

Verfahren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Radon-222 im Trinkwasser

H-Rn-222-TWASS-01

Bearbeiter:

C. Scholtysik

P. Hofmann

M. Beyermann

C. Lucks

Leitstelle für die Überwachung der Radioaktivität in Trinkwasser,
Grundwasser, Abwasser, Klärschlamm, Abfälle und Abwasser aus
kerntechnischen Anlagen

Verfahren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Radon-222 im Trinkwasser

1 Anwendungsbereich

Das Isotop Radon-222 (Rn-222) des Edelgases Radon ist als Glied der U-238-Zerfallsreihe ein natürliches, Alphastrahlung emittierendes Radionuklid mit einer Halbwertszeit von etwa 3,8 Tagen.

Das hier beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Rn-222 ist für klare und farblose Wasserproben beliebiger Herkunft, insbesondere Trink-, Grund-, Quell- und Oberflächenwasser gemäß § 162 Strahlenschutzgesetz [1] geeignet. Die Einhaltung einer Nachweisgrenze in Höhe von $10 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ [2] wird bei Anwendung dieses Verfahrens unter üblichen Randbedingungen, insbesondere bei kurzen Wartezeiten zwischen Probeentnahme und Messung, ohne Schwierigkeiten sichergestellt. Eine radiochemische Probenaufbereitung ist dabei nicht erforderlich.

2 Probeentnahme

Zur Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration nach dem hier beschriebenen Verfahren ist nur ein geringes Probenvolumen von etwa 20 ml bis 500 ml erforderlich.

Bei Entnahme aus Wasserleitungen, Brunnen, Peilrohren oder dergleichen ist vor dem Abfüllen der Probe das abgestandene Wasser in der Leitung auszuspülen, indem man z. B. das Wasser hinreichend lange ablaufen lässt oder abpumpt. Einen Hinweis darauf, ob die Ablaufzeit ausreicht, geben die Vor-Ort-Parameter, wie Temperatur, pH-Wert oder elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers, die konstante Werte annehmen müssen.

Die Vorgehensweise bei der Probeentnahme richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten und den Vorgaben der Untersuchungs- bzw. Messstelle. Im Idealfall können Messpräparate bereits unmittelbar nach der Probeentnahme vor Ort hergestellt werden. Dabei müssen mit Szintillationscocktail gefüllte Zählfläschchen (Vials) aus Glas oder polytetrafluorethylen-beschichtetem Polyethylen hoher Dichte (PTFE-HDPE) am Entnahmeort zur Verfügung stehen.

Anmerkung:

Zählfläschchen ausschließlich aus Polyethylen (PE) sind für diese Messung nicht geeignet, weil Rn-222 durch die Wandung diffundieren kann.

Zur Entnahme des Wasservolumens eignen sich Einwegspritzen an deren Ende ein etwa 5 cm langer Silikonschlauch zur flexibleren Handhabung angebracht wird. Die Probeent-

nahme, veranschaulicht in Abbildung 1a, und die Herstellung des Messpräparats, verdeutlicht in Abbildung 1b, verlaufen wie folgt:

