

**Verfahren zur Bestimmung der  
Aktivitätskonzentrationen von Radionukliden  
aufgrund einer erhöhten künstlichen  
Gesamt-Gamma-Aktivitätskonzentration**

D- $\gamma$ -GESAMT-MWASS-02

Bearbeiter:

M. Grüttmüller

M. Martens

K. Becker

S. Schmied

C. Wedekind

G. Kanisch

Leitstelle für Meerwasser, Meeresschwebstoff und -sediment

# **Verfahren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen von Radionukliden aufgrund einer erhöhten künstlichen Gesamt-Gamma-Aktivitätskonzentration**

## **1 Anwendungsbereich**

Das nachstehend beschriebene Verfahren kommt zur Anwendung, wenn der im Verfahren D-γ-GESAMT-MWASS-01 beschriebene Schwellenwert der künstlichen Gesamt-Gamma-Aktivitätskonzentration von  $1\,000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  aufgrund eines erhöhten Eintrags künstlicher Radionuklide überschritten ist. Aus den erhaltenen Impulshöhenspektren können dann schnell einzelne Radionuklide beziehungsweise Radionuklidgemische qualitativ erkannt und gegebenenfalls ihre Aktivitätskonzentrationen abgeschätzt werden. Für eine genauere Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen radioaktiver Stoffe im Meerwasser ist ein für den jeweiligen Ereignisfall geeignetes Verfahren einzusetzen.

## **2 Probeentnahme**

Eine Probeentnahme ist nicht erforderlich.

## **3 Analyse**

### **3.1 Prinzip des Verfahrens**

Bei diesem integralen Verfahren werden die Zählraten infolge der Gammastrahlung im Meerwasser quasi-kontinuierlich, d. h. zyklisch mit einer Messdauer von einer Stunde, mit Thallium-dotierten Natriumiodid-Detektoren (NaI(Tl)-Detektoren) direkt ermittelt.

Das Verfahren gestattet die Aufnahme und Auswertung von Impulshöhenspektren in Form von Stundenspektren, die bei Bedarf zu Tages- oder Wochenspektren summiert werden. Obwohl das geringe Energieauflösungsvermögen der NaI(Tl)-Detektoren eine nuklidspezifische Auswertung nur begrenzt zulässt, können einzelne Radionuklide wie Caesium-137 (Cs-137) und störfalltypische Radionuklidgemische erkannt und auf Grund der unterschiedlichen Gammastrahlungsenergien von natürlichen radioaktiven Stoffen unterschieden werden [1, 2, 3, 4].

### **3.2 Probenvorbereitung**

Eine Probenvorbereitung ist nicht erforderlich.

### **3.3 Radiochemische Trennung**

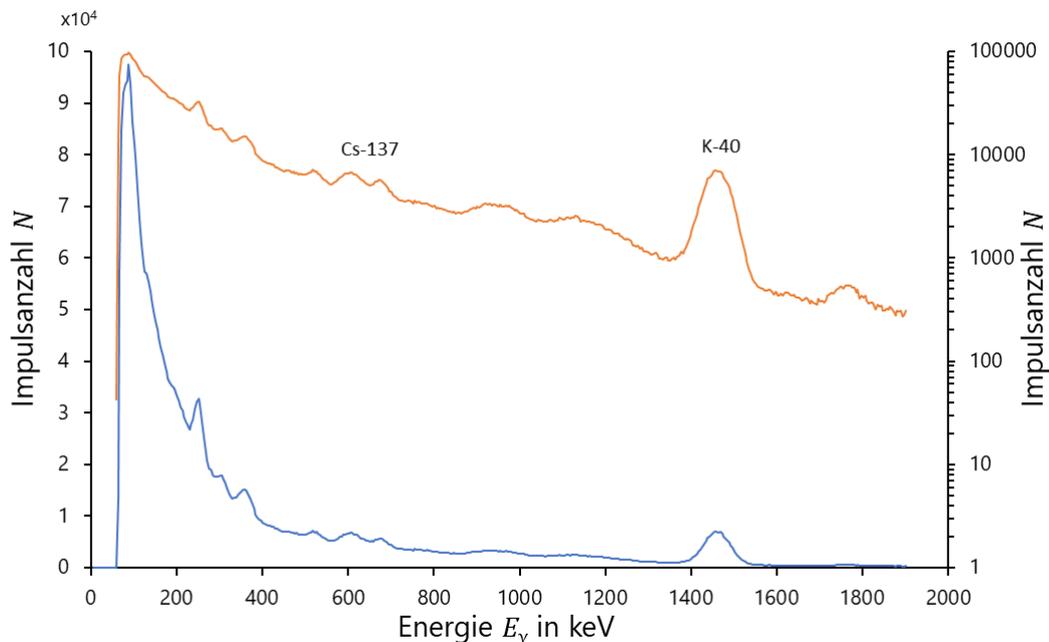
Eine radiochemische Trennung ist nicht erforderlich.

