

**Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Aktivität
von Strontium-90 in Boden mit dem
Flüssigkeitsszintillationsspektrometer
(Dicyclohexyl-18-Krone-6 – Methode)**

F-Sr-90-BODEN-03

Bearbeiter:

F. Ober

D. Tait

Leitstelle für Boden, Bewuchs, Futtermittel und Nahrungsmittel
pflanzlicher und tierischer Herkunft

Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Strontium-90 in Boden mit dem Flüssigkeitsszintillationspektrometer (Dicyclohexyl-18-Krone-6 – Methode)

1 Anwendungsbereich

Das Verfahren ist für die Überwachung der spezifischen Aktivität von Strontium-90 (Sr-90) in Boden entsprechend der Messprogramme der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum „Integrierten Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Umwelt-radioaktivität (IMIS) nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz“ (AVV-IMIS) [1] und der „Richtlinie zur Erfassung der Emissionen und Immissionen kerntechnischer Anlagen“ (REI) [2] geeignet.

2 Probeentnahme

Zur Probeentnahme von Boden wird auf das Verfahren F- γ -SPEKT-BODEN-01 verwiesen.

3 Analyse

3.1 Prinzip des Verfahrens

Die entsprechend des Verfahrens F- γ -SPEKT-BODEN-01 vorbereiteten Proben werden bei bis zu 700 °C verascht. Die Asche einer Probe wird in verdünnter Salpetersäure für wenige Minuten zum Sieden erhitzt. Strontium wird aus dem abgekühlten Säureauszug mit einer Lösung des Kronenether Dicyclohexyl-18-Krone-6 (DC18K6), gelöst in Chloroform, extrahiert. Dieses Flüssig-Flüssig-Extraktionssystem erreicht das Gleichgewicht innerhalb weniger Minuten und ermöglicht eine sehr schnelle Strontiumabtrennung. Nach der Flüssig-Flüssig-Extraktion wird Strontium mit einer wässrigen Acetatpufferlösung zurückextrahiert. Störende Radioisotope des Bariums, Bleis oder Radiums werden durch Chromatfällung bei einem pH-Wert von 6,5 entfernt. Eine zusätzliche Hydroxidfällung bei einem pH-Wert von 10 hat sich für die Entfernung verbleibender Spuren natürlicher Radionuklide bewährt. Das Strontium wird anschließend aus alkalischer Lösung als Carbonat gefällt und auf einem Filter abgeschieden.

Das Messpräparat wird nach einer Wartezeit von mindestens zwei Wochen, in der sich das Gleichgewicht zwischen Sr-90 und Yttrium-90 (Y-90) eingestellt hat, mit einem Flüssigkeitsszintillationsspektrometer (en. *liquid scintillation counter*, LSC) in Low-level-Ausführung gemessen.

Die chemische Ausbeute wird entweder extern über ein Kontrollmesspräparat, das Strontium-85 (Sr-85) enthält und bei jeder Analysencharge mitläuft, bestimmt oder intern

durch Zugabe von Sr-85 zu jeder Analysenprobe. In dieser Messanleitung werden beide Varianten vorgestellt. Die chemische Ausbeute liegt in der Regel zwischen 75 % und 85 %.

3.2 Probenvorbereitung

Zum Prinzip des Verfahrens wird auf den entsprechenden Abschnitt des Verfahrens F-Sr-90-BODEN-02 verwiesen.

3.3 Radiochemische Trennung

Für die Extraktion werden 10 g bis 20 g der nach der Probenvorbereitung homogenisierten Asche eingesetzt.

3.3.1.1 Die Asche wird in einen 250-ml-Druckbehälter überführt.

Anmerkung:

Je nach Variante bei der Bestimmung der chemischen Ausbeute gilt:

- a) Bei externer Bestimmung wird pro Analysencharge der Asche in einem der Druckbehälter 5 Bq Sr-85-Tracer, der auf ein Aktivitätsnormal rückführbar ist, zugegeben.
- b) Bei interner Bestimmung wird jeder Analysenprobe eine geringere Sr-85-Aktivität, üblicherweise 2 Bq bis 5 Bq, zugegeben.

Für die weiteren Schritte der radiochemischen Trennung wird auf den entsprechenden Abschnitt des Verfahrens F-Sr-90-BODEN-02 verwiesen.

3.4 Herstellung des Sr-90-Messpräparats bzw. des Sr-85-Kontrollmesspräparats

Die Herstellung des Sr-90-Messpräparats bzw. des Sr-85-Kontrollmesspräparats erfolgt nach dem entsprechenden Abschnitt des Verfahrens F-Sr-90-MILCH-05.

4 Messung der Aktivität

Zur Durchführung der Kalibrierung, der Ausbeutebestimmung und zur Messung wird auf das Verfahren F-Sr-90-MILCH-05 verwiesen.

Die im Routinemessprogramm nach AVV-IMIS geforderte Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration von $0,5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ TM}$ [1] wird im Fall, dass ein Sr-85-Kontrollmesspräparat verwendet wird, bei einer Messdauer von etwas weniger als 16 Stunden erreicht.

Falls Sr-85 als Ausbeutetracer direkt zu den Messpräparaten gegeben wird, erhöht dies die Zählrate. Um diesen Beitrag gering zu halten, muss darauf geachtet werden, den Energiebereich für die Messung der Aktivität von (Sr-90 + Y-90) im oberen Bereich des Impulshöhenspektrums kleiner zu wählen. Dadurch sinkt das Nachweisvermögen und die Nachweisgrenze nimmt bei gleicher Messdauer zu. Die im Routinemessprogramm nach AVV-IMIS geforderte Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration [1] wird nach einer Messdauer von ca. 48 Stunden erreicht.

5 Berechnung der Analyseergebnisse

Die Berechnungen erfolgen analog des Verfahrens F-Sr-90-MILCH-05.