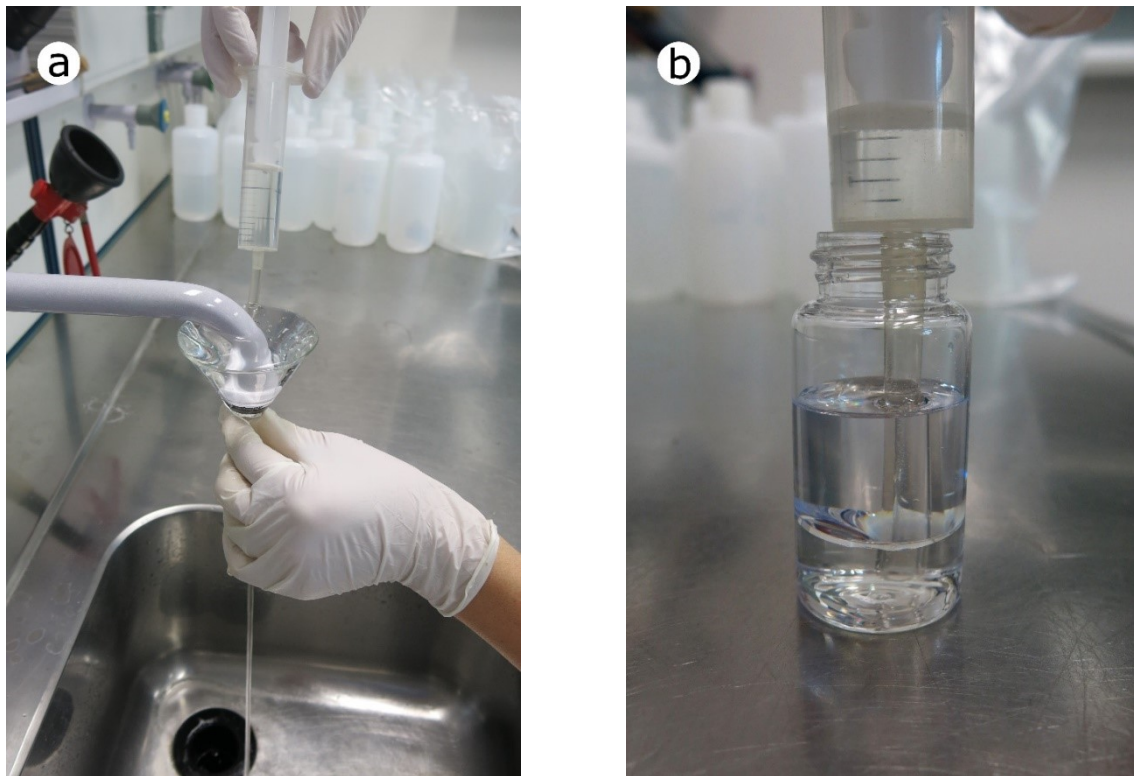


Abb. 1: a) Probeentnahme aus einem laminar fließenden Wasservolumen unter Zuhilfenahme einer Einwegspritze mit 5 cm langen Silikonschlauchaufsatz; b) Vorsichtiges Unterschichten der zu messenden Wasserprobe unter den Szintillationscocktail im Glaszählfläschchen.

Kann die Wasserprobe nicht sofort für die Messung vorbereitet werden, wird ein hinreichendes Volumen (üblicherweise 500 ml) randvoll (ohne Luftvolumen) in einen geeigneten, gasdichten Probenbehälter aus Glas oder Polyethylenterephthalat (PET) gefüllt. Aus dieser Probenflasche wird später die zu messende Teilprobe mit einer geeigneten Pipette oder Einwegspritze entnommen. Das Messpräparat wird wie oben beschrieben hergestellt.

Anmerkung:

Untersuchungsergebnisse zur Eignung verschiedener Behältermaterialien und -verschlüsse finden sich in Anhang A.

Weitere Hinweise zur Probeentnahme sowie zum Transport und zur Aufbewahrung von Proben sind der Vorbemerkung H-VORBEMERK-TWASS-02 zu entnehmen.

3 Analyse

3.1 Prinzip des Verfahrens

Zur Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration wird ein Aliquot der zu untersuchenden Wasserprobe ohne vorherige Aufbereitung mit einem handelsüblichen Szintillationscocktail gemischt und die Messprobe nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Rn-222 und seinen kurzlebigen Folgeprodukten im Flüssigkeitszintillationszähler (LSC) gemessen. Dabei wird die Alphastrahlung des Rn-222 sowie der kurzlebigen Folgeprodukte Po-218 und Po-214 zusammen mit der Betastrahlung der Folgeprodukte Bi-214 und Pb-214 registriert.

3.2 Probenvorbereitung

Zur Herstellung der Messpräparate sind sowohl mit Wasser mischbare als auch unpolare, mit Wasser nicht mischbare Szintillationscocktails einsetzbar. Bei der Verwendung von mit Wasser mischbaren Szintillationscocktails ist zu beachten, dass neben Rn-222 alle anderen, ebenfalls in der zu untersuchenden Wasserprobe enthaltenen Radionuklide zur Impulszählrate beitragen. Die Anwendung unpolarer organischer Szintillationscocktails hat dagegen den Vorteil, dass nur das Edelgas Radon in die organische Phase migriert, da es in unpolaren Lösungsmitteln besser löslich ist als im Wasser.

Anmerkung:

In der Literatur wird für den handelsüblichen Szintillationscocktail Opti-Fluor™ ein Verteilungskoeffizient von 48 angegeben [3]. Weitere, für die Extraktion des Radons aus der Wasserprobe geeignete Szintillationscocktails auf Basis von Dodecylbenzen, Diisopropylnaphthalin oder Mineralöl sind in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** erwähnt.

Störungen bei der Aktivitätsmessung durch andere, im Wasser gelöste Radionuklide können bei Messpräparaten mit einem Zwei-Phasen-Gemisch weitestgehend ausgeschlossen werden. Dazu muss vor Beginn der Messung die Einstellung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen dem in der organischen Phase befindlichen Rn-222 und seinen kurzlebigen Folgeprodukten abgewartet werden.

3.3 Radiochemische Trennung

Eine radiochemische Trennung ist nicht erforderlich.

4 Messung der Aktivität

4.1 Allgemeines

Rn-222 ist Teil der Zerfallsreihe des natürlich vorkommenden U-238 (Abbildung 2). Die Aktivität von Rn-222 wird durch Messung von dessen Alphastrahlung und der Alphastrahlung der kurzlebigen Folgeprodukte Po-218 und Po-214, sowie der Betastrahlung

der kurzlebigen Folgeprodukte Pb-214 und Bi-214 in einem LSC bestimmt. Dabei ist ein Messfenster vorzugeben, das den Energiebereich sämtlicher Aktivitätsbeiträge umfasst. Die Parameter des Messfensters werden durch die Aufnahme des Spektrums eines Kalibrierpräparats ermittelt.