## 4 Messung der Aktivität

### 4.1 Allgemeines

Für grundlegende Informationen wird auf die Messanleitung D- $\gamma$ -GESAMT-MWASS-01 verwiesen.

In den Impulshöhenspektren in Abbildung 1 ist neben den natürlichen Radionukliden aus der Uran-/Radium-Zerfallsreihe und dem K-40 im Wasser der Ostsee noch Cs-137, das größtenteils aus dem Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl stammt, zu erkennen.



**Abb. 1:** Beispiel eines Wochenspektrums der Station Kühlungsborn. Die Kalibrierung des Spektrums (blau: y-Achse linear, rot: y-Achse logarithmisch) erfolgte über K-40.

Um aus solchen relativ gut zu identifizierenden Gammalinien nuklidspezifische Aussagen treffen zu können, wird die spektrometrische Nachweiswahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{Sp}(E_\gamma)$  der Messeinrichtung benötigt. Daraus wird das nuklidspezifische Nachweisvermögen  $\varepsilon_{SpN}(E_\gamma)$  zur Berechnung der Aktivitätskonzentration abgeleitet.

### 4.2 Kalibrierung

#### 4.2.1 Experimentelle Kalibrierung

Für die Messanordnung „Sonde im Schiffskoker“ ist die experimentelle Kalibrierung der spektrometrischen Nachweiswahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{Sp}(E_\gamma)$  nicht sinnvoll möglich. Das vorliegende Verfahren kann deshalb nur für die Messanordnung „Sonde frei im Wasser hängend“ angewendet werden. Die Kalibrierung für diese Messanordnung ist in Anhang A.2 des Verfahrens D- $\gamma$ -GESAMT-MWASS-01 beschrieben.

Die spektrometrische Nachweiswahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{\text{Sp}}(E_\gamma)$  für ein ausgewähltes Radionuklid mit einer metrologisch rückführbaren Aktivitätskonzentration  $c$  wird bei einer Impulsanzahl  $N_{\text{Sp}}$  und einer Messdauer  $t_m$  nach Gleichung (1) berechnet:

$$\varepsilon_{\text{Sp}}(E_\gamma) = \frac{N_{\text{Sp}}}{c \cdot p_\gamma \cdot t_m} \quad (1)$$

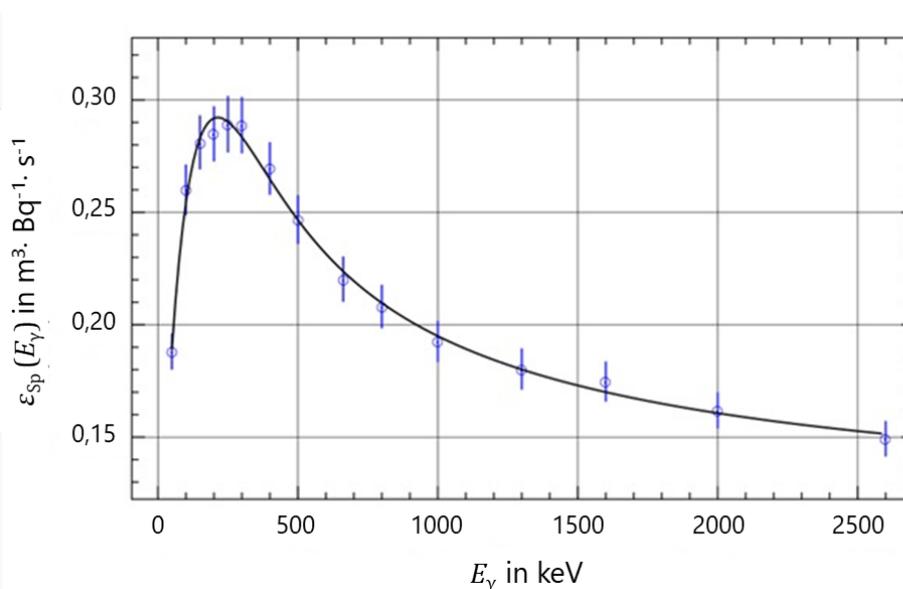
Das nuklidspezifische Nachweisvermögen  $\varepsilon_{\text{SpN}}(E_\gamma)$  wird durch Multiplikation mit der Emissionsintensität der Gammalinie  $p_\gamma$  entsprechend Gleichung (2) erhalten:

$$\varepsilon_{\text{SpN}}(E_\gamma) = \varepsilon_{\text{Sp}}(E_\gamma) \cdot p_\gamma \quad (2)$$

#### 4.2.2 Kalibrierung mittels Monte Carlo-Simulation

Wegen des großen Aufwandes der experimentellen Kalibrierung wird das Nachweisvermögen  $\varepsilon_{\text{Sp}}$  für die In-situ-Messung in Meerwasser bevorzugt mit Monte Carlo-Simulation durchgeführt [5, 6, 7]. Anhand der im PENELOPE-Bericht [8] beschriebenen Algorithmen wurde eine Anwendung programmiert, die die Nachweiswahrscheinlichkeit eines NaI(Tl)-Detektors berechnet, wobei der NaI(Tl)-Kristall von einem wasserdichten, 8 mm dicken Polyamidgehäuse (Ertalon® 6 xau) umgeben ist. Der Detektor befindet sich in der Mitte einer Wasserkugel. Der Radius ist dabei abhängig von der Gammaenergie und reicht von 31 cm für 50 keV bis 146 cm für 2000 keV (Kugelvolumina von 0,12 m<sup>3</sup> bis 13 m<sup>3</sup>).

In Abbildung 2 wird die auf diese Art berechnete energieabhängige spektrometrische Nachweiswahrscheinlichkeit gezeigt.



**Abb. 2:** Energieabhängige, mit der MC-Simulation erhaltene spektrometrische Nachweiswahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{\text{Sp}}(E_\gamma)$  (blaue Kästchen) und die (durchgezogene) Kurve eines mit sechs Koeffizienten an die Werte angepassten Polynoms als Funktion von  $\ln(E_\gamma)$ .

In Tabelle 1 sind die spektrometrischen Nachweiswahrscheinlichkeiten  $\varepsilon_{Sp}(E_{\gamma})$  zur Berechnung des nuklidspezifischen Nachweisvermögens  $\varepsilon_{SpN}(E_{\gamma})$  einer Auswahl relevanter Radionuklide zusammengestellt.

**Tab. 1:** Kalibrierdaten für ausgewählte Radionuklide bei der Messanordnung „Sonde frei im Wasser hängend“

Radionuklid	Radionukliddaten[9]		spektrometrische Nachweiswahrscheinlichkeit (Liniennachweiswahrscheinlichkeit)*
	$E_{\gamma}$ in MeV	$p_{\gamma}$	$\varepsilon_{Sp}$ in $m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$
K-40	1,46	0,11	$0,17 \cdot 10^{-3}$
Mn-54	0,83	1,0	$0,21 \cdot 10^{-3}$
Zn-65	1,12	0,50	$0,19 \cdot 10^{-3}$
Ru-106	0,51	0,21	$0,24 \cdot 10^{-3}$
	0,62	0,10	$0,23 \cdot 10^{-3}$
	1,06	0,015	$0,19 \cdot 10^{-3}$
I-131	0,36	0,81	$0,27 \cdot 10^{-3}$
	0,64	0,07	$0,23 \cdot 10^{-3}$
Cs-134	0,60	0,98	$0,23 \cdot 10^{-3}$
	0,80	0,85	$0,21 \cdot 10^{-3}$
	0,57	0,16	$0,24 \cdot 10^{-3}$
Cs-137	0,66	0,85	$0,22 \cdot 10^{-3}$
Ce-144	0,13	0,11	$0,27 \cdot 10^{-3}$

