammes vorzugsweise im Gartenbaubereich (Gärtnereien, Baumschulen, Parkanlagen usw.) verwendet wird. Inwiefern dieser zusätzlich aufgebrauchte Kompost zu einer signifikanten Erhöhung der  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität führt, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) hat im Vergleich zur vorherig gültigen Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung den Transferfaktor Boden/Pflanze für Cäsium von 0,05 auf 0,01 abgesenkt. Vorausgesetzt, eine Pflanze würde auf einem Boden nur bestehend aus dem maximal mit  $^{137}\text{Cs}$  angereicherten Kompost von 40 Bq/kg TM angepflanzt werden, so würde das nach den Vorgaben der AVV Tätigkeiten zu einer Aktivitätskonzentration in der Pflanze von bis zu 0,4 Bq/kg FM führen. Berechnet man die Dosis anhand der maximal aufgenommenen Aktivitätskonzentration von 0,4 Bq/kg FM in der Pflanze (Annahme: Wurzelgemüse, Kartoffel, Säfte, mittlere Verzehrsmengen) für die Altersgruppe <1 a und den Erwachsenen (>17 a) würde man Werte von 0,76  $\mu\text{Sv/a}$  und 0,86  $\mu\text{Sv/a}$  erhalten, welche deutlich unterhalb des Dosisgrenzwertes von 1 mSv/a liegen. Somit würde die Nutzung des Kompostes bzw. der Verzehr des angebauten Produktes keine gesundheitliche Gefährdung für die Bevölkerung darstellen.

### Radioaktive Stoffe in Abwasser und Klärschlamm

Im Rahmen der Überwachung der Umweltradioaktivität nach dem StrlSchG werden gereinigte kommunale Abwässer (Klarwässer) aus den Abläufen der Kläranlagen und die bei der biologischen Abwasserreinigung in Kläranlagen anfallende Klärschlämme untersucht. Die Messwerte für Klärschlämme beziehen sich dabei vorzugsweise auf konditionierte oder stabilisierte Schlämme in der Form, in der sie die Kläranlagen verlassen bzw. in die Klärschlammverbrennung gegeben werden, z. B. auf teilentwässerte Schlämme oder Faulschlämme. Abwässer und Klärschlämme sind

radioökologisch von besonderer Bedeutung, da sich in der Umwelt befindliche künstliche und natürliche Radionuklide dort sehr stark anreichern können. Das Routinemessprogramm der AVV IMIS sieht die Überwachung von etwa 90 Abwasserreinigungsanlagen in Deutschland vor. Vorwiegend erfolgen gammaspektrometrische Untersuchungen, bei denen z.B. Aktivitäten der Nuklide  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  identifiziert werden können. Darüber hinaus werden über radiochemische Verfahren die Aktivitäten von  $^{90}\text{Sr}$  sowie Plutonium- und Uranisotopen bestimmt.

In Tabelle 12.1 sind die Daten der amtlichen Messstellen der Bundesrepublik Deutschland für die Berichtsjahre 2020 bis 2022 zusammengestellt ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  sowie  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$ ). Angegeben werden jeweils die Gesamtanzahl der untersuchten Proben, die Anzahl der untersuchten Proben mit dem Ergebnis kleiner Nachweisgrenze (NWG) sowie der kleinste und größte bestimmte tatsächliche Messwert. Um einen besseren Überblick über die Entwicklung der Datenlage zu erhalten, ist zusätzlich der für jedes Berichtsjahr berechnete nuklidspezifische Median in der Tabelle dokumentiert. Für dessen Kalkulation wird das Ergebnis kleiner Nachweisgrenze gleichrangig mit dem Zahlenwert der erreichten Nachweisgrenze wie ein tatsächlicher Messwert berücksichtigt. Für die Daten aus dem Jahr 2020 wird zusätzlich auf den bereits veröffentlichten Jahresbericht „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ des BMUV [23] verwiesen.

Die Radionuklide  $^{40}\text{K}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  sind natürliche Bestandteile des Bodens und damit geogenen Ursprungs. Die jeweilige Aktivitätskonzentration bzw. spezifische Aktivität in Abwasser und Klärschlamm variiert in Abhängigkeit von regionalen geologischen Gegebenheiten. Die Ergebnisse für  $^{40}\text{K}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  aus den Jahren 2020 bis 2022 sind miteinander vergleichbar und stimmen auch mit den Ergebnissen der vorangegangenen Jahre gut überein.

In einem Teil der Abwasser- und Klärschlammproben wurde das hauptsächlich in der Nuklearmedizin eingesetzte  $^{131}\text{I}$  bestimmt, in Einzelfällen auch  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{177\text{m}}\text{Lu}$  und  $^{177}\text{Lu}$ . Die Messwerte für  $^{131}\text{I}$  im Klärschlamm lagen im Berichtszeitraum zwischen 0,26 Bq/kg TM und 2300 Bq/kg TM; die jeweiligen Mediane sind miteinander vergleichbar. Für vereinzelte Klärschlammproben der Anlagen Hamburg-Köhlbrandhöft, Arnsberg, Meerbusch, München I und Saarbrücken wurden im Berichtszeitraum 2020 bis 2022 auch Messwerte für die Plutoniumisotope  $^{238}\text{Pu}$  und  $^{239}\text{Pu}$

$^{240}\text{Pu}$  übermittelt. Der höchste Plutoniummesswert im zu betrachtenden Berichtszeitraum wurde in einer Klärschlammprobe der Anlage Saarbrücken mit 2,3 Bq/kg TM (Nachweisgrenze 3,2 Bq/kg TM) für  $^{238}\text{Pu}$  bestimmt.

Von den während der Zeit der atmosphärischen Kernwaffenversuche von 1945 bis etwa 1980 und des Kernkraftwerkunfalls in Tschornobyl 1986 mit dem Fallout in die Umwelt gelangten Spalt- und Aktivierungsprodukten sind in den Abwässern und Klärschlämmen nur noch die langlebigen Leuklide  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{90}\text{Sr}$  nachweisbar.

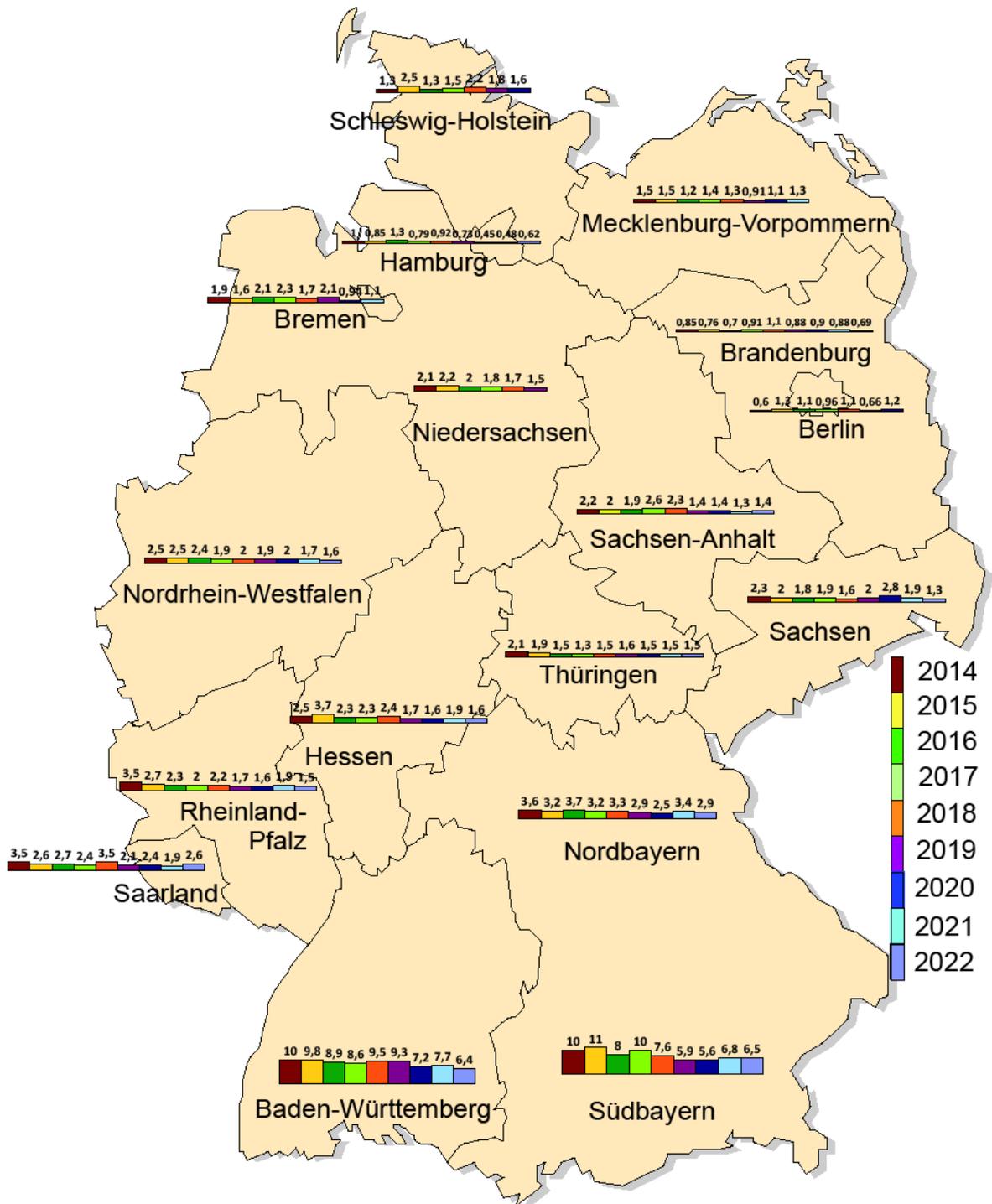
Im Berichtszeitraum 2020 bis 2022 wurden als Ergebnis für  $^{137}\text{Cs}$  im Abwasser zu 99 % „kleiner Nachweisgrenze“ angegeben. Die jeweils erreichten Nachweisgrenzen lagen dabei deutlich unterhalb der im Routinemessprogramm geforderten Nachweisgrenze von 0,1 Bq/l (bezogen auf  $^{60}\text{Co}$ ). Die wenigen für  $^{137}\text{Cs}$  ermittelten Messwerte lagen in den zu betrachtenden Berichtsjahren zwischen 0,023 Bq/l und 0,16 Bq/l. In ca. 50 % der Abwasserproben wurde  $^{90}\text{Sr}$  nachgewiesen. Mit einer Ausnahme liegen aber alle übermittelten Aktivitätskonzentrationen unter der geforderten Nachweisgrenze für die  $^{90}\text{Sr}$ -Bestimmung von 0,1 Bq/l des Routinemessprogramms. In einer Probe aus der Anlage Saarbrücken wurde im Berichtsjahr 2020 ein Messwert mit 0,18 Bq/l angegeben, wobei die bei der Messung erreichte Nachweisgrenze 0,36 Bq/l betrug.

In den untersuchten Klärschlämmen variiert die Höhe der  $^{137}\text{Cs}$ -Kontamination auf Grund des regional unterschiedlichen Eintrags deutlich. Als Folge von starken Niederschlägen Anfang Mai 1986 östlich bzw. südlich der Linie Radolfzell – Eichstätt – Regensburg – Zwiesel treten in diesen Gebieten auch heute die höchsten spezifischen Aktivitäten auf. Gemäß dieser Trennlinie sind die Werte in der Tabelle 12.1 für die nördliche und die südliche Bundesrepublik zusätzlich aufgeschlüsselt. Die Maximalwerte der spezifischen Aktivitäten (Jahresmittelwerte) zeigten 2020 bis 2022 – wie in den Vorjahren – die Klärschlämme aus der Kläranlage Tannheim (Baden-Württemberg) mit 20 Bq/kg TM, 22 Bq/kg TM und

20 Bq/kg TM, wobei es festzuhalten gilt, dass im Jahr 2000 der Jahresmittelwert für  $^{137}\text{Cs}$  in dieser Kläranlage noch 140 Bq/kg TM betrug.