Anmerkung:

Eine Optimierung des Messfensters ist durch die „Figure of Merit“, dem Quotienten aus dem Quadrat der Nachweiswahrscheinlichkeit ε und der Nulleffektzählrate R_0 im Messfenster, möglich [4].

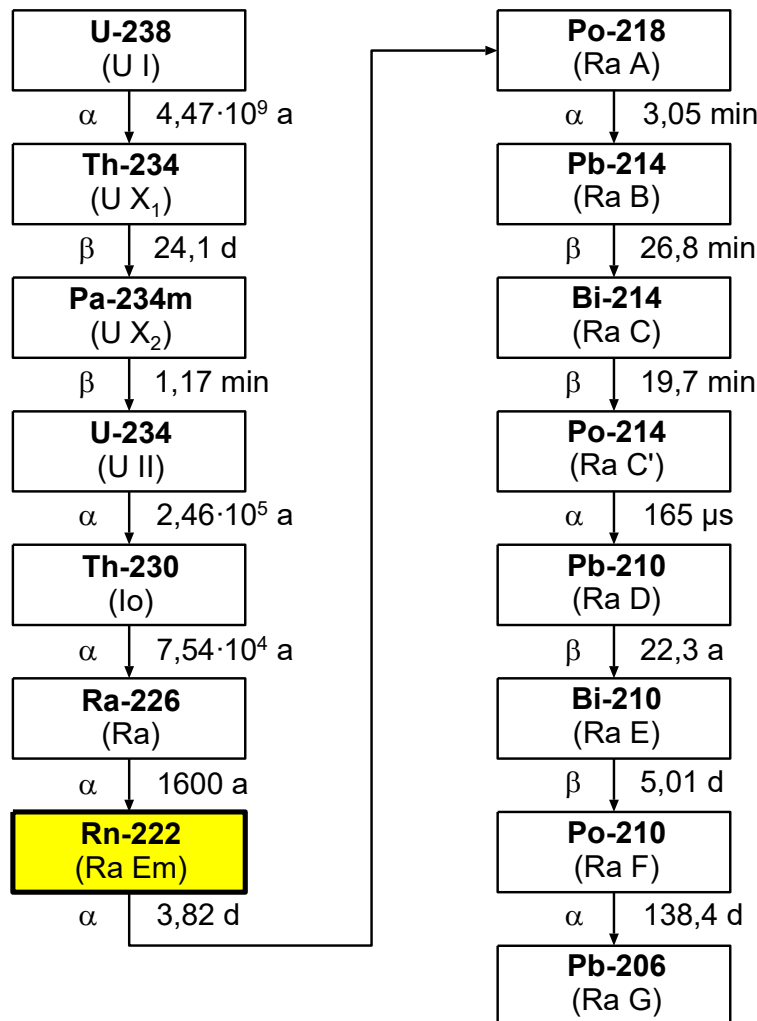


Abb. 2: Uran-238-Zerfallsreihe; Zerfallsprozesse mit Emissionsintensitäten kleiner als 0,1 % wurden nicht dargestellt. Die historischen Bezeichnungen der einzelnen Isotope sind in Klammern angegeben.

4.2 Kalibrierung

Zur Herstellung eines Kalibrierpräparats werden 10 ml einer Ra-226-Standardlösung in einem Zählfläschchen mit 10 ml eines nicht mit Wasser mischbaren Szintillationscocktails überschichtet. Das Zählfläschchen ist fest zu verschließen und zur Einstellung des radio-

aktiven Gleichgewichts zwischen Ra-226 und Rn-222 mit dem Verschluss nach Unten stehend für mindestens 30 Tagen im Kühlschrank aufzubewahren.

Anmerkung:

Die Zählfläschchen werden mit dem Verschluss nach Unten stehend aufbewahrt, um Verluste von Radon und Wasserdampf durch den Verschluss des Zählfläschchens zu vermeiden. Die auf diese Weise gelagerten Kalibrierpräparate können so bis zu drei Jahre verwendet werden.

Vor jeder Messung des Kalibrierpräparats wird das Zählfläschchen kräftig geschüttelt. Nach einer Wartezeit von mindestens drei Stunden zur Einstellung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Rn-222 und dessen kurzlebigen Folgeprodukten wird das Kalibrierpräparat im Flüssigkeitsszintillationszähler gemessen. Die Messdauer beträgt zwischen 600 s und 1 800 s.