5.1 Ergebnisgröße

Die Berechnung der spezifischen Aktivität von Sr-90 erfolgt allgemein nach Gleichung (1):

$$a = \varphi \cdot R_n \quad (1)$$

wobei der verfahrensbezogene Kalibrierfaktor φ nach Gleichung (2)

$$\varphi = f_2 \cdot \frac{\varphi_{A,Sr-90}}{\eta_{Sr} \cdot m_{TM}} \quad (2)$$

und die Nettozählrate R_n ohne Verwendung von Strontium-85 als Ausbeutetracer nach Gleichung (4) bzw. mit Einsatz von Strontium-85 nach Gleichung (3) berechnet werden.

$$R_n = R_b - R_0 \quad (3)$$

$$R_n = R_b - (R_0 + R_{Sr-85}) \quad (4)$$

Bei der Verwendung des Ausbeutetracers Sr-85 wird zudem der zu erwartende Sr-85-Beitrag im für die Bestimmung der spezifischen Aktivität von (Sr-90 + Y-90) herangezogenen Energiebereich zum Zeitpunkt dieser Messung gemäß Gleichung (5) ermittelt:

$$R_{Sr-85} = \frac{A_{Sr-85}}{\varphi_{A,Sr-85}} \cdot \eta_{Sr} \cdot f_b \quad (5)$$

In den Gleichungen (1) bis (5) bedeuten:

A_{Sr-85} zugegebene Aktivität des Sr-85-Ausbeutetracers, in Bq;

a spezifische Aktivität von Sr-90, in $Bq \cdot kg^{-1}$, bezogen auf Trockenmasse (TM);

f_b Korrektionsfaktor für das Abklingen der Aktivität von Sr-85 für die Zeitspanne zwischen Zugabe des Ausbeutetracers und Messbeginn:

f_b Korrektionsfaktor für das Abklingen der Aktivität von Sr-85 für die Zeitspanne zwischen Zugabe des Ausbeutetracers und Messbeginn:

$$f_b = e^{\lambda_{Sr-85} \cdot t_b}$$

f_2 Korrektionsfaktor für das Abklingen der Aktivität von Sr-90 für die Zeitspanne zwischen Probeentnahme und Messbeginn:

$$f_2 = e^{\lambda_{Sr-90} \cdot t_A}$$

m_{TM} Masse der eingesetzten Bodenprobe, in kg, bezogen auf Trockenmasse (TM);

| | |
|---------------------|---|
| R_b | Bruttozählrate, in s^{-1} ; |
| R_n | Nettozählrate, in s^{-1} ; |
| R_{Sr-85} | Zählrate des Strontium-85, in s^{-1} ; |
| R_0 | Nulleffektzählrate, in s^{-1} ; |
| t_A | Zeitspanne zwischen Probeentnahme und Messbeginn, in s; |
| t_b | Zeitspanne zwischen Zugabe des Ausbeutetracers und Messbeginn, in s; |
| t_{Sr-85} | Halbwertszeit von Sr-85, in s; |
| t_{Sr-90} | Halbwertszeit von Sr-90, in s; |
| λ_{Sr-85} | Zerfallskonstante von Sr-85, in s^{-1} : |
| | $\lambda_{Sr-85} = \frac{\ln 2}{t_{Sr-85}}$ |
| λ_{Sr-90} | Zerfallskonstante von Sr-90, in s^{-1} : |
| | $\lambda_{Sr-90} = \frac{\ln 2}{t_{Sr-90}}$ |
| η_{Sr} | chemische Ausbeute für Strontium; |
| φ | verfahrensbezogener Kalibrierfaktor, in $Bq \cdot s \cdot kg^{-1}$; |
| $\varphi_{A,Sr-85}$ | aktivitätsbezogener Kalibrierfaktor von Strontium-85, in $Bq \cdot s$; |
| $\varphi_{A,Sr-90}$ | aktivitätsbezogener Kalibrierfaktor von Strontium-90, in $Bq \cdot s$. |

Anmerkung:

Neben der Berechnung kann die Summe der Beiträge des Nulleffektes sowie des Sr-85 ($R_0 + R_{Sr-85}$) empirisch festgestellt werden. Dazu wird die Aktivität von Sr-85 im Messpräparat gammaspektrometrisch bestimmt. Die gleiche Aktivität von Sr-85 wird dem für die Nulleffektbestimmung der Szintillationsmessungen genutzten Zählfläschchen zugesetzt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die gleichen Messbedingungen eingehalten werden.

5.2 Standardunsicherheit der Ergebnisgröße

Unsicherheitsbeiträge aus der Probeentnahme werden im Rahmen dieser Messanleitungen nicht berücksichtigt, da diese von vielen, oft nicht quantifizierbaren Faktoren abhängen können.

Die Standardunsicherheit beinhaltet neben der zählstatistischen auch die Standardunsicherheiten der Masse, des Abklingkorrektionsfaktors, der Ausbeutebestimmung und der Kalibrierung.