Der zeitliche Verlauf der Jahresmittelwerte für die spezifische  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivität der Klärschlämme der einzelnen Bundesländer (Jahresmittelwerte) seit 2015 ist in Abbildung 12.1 dargestellt. Die bisherige Tendenz zur Abnahme der Kontamination der Klärschlämme ist nur noch schwach ausgeprägt. Diese Entwicklung ist auch in den höher kontaminierten Gebieten wie z. B. im südlichen Bayern zu erkennen. Lag im Jahr 1988 der  $^{137}\text{Cs}$ -Jahresmittelwert noch bei 970 Bq/kg TM, so schwanken die mittleren spezifischen Aktivitäten im Klärschlamm in dieser Region seit 2018 zwischen 5,6 Bq/kg TM und 6,8 Bq/kg TM. Auf Grund dieses inzwischen erreichten sehr niedrigen Niveaus der spezifischen Aktivität der Klärschlämme sind die zu beobachtenden Schwankungen hauptsächlich durch die messtechnisch bedingten Unsicherheiten und die natürliche Heterogenität der Proben erklärbar.

Zur Einordnung und Bewertung der ermittelten Klärschlammkontamination kann die landwirtschaftliche Nutzung der Klärschlämme betrachtet werden. Wird z. B. Klärschlamm mit einer spezifischen Aktivität von etwa 22 Bq/kg TM (höchster Jahresmittelwert der Kläranlage Tannheim in den zu betrachtenden Berichtsjahren 2020 bis 2022) in einer Menge von 0,5 kg auf einer Fläche von einem Quadratmeter innerhalb von drei Jahren (Werte gemäß Klärschlammverordnung) ausgebracht, entspricht dies einer mittleren jährlichen Aktivitätszufuhr von etwa  $4 \text{ Bq/m}^2$   $^{137}\text{Cs}$ . Dies bedeutet bei einer für das Einzugsgebiet entsprechenden Kläranlage typischerweise vorhandenen Flächenkontamination von ca.  $15000 \text{ Bq/m}^2$   $^{137}\text{Cs}$  eine jährliche Aktivitätszufuhr in den Boden von weniger als 0,05 %. Hierbei ist aber anzumerken, dass eine solche Aufstockung des  $^{137}\text{Cs}$ -Inventars durch den radioaktiven Zerfall des bereits im Boden befindlichen Inventars in der Höhe von 2,3 % pro Jahr um ein Vielfaches kompensiert wird.



Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz

Abbildung 12.1  
 Der zeitliche Verlauf der Kontamination von Klärschlamm mit  $^{137}\text{Cs}$  in Bq/kg Trockenmasse  
 (Jahresmittelwerte in den Bundesländern)

**Tabelle 12.1**  
**Allgemeine Überwachung von Abwasser und Klärschlamm 2020 - 2022**

Land	Nuklid	Anzahl		Minimalwert <sup>1</sup>	Maximalwert <sup>1</sup>	Median <sup>1</sup>			
		gesamt	<NWG			2020	2021	2022	
		2020 - 2022				2020	2021	2022	
<b>Abwasser aus Kläranlagen, Ablauf (Bq/l)</b>									
	<sup>40</sup> K	1085	464	0,1	15	0,96	<0,91	0,92	
	<sup>60</sup> Co	1085	1085	-	-	<0,034	<0,034	<0,039	
	<sup>131</sup> I	1035	736	0,0081	3,2	<0,1	<0,097	<0,095	
	<sup>137</sup> Cs	1085	1081	0,023	0,16	<0,033	<0,036	<0,041	
	<sup>90</sup> Sr	203	100	0,0007	0,18	<0,0078	<0,006	0,0073	
	<sup>234</sup> U	214	67	5,7E-05	0,074	0,0028	0,0043	0,0031	
	<sup>235</sup> U	214	185	1,0E-05	0,0029	<0,00093	<0,00082	<0,00088	
	<sup>238</sup> U	214	72	5,7E-05	0,04	<0,0019	0,0031	0,0025	
<b>Klärschlamm (Bq/kg TM)</b>									
	<sup>40</sup> K	1154	6	30	1300	120	120	120	
	<sup>60</sup> Co	1154	1153	-	0,12	<0,65	<0,64	<0,68	
	<sup>131</sup> I	1061	130	0,26	2300	26	22	23	
	<sup>137</sup> Cs	1154	327	0,22	35	1,5	1,6	<1,7	
	<sup>90</sup> Sr	178	20	0,13	17	1,5	<1,4	1,3	
	<sup>234</sup> U	189	0	3,8	240	38	33	35	
	<sup>235</sup> U	228	51	0,18	9,9	1,7	2,1	<1,6	
	<sup>238</sup> U	218	0	3,6	220	34	33	30	
Deutschland (Nord <sup>2</sup> )	<sup>60</sup> Co	1051	1050	-	0,12	<0,6	<0,61	<0,63	
		1051	325	0,22	31	1,4	1,5	1,5	
		170	20	0,13	17	1,5	<1,3	1,3	
Deutschland (Süd <sup>3</sup> )	<sup>60</sup> Co	103	103	-	-	<0,75	<0,86	<0,83	
		103	2	1,4	35	6,9	6,1	6,7	
		8	0	0,38	4,0	0,55	1,9	1,8	



# 13 RADIONUKLIDE IN ABWASSER UND KLÄRSCHLAMM - EINE AUSWERTUNG VON DATEN DER IMIS-DATENBANK

R. Gellermann<sup>1</sup>, P. Hofmann<sup>2</sup>, C. Scholtysik<sup>2</sup>, V. Ustohalova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nuclear Control & Consulting GmbH (NCC)

<sup>2</sup>Bundesamt für Strahlenschutz

<sup>3</sup>Öko-Institut e. V.

Leitstelle für Trinkwasser, Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Abfälle und Abwasser aus kerntechnischen Anlagen (Leitstelle H)

## Einleitung

Das Bundesamt für Strahlenschutz als Zentralstelle des Bundes sammelt nach § 163 StrlSchG die in den Ländern erhobenen Daten zu Radionukliden im Abwasser und Klärschlamm. Die Ergebnisse zu den nach AVV IMIS berichtspflichtigen Radionukliden werden von der zuständigen Leitstelle aufbereitet und in den Jahresberichten „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung“ (BfS/BMUV) zusammengefasst. Eine übergreifende Auswertung der vollständigen Datensätze über einen längeren Zeitraum erfolgte bisher nicht. In einem Forschungsvorhaben, das Grundlagen für die Weiterentwicklung der Messprogramme erarbeiten sollte, wurden alle erhaltenen Ergebnisse, die bei der Untersuchung von Abwasser- und Klärschlammproben im Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2022 gewonnen wurden, ausgewertet.

Die Messprogramme nach der AVV IMIS sind darauf ausgelegt, messtechnische Kapazitäten und analytische Routinen vorzuhalten, um bei Ereignissen, die erhebliche nachteilige Auswirkungen auf Menschen, die Umwelt oder Sachgüter zur Folge haben können (Notfälle im Sinne des § 5 Abs. 26 StrlSchG) datenbasierte Entscheidungen treffen zu können. Für diesen Zweck enthält die AVV IMIS ein spezielles Messprogramm „Störfall-/Intensivbetrieb“. Da in diesem Messprogramm die Anforderungen hinsichtlich der Anzahl der zu messenden Proben in einem festgelegten Zeitraum und die zu erreichenden Nachweisgrenzen sich vom „Normal-/Routinebetrieb“ unterscheiden, werden Übungen für die zuständigen Behörden des Bundes und die Messstellen der Bundesländer in regelmäßigen Abständen angeboten. Mehr als 90 % der im Rahmen von IMIS ausgeführten Messungen werden allerdings im Messprogramm „Normal-/Routinebetrieb“ realisiert. Ergänzend werden von einigen Bundesländern weitere Untersuchungen vorgenommen und an IMIS gemeldet. Die im Weiteren vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Daten der Messprogramme „Normal-/Routinebetrieb“ und der ergänzenden Messprogramme „Land“.

## Grundlagen der Datenauswertung

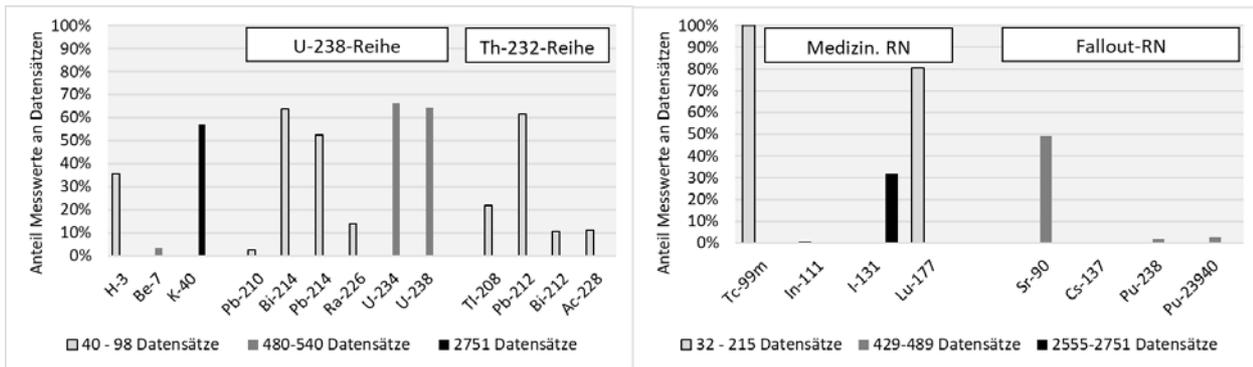
Bei der Auswertung wurden drei Gruppen von Radionukliden genauer betrachtet:

- Natürlich vorkommende Radionuklide Be-7, K-40 sowie Radionuklide der U-238- und Th-232-Zerfallsreihe. Im Abwasser darüber hinaus auch Tritium (H-3).
- Medizinisch genutzte Radionuklide, Tc-99m, In-111, I-131, Lu-177.
- Radionuklide der Fallouts der früheren Kernwaffentests sowie des Nuklearunfalls von Tschornobyl: Sr-90, Cs-137, Pu-238, Pu-239/40.

Vor allem im Abwasser, in dem die Aktivität einzelner Radionuklide in einem Probenvolumen deutlich kleiner ist als bei einem gleichen Probenvolumen Klärschlamm, konnten vielfach nur Messergebnisse unter der Erkennungsgrenze festgestellt werden. Der Anteil der Messwerte über der Erkennungsgrenze an den Datensätzen der einzelnen Analysenergebnisse im Abwasser ist in Abbildung 13.1 dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass für viele Radionuklide aus dem hier betrachteten Zeitraum von 7 Jahren weniger als 100 Datensätze vorliegen und nur für einige Radionuklide mehr als 50 % Messergebnisse existieren, so dass Medianwerte über den ganzen Datensatz berechnet werden können.

Beim Klärschlamm ist die Messbarkeit wesentlich besser. Der Anteil der Messwerte an den Datensätzen bei den meisten hier betrachteten Radionukliden liegt über 80 %. Ausnahmen sind vor allem die Plutoniumisotope mit weniger als 10 % und In-111 mit 16 %.