Anmerkung:

Bei der Auswertung der Messung des Kalibrierpräparats ist keine Zerfallskorrektur anzuwenden. Die Aktivitäten von Rn-222, das in der organischen Phase nach dem Schütteln abklingt, und Rn-222, das in der wässrigen Phase aus Ra-226 nachgebildet wird, sind identisch. Da das nachgebildete Rn-222 auch ohne Schütteln sehr schnell und nahezu quantitativ in die organische Phase diffundiert, müssen bei der Messung der Kalibrierpräparate die Zeitspanne zwischen dem Schütteln des Präparats und dem Beginn der Messung sowie die Messdauer unberücksichtigt bleiben.

Ein Beispiel für ein Kalibrierspektrum ist in Abbildung 3 dargestellt.

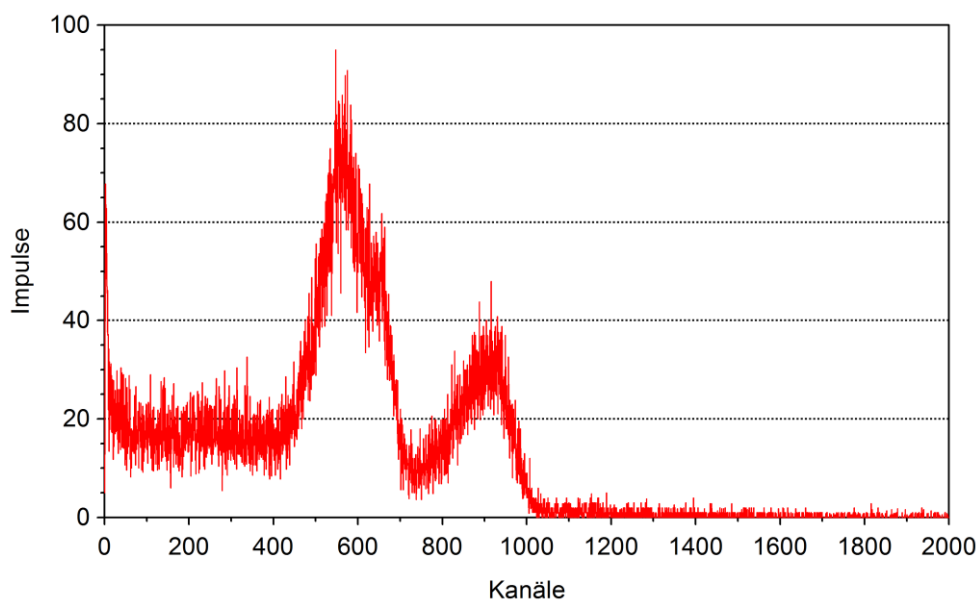


Abb. 3: Beispiel für ein Kalibrierspektrum; zur Herstellung des Kalibrierpräparats wurde der Szintillationscocktail MaxiLight™ verwendet.

Der Kalibrierfaktor φ_A wird nach Gleichung (1) berechnet:

$$\varphi_A = \frac{c_S \cdot V_S}{R_S - R_0} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

- c_s Aktivitätskonzentration der Ra-226-Standardlösung, in $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$;
 V_s Volumen der eingesetzten Standardlösung, in l;
 R_s Bruttozählrate der Standardlösung, in s^{-1} ;
 R_0 Nulleffektzählrate, in s^{-1} .

Um die Unsicherheit des Kalibrierfaktors abzuschätzen, empfiehlt es sich, mindestens drei Kalibrierpräparate unterschiedlicher Ra-226-Aktivität herzustellen und zu messen.

Anmerkung:

Da bei dieser Messung die kurzlebigen Folgeprodukte miterfasst werden, ergibt sich ein auf Rn-222 bezogener Kalibrierfaktor φ_A kleiner als eins, was einer Nachweiswahrscheinlichkeit ε größer als eins entspricht.

4.3 Messung

Die Messpräparate werden unter Verwendung desselben Szintillationscocktails im selben Mischungsverhältnis wie die Kalibrierpräparate hergestellt. Anschließend werden sie, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, bis zum Beginn der Messung mindestens drei Stunden kühl und dunkel aufbewahrt. Wegen der Halbwertszeit des Rn-222 von etwa 3,8 Tagen sollte mit der Messung innerhalb eines Tages begonnen werden.

Anmerkung:

Ist eine längere Aufbewahrung der Messpräparate nicht zu vermeiden, sollten diese immer mit dem Verschluss nach Unten stehend dunkel und kühl gelagert werden.

Bei Verwendung eines mit Wasser mischbaren Szintillationscocktails muss eine Wiederholungsmessung durchgeführt werden, um die Messung störende Alpha- oder Betastrahler auszuschließen; bei der Verwendung unpolarer Szintillationscocktails ist die Wiederholungsmessung nicht zwingend notwendig. Stimmt das Messergebnis der Wiederholungsmessung mit dem Messergebnis der ersten Messung innerhalb der Messunsicherheiten überein, enthält das Messpräparat keine Störstrahler.