Die relative Standardunsicherheit der spezifischen Aktivität $u(a) \cdot a^{-1}$ wird **ohne Verwendung** des Ausbeutetracers Sr-85 nach Gleichung (6):

$$\frac{u(a)}{a} = \sqrt{\frac{1}{(R_b - R_0)^2} \cdot \left(\frac{R_b}{t_m} + \frac{R_0}{t_0}\right) + u_{\text{rel}}^2(\varphi)} \quad (6)$$

Bei Verwendung von Sr-85 als interner Ausbeutetracer erweitert sich Gleichung (6) um den Beitrag von Sr-85 zur Standardunsicherheit der Aktivitätskonzentration. Es wird somit Gleichung (7) erhalten:

$$\frac{u(a)}{a} = \left\{ \frac{1}{(R_b - R_0 - R_{\text{Sr-85}})^2} \cdot \left[\frac{R_b}{t_m} + \frac{R_0}{t_0} + u^2(R_{\text{Sr-85}}) \right] + u_{\text{rel}}^2(\varphi) + 2 \cdot u_{\text{rel}}^2(\eta_{\text{Sr}}) \cdot \frac{R_{\text{Sr-85}}}{(R_b - R_0 - R_{\text{Sr-85}})} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

In den Gleichungen (6) und (7) wird die relative Standardunsicherheit des verfahrensbezogenen Kalibrierfaktors nach Gleichung (8) ermittelt:

$$u_{\text{rel}}^2(\varphi) = u_{\text{rel}}^2(f_2) + u_{\text{rel}}^2(\varphi_A) + u_{\text{rel}}^2(\eta_{\text{Sr}}) + u_{\text{rel}}^2(m_{\text{TM}}) \quad (8)$$

Die in Gleichung (7) zusätzlich benötigte Standardunsicherheit der Sr-85-Zählrate wird nach Gleichung (9) erhalten.

$$u^2(R_{\text{Sr-85}}) = R_{\text{Sr-85}}^2 \cdot [u_{\text{rel}}^2(A_{\text{Sr-85}}) + u_{\text{rel}}^2(\varphi_{A, \text{Sr-85}}) + u_{\text{rel}}^2(\eta_{\text{Sr}}) + u_{\text{rel}}^2(f_b)] \quad (9)$$

In den Gleichungen (7) bis (9) bedeuten:

| | |
|---|--|
| t_m | Messdauer, in s; |
| t_0 | Messdauer des Nulleffekts, in s; |
| $u(a)$ | Standardunsicherheit der spezifischen Aktivität von Sr-90 zum Zeitpunkt der Probeentnahme, in Bq·kg ⁻¹ ; |
| $u(R_{\text{Sr-85}})$ | Standardunsicherheit der Zählrate von Sr-85, in s ⁻¹ ; |
| $u_{\text{rel}}(A_{\text{Sr-85}})$ | relative Standardunsicherheit des zugegebenen Ausbeutetracers Sr-85; |
| $u_{\text{rel}}(f_b)$ | relative Standardunsicherheit des Abklingkorrektionsfaktors für Sr-85 für die Zeitspanne zwischen Zugabe des Ausbeutetracers und Messbeginn; |
| $u_{\text{rel}}(f_2)$ | relative Standardunsicherheit des Abklingkorrektionsfaktors für Sr-90 für die Zeitspanne zwischen Probeentnahme und Messbeginn; |
| $u_{\text{rel}}(m_{\text{TM}})$ | relative Standardunsicherheit der Masse der eingesetzten Bodenprobe; |
| $u_{\text{rel}}(\eta_{\text{Sr}})$ | relative Standardunsicherheit der chemischen Ausbeute für Strontium; |
| $u_{\text{rel}}(\varphi_A)$ | relative Standardunsicherheit des aktivitätsbezogenen Kalibrierfaktors. |
| $u_{\text{rel}}(\varphi_{A, \text{Sr-85}})$ | relative Standardunsicherheit des aktivitätsbezogenen Kalibrierfaktors für Strontium-85. |

Üblicherweise können die Beiträge der relativen Standardunsicherheit des Korrektionsfaktors $u_{\text{rel}}(f_2)$ und der Masse der eingesetzten Bodenprobe $u_{\text{rel}}(m_{\text{TM}})$ vernachlässigt werden.

Bei einem für die Messung der spezifischen Aktivität von (Sr-90 + Y-90) verwendeten Energiebereich von 350 keV bis 1000 keV und einer Aktivität von Sr-85 von nur wenigen Bq ist die Standardunsicherheit $u(R_{\text{Sr-85}})$ gegenüber der Standardunsicherheit des Nulleffektes $u(R_0)$ vernachlässigbar.

6 Charakteristische Grenzen des Verfahrens

Die Berechnung der charakteristischen Grenzen erfolgt entsprechend der Normenreihe DIN EN ISO 11929 [3]. Für weiterführende Betrachtungen wird auf das Allgemeine Kapitel CHAGR-ISO-01 dieser Messanleitungen verwiesen [4].

6.1 Erkennungsgrenze

Zur Berechnung der Nachweisgrenzen des Verfahrens wird zunächst die Erkennungsgrenze a^* nach Gleichung (10) ermittelt:

$$a^* = k_{1-\alpha} \cdot \varphi \cdot \sqrt{R_0 \cdot \left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{t_0} \right)} \quad (10)$$

Wird Sr-85 als interner Ausbeutetracer hinzugegeben, so erweitert sich Gleichung (10) zur folgenden Gleichung (11):

$$c^* = k_{1-\alpha} \cdot \varphi \cdot \sqrt{\frac{R_0 + R_{\text{Sr-85}}}{t_m} + \frac{R_0}{t_0} + u^2(R_{\text{Sr-85}})} \quad (11)$$

Dabei bedeuten:

a^* Erkennungsgrenze der spezifischen Aktivität von Sr-90, in Bq·kg⁻¹;

$k_{1-\alpha}$ Quantil der Standardnormalverteilung zum Fehler 1. Art α .