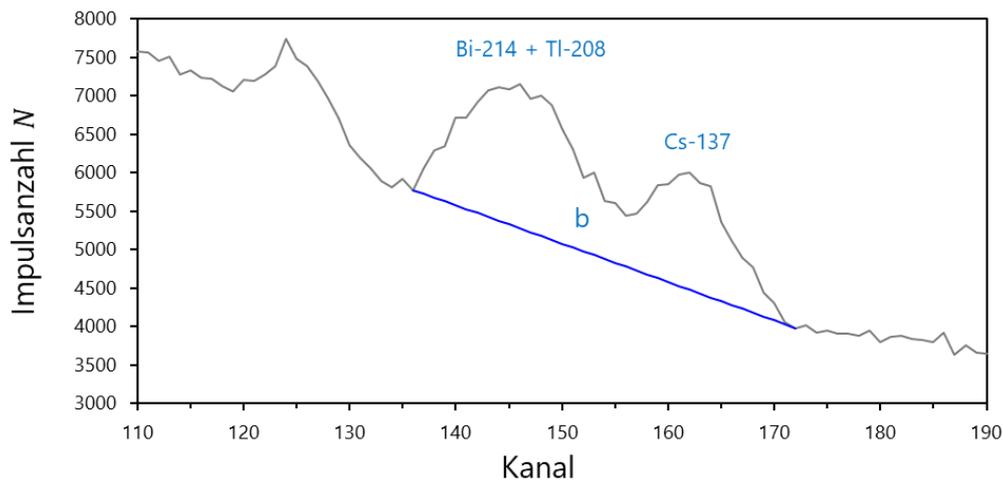
\* berechnet mit Monte Carlo-Simulation

### 4.3 Messung

Für grundlegende Informationen wird auf das Verfahren D- $\gamma$ -GESAMT-MWASS-01 verwiesen.

### 4.4 Interferenzen

Wegen des geringen Energieauflösungsvermögens der verwendeten NaI(Tl)-Detektoren treten häufig Überlagerungen von Gammalinien verschiedener Radionuklide, sogenannte Multipletts, auf. In Abbildung 3 wird ein Multiplett im Kanalbereich b von 135 bis 172 bestehend aus den Linien der natürlichen Radionuklide Thallium-208 (Tl-208) und Bismut-214 (Bi-214) sowie der des künstlichen Radionuklids Cs-137 gezeigt [10]. Die Vorgehensweise bei der Auswertung eines solchen Multipletts ist im Abschnitt 5.4 des Allgemeinen Kapitels  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen beschrieben.



**Abb. 3:** Multipllett aus Linien der natürlichen Radionuklide Tl-208 und Bi-214 sowie des künstlichen Radionuklids Cs-137 im Kanalbereich b

Für weitergehende Informationen zu Interferenzen wird auf das Allgemeine Kapitel  $\gamma$ -SPEKT/INTERF dieser Messanleitungen verwiesen.

## 5 Berechnung der Analyseergebnisse

### 5.1 Gleichungen zur Berechnung

Falls eine ungestörte Gammalinie im NaI-Spektrum vorliegt, wird der Untergrundbeitrag mit Hilfe des Trapezverfahrens nach dem Abschnitt 5.3.1 des Allgemeinen Kapitels  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen bestimmt.

Da die meisten Linien im Impulshöhenspektrum eines NaI(Tl)-Detektors nicht als Einzellinien, sondern als Multipllett auftreten (siehe Abschnitt 4.4), wird bei der Auswertung ein Least-squares-Verfahren zur Linienanpassung eingesetzt, das in den Abschnitten 5.3.3 und 5.4 des Allgemeinen Kapitels  $\gamma$ -SPEKT/GRUNDL dieser Messanleitungen beschrieben wird. Anschließend wird ein nicht-lineares Fitten mit dem Levenberg-Marquardt-Verfahren durchgeführt, bei dem die im linearen Fitten zunächst konstant gehaltenen Parameter ebenfalls angepasst werden. Das zum Fitten verwendete Excel-Datenblatt wird in Abbildung 4, das Impulshöhenspektrum mit angepasster Fitfunktion in Abbildung 5 gezeigt.