5 Berechnung der Analyseergebnisse

5.1 Ergebnisgröße

Die Rn-222-Aktivitätskonzentration c zum Zeitpunkt der Probeentnahme wird nach Gleichung (2) berechnet:

$$c = \varphi \cdot (R_b - R_0) = \varphi \cdot R_n \quad (2)$$

mit

$$\varphi = \frac{\varphi_A}{V} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{t_{\text{Rn-222}}} \cdot t_A} = \frac{\varphi_A}{V} \cdot f_1 \quad (3)$$

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

R_b	Bruttozählrate des Messpräparats, in s^{-1} ;
R_n	Nettozählrate des Messpräparats, in s^{-1} ;
f_1	Zerfallskorrektionsfaktor für Rn-222;
t_A	Zeitspanne zwischen Probeentnahme und Mitte der Messung, in s;
t_{Rn-222}	Halbwertszeit des Rn-222, in s;
V	Probenvolumen, in l;
φ	verfahrensbezogener Kalibrierfaktor, in $Bq \cdot s \cdot l^{-1}$;
φ_A	aktivitätsbezogener Kalibrierfaktor, in $Bq \cdot s$.

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 kombinierte, relative Standardunsicherheit der Rn-222-Aktivitätskonzentration berechnet sich nach Gleichung (4):

$$u_{\text{rel}}(c) = \frac{u(c)}{c} = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(R_n) + u_{\text{rel}}^2(\varphi)} \quad (4)$$

Der relative, statistische Unsicherheitsbeitrag der Nettozählrate R_n bzw. die Typ-A-Unsicherheit ergibt sich entsprechend Gleichung (5):

$$u_{\text{rel}}(R_n) = \frac{u(R_n)}{R_n} = \frac{1}{R_n} \cdot \sqrt{\frac{R_b}{t_m} + \frac{R_0}{t_0}} \quad (5)$$

Die relative Standardunsicherheit des verfahrensbezogenen Kalibrierfaktors $u_{\text{rel}}(\varphi)$ bzw. die Typ-B-Unsicherheit wird nach Gleichung (6) ermittelt.

$$u_{\text{rel}}(\varphi) = \frac{u(\varphi)}{\varphi} = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\varphi_A) + u_{\text{rel}}^2(V)} \quad (6)$$

Dabei bedeuten in den Gleichungen (4) bis (6):

$u_{\text{rel}}(x)$	relative Standardunsicherheit der betrachteten Messgröße x ;
$u(x)$	Standardunsicherheit der betrachteten Messgröße x ;
t_m	Messdauer des Messpräparats, in s;
t_0	Messdauer der Nulleffektmessung, in s.

Die relative Standardunsicherheit des aktivitätsbezogenen Kalibrierfaktors $u_{\text{rel}}(\varphi_A)$ wird mit 15 % abgeschätzt und berücksichtigt Unsicherheiten in Bezug auf die Aktivität des Kalibrierstandards, auf die Repräsentativität der Probe und auf die Extraktion des Radons

in die organische Phase des Szintillationscocktails. Die relative Standardunsicherheit des Probevolumens $u_{\text{rel}}(V)$ entspricht der Unsicherheit bei Entnahme des Probevolumens mit einer Spritze oder Pipette und beträgt etwa 3 %. Die relative Standardunsicherheit des Zerfallskorrektionsfaktor f_1 wird vernachlässigt.

6 Charakteristische Grenzen des Verfahrens

Die Berechnung der charakteristischen Grenzen erfolgt entsprechend der Normenreihe DIN EN ISO 11929 [5]. Für weiterführende Betrachtungen wird auf das Allgemeine Kapitel CHAGR-ISO-01 dieser Messanleitungen verwiesen [6].

6.1 Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze der Rn-222-Aktivitätskonzentration c^* wird nach Gleichung (7) berechnet:

$$c^* = k_{1-\alpha} \cdot \varphi \cdot \sqrt{R_0 \cdot \left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{t_0} \right)} \quad (7)$$

Dabei ist $k_{1-\alpha}$ die Quantile der Standardnormalverteilung für den Fehler 1. Art.

6.2 Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze der Rn-222-Aktivitätskonzentration $c^\#$ wird nach Gleichung (8) ermittelt:

$$c^\# = c^* + k_{1-\beta} \cdot \sqrt{[c^\# \cdot u_{\text{rel}}(\varphi)]^2 + \varphi^2 \cdot \left[\frac{c^\#}{t_m \cdot \varphi} + R_0 \cdot \left(\frac{1}{t_m} + \frac{1}{t_0} \right) \right]} \quad (8)$$

Die iterativ lösbare Gleichung (8) kann nach Quadrierung und Anwendung der Lösungsformel für quadratische Gleichungen in die explizite Gleichung (9) umgewandelt werden:

$$c^\# = \frac{c^* \cdot \psi}{\theta} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{\theta}{\psi^2} \cdot \left(1 - \frac{k_{1-\beta}^2}{k_{1-\alpha}^2} \right)} \right] \quad (9)$$

mit den Hilfsgrößen:

$$\theta = 1 - k_{1-\beta}^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(\varphi) \quad (10)$$

$$\psi = 1 + \frac{k_{1-\beta}^2}{2 \cdot c^*} \cdot \frac{\varphi}{t_m} \quad (11)$$

Dabei ist $k_{1-\beta}$ die Quantile der Standardnormalverteilung für den Fehler 2. Art.