6.2 Nachweisgrenze

Damit wird die Nachweisgrenze $a^\#$ nach der impliziten Gleichung (12) berechnet:

$$a^\# = a^* + k_{1-\beta} \cdot \sqrt{a^{\#2} \cdot u_{\text{rel}}^2(\varphi) + \varphi^2 \cdot \left(\frac{a^\#}{t_m \cdot \varphi} + \frac{R_0}{t_m} + \frac{R_0}{t_0} \right)} \quad (12)$$

Wird Sr-85 direkt zur Probe gegeben, berechnet sich die Nachweisgrenze näherungsweise gemäß der folgenden impliziten Gleichung (12):

$$c^{\#} = c^* + k_{1-\beta} \cdot \sqrt{c^{\#2} \cdot u_{\text{rel}}^2(\varphi) + \varphi^2 \cdot \left(\frac{c^{\#}}{t_m \cdot \varphi} + \frac{R_0 + R_{\text{Sr-85}}}{t_m} + \frac{R_0}{t_0} + u^2(R_{\text{Sr-85}}) \right)} \quad (13)$$

Nach Auflösung und Vereinfachung der Gleichungen (12) und (13) berechnet sich die Nachweisgrenze für beide Verfahren nach Gleichung (14):

$$a^{\#} = \frac{a^* \cdot \psi}{\theta} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{\theta}{\psi^2} \cdot \left(1 - \frac{k_{1-\beta}^2}{k_{1-\alpha}^2} \right)} \right] \quad (14)$$

mit den Hilfsgrößen

$$\theta = 1 - k_{1-\beta}^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(\varphi) \quad (15)$$

$$\psi = 1 + \frac{k_{1-\beta}^2}{2 \cdot a^*} \cdot \frac{\varphi}{t_m} \quad (16)$$

berechnet.

Dabei bedeuten:

$a^{\#}$ Nachweisgrenze der spezifischen Aktivität von Sr-90, in Bq·kg⁻¹;

$k_{1-\beta}$ Quantil der Standardnormalverteilung zum Fehler 2. Art β .

6.3 Grenzen des Überdeckungsintervalls

Eine Betrachtung der Grenzen des Überdeckungsintervalls ist nicht erforderlich.

7 Rechenbeispiel

Die Auswertung kann manuell (siehe Abschnitt 7.1) oder softwaregestützt mit Excel[®] oder UncertRadio (siehe Abschnitt 7.2) erfolgen. Ein Excel[®]-Tabellenblatt sowie eine Projektdatei zum Programm UncertRadio sind auf der Internetseite dieser Messanleitung abrufbar.

7.1 Manuelle Auswertung

Bei der manuellen Auswertung werden die Zwischenergebnisse und das Endergebnis mit vier signifikanten Stellen gerundet angegeben.

7.1.1 Ohne Verwendung des Ausbeutetracers Sr-85

Für die Bestimmung der spezifischen Sr-90-Aktivität in einer Bodenprobe werden nachstehende Zahlenwerte verwendet:

$$R_b = 117,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}; \quad t_m = 60 \cdot 10^3 \text{ s};$$

$$\begin{array}{ll}
 R_0 & = 79,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}; & t_0 & = 60 \cdot 10^3 \text{ s}; \\
 f_2 & = 1,0; & u_{\text{rel}}(f_2) & = 0; \\
 m_{\text{TM}} & = 0,015 \text{ kg}; & u_{\text{rel}}(m_{\text{TM}}) & = 0,001; \\
 \eta_{\text{Sr}} & = 0,750; & u_{\text{rel}}(\eta_{\text{Sr}}) & = 0,05; \\
 \varphi_A & = 0,585 \text{ Bq} \cdot \text{s}; & u_{\text{rel}}(\varphi_A) & = 0,04.
 \end{array}$$

Mit dem nach Gleichung (2) berechneten verfahrensbezogenen Kalibrierfaktor

$$\varphi \approx 1,0 \cdot \frac{0,585 \text{ Bq} \cdot \text{s}}{0,750 \cdot 0,015 \text{ kg}} \approx 52 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$$

und der nach Gleichung (4) ermittelten Nettozählrate

$$R_n = 117,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} - 79,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \approx 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

wird die spezifische Aktivität von Strontium-90 nach Gleichung (1) erhalten:

$$a \approx 52 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 38,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \approx 2,002 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Die dazugehörige relative Standardunsicherheit der spezifischen Sr-90-Aktivität wird nach Gleichung (6) berechnet,

$$\begin{aligned}
 \frac{u(a)}{a} &\approx \sqrt{\frac{1}{(38,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1})^2} \cdot \left(\frac{117,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} + \frac{79,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} \right) + 4,101 \cdot 10^{-3}} \\
 &\approx 0,0794
 \end{aligned}$$

wobei die relative Standardunsicherheit des verfahrensbezogenen Kalibrierfaktors nach Gleichung (8) ermittelt wird:

$$u_{\text{rel}}^2(\varphi) = 0^2 + 0,04^2 + 0,05^2 + 0,001^2 = 4,101 \cdot 10^{-3}$$

Die spezifische Aktivität von Sr-90 in der Bodenprobe zum Zeitpunkt der Probeentnahme beträgt für dieses Beispiel:

$$a \approx (2,002 \pm 0,159) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Für die Berechnung der charakteristischen Grenzen werden für das Quantil $k_{1-\alpha}$ der Wert 3 und für das Quantil $k_{1-\beta}$ der Wert 1,645 verwendet [4]. Für die Erkennungsgrenze a^* wird nach Gleichung (10) der Wert erhalten:

$$a^* \approx 3 \cdot 52 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \sqrt{79,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \cdot \left(\frac{1}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} + \frac{1}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} \right)} \approx 0,2531 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Mit den Hilfsgrößen nach den Gleichungen (15) und (16)

$$\theta = 1 - 1,645^2 \cdot 4,101 \cdot 10^{-3} \approx 0,9889$$

$$\psi \approx 1 + \frac{1,645^2}{2 \cdot 0,2531 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}} \cdot 52 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \frac{1}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} \approx 1,0046$$

beträgt die Nachweisgrenze $a^\#$ nach Gleichung (14):

$$a^\# \approx \frac{0,2531 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1,0046}{0,9889} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{0,9889}{1,0046^2} \cdot \left(1 - \frac{1,645^2}{3^2} \right)} \right] \approx 0,4014 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