Eine Auswertung der Datensätze, bei denen die Ergebnisse unter der Erkennungsgrenze lagen, zeigte allerdings, dass die Erkennungsgrenzen teilweise die häufig gemessenen Aktivitätskonzentrationen überstiegen oder zumindest die gleiche Größenordnung hatten. Eine Auswertung, bei der diese Ergebnisse mit „Null“ berücksichtigt werden, verzerrten die berechneten Kennziffern hin zu niedrigen Werten. Aus diesem Grund wur-



**Abbildung 13.1**  
**Anteile der Datensätze aus den Abwasseruntersuchungen mit Messwerten über der Erkennungsgrenze.**  
**Die Signatur der Balken charakterisiert die Anzahl der ausgewerteten Datensätze im Betrachtungszeitraum 2016-2022.**

den für die Ermittlung statistischer Kennziffern die ausgewiesenen Messwerte genutzt. Das kann in einigen Fällen zu Überschätzungen der tatsächlichen mittleren Werte führen.

### Ergebnisse - natürliche Radionuklide

Die Wertebereiche der messtechnisch erfassten natürlich vorkommenden Radionuklide im Abwasser und Klärschlamm sind in den Diagrammen der Abbildung 13.2 als Box-Whisker-Plots dargestellt. Radionuklide der Zerfallsreihen, für die im Abwasser nur wenige, nicht aussagekräftige Messwerte vorliegen, sind ohne Wertebereiche in den Diagrammen angegeben.

Der Wertebereich für Tritium (H-3) beruht auf Messergebnissen von sehr wenigen Kläranlagen. Der Medianwert liegt etwas höher als die Tritiumkonzentration des Niederschlags.

Die Aktivitätskonzentrationen des kosmogenen Radionuklids Be-7 sind im Abwasser deutlich geringer als die des primordialen K-40, im Klärschlamm besitzen beide Radionuklide ähnliche spezifische Aktivitäten. Die unterschiedlich gute Löslichkeit des Alkalielements Kalium und des Erdalkalielelements Beryllium im Wasser führen zu dieser Verteilung.

Der Medianwert von K-40 im Abwasser von 0,73 Bq/l kann weitgehend durch die menschlichen Ausscheidungen von ca. 4 Gramm Kalium (ca. 125 Bq K-40) pro Tag und einem durchschnittlichen täglichen Wasserverbrauch von 120 Liter je Einwohner erklärt werden.

Bei den Radionukliden der Zerfallsreihen sind deutliche Ungleichgewichte in den beiden Reihen feststellbar. Im Abwasser liegen die U-238-Konzentrationen im Bereich von 3 mBq/l und damit in ähnlicher Größe wie beim U-238 im Trinkwasser

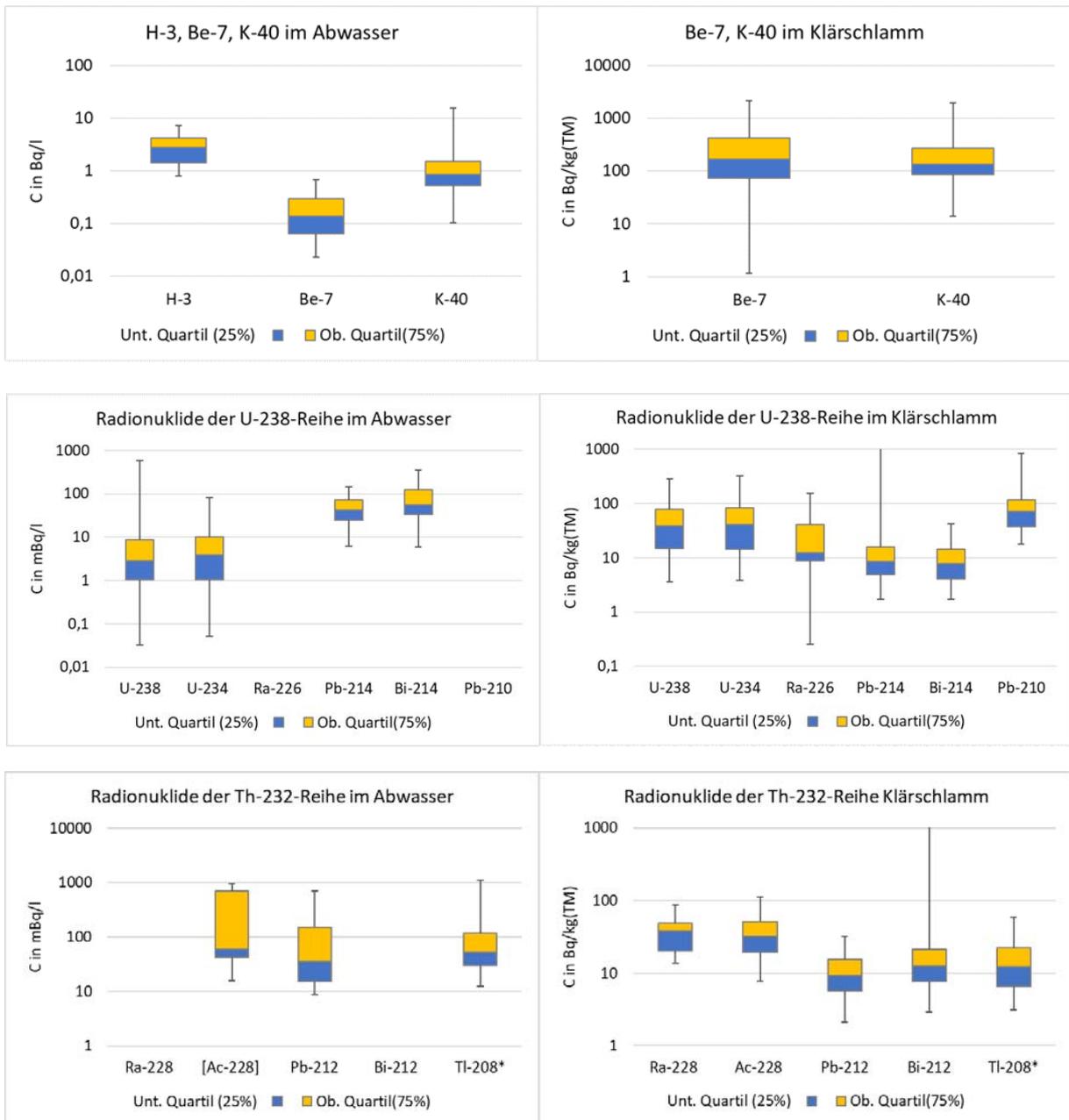
in Deutschland [26]. Im Unterschied dazu sind die Aktivitätskonzentrationen der Zerfallsprodukte des Ra-226 im Abwasser ca. eine Größenordnung höher. Da diese Radionuklide kurzlebig sind, können sie nur aus dem Zerfall von Ra-226 im Abwasser stammen.

Im Klärschlamm sind demgegenüber die Uranaktivitäten in Relation zu Ra-226 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten Pb-214 und Bi-214 deutlich erhöht. Eine Ursache könnte die Mitfällung von Uran bei der Phosphatfällung im Abwasser sein.

Die besonders niedrigen spezifischen Aktivitäten von Pb-214 und Bi-214 sind zum einen ein Ergebnis der Abwasserbehandlung, bei der das Edelgas Rn-222 durch die Belüftung des Abwassers in die Atmosphäre übertritt. Dadurch sind die Rn-222 Folgeprodukte Pb-214 und Bi-214 im Klärschlamm stark gegen Ra-226 abgereichert. Da die natürlichen Radionuklide nicht im Fokus der Messroutinen der Länder stehen und keine dezidierten Berichtspflichten existieren, wird eine zügige Probenverarbeitung angestrebt und das Nachwachsen der Rn-222 Folgeprodukte nicht abgewartet.

Pb-210, das langlebige Zerfallsprodukt von Ra-226, weist im Klärschlamm in Relation zu U-238 und Ra-226 deutlich höhere spezifische Aktivitäten auf. Ursache ist die Deposition des in der Atmosphäre aus dem Zerfall von Rn-222 entstehenden Pb-210.

In der Th-232-Zerfallsreihe wurden praktisch nur kurzlebige Zerfallsprodukte von längerlebigen Vorgängern gammaspektrometrisch bestimmt. Ac-228 (Halbwertszeit  $T_{1/2} = 6$  h) steht im Gleichgewicht mit Ra-228 ( $T_{1/2} = 5,7$  a). Für Pb-212, Bi-212 und Tl-208 kann im Abwasser von einem



**Abbildung 13.2**

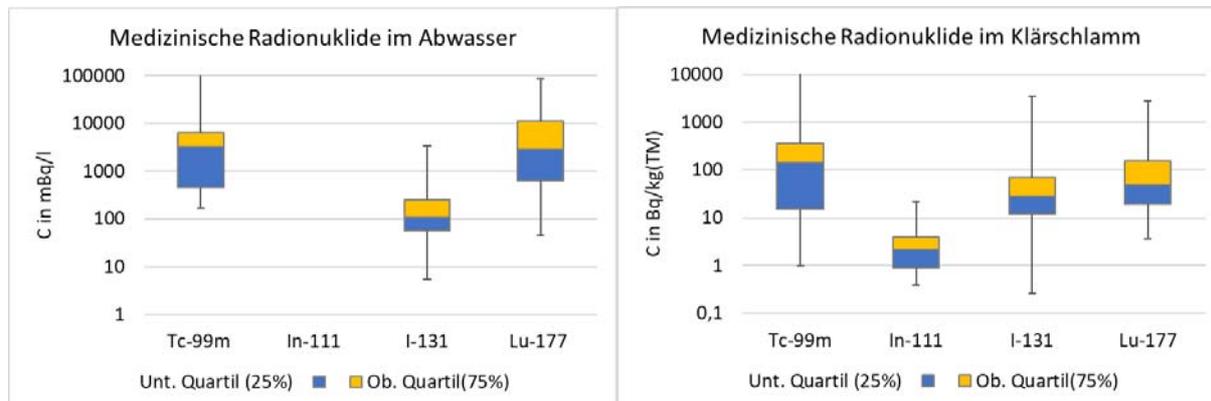
**Box-Whisker-Plots der natürlich vorkommenden Radionuklide im Abwasser und Klärschlamm. Für die in den Diagrammen zum Abwasser fehlenden Radionuklide Ra-226, Ra-228, und Bi-212 liegen keine oder zu wenige Daten für eine statistisch repräsentative Angabe vor. Tl-208\* - mit dem Verzweigungsanteil von 36 % normierter Messwert. Man beachte die unterschiedlichen Einheiten der Messergebnisse.**

Gleichgewicht mit Ra-224 ( $T_{1/2} = 3,6$  d), im Klärschlamm von einem Gleichgewicht mit Th-228 ( $T_{1/2} = 1,9$  a) ausgegangen werden. Vor allem im Klärschlamm zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der spezifischen Aktivität von Ra-228 (Ac-228) und Th-228 (Pb-212, Bi-212, Th-208\*), der aufgrund der geringen Löslichkeit von Thorium im Wasser plausibel ist.

### Ergebnisse – nuklearmedizinische Radionuklide

Nuklearmedizinische Radionuklide gelangen vor allem durch die Ausscheidungen entlassener Patienten in das Abwasser und darüber in die Kläranlagen. Die im Abwasser und Klärschlamm nachweisbaren und im IMIS-Programm analysierten nuklearmedizinisch genutzten Radionuklide sind sämtlich kurzlebig, mit Halbwertszeiten von 6 h bei Tc-99m, 2,8 d beim In-111, 8 d beim I-131 und 6,6 d beim Lu-177. Aufgrund dieser kurzen Halb-

wertszeiten werden die Analysenergebnisse einer Messung stets auf den Probennahmezeitpunkt bezogen.