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 werden nachstehende Zahlenwerte verwendet:

R_b	=	$0,40 \text{ s}^{-1}$;	t_m	=	$1\,800 \text{ s}$;
R_0	=	$0,30 \text{ s}^{-1}$;	t_0	=	$6\,000 \text{ s}$;
t_A	=	$108,0 \cdot 10^3 \text{ s}$;	$t_{\text{Rn-222}}$	=	$330,32 \cdot 10^3 \text{ s}$;
V	=	$0,010 \text{ l}$;	$u_{\text{rel}}(V)$	=	$0,03$;
φ_A	=	$0,30 \text{ Bq} \cdot \text{s}$;	$u_{\text{rel}}(\varphi_A)$	=	$0,15$.

7.1 Manuelle Auswertung

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

Der verfahrensbezogene Kalibrierfaktor wird nach Gleichung (3) berechnet:

$$\varphi = \frac{0,30 \text{ Bq} \cdot \text{s}}{0,010 \text{ l}} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{330,32 \cdot 10^3 \text{ s}} \cdot 108,0 \cdot 10^3 \text{ s}} \approx 37,63 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{l}^{-1}$$

Damit wird die Aktivitätskonzentration von Rn-222 nach Gleichung (2) erhalten:

$$c \approx 37,63 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{l}^{-1} \cdot (0,40 \text{ s}^{-1} - 0,3 \text{ s}^{-1}) \approx 3,763 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

Für die Berechnung der Standardunsicherheit werden zunächst die Werte der relativen Standardunsicherheiten der Nettozählrate und des verfahrensbezogenen Kalibrierfaktors nach den Gleichungen (5) und (6) berechnet:

$$u_{\text{rel}}(R_n) = \frac{1}{0,10 \text{ s}^{-1}} \cdot \sqrt{\frac{0,40 \text{ s}^{-1}}{1800 \text{ s}} + \frac{0,30 \text{ s}^{-1}}{6000 \text{ s}}} = 0,1650$$

$$u_{\text{rel}}(\varphi) = \sqrt{0,15^2 + 0,03^2} = 0,1530$$

Mit diesen Werten und nach Umstellung von Gleichung (4) wird die Standardunsicherheit der Aktivitätskonzentration wie folgt ermittelt:

$$u(c) \approx 3,763 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \sqrt{0,165^2 + 0,153^2} \approx 0,8467 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

Die Rn-222-Aktivitätskonzentration in der Probe beträgt damit

$$c = (3,763 \pm 0,847) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

Mit dem Wert $k_{1-\alpha}$ von 3 wird nach Gleichung (7) folgende Erkennungsgrenze erhalten:

$$c^* \approx 3 \cdot 37,63 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \sqrt{0,30 \text{ s}^{-1} \cdot \left(\frac{1}{1800 \text{ s}} + \frac{1}{6000 \text{ s}} \right)} \approx 1,662 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

Mit einem Wert von 1,645 für $k_{1-\beta}$ und den nach den Gleichungen (10) und (11) ermittelten Werten für die Hilfsgrößen θ und ψ

$$\theta \approx 1 - 1,645^2 \cdot 0,153^2 \approx 0,9367$$

$$\psi \approx 1 + \frac{1,645^2}{2 \cdot 1,662 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}} \cdot \frac{37,63 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{l}^{-1}}{1800 \text{ s}} \approx 1,017$$

berechnet sich die Nachweisgrenze nach Gleichung (9):

$$c^{\#} \approx \frac{1,662 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1} \cdot 1,017}{0,9367} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \frac{0,9367}{1,017^2} \cdot \left(1 - \frac{1,645^2}{3^2} \right)} \right] \approx 2,897 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$$

Anmerkung:

Bei einem Probevolumen von 0,010 l sind Nachweisgrenzen von ca. 3 Bq·l⁻¹ realistisch. Durch eine Verlängerung der Messdauer kann die Nachweisgrenze weiter gesenkt werden.