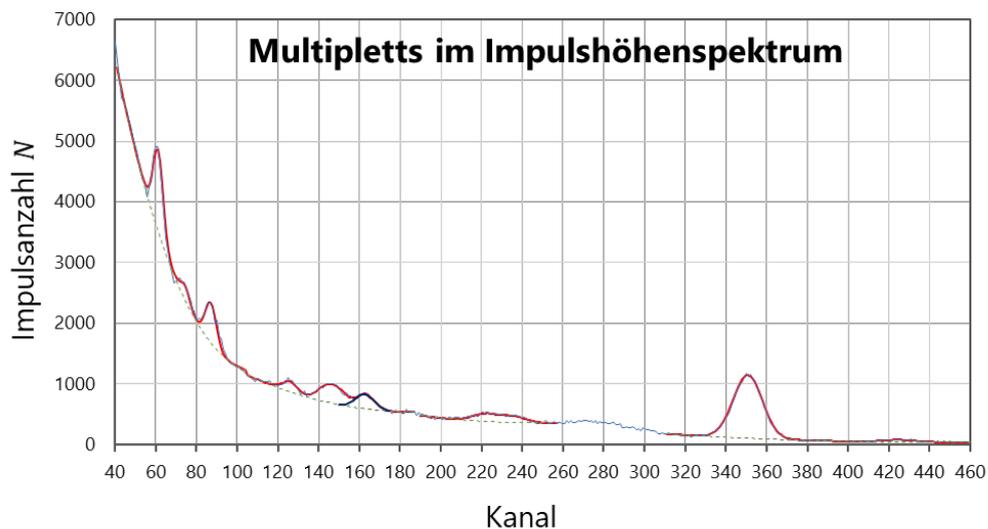
Die Berechnung der Aktivitätskonzentration erfolgt aus den angepassten Nettolinienflächen durch Multiplikation mit einem detektor- und nuklidspezifischen Kalibrierfaktor, d. h. unter Verwendung des Detektornachweisvermögens und der Gamma-Emissionsintensität des betrachteten Radionuklids. Spezielle Ausführungen zur Berechnung von Ergebnisgröße und Standardunsicherheit unter Einsatz von Verfahren mit linearer Entfaltung finden sich im Abschnitt 4.2 und im Anhang C.3 des Allgemeinen Kapitels CHAGR-ISO-01 dieser Messanleitungen sowie in Tabelle 7 der Literatur [11].

**Anmerkung:**

Der Einfluss der Wasserüberdeckung kommt in diesem Fall nicht zum Tragen, da bei Auswertung mit der linearen Spektrententaltung nur Nettozählraten betrachtet werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V		
1	Kühlungsborn																							
2	08.02.2016 00:00																							
3				sigma=fwhm/2,355			Wert	sigf	u(pai)	urel(pai)	Wert	sigf	u(pai)	urel(pai)	Wert	sigf	u(pai)	urel(pai)	Wert	sigf	u(pai)	urel(pai)	Wert	
4	Farblehre:	Eingabefelder	ROI-Anfangskanal	#kl			63					105					313							0
5		NBA-Ausgabe	ROI-Endkanal	kr			104					187					392							0
6		Excel_formeln		tm			86400					86400					86400							86400
7				Anzahl UG-Parameter			3					3					3							3
8				Breitenparameter, Kanal			3,230					4,040					6,878							
9				tail			3,972					11,196					31,255							
10				1, 2 oder 3 UG-Parameter			3620,17					4917,30					3620,47							
11				ug2			-44,35					-116,29					-44,36							
12	#k_alpha	3		ug3			7,93					25,10662					7,92866							
13	k_beta	1,645		1 bis 5 Peaklagenwerte, in Kanälen;			87,333	1,000	338,3			125,954	0,915	511			350,820	1,000	1460,8					
14				plage1			0,971					142,979	0,992	583,2			0,992							
15				plage2			1,075					149,920	1,018	609,3			1,041							
16				plage3			1,109					162,801	1,069	661,7										
17				plage4																				
18				plage5																				
19				1 bis 5 Peakflächen, in Impulsen			5950,6		563,2	0,0947		1767,0		325,0	0,1839		18807,3		221,8	0,0118				
20				pa1					#DIV/0!			2281,2		370,4	0,1624				#DIV/0!					
21				pa2					#DIV/0!			2320,0		480,4	0,2071				#DIV/0!					
22				pa3					#DIV/0!			2736,7		353,6	0,1292				#DIV/0!					
23				pa4					#DIV/0!										#DIV/0!					
24				pa5					#DIV/0!										#DIV/0!					
25				Auswahl Aktion																				
26									ChisqR:	7,663				ChisqR:	0,669				ChisqR:	0,709				
27				2. linear; 3. Parabel			3												#Fwhm-Kal:					
28				npEK															hwb0 (keV)					
29				e0 (keV)			-13,358		u(e0)	1,880		Chi2_Ekal:							hwb1 (keV/keV)					
30				e1 (keV/Kanal)			4,132		u(e1)	0,00699		1,943												
31				e2			0,00012703			0,00000														
32				#Effi_Pars																				
33				effp1-6			0,01237096	-0,0115	0,004124	-0,00071	5,8E-05	-1,849E-06												
34				eps = Polynom(ln(E(keV)))																				
35																								
36				spezielle Trennpunkte (Kanäle):			111																	

