

Verfahren zur alphaspektrometrischen Bestimmung der spezifischen Aktivitäten von Plutonium, Americium und Curium in Meeressediment

D- α -SPEKT-MSEDI-01

Bearbeiter:

S. Schmied

A. Meyer

I. Goroncy

J. Herrmann

Leitstelle für Meerwasser, Meeresschwebstoff und -sediment

Verfahren zur alphaspektrometrischen Bestimmung der spezifischen Aktivitäten von Plutonium, Americium und Curium in Meeressediment

1 Anwendungsbereich

Das nachstehend beschriebene Verfahren dient zur Bestimmung der spezifischen Aktivitäten von Plutonium, Americium und Curium in Meeressediment entsprechend des Routinemessprogramms der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum „Integrierten Mess- und Informationssystem zur Überwachung der Umweltradioaktivität (IMIS) nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz“ (AVV-IMIS) [1].

2 Probeentnahme

Zu Details der Probeentnahme wird auf das Verfahren D- γ -SPEKT-MSEDI-01 verwiesen.

3 Analyse

3.1 Prinzip des Verfahrens

Das Prinzip des Verfahrens ist im Verfahren D- α -SPEKT-MWASS-01 beschrieben, wobei das vorliegende Verfahren für Trockenmassen von fünf Gramm bis zehn Gramm ausgelegt ist.

3.2 Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung erfolgt entsprechend dem Verfahren D- γ -SPEKT-MSEDI-01.

Nach der gammaspektrometrischen Messung der getrockneten Meeressedimente wird eine repräsentative Teilprobe mit einer Masse von üblicherweise 10 g für die radiochemische Trennung der Transurane entnommen.

3.3 Radiochemische Trennung

3.3.1 Die repräsentative Teilprobe wird in ein 250-ml-Becherglas eingewogen. Zur Ausbeutebestimmung werden bekannte, auf nationale Primärnormale rückführbare Aktivitäten von etwa 15 mBq bis 40 mBq der radioaktiven Tracer Pu-242 und Am-243 zugegeben.

3.3.2 Nach Zugabe von 20 ml bis 30 ml konzentrierter Salpetersäure (etwa 15 mol·l⁻¹) wird die Suspension mindestens 15 Minuten unter Rühren auf einer Heizplatte erhitzt.

3.3.3 Nach dem Abkühlen wird die Suspension in ein 500-ml-Zentrifugengefäß überführt bis zur vollständigen Trennung bei etwa dem 1510fachen der Erdbeschleunigung

(1510 g) drei Minuten lang zentrifugiert. Die überstehende Lösung wird in ein 2-l-Becherglas dekantiert.

Anmerkung:

Falls die Zentrifuge nur Umdrehungen pro Minute anzeigt, muss in der Bedienungsanleitung für die Zentrifuge/Rotor nachgesehen werden.

3.3.4 Der Niederschlag wird mit 100 ml bis 150 ml konzentrierter Salzsäure ($12 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$) versetzt und mindestens 15 Minuten unter Rühren auf einer Heizplatte erhitzt.

3.3.5 Nach dem Abkühlen wird entsprechend Schritt 3.3.3 zentrifugiert. Die überstehende Lösung wird zum salpetersauren Auszug aus Schritt 3.3.3 in das 2-l-Becherglas gegeben.

3.3.6 Die Schritte 3.3.4 und 3.3.5 werden einmal wiederholt, jedoch ohne zu erhitzen.

3.3.7 Anschließend wird der Niederschlag mit 100 ml bis 150 ml destilliertem Wasser versetzt und mindestens 15 Minuten gerührt.

3.3.8 Nach dem Abkühlen wird entsprechend Schritt 3.3.3 zentrifugiert. Die überstehende Lösung wird mit der Lösung im 2-l-Becherglas vereinigt.

3.3.9 Zu den vereinigten Auszügen werden 10 ml Eisen(III)-chloridlösung ($0,5 \text{ g Fe}^{3+}$) gegeben.

3.3.10 Nach Zugabe einiger Eiswürfel wird unter Rühren mit konzentriertem Ammoniak ($13,3 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$) ein pH-Wert von 9 bis 10 eingestellt. Die Transurane fallen zusammen mit dem sich bildenden Eisenhydroxidniederschlag aus.