**Abbildung 13.3**

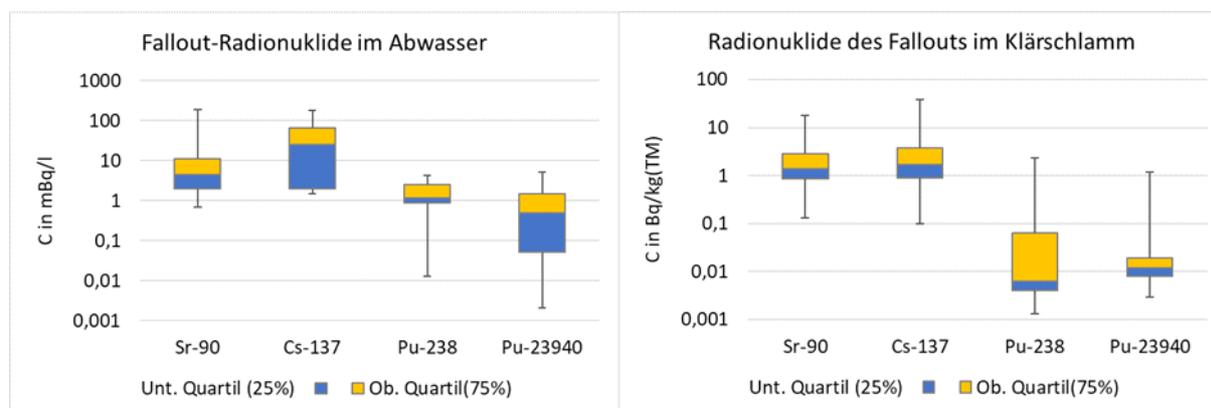
**Box-Whisker-Plots der nuklearmedizinisch genutzten Radionuklide im Abwasser und Klärschlamm. Für In-111 gibt es keine Messergebnisse im Abwasser. Die Maximalwerte von Tc-99m liegen höher als die Maximalwerte der Ordinate. Man beachte die unterschiedlichen Einheiten der Messergebnisse im Abwasser und im Klärschlamm.**

Die im Abwasser gemessenen Aktivitätskonzentrationen (s. Abbildung 13.3) reflektieren zum einen die applizierten Aktivitäten, zum anderen die diagnostische oder therapeutische Wirksamkeit. Die aus diesen Radionukliden resultierende Exposition von Beschäftigten in den Kläranlagen liegt deutlich unter der Geringfügigkeitsschwelle von 10  $\mu$ Sv im Kalenderjahr [48].

### Ergebnisse – Radionuklide des Fallouts

Die bei Kernwaffentests und dem Reaktorunfall von Tschornobyl freigesetzten und danach in Deutschland auf den Böden abgelagerten Radionuklide Sr-90, Cs-137, Pu-238 und Pu-239/Pu-240 (abgekürzt: Pu23940) sind Teil der allgemeinen

Umweltradioaktivität. Im Abwasser wird insbesondere Sr-90 häufig gemessen und auch detektiert. Bei gammaspektrometrischen Messungen wird Cs-137 zumeist mit ausgewertet, allerdings werden kaum Messergebnisse über der Erkennungsgrenze gefunden. Ähnliches gilt für die Plutoniumisotope, die zwar nicht so häufig wie Cs-137 analysiert werden, bei denen aber auch vielfach nur die Erkennungsgrenzen angegeben werden können. Von daher sind die in Abbildung 13.4 für Abwasser dargestellten Wertebereiche außer beim Sr-90 als überschätzend für die deutschlandweiten Mittelwerte zu interpretieren.



**Abbildung 13.4**

**Box-Whisker-Plots der Radionuklide des Fallouts im Abwasser und Klärschlamm. Man beachte die unterschiedlichen Einheiten der Messergebnisse im Abwasser und im Klärschlamm**

Im Klärschlamm ist die Messbarkeit der Radionuklide des Fallouts deutlich besser. Die in Abbildung 13.4 gezeigten Wertebereiche geben die derzeitige Kontamination des Klärschlammes mit den genannten Radionukliden wieder.

### Schlussfolgerungen

Abwasser und Klärschlamm sind geeignete Medien, um den Eintrag von künstlichen Radionukliden in radiologischen Notfällen aber auch in der Routine durch Entwicklungen in Medizin und Forschung abzubilden und zu verfolgen. Die im Abwasser vorkommenden natürlichen Radionuklide werden durch die Prozesse der Abwasserreini-

gung teilweise in den Klärschlamm übertragen. Durch die Auswertung der im Rahmen von IMIS ermittelten Daten konnten für Abwasser und Klärschlamm die Wertebereiche von natürlich vorkommenden Radionukliden, von nuklearmedizinisch genutzten Radionukliden sowie Radionukliden, die in der Vergangenheit aus dem Fallout von Kernwaffentests und dem Reaktorunfall in Tschornobyl stammen, eingegrenzt und präzisiert werden. Durch diese Auswertung wurden Grundlagen geschaffen, mit denen die Messprogramme weiterentwickelt und die Qualitätssicherung verbessert werden können.

# 14 ARZNEIMITTEL UND DEREN AUSGANGSSTOFFE SOWIE BEDARFSGEGENSTÄNDE

E. Kabai, A. Hamer

Bundesamt für Strahlenschutz

Leitstelle für Arzneimittel und deren Ausgangsstoffe sowie Bedarfsgegenstände (Leitstelle I)

Die Leitstelle für Arzneimittel und deren Ausgangsstoffe sowie Bedarfsgegenstände überwacht routinemäßig vor allem Arzneimittelpflanzen bzw. Pflanzen, die als Ausgangsstoffe für Arzneimittel und Tees dienen. Der Schwerpunkt der Überwachung liegt bei gammastrahlenden Radioisotopen, insbesondere  $^{137}\text{Cs}$ , einem Falloutbestandteil der oberirdischen Kernwaffenversuche sowie des Reaktorunfalls von Tschornobyl.

Im Jahr 2023 wurden Proben ausgewählter pflanzlicher Ausgangsstoffe für Arzneimittel sowie Gewürze aus verschiedenen Herkunftsländern stichprobenartig untersucht. Die Ergebnisse für die spezifischen Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{40}\text{K}$  in der Trockenmasse (TM) der Probe sind in Tabelle 14.1 zusammengefasst. Die Trockenmassen wurden nach Trocknung der Proben bei  $105^\circ\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz bestimmt.

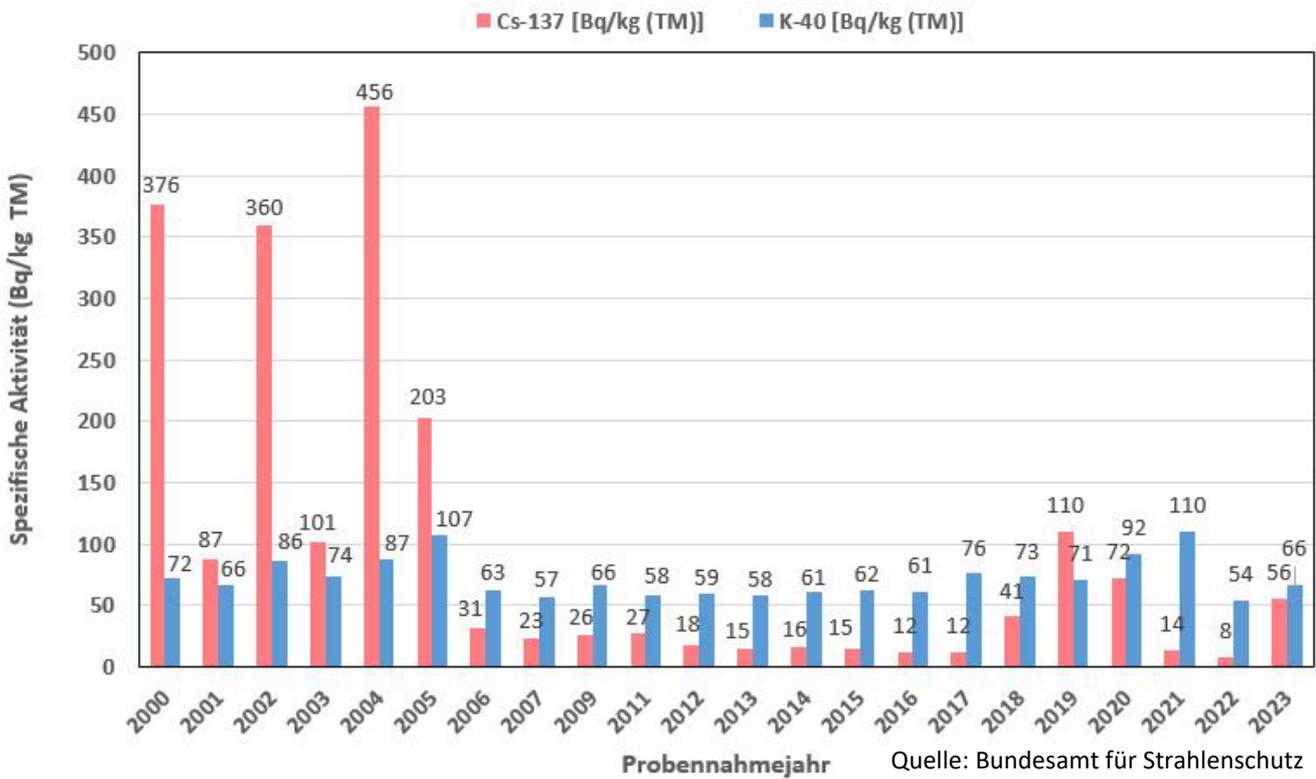
Die spezifischen Aktivitäten des Radionuklids  $^{137}\text{Cs}$  können je nach Art und lokalen Gegebenheiten, z. B. der Bodenbeschaffenheit oder -kontamination in den verschiedenen Anbaugebieten der Herkunftsländer, erhebliche Variabilitäten aufweisen. Sie bewegen sich zwischen maximal 3500 Bq/kg (TM) bei Bitterklee aus der Ukraine und Werten unterhalb der Nachweisgrenze, wie z. B. bei (Gewürz-)Paprika aus Spanien. Da bei den Bitterkleeproben seit 2020 erhöhte  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitäten nachgewiesen wurden, wurden zusätzliche Stichproben aus dem Handel beschafft und gemessen. Die Messergebnisse für Bitterkleeblätter ergaben in den letzten vier Jahren bei allen eingekauften Proben erhöhte spezifische Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$ , unabhängig davon, welches Ursprungsland für diese Stichproben angegeben wurde. So konnten zum Beispiel folgende Messwerte für Bitterkleeblätter aus dem Jahr 2023 festgestellt werden: 3500 Bq/kg TM bei Proben aus der Ukraine, 2700 Bq/kg TM bei Proben aus

Tschechien und 3400 Bq/kg TM bei Proben aus Spanien. Ähnliche Messwerte wurden im Jahr 2022 bei Bitterkleeproben aus Polen (2300 Bq/kg TM) und aus der Ukraine (2700 Bq/kg TM) festgestellt. Wegen der auffallenden Ähnlichkeit der Messwerte bei Proben aus unterschiedlichen Ursprungsländern wird die Leitstelle der Frage nachgehen, wie zuverlässig die Angaben zu den Ursprungsländern bei Proben aus dem Handel sind und ob die Messwerte im Hinblick auf die flächenbezogene Bodenkontamination, die Verbreitung von Bitterklee und die lokalen radioökologischen Gegebenheiten plausibel sind.