**Abb. 4:** Aufbau des Excel-Datenblatts für die Parametervorgaben zur Anpassung des Modells der Auswertung an das Impulshöhenspektrums



**Abb. 5:** Impulshöhenspektrum mit angepasster Fitfunktion;  
hellblau – gemessenes Impulshöhenspektrum  
rot – Fitfunktion  
grün gestrichelt – Untergrundpolynom  
dunkelblau – Linie des betrachteten Radionuklids Cs-137

### 5.1.1 Ergebnisgröße

Die Aktivitätskonzentration  $c_r$  des Radionuklids  $r$  wird nach Gleichung (3) berechnet:

$$c_r = R_{n,r} \cdot \varphi_{SpN,r} \quad (3)$$

Dabei bedeuten:

$c_r$  Aktivitätskonzentration des Radionuklids  $r$ , in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ;

$\varphi_{\text{SpN},r}$  verfahrensbezogener Kalibrierfaktor für das Radionuklid  $r$ , in  $\text{Bq}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ :

$$\varphi_{\text{SpN},r} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{SpN}}(E_\gamma)}$$

$\varepsilon_{\text{SpN},r}$  nuklidspezifisches Nachweisvermögen des Radionuklids  $r$ , in  $\text{m}^3\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

$R_{n,r}$  aus der Linienanpassung erhaltene Nettozählrate der betrachteten Gammalinie des Radionuklids  $r$ , in  $\text{s}^{-1}$ .

### 5.1.2 Standardunsicherheit der Ergebnisgröße

Die Standardunsicherheit  $u(c_r)$  der Aktivitätskonzentration des Radionuklids  $r$  wird nach Gleichung (4) berechnet:

$$u(c_r) = c_r \cdot \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\varphi_{\text{SpN},r}) + \varphi_{\text{SpN},r}^2 \cdot u^2(R_{n,r})} \quad (4)$$

Darin bedeuten:

$u(c_r)$  Standardunsicherheit der Aktivitätskonzentration des Radionuklids  $r$ , in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ;

$u_{\text{rel}}(\varphi_{\text{SpN},r})$  relative Standardunsicherheit des verfahrensbezogenen Kalibrierfaktors für das Radionuklid  $r$ ;

$u(R_{n,r})$  Standardunsicherheit der Nettozählrate der betrachteten Gammalinie des Radionuklids  $r$ , in  $\text{s}^{-1}$ .

## 5.2 Rechenbeispiel

Ein Rechenbeispiel kann hier nicht durchgeführt werden, da für eine manuelle Berechnung die zugrunde liegenden Gleichungen zu aufwändig sind. Für die erforderliche, nicht-lineare Spektrenentfaltung wird eine Excel-VBA-Anwendung verwendet (siehe Abbildung 4) [11].

## 5.3 Unsicherheiten der Analyseergebnisse

Die Standardunsicherheit des Analyseergebnisses beinhaltet die Beiträge der Zählstatistik, der Kalibrierung, der Emissionsintensität und der Lage der Linienmaxima. Die Standardunsicherheit der Messdauer wird vernachlässigt.

## 6 Charakteristische Grenzen des Verfahrens

Die Berechnung der charakteristischen Grenzen erfolgt entsprechend der Normenreihe DIN EN ISO 11929 [12]. Weiterführende Betrachtungen zu den charakteristischen Grenzen finden sich im Allgemeinen Kapitel CHAGR-ISO-01 dieser Messanleitungen.

Für das oben beschriebene Verfahren können die Gleichungen der charakteristischen Grenzen nur rechnergestützt gelöst werden.

### 6.1 Gleichungen zur Berechnung

#### 6.1.1 Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze der Aktivitätskonzentration  $c_r^*$  wird nach Gleichung (5) berechnet.

$$c_r^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0) \quad (5)$$

Darin bedeuten:

$c_r^*$  Erkennungsgrenze der Aktivitätskonzentration des Radionuklids  $r$ , in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $k_{1-\alpha}$  Quantil der standardisierten Normalverteilung für  $\alpha = 0,0014$ .