7.2 Softwaregestützte Auswertung

7.2.1 Ansicht des Excel®-Tabellenblatts

Verfahren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Radon-222 im Trinkwasser

H-Rn-222-TWASS-01

Version Juni 2024

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

PROBENBEZEICHNUNG:

Trinkwasser

ANALYT: Rn-222

#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					UNSICHERHEITSBUDGET		
#Werte der Eingangsgrößen	Einheit	Excel-Variable	Eingabewerte	abs. StdUns.	partielle Ableitungen	Unsicherh.- Budget	Budget in %
p 1 #Bruttoimpulsanzahl Nb		Nb	720	26,833	0,020906061	0,560968486	43,89815783
p 2 Messdauer		tm	1800	0	-0,00836242	0	0
p 3 Nulleffektzählrate		R0	0,300	7,071E-03	-37,6309101	0,266090717	9,877085515
p 4 Messdauer Nulleffekt		t0	6000	0	0	0	0
p 5 Halbwertszeit Rn-222		_tRn222	3,3032E+05	0	-2,5818E-06	0	0
p 6 Sammelzeitraum		tA	1,0800E+05	0	7,89651E-06	0	0
p 7 Volumen Aliquot		V	0,01	3,000E-04	-376,308724	0,112892617	1,777871837
p 8 aktivitätsbezogener Kalibrierfaktor (Liste hier verlängerbar)		_phiA	0,300	0,045	12,54363669	0,564463651	44,44688482
MODELL							
Abgeleitete Größen					Erg = phi * Rn		
					(Formeln)		
h 1 #Bruttozählrate Rb	1/s	Rb	0,4000				
h 2 Zerfallskorrektionsfaktor Rn-222 (Liste hier verlängerbar)		_f1	1,2544				
#Nettozählrate Rn	1/s	Rn	0,1000				
#Kalibrierfaktor, verf.-bez.		phi	37,631				
#Ergebniswert		Erg	3,763	2,8968536	<-- von VBA modifizierb. Ergebniswert		
#kombin. Stdunsicherheit		uErg	0,847				
#Erkennungsgrenze			1,662				
#Nachweisgrenze			2,897				

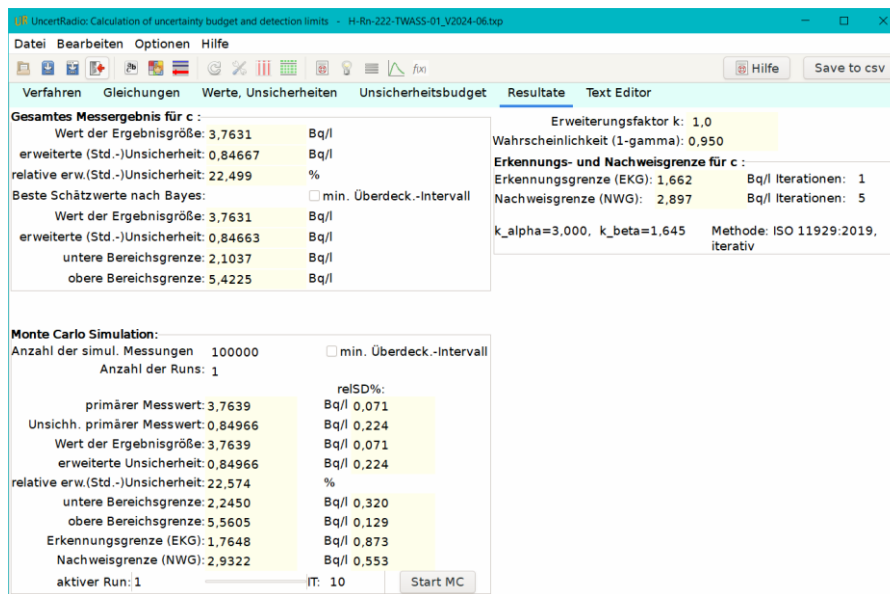
WEITERE ABGELEITETE GRÖßEN

Hilfsgröße Omega	Omega	1,000
Beste Schätzwert	BestWert	3,763
Stdunsicherheit des b. Schätzwerts		0,847
u. Grenze d. Überdeckungsintervalls		2,104
o. Grenze d. Überdeckungsintervalls		5,423

Rechnen!

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

7.2.2 Ansicht der UncertRadio-Resultatseite



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.

- Ra-226-Standardlösung;
- Szintillationscocktail: z. B. Ultima Gold F™, MaxiLight™, Opti-Fluor O™;
- Wasser, entemaniiert: aus deionisiertem Wasser:

Durchleiten von Stickstoff oder radonfreier Luft durch deionisiertes Wasser; die Dauer hängt u. a. vom Verhältnis zwischen dem durchgeleiteten Luftvolumen und dem Wasservolumen ab.

8.2 Geräte

Für das Verfahren wird folgende Ausstattung benötigt:

- übliche Ausrüstung eines radiochemischen Labors;
- Einwegspritzen, Nennvolumen 20 ml;
- Silikonschlauch;
- Zählfläschchen aus K-40-armen Glas oder polytetrafluorethylen-beschichtetem Polyethylen hoher Dichte (PTFE-HDPE), Nennvolumen 20 ml;
- Flüssigkeitsszintillationsspektrometer (LSC).