3.3.11 Nach dem Absetzen des Niederschlags wird die überstehende Lösung so weit wie möglich ohne Verlust an Niederschlag, z. B. mit einer Wasserstrahlpumpe, abgesaugt.

Anmerkung:

Das Volumen der Suspension im 2-l-Becherglas sollte nach dem Absaugen der überstehenden Lösung etwa 400 ml betragen.

3.3.12 Der Niederschlag wird entsprechend Schritt 3.3.3 zentrifugiert. Die überstehende Lösung wird verworfen.

3.3.13 Der Niederschlag wird in möglichst wenig Salpetersäure ($8 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$) gelöst und verlustfrei in ein 250-ml-Becherglas überführt, wobei das Zentrifugengefäß mit möglichst wenig Salpetersäure ($8 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$) nachgespült wird. Das Gesamtvolumen sollte bei 100 ml liegen.

3.3.14 Die weiteren Verfahrensschritte sind im Verfahren D- α -SPEKT-MWASS-01 ab Schritt 3.3.1.16 beschrieben.

4 Messung der Aktivität

Für die Messung der Aktivität wird auf das Verfahren D- α -SPEKT-MWASS-01 verwiesen.

5 Berechnung der Analyseergebnisse

5.1 Ergebnisgröße

Die spezifische Aktivität a_r des Radionuklids r wird nach Gleichung (1) berechnet; die Zerfallskorrektur auf den Zeitpunkt der Probeentnahme wird aufgrund der langen Halbwertszeiten der Plutonium- und Americiumisotope vernachlässigt:

$$a_r = \frac{A_{Tr}}{R_{n,Tr}} \cdot \frac{p_{\alpha,Tr}}{p_{\alpha,r}} \cdot \frac{1}{m_{TM}} \cdot (R_{b,r} - R_{0,r}) = \frac{A_{Tr}}{R_{n,Tr}} \cdot \frac{p_{\alpha,Tr}}{p_{\alpha,r}} \cdot \frac{1}{m_{TM}} \cdot R_{n,r} = \varphi \cdot R_{n,r} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

a_r spezifische Aktivität des Radionuklids r , in $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$;

A_{Tr} Aktivität des Tracernuklids zum Zeitpunkt des Messbeginns, in Bq;

m_{TM} Trockenmasse des eingewogenen Meeressediments, in kg;

$p_{\alpha,Tr}$ Summe der Emissionsintensitäten des Tracers;

$p_{\alpha,r}$ Summe der Emissionsintensitäten des Radionuklids r ;

$R_{n,Tr}$ Nettozählrate der zu bestimmenden Alphalinie des Tracers, in s^{-1} ;

$R_{b,r}$ Bruttozählrate der zu bestimmenden Alphalinie des Radionuklids r , in s^{-1} ;

$R_{0,r}$ Nulleffektzählrate der zu bestimmenden Alphalinie des Radionuklids r aus dem Blindwertpräparat, in s^{-1} ;

$R_{n,r}$ Nettozählrate der zu bestimmenden Alphalinie des Radionuklids r , in s^{-1} ;

φ verfahrensbezogener Kalibrierfaktor, in $\text{Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Zur Berechnung der chemischen Ausbeute und deren Standardunsicherheit wird auf das Verfahren D- α -SPEKT-MWASS-01 verwiesen.

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 $u(a_r)$ der spezifischen Aktivität wird nach Gleichung (2) berechnet:

$$u(a_r) = \sqrt{a_r^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(\varphi) + \varphi^2 \cdot \left(\frac{R_{b,r}}{t_m} + \frac{R_{0,r}}{t_0} \right)} \quad (2)$$

mit

$$u_{\text{rel}}^2(\varphi) = u_{\text{rel}}^2(A_{Tr}) + u_{\text{rel}}^2(p_{\alpha,Tr}) + u_{\text{rel}}^2(p_{\alpha,r}) + u_{\text{rel}}^2(R_{n,Tr}) + u_{\text{rel}}^2(m_{TM}) \quad (3)$$

In den Gleichungen (2) und (3) bedeuten:

- t_m Messdauer des Messpräparats, in s;
 t_0 Messdauer des Nulleffekts (Blindwertpräparat), in s;
 $u(a_r)$ Standardunsicherheit der spezifischen Aktivität des Radionuklids r, in Bq·kg⁻¹;
 $u_{\text{rel}}(A_{\text{Tr}})$ relative Standardunsicherheit der Traceraktivität;
 $u_{\text{rel}}(p_{\alpha,\text{Tr}})$ relative Standardunsicherheit der Emissionsintensitäten des Tracers;
 $u_{\text{rel}}(p_{\alpha,r})$ relative Standardunsicherheit der Emissionsintensitäten des Radionuklids r;
 $u_{\text{rel}}(R_{n,\text{Tr}})$ relative Standardunsicherheit der Nettozählrate des Tracers;
 $u_{\text{rel}}(m_{\text{TM}})$ relative Standardunsicherheit der Trockenmasse;
 $u_{\text{rel}}(\varphi)$ relative Standardunsicherheit des verfahrensbezogenen Kalibrierfaktors.

Die Standardunsicherheit des Analysenergebnisses beinhaltet die Standardunsicherheiten der Zählstatistik, der Traceraktivität, der Emissionsintensitäten und der Trockenmasse der Probe. Die Standardunsicherheiten der Messdauern werden vernachlässigt.

6 Charakteristische Grenzen des Verfahrens

Die Berechnung der charakteristischen Grenzen erfolgt entsprechend der Normenreihe DIN EN ISO 11929 [2]. Für weiterführende Betrachtungen wird auf das Allgemeine Kapitel CHAGR-ISO-01 dieser Messanleitungen verwiesen [3].

6.1 Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze a_r^* wird nach Gleichung (4) ermittelt:

$$a_r^* = k_{1-\alpha} \cdot \varphi \cdot \sqrt{R_{0,r} \cdot \left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{t_0} \right)} \quad (4)$$

Dabei bedeuten:

- a_r^* Erkennungsgrenze der spezifischen Aktivität des Radionuklids r, in Bq·kg⁻¹;
 $k_{1-\alpha}$ Quantil der standardisierten Normalverteilung für $\alpha = 0,0014$.

6.2 Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze $a_r^\#$ wird nach der impliziten Gleichung (5) berechnet:

$$a_r^\# = a_r^* \cdot k_{1-\beta} \cdot \sqrt{a_r^{*2} \cdot u_{\text{rel}}^2(\varphi) + \varphi^2 \cdot \left(\frac{a_r^\#}{t_m \cdot \varphi} + \frac{R_{0,r}}{t_m} + \frac{R_{0,r}}{t_0} \right)} \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

$a_r^\#$ Nachweisgrenze der spezifischen Aktivität des Radionuklids r , in $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;

$k_{1-\beta}$ Quantil der standardisierten Normalverteilung für $\beta = 0,05$.

Durch Einführung der Hilfsgrößen Ψ und θ entsprechend der Gleichungen (6) und (7)

$$\theta = 1 - k_{1-\beta}^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(\varphi) \quad (6)$$

$$\Psi = 1 + \frac{k_{1-\beta}^2}{2 \cdot a_r^*} \cdot \varphi \cdot \frac{1}{t_m} \quad (7)$$

wird die Nachweisgrenze $a_r^\#$ nach Gleichung (8) berechnet:

$$a_r^\# = \frac{a_r^* \cdot \Psi}{\theta} \cdot \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{\theta}{\Psi^2} \cdot \left(1 - \frac{k_{1-\beta}^2}{k_{1-\alpha}^2} \right)} \right\} \quad (8)$$

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.

Für das Rechenbeispiel mit Pu-238 werden die nachstehenden Zahlenwerte verwendet:

$R_{b,\text{Pu-238}}$	=	$0,55 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;	t_m	=	1559663 s;
$R_{0,\text{Pu-238}}$	=	$0,01 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;	t_0	=	1559663 s;
$R_{n,\text{Pu-242}}$	=	$4,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;	$u_{\text{rel}}(R_{n,\text{Pu-242}})$	=	0,01;
$A_{\text{Pu-242}}$	=	$43,2 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$;	$u_{\text{rel}}(A_{\text{Pu-242}})$	=	0,05;
$p_{\alpha,\text{Pu-238}}$	=	1,000;	$u_{\text{rel}}(p_{\alpha,\text{Pu-238}})$	=	0,002;
$p_{\alpha,\text{Pu-242}}$	=	0,9997;	$u_{\text{rel}}(p_{\alpha,\text{Pu-242}})$	=	0,002;
m_{TM}	=	0,01 kg;	$u_{\text{rel}}(m_{\text{TM}})$	=	0,01;
φ	=	$1004,35 \text{ Bq}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$;	$u_{\text{rel}}(\varphi)$	=	0,052.