7.1.2 Mit Verwendung des Ausbeutetracers Sr-85

In diesem Rechenbeispiel werden 20 Tage vor Beginn der LSC-Messung einer Analysenprobe 5 Bq Sr-85 als interner Ausbeutetracer zugegeben und die radiochemische Analyse durchgeführt. Für die Bestimmung der spezifischen Sr-90-Aktivität in einer Bodenprobe wird der Energiebereich zwischen 350 keV und 1 000 keV des gemessenen Impulshöhenspektrums ausgewertet. Es werden nachstehende Zahlenwerte verwendet:

| | | | | | |
|--------------------|---|--|------------------------------------|---|--|
| R_b | = | $28,13 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; | t_m | = | $60 \cdot 10^3 \text{ s}$; |
| R_0 | = | $16,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; | t_0 | = | $60 \cdot 10^3 \text{ s}$; |
| $A_{\text{Sr-85}}$ | = | 5,0 Bq; | $\varphi_{A, \text{Sr-85}}$ | = | $4,167 \cdot 10^3 \text{ Bq} \cdot \text{s}$; |
| f_b | = | 0,808; | $u_{\text{rel}}(f_b)$ | = | 0; |
| f_2 | = | 1,0; | $u_{\text{rel}}(f_2)$ | = | 0; |
| m_{TM} | = | 0,015 kg; | $u_{\text{rel}}(m_{\text{TM}})$ | = | 0,001; |
| η_{Sr} | = | 0,750; | $u_{\text{rel}}(\eta_{\text{Sr}})$ | = | 0,05; |
| φ_A | = | 2,632 Bq·s; | $u_{\text{rel}}(\varphi_A)$ | = | 0,04. |

Die Zählrate des Ausbeutetracers beträgt nach Gleichung (5):

$$R_{\text{Sr-85}} = \frac{5,0 \text{ Bq}}{4,167 \cdot 10^3 \text{ Bq} \cdot \text{s}} \cdot 0,750 \cdot 0,808 \approx 0,727 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Mit dem nach Gleichung (2) berechneten verfahrensbezogenen Kalibrierfaktor

$$\varphi \approx 1,0 \cdot \frac{2,632 \text{ Bq} \cdot \text{s}}{0,750 \cdot 0,015 \text{ kg}} \approx 233,96 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$$

und der nach Gleichung (4) ermittelten Nettozählrate

$$R_n = 28,13 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} - (16,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} + 0,727 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}) \approx 11,40 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

wird die spezifische Aktivität von Strontium-90 nach Gleichung (1) erhalten:

$$a \approx 233,96 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 11,40 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \approx 2,667 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Die dazugehörige relative Standardunsicherheit der spezifischen Sr-90-Aktivität wird nach Gleichung (7) berechnet, wobei die relative Standardunsicherheit des verfahrensbezogenen Kalibrierfaktors nach Gleichung (8) und die Standardunsicherheit der Sr-85-Zählrate nach Gleichung (9) ermittelt werden.

$$u^2(R_{\text{Sr-85}}) = 0,53 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot [0,02^2 + 0,04^2 + 0,05^2 + 0^2]^2 \approx 2,38 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2}$$

$$u_{\text{rel}}^2(\varphi) = 0^2 + 0,04^2 + 0,05^2 + 0,001^2 = 4,101 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{u(a)}{a} \approx \left\{ \frac{1}{(11,40 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1})^2} \cdot \left[\frac{28,13 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} + \frac{16,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} + 2,38 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2} \right] + 4,101 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,05^2 \cdot \frac{0,727 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}}{11,40 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}} \right\}^{1/2} \approx 0,1005$$

Die spezifische Aktivität von Sr-90 in der Bodenprobe zum Zeitpunkt der Probeentnahme beträgt für dieses Beispiel:

$$a \approx (2,668 \pm 0,268) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Für die Berechnung der charakteristischen Grenzen werden für das Quantil $k_{1-\alpha}$ der Wert 3 und für das Quantil $k_{1-\beta}$ der Wert 1,645 verwendet [4]. Für die Erkennungsgrenze a^* wird nach Gleichung (11) der Wert erhalten:

$$a^* \approx 3 \cdot 233,96 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$$

$$\cdot \sqrt{\left(\frac{16,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} + 0,727 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} + \frac{16,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} + 2,38 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-2} \right)} \approx$$

$$\approx 0,52 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Mit den Hilfsgrößen nach den Gleichungen (15) und (16)

$$\theta = 1 - 1,645^2 \cdot 4,101 \cdot 10^{-3} \approx 0,9889$$

$$\psi \approx 1 + \frac{1,645^2}{2 \cdot 0,52 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}} \cdot 233,96 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \frac{1}{60 \cdot 10^3 \text{ s}} \approx 1,010$$

beträgt die Nachweisgrenze $a^\#$ nach Gleichung (14):

$$a^\# \approx \frac{0,52 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1,0103}{0,9889} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{0,9889}{1,0103^2} \cdot \left(1 - \frac{1,645^2}{3^2} \right)} \right] \approx 0,83 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

7.2 Softwaregestützte Auswertung

7.2.1 Ansicht des Excel®-Tabellenblatts

7.2.1.1 Ohne Verwendung des Sr-85-Tracers (Variante 1)

Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Strontium-90 in Boden mit dem Flüssigkeitsszintillationsspektrometer (Dicyclohexyl-18-Krone-6 – Methode)

F-Sr-90-BODEN-03

Version November 2023

Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung (ISSN: 1865-8725)

PROBENBEZEICHNUNG:

Boden

ANALYT: Sr-90 (ohne Sr-85-Tracer)

| | |
|----------------------------|-------|
| #Anzahl der Eingangsgrößen | 8 |
| k alpha | 3 |
| k beta | 1,645 |
| gamma | 0,05 |