Anhang A

Dichtheit von Probeentnahmegefäßen

A.1 Einleitung

Für die Rn-222-Probeentnahme wurden an zwei verschiedenen Materialien für Probeentnahmegefäße (PET-Veral-Flasche und Glas-Sirup-Flasche) mit verschiedenen Verschlüssen (Aluminium beschichteter Schraubdeckel und konischer PE-Schraubdeckel) Dichtheitsprüfungen durchgeführt.

A.2 Durchführung

Dazu wurden Wässer mit einer Rn-222-Aktivitätskonzentration von $(673 \pm 75) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ in den jeweiligen Probeentnahmegefäßen bis zu 13 Tage bei Raumtemperatur aufbewahrt. Die zu verschiedenen Zeitpunkten – ca. alle drei Tage – aus der Dreifachbestimmung erhaltenen Messwerte sind in Abbildung A1 als Mittelwert zusammen mit der einfachen Standardmessunsicherheit dargestellt. Zusätzlich wurde an den gewählten Probeentnahmegefäßen ein Postversandszenario simuliert, in dem diese über drei Arbeitstage, d. h. insgesamt etwa 13 Stunden, auf einer Schüttelmaschine geschüttelt wurden. Die anschließende Probeentnahme und Messung erfolgten wie in den Abschnitten 2 und 4.2 beschrieben.

Abbildung A1 verdeutlicht, dass es bezogen auf die Gasdichtigkeit innerhalb der Standardmessunsicherheit keinen Unterschied zwischen der PET-Veral-Flasche und der Glas-Sirup-Flasche besteht. Basierend auf dieser Testreihe kann davon ausgegangen werden, dass beide Gefäßmaterialien mit den jeweiligen Verschlüssen für den Versand und die Lagerung von Proben für die Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration geeignet sind.

Anmerkung:

Das Ergebnis des Schüttelszenarios für die Glas-Sirup-Flasche mit Aluminium beschichteten Schraubdeckel weicht von dem der einfachen Lagerung nur um $0,2 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ ab. Folglich liegen die Punkte in Abbildung A1 unmittelbar übereinander und sind nicht separat visuell erfassbar.

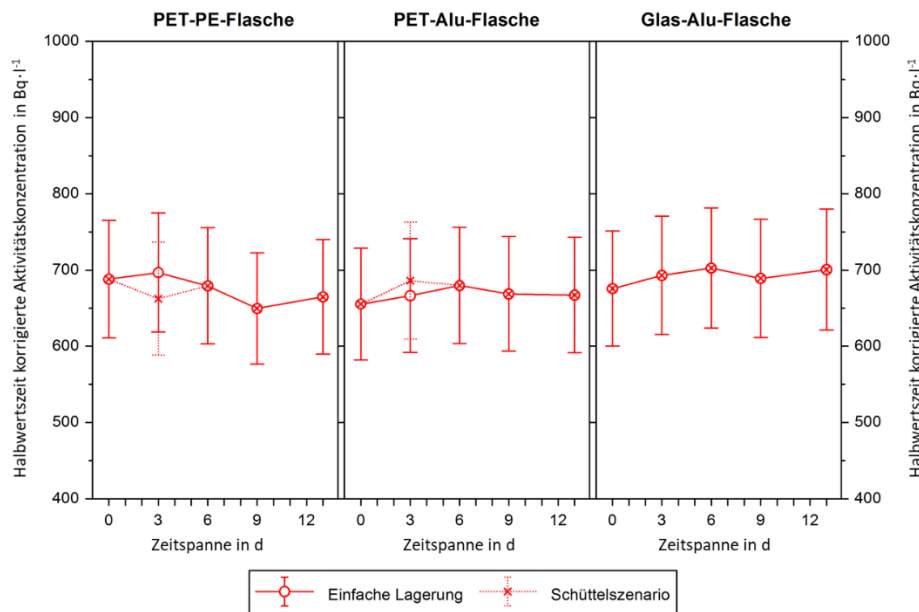


Abb. A1: Messergebnisse der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Abhängigkeit von der Standzeit der Probe, dem Probeentnahmegefäß und dem Verschluss.

Literatur

- [1] Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), zuletzt geändert durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 15).
- [2] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016. Bundesgesetzblatt, 2016, Teil I Nr. 12, S. 459.
- [3] Zouridakis, N., Ochsenkühn, K. M., Savidou, A.: *Determination of uranium and radon in potable water samples*. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, Vol. 61 (2), S. 225-232.
- [4] L'Annunziata, M. F., Kessler, M. J.: *Chapter 7 - Liquid Scintillation Analysis: Principles and Practice*. In: L'Annunziata, M. F. (Hrsg.): Handbook of Radioactivity Analysis Amsterdam: Academic Press, 2012, S. 423-573.
- [5] 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 - 3)*.
- [6] 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].