#### 6.1.2 Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration  $c_r^\#$  wird entsprechend der impliziten Gleichung (6) ermittelt.

$$c_r^\# = c_r^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(c_r^\#) \quad (6)$$

Darin bedeuten:

$c_r^\#$  Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration des Radionuklids  $r$ , in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  
 $k_{1-\beta}$  Quantil der standardisierten Normalverteilung für  $\beta = 0,05$ .

#### 6.1.3 Grenzen des Überdeckungsintervalls

Eine Betrachtung der Grenzen des Überdeckungsintervalls ist nicht erforderlich.

### 6.2 Rechenbeispiel

Mit der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Excel-VBA-Anwendung werden die Erkennungs- und Nachweisgrenzen iterativ ermittelt.

## 7 Softwaregestützte Auswertung

### 7.1 Ansicht des Excel-Tabellenblatts

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Kühlungsborn																					
2	09.02.2016 09:00			sigma=fwhm/2,355		Wert	sigf	u(pai)	urel(pai)		Wert	sigf	u(pai)	urel(pai)		Wert	sigf	u(pai)	urel(pai)		Wert	
3						MP1					MP2					MP3						MP0
4	Farblehre:	Eingabefelder	ROI-Anfangskanal	#KL		63					105					313						0
5		VBA-Ausgabe	ROI-Endkanal	kR		104					187					392						0
6		Excel-formeln	Messdauer in s	tm		86400					86400					86400						86400
7			Anzahl UG-Parameter	nbg		3					3					3						3
8			Breitenparameter, Kanal	sigma		3,230					4,040					6,878						
9				tail		3,972					11,196					31,255						
10			1, 2 oder 3 UG-Parameter	ug1		3620,17					4917,30					3620,47						
11	#k_alpha	3		ug2		-44,35					-116,29					-44,36						
12				ug3		7,93					25,10662					7,92866						
13	k_beta	1,645		1 bis 5 Peaklagenwerte, in Kanälen;	plage1	87,333	1,000	338,3			125,954	0,915	511			350,820	1,000	1460,8				
14					plage2	0,971					142,979	0,992	583,2				0,992					
15					plage3	1,075					149,920	1,018	609,3				1,041					
16					plage4	1,105					162,801	1,069	661,7									
17					plage5																	
18				1 bis 5 Peakflächen, in Impulsen	#pa1	5950,6		563,2	0,0947		1767,0		325,0	0,1839		18807,3		221,8	0,0118			
19					pa2			#DIV/0!		2281,2		370,4	0,1624						#DIV/0!			
20					pa3			#DIV/0!		2320,0		480,4	0,2071						#DIV/0!			
21					pa4			#DIV/0!		2736,7		353,6	0,1292						#DIV/0!			
22					pa5			#DIV/0!											#DIV/0!			
23				Auswahl Aktion																		
24								ChisqR:	7,663				ChisqR:	0,669					ChisqR:	0,709		
25																						
26				#Ekal:												#Fwhm_Kal:						
27				2. linear; 3. Parabel	npEK	3										hwb0 (keV)	-436,569					
28					e0 (keV)	-13,358		u(e0)	1,880		Chi2_Ekal:					hwb1 (keV/keV)	4,1531					
29					e1 (keV/Kanal)	4,132		u(e1)	0,00699		1,943											
30					e2	0,00012703			0,00000													
31																						
32				#Efit_Pars																		
33				eps = Polynom(ln(E(keV)))	effp1-6	0,01237096	-0,0115	0,004124	-0,00071	5,8E-05	-1,849E-06											
34																						
35																						
36				spezielle Trennpunkte (Kanäle):		111										gelbe Zellen: enthalten Formeln!						
37																						
38	Scenario:	Routine	#Nuklid:	Kanal	E(keV)	pgamma	eps	NERate	u(NERate)		c (Bq/m3)	u(c)	urel(A)	phi		EKG	NWG	NWG iter				
39			K-40	x	352,94	1460,8	0,1067	1,78E-04	0		11431,7	590,1	0,0516	6,078E-01		1770,2	2740,8	2,0				
40			Cs-137	x	162,56	661,7	0,851	2,27E-04	0		164,1	22,7	0,1386	5,995E-02		68,2	105,7	2,0				
41			Bi-214	x	150,00	609,3	0,452	2,33E-04	0		255,1	54,4	0,2131	1,100E-01		163,1	252,5	2,0				
42			Bi-214	x	88,16	351,9	0,3535	2,67E-04	0		729,3	78,2	0,1072	1,226E-01		234,5	363,0	2,0				
43			Bi-214	x	424,72	1764,5	0,1519	1,72E-04	0							4,421E-01						
44			Bi-214	x	74,51	295,2	0,1829	2,74E-04	0							2,312E-01						
45			Bi-214	x	61,68	242,0	0,07197	2,77E-04	0							5,803E-01						
46			Ac-228		222,24	911,2	0,262	2,04E-04	0							2,164E-01						
47			Ac-228		236,03	969,0	0,159	2,00E-04	0							3,638E-01						