Erstellen von
Excel-Variablen

| | |
|------------|-------------------------------------|
| Anwender: | Definition Größen / Excel-Variablen |
| | Eingabe Excel-Formeln |
| | Eingabe Werte Eingangsgrößen |
| Excel-VBA: | #Schlüsselwörter |
| | Werte aus VBA |

| DATENEINGABE | | | | | UNSIKERHEITSBUDGET | | |
|------------------------------------|---------|----------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| #Werte der Eingangsgrößen | Einheit | Excel-Variable | Eingabewerte | abs. StdUns. | partielle Ableitungen | Unsicherh.- Budget | Budget in % |
| p 1 #Bruttoimpulsanzahl Nb | | Nb | 7050 | 83,9643 | 0,000866667 | 0,072769041 | 20,93645689 |
| p 2 NE-Zählrate | 1/s | _R0 | 7,9000E-02 | 1,1475E-03 | -52 | 0,05966797 | 14,07642633 |
| p 3 Messdauer | s | tm | 6,0000E+04 | 0 | -0,00010183 | 0 | 0 |
| p 4 NE-Messdauer | s | _t0 | 6,0000E+04 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p 5 Trockenmasse | kg | mTM | 0,0150 | 1,5000E-05 | -133,466533 | 0,002001998 | 0,015846639 |
| p 6 Aktivitätsbez. Kalibrierfaktor | Bq*s/kg | phia | 0,5850 | 2,3400E-02 | 3,422222222 | 0,08008 | 25,35467293 |
| p 7 Chemische Ausbeute | | eta | 0,7500 | 3,7500E-02 | -2,66933066 | 0,1000999 | 39,61659722 |
| p 8 Abklingfaktor für Sr-90 | | _f2 | 1,0000 | 0 | 2,002 | 0 | 0 |
| (Liste hier verlängern) | | | | | | | |

| MODELL | | | | |
|------------------------------|---------|------|------------|--|
| Erg = phi * Rn | | | | |
| Abgeleitete Größen | | | | (Formeln) |
| h 1 #Bruttozählrate Rb | 1/s | Rb | 1,1750E-01 | |
| (Liste hier verlängern) | | | | |
| #Nettozählrate Rn | 1/s | Rn | 3,8500E-02 | |
| #Kalibrierfaktor, verf.-bez. | Bq*s/kg | phi | 5,2000E+01 | |
| #Ergebniswert | Bq/kg | Erg | 2,0020E+00 | 0,40146874 <-- von VBA modifizierb. Ergebniswert |
| #kombin. Stdunsicherheit | Bq/kg | uErg | 1,5904E-01 | |
| #Erkennungsgrenze | Bq/kg | | 2,5315E-01 | |
| #Nachweisgrenze | Bq/kg | | 4,0147E-01 | |

WEITERE ABGELEITETE GRÖßEN

| | | | |
|-------------------------------------|-------|----------|-------------|
| Hilfsgröße Omega | | Omega | 1 |
| Beste Schätzwert | Bq/kg | BestWert | 2,002 |
| Stdunsicherheit des b. Schätzwerts | Bq/kg | | 0,159035859 |
| u. Grenze d. Überdeckungsintervalls | Bq/kg | | 1,690295445 |
| o. Grenze d. Überdeckungsintervalls | Bq/kg | | 2,313704555 |

Rechnen!

Das zugehörige Excel®-Tabellenblatt ist auf der Internetseite dieser Messanleitung verfügbar.

7.2.1.2 Mit Verwendung des Sr-85-Tracers (Variante 2)

Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Strontium-90 in Boden mit dem Flüssigkeitsszintillationsspektrometer (Dicyclohexyl-18-Krone-6 – Methode)

F-Sr-90-BODEN-03

Version November 2023

Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung (ISSN: 1865-8725)

PROBENBEZEICHNUNG: Boden

ANALYT: Sr-90 (mit Sr-85-Tracer)

| | |
|-----------------------------------|-------|
| #Anzahl der Eingangsgrößen | 11 |
| k_alpha | 3 |
| k_beta | 1,645 |
| gamma | 0,05 |

**Erstellen von
Excel-Variablen**

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| Anwender: | Definition Größen / Excel-Variablen |
| | Eingabe Excel-Formeln |
| | Eingabe Werte Eingangsgrößen |
| Excel-VBA: | #Schlüsselwörter |
| | Werte aus VBA |

| DATENEINGABE | | | | | UNSIKERHEITSBUDGET | | |
|--|---------|----------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| #Werte der Eingangsgrößen | Einheit | Excel-Variable | Eingabewerte | abs. StdUns. | partielle Ableitungen | Unsiherh.- Budget | Budget in % |
| p 1 #Bruttoimpulsanzahl Nb | | Nb | 1687,8 | 41,0828 | 0,003899259 | 0,160192656 | 35,71874379 |
| p 2 NE-Zählrate | 1/s | _R0 | 1,6000E-02 | 0,0005164 | -233,955556 | 0,120814129 | 20,31638466 |
| p 3 Messdauer | s | tm | 6,0000E+04 | 0 | -0,00010969 | 0 | 0 |
| p 4 NE-Messdauer | s | _t0 | 6,0000E+04 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| p 5 Zugegebene Sr-85-Aktivät | Bq | _ASr85 | 5,0000 | 1,0000E-01 | -0,03402377 | 0,003402377 | 0,016112983 |
| p 6 Sr-85-Kalibrierfaktor | Bq*s | _phiSr85 | 4167 | 1,6670E+02 | 4,08252E-05 | 0,006805565 | 0,06446727 |
| p 7 Volumen | kg | mTM | 1,5000E-02 | 1,5000E-05 | -177,850623 | 0,002667759 | 0,009906136 |
| p 8 Aktivitätsbez. Sr-90-Kalibrierfaktor | Bq*s | phia | 2,6320E+00 | 1,0528E-01 | 1,013587393 | 0,106710481 | 15,84984877 |
| p 9 Chemische Ausbeute | | eta | 7,5000E-01 | 3,7500E-02 | -3,7838374 | 0,141893903 | 28,02453638 |
| p 10 Abklingfaktor für Sr-85 | | fb | 8,0800E-01 | 0 | -0,21054316 | 0 | 0 |
| p 11 Abklingfaktor für Sr-90 | | _f2 | 1,0000 | 0 | 2,667762018 | 0 | 0 |
| (Liste hier verlängerbar) | | | | | | | |

