

Vorhaben

**Untersuchung der Eignung von
In-situ-Gammaspektrometern für den
Nachweis inkorporierter gammastrahlender
Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen**

**Endbericht zum BfS-Vorhaben
3612S20014**

19. November 2014

Rev. 02

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragsnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Zusammenfassung

In radiologischen Notfallsituationen kann es zur Abwendung oder Minimierung von Strahlenschäden durch inkorporierte Radionuklide bei betroffenen Personen notwendig sein, mit mobilen Messgeräten vor Ort und unter improvisierten Bedingung Inkorporationsmessungen vorzunehmen, um gegebenenfalls innerhalb kürzester Zeit z. B. Dekorporationsmaßnahmen einleiten zu können. Wegen der Vielzahl der möglichen Szenarien sowie der Art und Aktivität der Radionuklide sind möglichst flexibel einsetzbare, universelle Strahlungsmessgeräte erforderlich.

Im Rahmen des Vorhabens wurden ein elektrisch gekühlter, portabler Reinst-Germanium (HPGe)-Detektor sowie eine LaBr₃-Messsonde für diesen Anwendungsbereich an einem Petersburger Ziegelphantom getestet. In einem ersten Schritt wurden für die Bestückung des Phantoms mit Radionukliden insgesamt mehr als 1400 Stabquellen mit den Radionukliden ²²Na, ²⁴Na, ⁷⁵Se, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, ¹³⁷Cs, ¹⁷⁰Tm und ¹⁹⁷Hg mit Aktivitäten zwischen 5E+03 Bq und 9E+04 Bq je Stab bei einer maximalen Toleranz von fünf Prozent je Radionuklid von RCM hergestellt. Die Radionuklide decken mit ihren charakteristischen Gamma-Linien einen Energiebereich von 84 keV bis 2754 keV ab. Mit jedem dieser sieben Radionuklide wurden Kalibrationsmessungen mit dem Petersburger Ziegelphantom in den beiden Größen P4 und P5 für jeweils drei unterschiedliche Messgeometrien und vier unterschiedliche Aktivitätsniveaus durchgeführt. Aus den Messungen für das höchste Aktivitätsniveau wurden für den HPGe-Detektor die jeweiligen Effektivitätskurven bestimmt. Ergänzend wurden die Nachweis- und Erkennungsgrenzen nach DIN ISO 11929 für die Radionuklide ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ⁷³As, ⁷⁵Se, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, ¹¹³Sn/^{113m}In, ¹²⁵Sb, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹³³Ba, ¹⁹²Ir, ²⁰⁴Tl und ²⁴¹Am berechnet. Die Nachweisgrenzen liegen im Bereich zwischen 1E+03 Bq und 9E+04 Bq, abhängig von der Phantomgröße und dem jeweiligen Radionuklid.

Zusätzlich wurden die Grenzen des Einsatzes eines Portalmonitors und einer Dosisleistungsmesssonde für den Anwendungsbereich aufgezeigt.

Summary

In case of radiological emergency situations it might be necessary for the prevention or minimization of radiation damages by incorporated radionuclides of affected persons to perform incorporation measurements on-site using mobile equipment in ad-lib conditions for initiating decorporation procedures as soon as possible. Flexible all-purpose radiation gauges are required due to the numerous scenarios possible and the type and activity of radionuclides.

Within the scope of the project an electro-cooled, mobile high purity Germanium (HPGe) detector and a LaBr₃-probe were tested for this field of application using a Petersburger brick phantom. For the assembling of the phantom by radionuclides, more than 1400 slab sources with the radionuclides ²²Na, ²⁴Na, ⁷⁵Se, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, ¹³⁷Cs, ¹⁷⁰Tm and ¹⁹⁷Hg were produced by RCM having activities in the range of 5E+03 Bq and 9E+04 Bq per slab with a maximum tolerance of five percent per radionuclide. These radionuclides cover the energy range from 84 keV up to 2754 keV by their characteristic gamma-lines.

With these seven radionuclides calibration measurements for the Petersburger brick phantom for the sizes P4 and P5 for three different measurement geometries and four different activity levels, each, were performed. From the measurement data for the highest activity level using the HPGe-detector the corresponding efficiency curves are calculated.