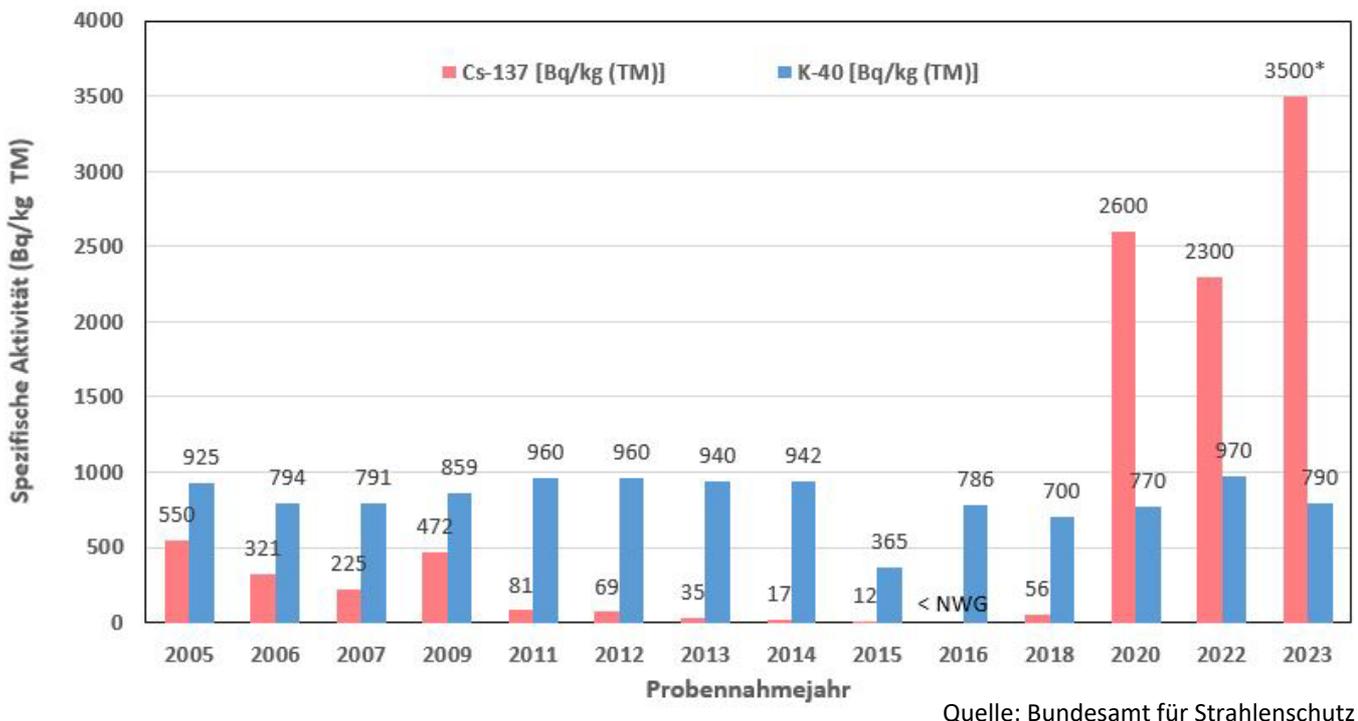
Die spezifischen Aktivitäten des natürlich vorkommenden Radionuklids  $^{40}\text{K}$  schwanken entsprechend dem Kaliumgehalt der untersuchten Pflanzenproben, da das Element Kalium von Natur aus einen festen Anteil an  $^{40}\text{K}$  enthält. Zudem wird der Gehalt dieses Elements in der Pflanze geregelt und hängt nur in geringem Maß von den Gegebenheiten im jeweiligen Anbaugebiet ab. Die spezifischen Aktivitäten von  $^{40}\text{K}$  lagen mit maximal rund 1100 Bq/kg (TM) bei Brennesseln und minimal 66 Bq/kg (TM) bei Island-Moos im Rahmen der natürlichen Schwankungsbreite.

Der zeitliche Verlauf der spezifischen Aktivitäten von Island-Moos aus überwiegend mittel- und osteuropäischen Herkunftsgebieten im Zeitraum 2000 bis 2023 ist in Abbildung 14.1 dargestellt.

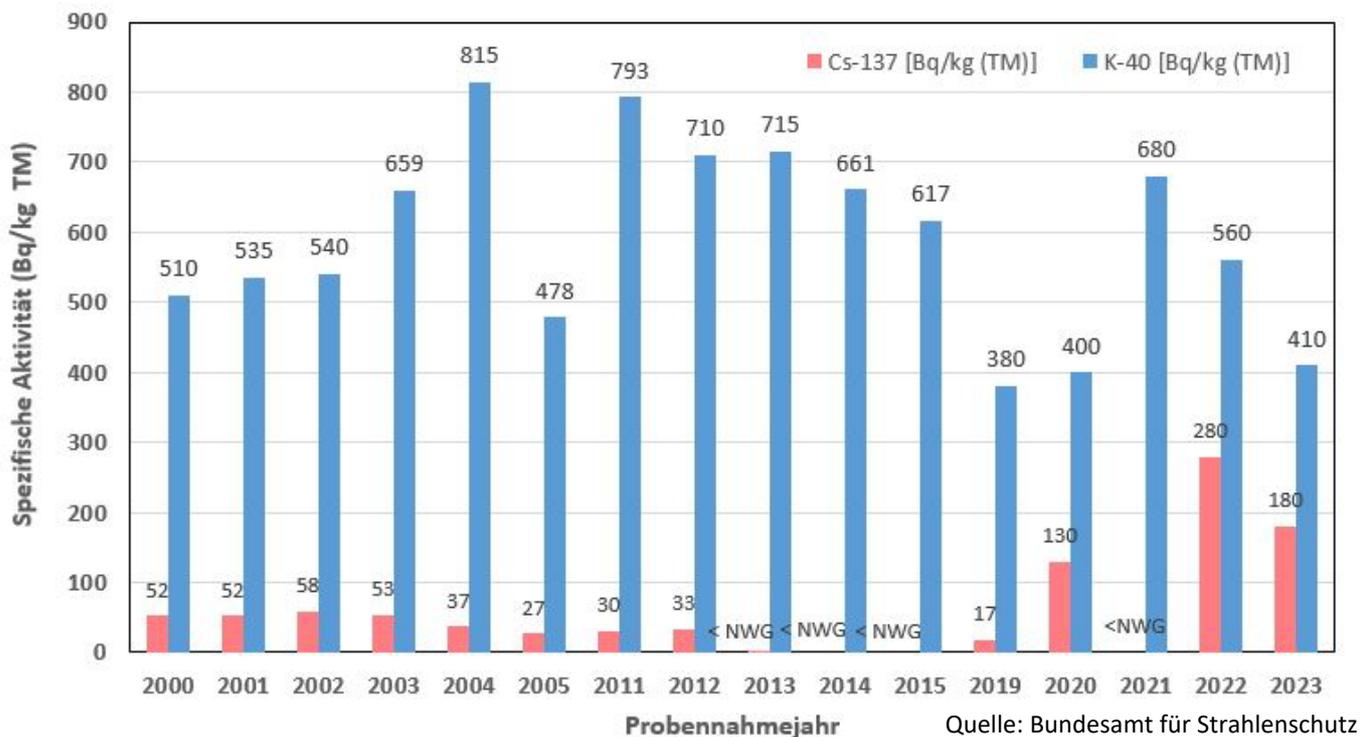
Abbildung 14.2 gibt den zeitlichen Verlauf der spezifischen Aktivitäten von Bitterkleeblättern aus Polen und der Ukraine für die Jahre 2005 bis 2023 wieder und Abbildung 14.3 zeigt die spezifischen Aktivitäten von Gänsefingerkraut aus mitteleuropäischen Ländern für die Jahre 2000 bis 2023. Für die in den Abbildungen 14.1 bis 14.3 fehlenden Jahre waren Proben mit einer Angabe des Ursprungslandes nicht erhältlich.



**Abbildung 14.1**  
 Spezifische Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{40}\text{K}$  in Island-Moos überwiegend aus mittel- und osteuropäischen Ländern für die Jahre 2000 bis 2023



**Abbildung 14.2**  
 Spezifische Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{40}\text{K}$  in Bitterkleeblättern aus Polen für die Jahre 2005 bis 2014, 2018 und 2022 sowie aus der Ukraine für die Jahre 2015, 2016, 2020 und 2023 (mit Sternchen gekennzeichnet).



**Abbildung 14.3**  
Spezifische Aktivitäten von <sup>137</sup>Cs und <sup>40</sup>K in Gänsefingerkraut aus mitteleuropäischen Ländern für die Jahre 2000 bis 2023

**Tabelle 14.1**  
Spezifische Aktivitäten von <sup>137</sup>Cs und <sup>40</sup>K in ausgewählten Arzneimittelpflanzen für das Jahr 2023

Artikel	Ursprungsland	<sup>40</sup> K [Bq/kg (TM)]	<sup>137</sup> Cs [Bq/kg (TM)]
Akeleikraut, Bio, geschnitten	Deutschland	920	< NWG*: 0,8
Baldrianwurzel, gemahlen	Polen	470	5,3
Bitterkleeblätter, Bio, geschnitten	Tschechien	890	2700
	Ukraine	790	3500
	Spanien	820	3400
Brennnesselblätter, Bio, gemahlen	Bosnien und Herzegowina	1100	0,4
Brombeerblätter, gemahlen	Albanien	400	0,6
Fenchel braun, bitter, gemahlen	Österreich	440	< NWG*: 0,8
Flohsamen, schwarz, gemahlen	Polen	290	< NWG*: 0,5
Gänsefingerkraut, geschnitten	Ukraine	410	180
Island Moos, gemahlen	Rumänien	66	56
Johanniskraut, gemahlen	Ungarn	430	0,4
Kamillenblüten, gemahlen	Kroatien	1000	< NWG*: 1,2
Kümmel, gemahlen	Finnland	380	0,6
Melissenblätter, gemahlen	Ungarn	970	< NWG*: 0,5
Oregano, gemahlen	Türkei	450	< NWG*: 0,6
Paprika, edelsüß, gemahlen	Spanien	560	< NWG*: 0,3

**Tabelle 14.1**

**Spezifische Aktivitäten von  $^{137}\text{Cs}$  und  $^{40}\text{K}$  in ausgewählten Arzneimittelpflanzen für das Jahr 2023**

Artikel	Ursprungsland	$^{40}\text{K}$ [Bq/kg (TM)]	$^{137}\text{Cs}$ [Bq/kg (TM)]
Pfefferminzblätter, Bio, gemahlen	Deutschland	1100	< NWG*: 0,7
Schachtelhalmkraut, gemahlen	Ungarn	680	3,3
Sommer-Bohnenkraut, gemahlen	Polen	720	0,7
Thymian, gemahlen	Polen	660	<NWG*: 0,9
NWG* - Nachweisgrenze			