| MODELL | | | | Erg = phi * Rn |
|-------------------------------------|---------|--------|------------|--|
| Abgeleitete Größen | | | | (Formeln) |
| h 1 #Bruttozählrate Rb | 1/s | Rb | 2,8130E-02 | |
| h 2 Sr-85-Zählrate | 1/s | _RSr85 | 7,2714E-04 | |
| (Liste hier verlängerbar) | | | | |
| #Nettozählrate Rn | 1/s | Rn | 1,1403E-02 | |
| #Kalibrierfaktor, verf.-bez. | Bq*s/kg | phi | 2,3396E+02 | |
| #Ergebniswert | Bq/kg | Erg | 2,6678E+00 | 0,83511048 <-- von VBA modifizierb. Ergebniswert |
| #kombin. Stdunsicherheit | Bq/kg | uErg | 2,6804E-01 | |
| #Erkennungsgrenze | Bq/kg | | 5,1949E-01 | |
| #Nachweisgrenze | Bq/kg | | 8,3511E-01 | |

WEITERE ABGELEITETE GRÖßEN

| | | | |
|--|-------|----------|-------------|
| Hilfsgröße Omega | | Omega | 1 |
| Bester Schätzwert | Bq/kg | BestWert | 2,667762018 |
| Stdunsicherheit des b. Schätzwerts | Bq/kg | | 0,268036856 |
| u. Grenze d. Überdeckungsintervalls | Bq/kg | | 2,142419434 |
| o. Grenze d. Überdeckungsintervalls | Bq/kg | | 3,193104603 |

Rechnen!

Das zugehörige Excel®-Tabellenblatt ist auf der Internetseite dieser Messanleitung verfügbar.

7.2.2 Ansicht der UncertRadio-Resultatseite

7.2.2.1 Ohne Verwendung des Sr-85-Tracers (Variante 1)

The screenshot shows the 'Resultate' tab of the UncertRadio software. The main results are as follows:

| Gesamtes Messergebnis für aSr90 : | |
|-----------------------------------|---------------|
| Wert der Ergebnisgröße: | 2,0020 Bq/kg |
| erweiterte (Std.-)Unsicherheit: | 0,15904 Bq/kg |
| relative erw.(Std.-)Unsicherheit: | 7,9439 % |
| Beste Schätzwerte nach Bayes: | |
| Wert der Ergebnisgröße: | 2,0020 Bq/kg |
| erweiterte (Std.-)Unsicherheit: | 0,15904 Bq/kg |
| untere Bereichsgrenze: | 1,6903 Bq/kg |
| obere Bereichsgrenze: | 2,3137 Bq/kg |

| Monte Carlo Simulation: | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Anzahl der simul. Messungen | 100000 |
| Anzahl der Runs: | 1 |
| relSD%: | |
| primärer Messwert: | 2,0075 Bq/kg 0,025 |
| Unsichh. primärer Messwert: | 0,15998 Bq/kg 0,224 |
| Wert der Ergebnisgröße: | 2,0075 Bq/kg 0,025 |
| erweiterte Unsicherheit: | 0,15998 Bq/kg 0,224 |
| relative erw.(Std.-)Unsicherheit: | 7,9691 % |
| untere Bereichsgrenze: | 1,7102 Bq/kg 0,079 |
| obere Bereichsgrenze: | 2,3382 Bq/kg 0,058 |
| Erkennungsgrenze (EKG): | 0,25908 Bq/kg 0,873 |
| Nachweisgrenze (NWG): | 0,40569 Bq/kg 0,577 |
| aktiver Run: | 1 |
| IT: | 8 |

Additional parameters on the right side of the interface:

- Erweiterungsfaktor k: 1,0
- Wahrscheinlichkeit (1-gamma): 0,950
- Erkennungs- und Nachweisgrenze für aSr90 :
- Erkennungsgrenze (EKG): 0,2531 Bq/kg Iterationen: 1
- Nachweisgrenze (NWG): 0,4015 Bq/kg Iterationen: 4
- k_alpha=3,000, k_beta=1,645 Methode: ISO 11929:2019, iterativ

Die zugehörige UncertRadio-Projektdatei ist auf der Internetseite dieser Messanleitung verfügbar.