7.1 Manuelle Auswertung

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

Die spezifische Aktivität $a_{\text{Pu-238}}$ wird nach Gleichung (1) berechnet:

$$a_{\text{Pu-238}} = \frac{43,2 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}}{4,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}} \cdot \frac{0,9997}{1,000} \cdot \frac{1}{0,01 \text{ kg}} \cdot (0,55 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} - 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}) \approx$$

$$\approx 0,5423 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Die Standardunsicherheit der spezifischen Aktivität $u(a_{\text{Pu-238}})$ wird mit den Gleichungen (2) und (3) berechnet:

$$u(a_{\text{Pu-238}}) = \sqrt{0,5422^2 \cdot 2,708 \cdot 10^{-3} + 1004,35^2 \cdot \left(\frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{1559663} + \frac{0,01 \cdot 10^{-3}}{1559663} \right)} \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \approx$$

$$\approx 0,0340 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

mit $u_{\text{rel}}^2(\varphi) = 0,05^2 + 0,002^2 + 0,002^2 + 0,01^2 + 0,01^2 = 2,708 \cdot 10^{-3}$

Die spezifische Aktivität für Pu-238 beträgt für dieses Beispiel:

$$a_{\text{Pu-238}} = (0,5423 \pm 0,0340) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Für die Berechnung der charakteristischen Grenzen werden die Werte der Quantile $k_{1-\alpha}$ von 3 und $k_{1-\beta}$ von 1,645 verwendet. Für die Erkennungsgrenze $a_{\text{Pu-238}}^*$ wird nach Gleichung (4) folgender Wert erhalten:

$$a_{\text{Pu-238}}^* = 3 \cdot 1004,35 \cdot \sqrt{0,01 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{1}{1559663} + \frac{1}{1559663} \right)} \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \approx$$

$$\approx 10,79 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Für die Nachweisgrenze $a_{\text{Pu-238}}^\#$ wird mit den Werten für die Hilfsgrößen nach den Gleichungen (6) und (7)

$$\theta \approx 1 - 1,645^2 \cdot 2,708 \cdot 10^{-3} \approx 0,993$$

$$\psi \approx 1 + \frac{1,645^2}{2 \cdot 10,79 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}} \cdot 1004,35 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \frac{1}{1559663 \text{ s}} \approx 1,081$$

folgender Wert nach Gleichung (5) ermittelt:

$$a_{\text{Pu-238}}^{\#} \approx \frac{10,79 \cdot 10^{-3} \cdot 1,081}{0,993} \cdot \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{0,993}{1,081^2} \cdot \left(1 - \frac{1,645^2}{3^2} \right)} \right\} \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \approx 19,23 \cdot 10^{-3} \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

7.2 Softwaregestützte Auswertung

7.2.1 Ansicht des Excel®-Tabellenblatts

Verfahren zur alphaspektrometrischen Bestimmung der spezifischen Aktivitäten von Plutonium, Americium und Curium in Meeressediment

D-α-SPEKT-MSEDI-01

Version März 2024

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

PROBENBEZEICHNUNG:

Meeressediment

ANALYT: Pu-238

#Anzahl der Eingangsgrößen	9
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	857,81	29,2885	0,000643953	0,018860402	30,69895259
p 2 Aktivität des Tracernuklids	Bq	ATr	4,3200E-02	2,1600E-03	12,55437209	0,027117444	63,4627908
p 3 Nettozählrate der Alpha Linie des Tracers	1/s	RnTr	4,3000E-03	4,3000E-05	-126,127519	0,005423483	2,538506555
p 4 Nulleffektzählrate	1/s	R0r	1,0000E-05	2,5321E-06	-1004,34976	0,002543136	0,558162765
p 5 Summe Emissionsintensitäten Tracer		paTr	0,9997	1,9994E-03	0,542511628	0,001084698	0,101540465
p 6 Summe Emissionsintensitäten Nuklid		par	1,0000	2,0000E-03	-0,54234833	0,001084697	0,101540262
p 7 Trockenmasse des Meeressediments	kg	mTM	0,0100	1,0000E-04	-54,2348332	0,005423483	2,538506555
p 8 Messdauer des Messpräparats	s	tm	1,5597E+06	0	-3,5417E-07	0	0
p 9 Messdauer des Nulleffekts	s	_t0	1,5597E+06	0	0	0	0
(Liste hier verlängerbar)							