# ANHANG

## LITERATUR

- [1] Berichte „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung - Jahresbericht“ ab 1997, Hrsg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Bonn  
[https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2015060312762/browse?type=dateissued&submit\\_browse=Ercheinungsdatum](https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2015060312762/browse?type=dateissued&submit_browse=Ercheinungsdatum)
- [2] Der aktuelle Katalog ist auf der Internetseite der PTB ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)) verfügbar. Pfad: Home > Struktur & Abteilungen > Abteilungen > Abt. 6 Ionisierende Strahlung > 6.1 Radioaktivität > 6.11 Aktivitätseinheit > Herstellung und Abgabe von Aktivitätsnormalen
- [3] Kossert, K., Mougeot, X.: Improved activity standardization of  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  by means of liquid scintillation counting. *Applied Radiation and Isotopes* 168 (2021) 109478, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109478>
- [4] Kossert, K., Nähle, O.J., Honig, A., Röttger, S.: Activity standardization by means of liquid scintillation counting and determination of the half-life of  $^{89}\text{Zr}$ . *Applied Radiation and Isotopes* 181 (2022) 11078. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110078>
- [5] Kossert, K., Bobin, C., Chisté, V., Fréchou, C., Lourenço, V., Nähle, O., Sabot, B., Thiam, C.: A bilateral comparison between LNHB and PTB to determine the activity concentration of the same  $^{125}\text{I}$  solution. *Applied Radiation and Isotopes* 200 (2023) 110947, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110947>
- [6] Takács, M.P., Kossert, K., Nähle, O.: Activity standardization of  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  by digitizer-based  $4\pi\text{ce}(\text{LS})\text{-}\gamma$  and  $4\pi\text{ce}(\text{PC})\text{-}\gamma$  coincidence counting. *Applied Radiation and Isotopes* 200 (2023) 110962, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110962>
- [7] Riffaud, J., Kossert, K., Takács, M.P., Chiera, N.M., Schumann, D., Studer, D., Röttger, S., Wendt, K.: Determination of the activity and nuclear decay data of  $^{157}\text{Tb}$ . *Applied Radiation and Isotopes* 211 (2024) 111407, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111407>
- [8] Kossert, K., Takács, M.P., Nähle, O.: Liquid scintillation counting: A valuable tool to determine half-lives. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022)*. *European Physics Journal Web of Conferences* 284 (2023) 02002, <https://doi.org/10.1051/ep-jconf/202328402002>
- [9] Takács, M.P., Kossert, K.: Half-life determination of short-lived nuclear levels in  $^{237}\text{Np}$  (59.54 keV),  $^{233}\text{Pa}$  (86.47 keV) and  $^{227}\text{Ac}$  (27.37 keV). *Applied Radiation and Isotopes* 176 (2021) 109858
- [10] Kajan, I., Heinitz, S., Kossert, K., Sprung, P., Dressler, R., Schumann, D.: The first direct determination of the  $^{93}\text{Mo}$  half-life, *Scientific Reports* 11:19788, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99253-5>
- [11] Kossert, K., Amelin, Y., Arnold, D., Merle, R., Mougeot, X., Schmiedel, M., Zapata, D.: Activity standardization of two enriched  $^{40}\text{K}$  solutions for the determination of decay scheme parameters and the half-life. *Applied Radiation and Isotopes* 188 (2022) 110362, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110362>
- [12] Kossert, K., Veicht, M.A., Mihalcea, I., Nedjadi, Y., Schumann, D., Symochko, D.: Activity Standardization of  $^{32}\text{Si}$  at PTB. *Applied Radiation and Isotopes* 202 (2023) 111042, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.111042>
- [13] Kossert, K., Loidl, M., Mougeot, X., Paulsen, M., Ranitzsch, Ph., Rodrigues, M.: High precision measurement of the  $^{151}\text{Sm}$  beta decay by means of a metallic magnetic calorimeter. *Applied Radiation and Isotopes* 185 (2022) 110237, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110237>
- [14] Paulsen, M., Ranitzsch, P.C.-O., Loidl, M., Rodrigues, M., Kossert, K., Mougeot, X., Singh, A., Leblond, S., Beyer, J., Bockhorn, L., Kempf, S., Wegner, M., Enss, C., Nähle, O.: High precision measurement of the  $^{99}\text{Tc}$   $\beta$  spectrum. Preprint: <https://arxiv.org/abs/2309.14014>
- [15] Webseite des EU Projektes MetroPOEM: <https://www.npl.co.uk/euramet/metropoem>
- [16] S. Röttger et.al.: Evolution of traceable radon emanation sources from MBq to few Bq, *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 196, 110726, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110726>

- [17] F. Mertes et al.: Ion implantation of  $^{226}\text{Ra}$  for a primary  $^{222}\text{Rn}$  emanation standard, *Applied Radiation and Isotopes* 181 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110093>
- [18] F. Mertes et al.: Approximate sequential Bayesian filtering to estimate  $^{222}\text{Rn}$  emanation from  $^{226}\text{Ra}$  sources using spectral time series, *Journal of Sensors and Sensor Systems* 12 (2023), <https://doi.org/10.5194/jsss-12-147-2023>
- [19] M.O. Stein, H. Fleischhack, S. Röttger: Tra-Gamma - A DIGITAL SERVICE FOR VALIDATING GAMMA-RAY SPECTROMETRY ANALYSIS SOFTWARE, accepted by *Measurement: Sensors, special edition IMEKO World Congress* (2024)
- [20] H. Fleischhack, M.O. Stein, S. Röttger: A METROLOGICAL PERSPECTIVE ON DATA ANALYSIS METHODS IN GAMMA-RAY SPECTROMETRY, accepted by *Measurement: Sensors, special edition IMEKO World Congress* (2024)
- [21] Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz – StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), zuletzt geändert durch Artikel 2b des Gesetzes vom 18. November 2020 (BGBl. I S. 2397)
- [22] Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung StrlSchV) vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 20. November 2020 (BGBl. I S. 2502)
- [23] Bericht „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung - Jahresbericht 2020“, Hrsg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), Bonn  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2023092039261>
- [24] BMG: Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung 10. März 2016. BGBl. Teil I Nr. 12: S. 459-491, 2016
- [25] Beyermann M, Hofmann P, Witter C: Leitfaden zur Untersuchung und Bewertung von radioaktiven Stoffen im Trinkwasser bei der Umsetzung der Trinkwasserverordnung. Empfehlung von BMUB, BMG, BfS, UBA, und den zuständigen Landesbehörden sowie DVGW und BDEW. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bonn, 2017, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2017020114224>
- [26] Beyermann M, Bünger T, Gehrcke K, Obrikat D: Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland. BfS-SW-Bericht, BfS SW 06/09, Salzgitter, 2009, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-20100319945>
- [27] Heldal, H. E., et al. (2019). Cruise report: Investigation of the marine environment around the nuclear submarine „Komsomlets“ 6.-10. July 2019 (IMR cruise number 2019109). Toktrapport, Havforskningsinstituttet. 9-2019: 42
- [28] Kanisch G: Effektive  $^{137}\text{Cs}$ -Halbwertszeiten in Fischen aus Binnenseen und Fließgewässern und  $^{137}\text{Cs}$ -Sorptionsverhalten in Böden. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (eds.): *Umweltradioaktivität in der Bundesrepublik Deutschland 2004 und 2005 - Daten und Bewertung. Bericht der Leitstellen des Bundes und des Bundesamtes für Strahlenschutz*, Kap. 14: 74-80, 2007
- [29] Dahlgard H: Transfer of European coastal pollution to the arctic: Radioactive tracers. *Marine Pollution Bulletin* 31/1-3: 3-7, 1995
- [30] Aarkrog A: Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 50/17-21, 2597-2606, 2003
- [31] Hunt J, Leonard K, Hughes L: Artificial radionuclides in the Irish Sea from Sellafield: remobilisation revisited. *Journal of Radiological Protection* 33/2: 261-279, 2013
- [32] Nielsen SP, Lüning M, Illus E, Outola I, Ikkäheimonen T, Mattila J, Herrmann J, Kanisch G, Osvath I: Baltic Sea. In: Atwood D: *Radionuclides in the Environment*. John Wiley & Sons, 2010
- [33] HELCOM: Thematic assessment of radioactive substances in the Baltic Sea 2011-2015. *Baltic Sea Environmental Proceedings* 151, 2018
- [34] Steele AK: Derived concentration factors for caesium-137 in edible species of North Sea fish. *Marine Pollution Bulletin* 21/12: 591-594, 1990
- [35] International Atomic Energy Agency (IAEA): *Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment*. Technical Report Series No. 422, Wien, 103 Seiten, 2004  
Verfügbar Online: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6855/Sediment-Distributi->

- [on-Coefficients-and-Concentration-Factors-for-Biota-in-the-Marine-Environment](#); zuletzt abgerufen: 28.11.2022
- [36] HELCOM (2023) Radioactive substances: Caesium-137 in fish and surface seawater. HELCOM core indicator report. Online. <https://indicators.helcom.fi/indicator/radioactive-substances/>, Stand 18.01.2024, ISSN 2343-2543
- [37] Kanisch G, Nagel G, Krüger A, Kellermann HJ: Radiological implications from the temporal development of radioactivity in marine food from the North Sea. *Kerntechnik* 65: 183-189, 2000
- [38] Galeriu D und Melintescu A: Tritium. In: Atwood D.A., *Radionuclides in the Environment*, S. 47-63, 2010
- [39] Povinec PP, Kwong LW, Kaizer J, Molnár M, Nies H, Palcsu L, Papp L, Pham MK and Jean-Baptist P: Impact of the Fukushima accident on tritium, radiocarbon and radiocesium levels in seawater of the western North Pacific Ocean: A comparison with pre-Fukushima situation, 2017
- [40] The Subcommittee on Handling of the ALPS Treated Water (SHALPS): The Subcommittee on Handling of the ALPS Treated Water - Report, 2020  
Online: [https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210\\_alps.pdf](https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210_alps.pdf); zuletzt abgerufen: 04.03.2024  
Nogueira P, Zankl M, Schlattl H, Vaz P: Dose conversion coefficients for monoenergetic electrons incident on a realistic human eye model with different lens cell populations. *Phys Med Biol* 56: 6919-6934, 2011
- [41] International Atomic Energy Agency (IAEA) : IAEA Follow-up Review of Progress Made on Management of ALPS Treated Water and the Report of the Subcommittee on Handling of ALPS treated water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 2020  
Online: <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/04/review-report-020420.pdf>; zuletzt abgerufen: 28.11.2022
- [42] International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Review of Safety Related Aspects of Handling ALPS-Treated Water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station - Report 1: Review Mission to TEPCO and METI (February 2022), 2022  
Online: [https://www.iaea.org/sites/default/files/report\\_1\\_review\\_mission\\_to\\_tepco\\_and\\_meti.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/report_1_review_mission_to_tepco_and_meti.pdf); zuletzt abgerufen: 04.03.2024
- [43] European Commission: Emerging Issues on Tritium and Low Energy Beta Emitters. *Radiation Protection No. 152, Proceedings of the EU Scientific Seminar 2007*. 108 Seiten, 2008
- [44] Health Protection Agency: Review on risks from Tritium, „Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation“, Documents of the Health Protection Agency, Radiation, Chemical and Environmental Hazards (November 2007), 104 Seiten, 2007
- [45] Behrens E, Schwarzkopf FU, Lübbecke, JF, Böning CW: Model simulations on the long-term dispersal of <sup>137</sup>Cs released into the Pacific Ocean off Fukushima. *Environmental Research Letters* 2012 Vol. 7 Issue 3 Pages 034004, 2012
- [46] International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Marine Radioactivity Information System (IAEA MARIS). In: Division of IAEA Environment Laboratories [online]. Monaco, 2024  
<https://maris.iaea.org>; Zugriff am 22.01.2024
- [47] Buessler KO: Opening the floodgates at Fukushima. *Science* Vol. 369 Issue 6504 Pages 621-622, 2020
- [48] Internationale Atomenergiebehörde (IAEA): DE MINIMIS CONCEPTS IN RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL. Considerations in Defining de Minimis Quantities of Solid Radioactive Waste for Uncontrolled Disposal by Incineration and Landfill. IAEA TECDOC 282, Vienna, 1983  
[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/15/028/15028861.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/15/028/15028861.pdf?r=1&r=1)

## VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

AtG	Atomgesetz	KIT	Karlsruher Institut für Technologie
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift	KKW	Kernkraftwerk
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde	MRI	Max Rubner-Institut
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz	N	Zahl der Einzelmessungen
BGA	Bundesgesundheitsamt	n.n.	nicht nachgewiesen / nachweisbar
BGBI	Bundesgesetzblatt	NORM	Naturally Occurring Radioactive Material
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz	NWG	Nachweisgrenze
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie	ODL	Ortsdosisleistung
/d.p	pro Tag und Person	PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
DAkkS	Deutsche Akkreditierungsstelle	Rβ	Rest-Beta-Aktivität
DWD	Deutscher Wetterdienst	RöV	Röntgenverordnung
ENORM	Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material	RMP	Routinemessprogramm
EURATOM	Europäische Gemeinschaft für Atomenergie	REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
EUROMET	Organisation der meteorologischen Staatsinstitute in Europa	RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
FM	Frischmasse	SSK	Strahlenschutzkommission
Gα	Gesamt-Alpha-Aktivität	StrSchV	Strahlenschutzverordnung
Gβ	Gesamt-Beta-Aktivität	StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
HWZ	Halbwertszeit	tSIE	Transformed Spectral Index
IAR	Institut für Atmosphärische Radioaktivität (heute: Fachbereich für Strahlenschutz und Umwelt)	TM	Trockenmasse
ICRP	Internationale Strahlenschutzkommission	UBA	Umweltbundesamt
ICRU	Internationale Kommission für radiologische Einheiten	UNSCEAR	Wissenschaftliches Komitee der Vereinten Nationen über die Wirkung von atomarer Strahlung
IMIS	Integriertes Mess- und Informationssystem	VOAS	Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz
KFÜ	Kernkraftwerks-Fernüberwachungssystem	WAA	Wiederaufarbeitungsanlage
		ZdB	Zentralstelle des Bundes zur Überwachung der Umweltradioaktivität

## EIGENSCHAFTEN DER IM TEXT ERWÄHNTEN RADIONUKLIDE

Radionuklid	Element	Strahlungsart	Halbwertszeit	Bemerkungen
H-3, $^3\text{H}$ , Tritium	Wasserstoff	$\beta^-$	12,32 a	
Be-7, $^7\text{Be}$	Beryllium	$\epsilon, \gamma$	53,3 d	durch kosmische Strahlung
C-14, $^{14}\text{C}$	Kohlenstoff	$\beta^-$	5730 a	durch kosmische Strahlung
F-18, $^{18}\text{F}$	Fluor	$\beta^+$	1,83 h	Verwendung in der Medizin
K-40, $^{40}\text{K}$	Kalium	$\beta^-, \gamma$	$1,3 \times 10^9$ a	natürlich
Mn-54, $^{54}\text{Mn}$	Mangan	$\epsilon, \gamma$	312,2 d	
Co-58, $^{58}\text{Co}$	Kobalt	$\epsilon, \beta^+, \gamma$	70,9 d	
Co-60, $^{60}\text{Co}$	Kobalt	$\beta^-, \gamma$	5,27 a	
Se-79, $^{79}\text{Se}$	Selen	$\beta^-, \gamma$	$3,27 \times 10^5$ a	Uran-Spaltprodukt
Kr-85, $^{85}\text{Kr}$	Krypton	$\beta^-, \gamma$	10,76 a	Edelgas
Kr-85 m, $^{85\text{m}}\text{Kr}$	Krypton	$\beta^-, \gamma$	4,48 h	Edelgas
Rb-85, $^{85}\text{Rb}$	Rubidium		stabil	Ausgangsstoff für $^{85}\text{Sr}$ -Erzeugung
Sr-85, $^{85}\text{Sr}$	Strontium	$\beta^-$	65 d	Tracer
Sr-89, $^{89}\text{Sr}$	Strontium	$\beta^-, \gamma$	50,5 d	
Sr-90, $^{90}\text{Sr}$	Strontium	$\beta^-$	28,6 a	Uran-Spaltprodukt
Y-88, $^{88}\text{Y}$	Yttrium	$\epsilon$	107 d	Uran-Spaltprodukt
Y-90, $^{90}\text{Y}$	Yttrium	$\beta^-$	64 h	Uran-Spaltprodukt
Tc-99, $^{99}\text{Tc}$	Technetium	$\beta^-$	213000 a	
Tc-99 m, $^{99\text{m}}\text{Tc}$	Technetium	R	6,01 h	Verwendung in der Medizin
Ag-108m, $^{108\text{m}}\text{Ag}$	Silber	$\beta^-, \gamma, \text{I}\gamma$	250 d	
Sb-125, $^{125}\text{Sb}$	Antimon	$\beta^-$	2,7582 a	
Te-132, $^{132}\text{Te}$	Tellur	$\beta^-$	3,20 d	
I-129, $^{129}\text{I}$	Jod	$\beta^-, \gamma$	$1,57 \times 10^7$ a	
I-131, $^{131}\text{I}$	Jod	$\beta^-, \gamma$	8,02 d	Uran-Spaltprodukt
I-132, $^{132}\text{I}$	Jod	$\beta^-$	2,295 h	
I-133, $^{133}\text{I}$	Jod	$\beta^-$	20,8 h	

Radionuklid	Element	Strahlungsart	Halbwertszeit	Bemerkungen
Xe-127, <sup>127</sup> Xe	Xenon	ε, R	36,4 d	Edelgas
Xe-131m, <sup>131</sup> Xe	Xenon	R	11,92 d	Edelgas
Xe-133, <sup>133</sup> Xe	Xenon	β <sup>-</sup> , R	5,25 d	Edelgas
Xe-133m, <sup>133m</sup> Xe	Xenon	R	2,19 d	Edelgas
Xe-135, <sup>135</sup> Xe	Xenon	β <sup>-</sup> , γ	9,1 d	Edelgas
Cs-134, <sup>134</sup> Cs	Cäsium	β <sup>-</sup> , γ	2,06 a	
Cs-137, <sup>137</sup> Cs	Cäsium	β <sup>-</sup> , γ	30,17 a	Uran-Spaltprodukt
Cs-136, <sup>136</sup> Cs	Cäsium	β <sup>-</sup>	13,2 d	
Ba-133, <sup>133</sup> Ba	Barium	ε, γ	10,5 a	Uran-Spaltprodukt
Ce-139, <sup>139</sup> Ce	Cer	ε, γ	137,6 d	
Lu-177, <sup>177</sup> Lu	Lutetium	β <sup>-</sup> , γ	6,647 d	Verwendung in der Nuklearmedizin
Tl-201, <sup>201</sup> Tl	Thallium	ε, R	73,1 h	
Tl-202, <sup>202</sup> Tl	Thallium	ε, γ	12,2 d	
Tl-208, <sup>208</sup> Tl	Thallium	β <sup>-</sup> , γ	3,1 min	Thorium-Zerfallsreihe
Pb-210, <sup>210</sup> Pb	Blei	β <sup>-</sup>	22,3 a	Uran-Radium-Zerfallsreihe
Pb-212, <sup>212</sup> Pb	Blei	β <sup>-</sup> , γ	10,6 h	Thorium-Zerfallsreihe
Bi-212, <sup>212</sup> Bi	Wismut	β, γ	60,6 min	Thorium-Zerfallsreihe
Bi-214, <sup>214</sup> Bi	Wismut	β	19,9 min	Uran-Radium-Zerfallsreihe
Po-210, <sup>210</sup> Po	Polonium	α	138,4 d	Uran-Radium-Zerfallsreihe
Po-212, <sup>212</sup> Po	Polonium	α	304 nsec	Thorium-Zerfallsreihe
Po-214, <sup>214</sup> Po	Polonium	α	164 μsec	Uran-Radium-Zerfallsreihe
Po-218, <sup>218</sup> Po	Polonium	α	3,05 min	Uran-Radium-Zerfallsreihe
Rn-220, <sup>220</sup> Rn	Radon	α	55,6 sec	Thorium-Zerfallsreihe, Edelgas
Rn-222, <sup>222</sup> Rn	Radon	α	3,82 d	Uran-Radium-Zerfallsreihe, Edelgas
Ra-226, <sup>226</sup> Ra	Radium	α, γ	1600 a	Uran-Radium-Zerfallsreihe
Ra-228, <sup>228</sup> Ra	Radium	β <sup>-</sup>	5,75 a	Thorium-Zerfallsreihe

Radionuklid	Element	Strahlungsart	Halbwertszeit	Bemerkungen
Th-228, $^{228}\text{Th}$	Thorium	$\alpha, \gamma$	1,9 a	Thorium-Zerfallsreihe
Th-230, $^{230}\text{Th}$	Thorium	$\alpha$	$7,54 \times 10^4$ a	Uran-Radium-Zerfallsreihe
Th-232, $^{232}\text{Th}$	Thorium	$\alpha$	$1,4 \times 10^{10}$ a	Thorium-Zerfallsreihe
Th-nat, $\text{Th}_{\text{nat}}$	Thorium			
U-234, $^{234}\text{U}$	Uran	$\alpha$	$2,45 \times 10^5$ a	
U-235, $^{235}\text{U}$	Uran	$\alpha, \text{R}$	$7,04 \times 10^8$ a	
U-238, $^{238}\text{U}$	Uran	$\alpha$	$4,47 \times 10^9$ a	
U-nat, $\text{U}_{\text{nat}}$	Uran			
Pu-238, $^{238}\text{Pu}$	Plutonium	$\alpha, \text{R}$	87,74 a	
Pu-239, $^{239}\text{Pu}$	Plutonium	$\alpha, \text{R}$	$2,4 \times 10^4$ a	
Pu-240, $^{240}\text{Pu}$	Plutonium	$\alpha, \text{R}$	6563 a	
Pu-241, $^{241}\text{Pu}$	Plutonium	$\alpha, \text{R}$	14,35 a	
Am-241, $^{241}\text{Am}$	Americium	$\alpha, \text{R}$	432 a	
Cm-244, $^{244}\text{Cm}$	Curium	$\alpha, \text{R}$	18,1 a	

$\alpha$ = Alphastrahlung

$\beta^-$ = Betastrahlung

$\beta^+$ = Positronenstrahlung

$\gamma$ = Gammastrahlung

$\epsilon$ = Elektroneneinfang

R= Röntgenstrahlung

## SI-EINHEITEN IM STRAHLENSCHUTZ

Phys. Größe	SI-Einheit	alte Einheit	Umrechnung
Aktivität	Becquerel (Bq) 1 Bq = 1/s	Curie (Ci)	1 Ci = 3,7 · 10 <sup>10</sup> Bq 1 Bq = 2,7 · 10 <sup>-11</sup> Ci = 27 pCi
Energiedosis	Gray (Gy) 1 Gy = 1 J/kg	Rad (rd)	1 rd = 0,01 Gy 1 Gy = 100 rd
Äquivalentdosis	Sievert (Sv) 1 Sv = 1 J/kg	Rem (rem)	1 rem = 0,01 Sv 1 Sv = 100 rem
Ionendosis	Coulomb pro Kilogramm (C/kg)	Röntgen (R)	1 R = 2,58 · 10 <sup>-4</sup> C/kg = 0,258 mC/kg 1 C/kg = 3876 R
Energiedosisleistung	Gray pro Sekunde (Gy/s)	Rad pro Sekunde (rd/s)	1 rd/s = 0,01 Gy/s 1 Gy/s = 100 rd/s