7.2.2.2 Mit Verwendung des Sr-85-Tracers (Variante 2)

The screenshot shows the 'Resultate' tab of the UncertRadio software. The main results are as follows:

| Gesamtes Messergebnis für aSr90 : | |
|-----------------------------------|---------------|
| Wert der Ergebnisgröße: | 2,6678 Bq/kg |
| erweiterte (Std.-)Unsicherheit: | 0,26804 Bq/kg |
| relative erw.(Std.-)Unsicherheit: | 10,047 % |
| Beste Schätzwerte nach Bayes: | |
| Wert der Ergebnisgröße: | 2,6678 Bq/kg |
| erweiterte (Std.-)Unsicherheit: | 0,26804 Bq/kg |
| untere Bereichsgrenze: | 2,1424 Bq/kg |
| obere Bereichsgrenze: | 3,1931 Bq/kg |

| Monte Carlo Simulation: | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Anzahl der simul. Messungen | 100000 |
| Anzahl der Runs: | 1 |
| relSD%: | |
| primärer Messwert: | 2,6745 Bq/kg 0,032 |
| Unsichh. primärer Messwert: | 0,26977 Bq/kg 0,224 |
| Wert der Ergebnisgröße: | 2,6745 Bq/kg 0,032 |
| erweiterte Unsicherheit: | 0,26977 Bq/kg 0,224 |
| relative erw.(Std.-)Unsicherheit: | 10,087 % |
| untere Bereichsgrenze: | 2,1759 Bq/kg 0,105 |
| obere Bereichsgrenze: | 3,2304 Bq/kg 0,071 |
| Erkennungsgrenze (EKG): | 0,52978 Bq/kg 0,873 |
| Nachweisgrenze (NWG): | 0,83933 Bq/kg 0,572 |
| aktiver Run: | 1 |
| IT: | 11 |

Additional parameters on the right side of the interface:

- Erweiterungsfaktor k: 1,0
- Wahrscheinlichkeit (1-gamma): 0,950
- Erkennungs- und Nachweisgrenze für aSr90 :
- Erkennungsgrenze (EKG): 0,5195 Bq/kg Iterationen: 1
- Nachweisgrenze (NWG): 0,8351 Bq/kg Iterationen: 4
- k_alpha=3,000, k_beta=1,645 Methode: ISO 11929:2019, iterativ

Die zugehörige UncertRadio-Projektdatei ist auf der Internetseite dieser Messanleitung verfügbar.

8 Verzeichnis der Chemikalien und Geräte

8.1 Chemikalien

Die verwendeten Chemikalien sollen analysenrein sein.

- Ammoniumcarbamat;
- Dicyclohexyl-18-Krone-6 in Chloroform: 0,05 mol·l⁻¹;
- Natriumacetat-Essigsäure-Lösung: 0,05 mol·l⁻¹ Natriumacetat in 0,05 mol·l⁻¹ Essigsäure;
- Natriumdichromatlösung, Na₂Cr₂O₇: 1,31 mol·l⁻¹;
- Natriumhydroxidlösung, NaOH: 3 mol·l⁻¹, 10 mol·l⁻¹ ;
- Salpetersäure, HNO₃: 6 mol·l⁻¹;
- Szintillationscocktail: z. B. InstantScintGelPlus oder UltimaGold LLT;
- Toluolsulfonsäure in wässriger Lösung: 25 g Toluolsulfonsäure in 75 ml entionisiertem Wasser (ergibt insgesamt 100 ml Lösung).

Trägerlösungen

- Bariumträgerlösung: 2 mg Ba²⁺ pro ml Lösung:
0,356 g Bariumchloriddihydrat (BaCl₂ · 2 H₂O) in entionisiertem Wasser lösen, 1 ml Salzsäure (3 mol·l⁻¹) zugeben, dann auf 100 ml mit entionisiertem Wasser auffüllen;
- Strontiumträgerlösung: 20 mg Sr²⁺ pro ml Lösung:
6,086 g Strontiumchloridhexahydrat (SrCl₂ · 6 H₂O) in entionisiertem Wasser lösen, 1 ml Salzsäure (3 mol·l⁻¹) zugeben, dann auf 100 ml mit entionisiertem Wasser auffüllen;
- Yttriumträgerlösung: 20 mg Y³⁺ pro ml Lösung:
6,83 g Yttriumchloridhexahydrat (YCl₃ · 6 H₂O) in entionisiertem Wasser lösen, 1 ml Salzsäure (3 mol·l⁻¹) zugeben, dann auf 100 ml mit entionisiertem Wasser auffüllen.

8.2 Geräte

Für das Verfahren wird folgende Ausstattung benötigt:

- Sieb für Teilchengröße kleiner 1 mm;
- Veraschungsschalen, z. B. aus Keramik (Alsint) 55 mm hoch, 145 mm breit, 205 mm lang und einer Wandstärke von 4 mm bis 5 mm (z. B. Fa. Haldenwanger);

- Veraschungsöfen mit Luftzutrittschlitzen und katalytischer Abgasreinigung, z. B. Kammeröfen Typ N150 der Fa. Nabertherm;
- Feine quantitative Papierfilter mit einem Porendurchmesser kleiner als 2 µm, (z. B. Blaubandfilter, Sorte 589/3) oder Filter aus Zellulosenitrat mit einem Porendurchmesser von 0,45 µm (Filterdurchmesser ca. 37 mm);
- Flüssigkeitsszintillationsmessfläschchen aus kaliumarmem Glas;
- Flüssigkeitsszintillationsspektrometer, nach Möglichkeit in Low-level-Ausführung mit Vielkanalanalysator;
- Laborzentrifuge.

Literatur

- [1] *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum integrierten Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt (IMIS) nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz (AVV-IMIS)*. Bundesanzeiger, 2006, Nr. 244a vom 13.12.2006, S. 4-80.
- [2] *Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI)*. Gemeinsames Ministerialblatt, 2024, Nr. 6-9, S. 102.
- [3] Normenreihe DIN EN ISO 11929:2021-11, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Überdeckungsintervalls) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen (Teile 1 bis 3)*.
- [4] Kanisch, G., Aust, M.-O., Bruchertseifer, F., Dalheimer, A., Heckel, A., Hofmann, S., et al.: *Bestimmung der charakteristischen Grenzen bei der Aktivitätsbestimmung radioaktiver Stoffe – Teil 1: Grundlagen*. Version Mai 2022. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, (Hrsg.): *Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung*. ISSN 1865-8725. Verfügbar unter: <https://www.bmuv.de/WS1517>. [Letzter Zugriff am 27.10.2023].