MODELL				Erg = phi * Rn			
Abgeleitete Größen				(Formeln)			
h 1 #Bruttozählrate Rb	1/s	Rb	5,5000E-04				
(Liste hier verlängerbar)							
#Nettozählrate Rn	1/s	Rn	5,4000E-04				
#Kalibrierfaktor, verf.-bez.	Bq*s/kg	phi	1,0043E+03				
#Ergebniswert	Bq/kg	Erg	5,4235E-01	0,01922877	<-- von VBA modifizierb. Ergebniswert		
#kombin. Stdunsicherheit	Bq/kg	uErg	3,4040E-02				
#Erkennungsgrenze	Bq/kg		1,0790E-02				
#Nachweisgrenze	Bq/kg		1,9229E-02				

WEITERE ABGELEITETE GRÖßEN

Hilfsgröße Omega		Omega	1,0000E+00
Bester Schätzwert	Bq/kg	BestWert	5,4235E-01
Stdunsicherheit des b. Schätzwerts	Bq/kg		3,4040E-02
u. Grenze d. Überdeckungsintervalls	Bq/kg		4,7563E-01
o. Grenze d. Überdeckungsintervalls	Bq/kg		6,0907E-01

Rechnen!

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

7.2.2 Ansicht der UncertRadio-Resultatseite

The screenshot displays the 'Resultate' (Results) tab of the UncertRadio software. The interface is divided into several sections:

- Gesamtes Messergebnis für ar :**
 - Wert der Ergebnisgröße: 0,54235 Bq/kg
 - erweiterte (Std.-)Unsicherheit: 3,4040E-02 Bq/kg
 - relative erw.(Std.-)Unsicherheit: 6,2764 %
- Beste Schätzwerte nach Bayes:**
 - Wert der Ergebnisgröße: 0,54235 Bq/kg
 - erweiterte (Std.-)Unsicherheit: 3,4040E-02 Bq/kg
 - untere Bereichsgrenze: 0,47563 Bq/kg
 - obere Bereichsgrenze: 0,60907 Bq/kg
- Erweiterungsfaktor k: 1,0**
- Wahrscheinlichkeit (1-gamma): 0,950**
- Erkennungs- und Nachweisgrenze für ar :**
 - Erkennungsgrenze (EKG): 1,0790E-02 Bq/kg Iterationen: 1
 - Nachweisgrenze (NWG): 1,9228E-02 Bq/kg Iterationen: 4
 - k_alpha=3,000, k_beta=1,645 Methode: ISO 11929:2019, iterativ
- Monte Carlo Simulation:**
 - Anzahl der simul. Messungen: 100000
 - Anzahl der Runs: 1
 - relSD%:
 - primärer Messwert: 0,54250 Bq/kg 0,020
 - Unsichh. primärer Messwert: 3,41079E-02 Bq/kg 0,224
 - Wert der Ergebnisgröße: 0,54250 Bq/kg 0,020
 - erweiterte Unsicherheit: 3,41079E-02 Bq/kg 0,224
 - relative erw.(Std.-)Unsicherheit: 6,2872 %
 - untere Bereichsgrenze: 0,47702 Bq/kg 0,060
 - obere Bereichsgrenze: 0,61070 Bq/kg 0,047
 - Erkennungsgrenze (EKG): 1,08088E-02 Bq/kg 0,873
 - Nachweisgrenze (NWG): 1,91719E-02 Bq/kg 0,524
 - aktiver Run: 1 IT: 11 Start MC

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.

Die erforderlichen Chemikalien sind im Verfahren D- α -SPEKT-MWASS-01 zusammengestellt. Zusätzlich werden Eiswürfel, hergestellt aus destilliertem Wasser, benötigt.

8.2 Geräte

Die erforderlichen Geräte sind im Verfahren D- α -SPEKT-MWASS-01 zusammengestellt.

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] 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)*.
- [3] 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.bmu.de/WS1517>. [Letzter Zugriff am 27.10.2023].