## PRÄFIXE

Präfix	Kurzbezeichnung	Faktor
Exa	E	10 <sup>18</sup>
Peta	P	10 <sup>15</sup>
Tera	T	10 <sup>12</sup>
Giga	G	10 <sup>9</sup>
Mega	M	10 <sup>6</sup>
Kilo	k	10 <sup>3</sup>
Hekto	h	10 <sup>2</sup>
Deka	da	10 <sup>1</sup>

Präfix	Kurzbezeichnung	Faktor
Dezi	d	10 <sup>-1</sup>
Zenti	c	10 <sup>-2</sup>
Milli	m	10 <sup>-3</sup>
Mikro	μ	10 <sup>-6</sup>
Nano	n	10 <sup>-9</sup>
Piko	p	10 <sup>-12</sup>
Femto	f	10 <sup>-15</sup>
Atto	a	10 <sup>-18</sup>

## GLOSSAR

Fachbegriff	Erläuterung
Aerosol	feste oder flüssige Schwebeteilchen in Luft
Aktivität	Anzahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne eines radioaktiven Stoffes
Alphastrahler	Radionuklide, die Alphateilchen (Heliumatomkerne) aussenden
anthropogen	durch den Menschen verursacht

Fachbegriff	Erläuterung
<b>Äquivalentdosis</b>	Produkt aus Energiedosis und einem u. a. von der Strahlenart abhängigen Bewertungsfaktor. Die Äquivalentdosis ist das Maß für die Wirkung einer ionisierenden Strahlung auf den Menschen
<b>Becquerel</b>	SI-Einheit der Aktivität. Die Aktivität von 1 Becquerel (Bq) liegt vor, wenn 1 Atomkern je Sekunde zerfällt.
<b>Betastrahlung</b>	Teilchenstrahlung, bestehend aus beim radioaktiven Zerfall oder bei der Spaltung von Atomkernen ausgesandten Elektronen
<b>Dekontamination</b>	Beseitigung oder Verminderung von radioaktiven Verunreinigungen
<b>Deterministisch</b>	Nicht-stochastisch; deterministische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Schwere des Schadens mit der Dosis variiert und ein Schwellenwert bestehen kann, z. B. Hautrötung, Augenlinsentrübung (siehe auch stochastisch)
<b>Dosis</b>	Siehe Energiedosis und Äquivalentdosis
<b>Effektive Dosis</b>	Summe der gewichteten mittleren Äquivalentdosen in den einzelnen Organen und Geweben des Körpers. Der Wichtungsfaktor bestimmt sich aus den relativen Beiträgen der einzelnen Organe und Gewebe zum gesamten Strahlenrisiko des Menschen bei Ganzkörperbestrahlung
<b>Energiedosis</b>	Quotient aus der Energie, die durch ionisierende Strahlung auf das Material in einem Volumenelement übertragen wird, und der Masse in diesem Volumenelement
<b>Fallout</b>	Aus der Atmosphäre auf die Erde in Form kleinster Teilchen abgelagertes radioaktives Material, das zum Beispiel bei Kernwaffenversuchen entstanden ist
<b>Gammastrahlung</b>	Energiereiche elektromagnetische Strahlung, die bei der radioaktiven Umwandlung von Atomkernen oder bei Kernreaktionen auftreten kann
<b>Gammastrahlung</b>	Strahlenexposition durch Gammastrahlung von radioaktiven Gasen in der Atmosphäre
<b>Ganzkörperdosis</b>	Mittelwert der Äquivalentdosis über Kopf, Rumpf, Oberarme und Oberschenkel als Folge einer als homogen angesehenen Bestrahlung des ganzen Körpers
<b>Gray</b>	SI-Einheit der Energiedosis
<b>Ingestion</b>	Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung
<b>Inhalation</b>	Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft
<b>Inkorporation</b>	Aufnahme radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper
<b>Intensivbetrieb</b>	Betrieb von IMIS im Ereignisfall mit verkürzten Messintervallen und erweiterten Messprogrammen (Intensivmessprogrammen)
<b>Ionisierende Strahlen</b>	Elektromagnetische- oder Teilchenstrahlen, welche die Bildung von Ionen bewirken können (z. B. Alphastrahlen, Betastrahlen, Gammastrahlen, Röntgenstrahlen)
<b>In-situ-Messung</b>	Messung im Freien mit mobilen Messeinrichtungen (Feldmessung)

<b>Fachbegriff</b>	<b>Erläuterung</b>
<b>Isotop</b>	Atomart eines chemischen Elements mit gleichen chemischen Eigenschaften (gleicher Ordnungszahl), aber verschiedener Massenzahl
<b>Kontamination</b>	Verunreinigung mit radioaktiven Stoffen
<b>Kosmische Strahlung</b>	Sehr energiereiche Strahlung aus dem Weltraum
<b>Median</b>	Mittelwert, unterhalb dessen ebensoviele kleinere Werte wie oberhalb größere Werte liegen
<b>Nuklearmedizin</b>	Anwendung radioaktiver Stoffe in der Medizin zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken
<b>Nuklid</b>	Durch Protonenzahl (Ordnungszahl) und Massenzahl charakterisierte Atomart
<b>Organdosis</b>	Mittelwert der Äquivalentdosis über ein Organ
<b>Ortsdosis</b>	Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort
<b>Ortsdosisleistung</b>	In einem kurzen Zeitintervall erzeugte Ortsdosis, geteilt durch die Länge des Zeitintervalls
<b>Radioaktive Stoffe</b>	Stoffe, die Radionuklide enthalten
<b>Radioaktivität</b>	Eigenschaft bestimmter chemischer Elemente bzw. Nuklide, ohne äußere Einwirkung Teilchen- oder Gammastrahlung aus dem Atomkern auszusenden
<b>Radiojod</b>	Radioaktive Jodisotope
<b>Radionuklide</b>	Instabile Nuklide, die unter Aussendung von Strahlung in andere Nuklide zerfallen
<b>SI-Einheiten</b>	Einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI). Die Anwendung der Einheiten im Strahlenschutzmesswesen ist durch die Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Messwesen vom 13.12.1985 (BGBl.I S.2272) geregelt
<b>Sievert</b>	SI-Einheit der Äquivalentdosis 1 Sievert = 1 000 Millisievert (mSv) = 1 000 000 Mikrosievert (µSv)
<b>Stochastisch</b>	Zufallsbedingt; stochastische Strahlenschäden sind solche, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens mit der Dosis variiert, nicht jedoch deren Schwere (siehe auch deterministisch)
<b>Strahlenbelastung</b>	Siehe Strahlenexposition
<b>Strahlenexposition</b>	Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper oder seine Teile
<b>Terrestrische Strahlung</b>	Strahlung der natürlich radioaktiven Stoffe, die überall auf der Erde vorhanden sind

# SACHVERZEICHNIS

## A

Abfälle 101  
Abwasser 23 , 26 , 28 , 102  
Ackerböden 99  
Aerosole 24  
Aktivitätsnormale 18  
Alpha-Strahler 26  
Americium-241 8  
Arzneimittel 112  
atomrechtliche Genehmigungsverfahren 23

## B

Berlin 43  
Beryllium-7 33 , 43 , 49 –50  
Binnengewässer 49 , 51 , 56 , 89  
Binnenseen 85 , 89  
Bismut-214 33  
Blei-210 59  
Blei-214 33  
Boden 97  
Bundesamt für Gewässerkunde 49  
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 61  
Bundesamt für Strahlenschutz 33 , 38 , 44 , 58  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 28

## C

Cäsium-134 62 , 121  
Cäsium-137 8 –11 , 33 , 39 –40 , 43 , 49 –51 , 55 , 60 , 62 –67 , 70 –77 , 85 , 88 , 90 , 97 –101 , 103 –104 , 112 , 114 , 121  
Cäsiums-137 113  
Cobalt-58 49 , 53  
Cobalt-60 11 , 49 –50 , 53 , 101 –102

## D

Deutsche Bucht 62  
Deutscher Wetterdienst 33 , 38 , 43 –44  
Donau 52 –54

## E

Edelgase 24  
effektive Dosis 28 , 38  
Elbe 52 –54  
Ems 52 , 56  
EU-Berichterstattung 33

## F

Fallout 62 , 89  
Fische 85  
Fischteiche 85  
Fließgewässer 51 , 85 , 89  
Fortluft 23 –24 , 28

Futtermittel 97

## G

Genehmigungswert 28  
Gesamtnahrung 98  
Grundwasser 58 –59 , 101

## I

IMIS 33  
Indium-111 11  
Iod-131 8 , 11 , 24 , 26 , 33 , 49 , 55 , 98 , 101 –102 , 105 , 120

## J

Johann Heinrich von Thünen-Institut 85 , 93

## K

Kalium-40 9 , 11 , 43 , 49 –50 , 55 , 58 , 101 –102 , 105 , 112 –114  
Kernkraftwerk 24 , 26 , 28  
    Biblis 24  
    Brokdorf 25  
    Brunsbüttel 24  
    Emsland 25  
    Grafenrheinfeld 24  
    Grohnde 25  
    Gundremmingen 24  
    Isar 24  
    Krümmel 24  
    Neckarwestheim 24  
    Philippsburg 24 –25  
    Stade 24  
    Unterweser 24  
Kernwaffenteststoppabkommen 39  
Kernwaffenversuche 62  
Klärschlamm 102 –104  
Kohlenstoff-14 24  
Krypton-85 38

## L

La Hague 61 –62  
Lutetium-177 11 , 55

## M

Main 54  
Mangan-54 55  
Max Rubner-Institut 97  
Meerwasser 61  
Milch 98  
Mosel 52 –54 , 56 –57  
Mutual Recognition Arrangement 18

## N

Neckar 56 –57

Niederschlag 33 , 36  
Nordsee 61 –62 , 87 , 91

## O

Oberflächenerosion 97  
Oberflächenwasser 49 –53 , 55 , 58 , 62  
Offenbach 43  
Ostsee 61 –63 , 87 –88

## P

Pflanzen 97  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt 18 , 33 ,  
38 , 43 –44  
Plutonium(239+240) 8 , 40  
Plutonium-238 40  
Polonium-210 59  
Probenentnahme 37

## Q

Qualitätsmanagement 18

## R

Radium-226 59  
Radium-228 59  
Radon-222 59  
Rhein 52 –54 , 56 –57  
Rohmilch 97  
Rubidium-85 120

## S

Saar 52  
Säuglingsnahrung 98  
Schwebstoff 49 , 51 , 53 , 55  
Sediment 49 , 68  
Selen-79 120  
Sellafield 61 –62

Spurenanalyse 38  
Strahlenschutzgesetz 58  
Strahlenschutzverordnung 58  
Strontium-90 8 –11 , 33 , 49 , 51 , 55 , 58 , 63 ,  
65 , 67 –77 , 98 , 102 –103 , 105

## T

Technetium 11 , 55  
Tellur-132 120  
Thorium-232 49 –50  
Trinkwasser 55 , 58 –60  
Tritium 24 , 26 , 49 –51 , 55 , 58 , 101  
Tschernobyl 61 –62 , 65  
Tschornobyl 89

## U

Uran-234 43 , 59 , 102 , 105  
Uran-235 40 , 50 , 102 , 105  
Uran-238 9 , 40 , 43 , 49 –50 , 59 , 102  
Uranbergbau 50  
Urannuklide 33

## W

Weideböden 100  
Weser 54

## X

Xenon 38  
Xenon-131m 39  
Xenon-133 38  
Xenon-133m 39  
Xenon-135 39

## Y

Yttrium-88 120  
Yttrium-90 120