Die zugehörige Excel-Datei steht auf Anfrage bei der Leitstelle zur Verfügung.

### 7.2 Ansicht der UncertRadio-Resultatseite

Eine zugehörige UncertRadio-Projektdatei steht für diese Messanleitung nicht zur Verfügung.

## 8 Verzeichnis der Chemikalien und Geräte

### 8.1 Chemikalien

Es werden für dieses Verfahren keine Chemikalien benötigt.

### 8.2 Geräte

Die Ausstattung entspricht der des Verfahrens D-γ-GESAMT-MWASS-01.

## Literatur

- [1] Wedekind, C., Schilling, G., Grützmüller, M., Becker, K.: *Neues Messverfahren zur Überwachung der Radioaktivität des Meeres im Bundes-Messnetz des BSH*. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): 10. Fachgespräch zur Überwachung der Umweltradioaktivität, Hamburg, 28. – 30. April 1998, S. 41-45.

- 
- [2] Wedekind, C., Schilling, G., Grützmüller, M., Becker, K.: *Gamma-radiation monitoring network at sea*. Applied Radiation and Isotopes, 1999, Vol. 50 (4), S. 733-741.
- [3] Wedekind, C.:  *$\gamma$ -Ray Spectrometer Probe for the Measurement of Radioactive Pollution in the Sea*. Health Physics, 1973, Vol. 25 (1), S. 51-58.
- [4] Wedekind, C., Becker, K., Schilling, G., Grützmüller, M.: *Marine environmental radioactivity monitoring by "in-situ"  $\gamma$ -radiation detection*. Kerntechnik, 2000, Vol. 65 (4), S. 190-194.
- [5] Han, S. Y., Maeng, S., Lee, H. Y., Lee, S. H.: *Preliminary study on the detection efficiency and estimation of minimum detectable activity for a NaI(Tl)-based seawater monitoring system*. Journal of Environmental Radioactivity, 2020, Vol. 218, S. 106222.
- [6] Naumenko, A., Andrukhovich, S., Kabanov, V., Kabanau, D., Kurochkin, Y., Martsynkevich, B., et al.: *Autonomous NaI(Tl) gamma-ray spectrometer for in situ underwater measurements*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, Vol. 908, S. 97-109.
- [7] Bagatelas, C., Tsabaris, C., Kokkoris, M., Papadopoulos, C., Vlastou, R.: *Monte Carlo simulation of a NaI detector in the aquatic environment*. In: Hellenic Nuclear Physics Society (Hrsg.): HNPS Proceedings, 2009, 17, S. 29-34.
- [8] NEA: *PENELOPE 2018: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. In: Agency, N. E. (Hrsg.): Workshop Proceedings, Barcelona, Spain, 28.01. – 01.02. 2019, S. 420.  
Verfügbar unter: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/32da5043-en>.
- [9] Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB): *Nucléide - Lara: Library for gamma and alpha emissions*. In: Atomic and Nuclear Data. Letztes Update am 10.11.2022. Verfügbar unter: <http://www.lnhb.fr/nuclear-data/module-lara/>. [Letzter Zugriff am 22.11.2022].
- [10] Nies, H., van Eck, G. T. M., de Jong, E. J.: *Radionuclides*. In: Laane, R. W. P. M. (Hrsg.): Background Concentrations of Natural Compounds in Rivers, Sea Water, Atmosphere and Mussels. Den Haag (NL): 1992, S. 40-49.
- [11] Kanisch, G.: *Bestimmung von Aktivitätskonzentrationen mittels spektrometrischer Analyse von NaI(Tl)-Gammaspektren einer Unterwassersonde*. Kurzhandbuch, Version 21.10.2022, 33 S. Persönliche Kommunikation.
- [12] Normenreihe DIN EN ISO 11929:2021, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Überdeckungsintervalls) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen (Teile 1 bis 3)*.