Additionally the detection and identification limits according to DIN ISO 11929 for the radionuclides ²²Na, ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ⁷³As, ⁷⁵Se, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, ¹¹³Sn/^{113m}In, ¹²⁵Sb, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ¹³³Ba, ¹⁹²Ir, ²⁰⁴Tl and ²⁴¹Am were calculated. The detection limits range from 1E+03 Bq to 9E+04 Bq, depending on the size of the phantom and the radionuclide.

Furthermore the limits of a portal monitor and of a dosimeter for this field of application are identified.

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Aufgabenstellung	6
1.2	Voraussetzungen	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
2	Durchführung des Vorhabens	8
2.1	Literaturrecherche	8
2.1.1	Aufgabenstellung	8
2.1.2	Ergebnisse	8
2.1.3	Verzeichnis ausgewählter Publikationen	9
2.2	Herstellung der radioaktiven Quellen	11
2.2.1	Aufgabenstellung	11
2.2.2	Allgemeines	11
2.2.3	Realisation	11
	2.2.3.1 Allgemeines	11
	2.2.3.2 Beschaffung des radioaktiven Ausgangsmaterials	13
2.2.4	Konzepte für die Herstellung der Stabquellen	14
	2.2.4.1 Stabquellen für langlebige Gamma-Strahler	14
	2.2.4.2 Stabquellen für kurzlebige Gamma-Strahler	16
2.2.5	Qualitätssicherung	17
	2.2.5.1 Allgemeines	17
	2.2.5.2 Aktivitätsbestimmung	17
	2.2.5.3 Homogenitätsprüfung	18
2.3	Messungen	21
2.3.1	Allgemeines	21
2.3.2	Eingesetzte Messgeräte	22
2.3.3	Petersburger Ziegelphantom	24
2.3.4	Messaufbau und -durchführung	25
	2.3.4.1 Allgemeines	25
	2.3.4.2 Zusammenbau der Phantome	26
	2.3.4.3 Anordnung für spektrometrische Messungen	26
	2.3.4.4 Spektrometrische Messungen mit kurzlebigen Radionukliden	26
	2.3.4.5 Spektrometrische Messungen mit langlebigen Radionukliden	27

2.3.4.6	Messungen der Dosisleistung	29
2.3.4.7	Messungen mit dem Portalmonitor	29
2.3.4.8	Eingesetzte Aktivitäten	29
2.3.4.9	Abstandsmessung.	30
2.3.5	Messergebnisse	30
2.3.5.1	Allgemeines	30
2.3.5.2	Ergebnisse der spektrometrischen Messungen mit dem HPGe-Detektor	31
2.3.5.3	Ergebnisse der spektrometrischen Messungen mit dem LaBr ₃ -Messsonde	38
2.3.5.4	Ergebnisse der Dosisleistungsmessungen	41
2.3.5.5	Messungen mit Portalmonitor	42
2.4	Auswertung und Dokumentation der Messergebnisse.	43
2.4.1	Allgemeines	43
2.4.2	Bestimmung der Effektivität für spektrometrische Messungen	43
2.4.2.1	HPGe-Detektor	43
2.4.2.2	LaBr ₃ -Messsonde	46
2.4.3	Vergleich mit HPGe- und LaBr ₃ -Messsonde gemessenen Spektren	49
2.4.4	Nachweis- und Erkennungsgrenzen weiterer Nuklide	53
2.4.4.1	Allgemeines	53
2.4.4.2	HPGe-Detektor	54
2.4.4.3	LaBr ₃ -Messsonde	73
2.4.5	Messungen mit dem Portalmonitor	73
2.4.6	Messungen der Dosisleistungen.	76
3	Zusammenfassung.	79
4	Referenzen	80
5	Anhang: Messanleitungen	81
5.1	HPGe-Detektor Falcon 5000	81
5.1.1	Erforderliches Equipment	81
5.1.2	Vorbereitung	81
5.2	LaBr ₃ -Messsonde	83
5.2.1	Erforderliches Equipment	83
5.2.2	Vorbereitung	83

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung ist in der Leistungsbeschreibung des BfS festgelegt /1/ und wird zum besseren Verständnis des vorliegenden Berichts nachfolgend zitiert:

"In radiologischen Notfallsituationen kann es zur Abwendung oder Minimierung von Strahlenschäden durch inkorporierte Radionuklide bei betroffenen Personen notwendig sein, mit mobilen Messgeräten vor Ort und unter improvisierten Bedingungen Inkorporationsmessungen vorzunehmen, um gegebenenfalls innerhalb kürzester Zeit z. B. Dekontaminationsmaßnahmen einleiten zu können. Wegen der Vielzahl der möglichen Szenarien sowie der Art und Aktivität der Radionuklide sind möglichst flexibel einsetzbare, universelle Strahlenmessgeräte erforderlich. Nur elektrisch gekühlte, portable Gammaskpektrometer mit Reinstgermanium (HPGe)-Detektoren kommen hierfür in Frage. Das gegenwärtige Konzept zur Inkorporationsüberwachung sieht daher die Anschaffung mehrerer dieser Geräte zur 'Emergency Preparedness' vor.

Im Vorfeld soll im Rahmen des Vorhabens die Eignung der auf dem Markt verfügbaren Messgeräte theoretisch und praktisch untersucht werden. Weiterhin sind mit einigen dieser Geräte Kalibrierungen (experimentell und simuliert) und Validierungen durchzuführen. Hierfür sind Stabquellen mit messtechnisch und/oder radiologisch relevanten, gammaemittierenden Radionukliden für das BfS-Ziegelphantom herzustellen und mit diesen Geräten quantitativ nachzuweisen. Auf der Basis der gewonnenen Ergebnisse sind praxistaugliche Messanleitungen für verschiedene Notfallsituationen zu erstellen."

1.2 Voraussetzungen

Gemäß /2/ waren vom Bundesamt für Strahlenschutz folgende Gerätschaften für die Durchführung des Vorhabens zur Verfügung zu stellen:

- Das in der Anlage zu /2/ näher beschriebene sogenannte Petersburger Ziegelphantom zur Simulation verschiedener Messgeometrien.
- Muster für die aktivitätstragenden Stabquellen sowie alle beim BfS vorhandenen Informationen zu deren Herstellung.
- Ein tragbares Gamma-Messsystem mit Lanthanbromid-Szintillations-Detektor zur Durchführung von vergleichenden Messungen für eine Gegenüberstellung der mittels HPGe-Detektor gewonnenen Daten.
- Ein nicht näher spezifizierter Portalmonitor, dessen Ansprechwahrscheinlichkeit für die verschiedenen, im Rahmen des Vorhabens zu präparierenden Stabquellen untersucht werden soll.

Als HPGe-Detektor wurde von RCM ein tragbareres, elektrogekühltes und batteriebetriebenes Detektorsystem vom Typ Falcon 5000 der Fa. Canberra für die Messungen bereitgestellt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Vorhabensablauf ist in vier Arbeitspakete (AP) untergliedert.

AP 1: Literaturrecherche zur Ermittlung des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der In-vivo-Messung mit In-situ-Messgeräten.

AP 2: Herstellung von radioaktiven Quellen (umschlossene Stabquellen) entsprechend den Vorgaben in /2/.

AP 3: Durchführung von Messungen mit den in AP 2 erstellten Radionukliden in verschiedenen Messpositionen.

AP 4: Auswertung und Dokumentation der in AP 3 bestimmten Ergebnisse.

Zusätzlich wurde mit dem Auftraggeber vereinbart, dass - soweit möglich - ergänzende Messungen mit einem Portalmonitor und mit einer Dosisleistungsmesssonde an den mit Radionukliden bestückten Phantomen durchgeführt werden sollen.

2 Durchführung des Vorhabens

2.1 Literaturrecherche

2.1.1 Aufgabenstellung

In einer Literaturrecherche war der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der In-vivo-Messung mit In-situ-Messgeräten zu ermitteln und darzustellen. Literatur zur Herstellung der Radionuklidquellen, welche für die Kalibrationsmessungen mit dem Körperphantom im Rahmen des Vorhabens benötigt wurde, sind im Literaturverzeichnis zu Kapitel 2.2 aufgeführt.

2.1.2 Ergebnisse

Die Themengebiete "In-vivo-Messung mit In-situ-Messgeräten" und "Ganzkörpermessplatz" sind in der Literatur durch eine Vielzahl an Publikationen vertreten. Eine Auswahl an Ergebnissen der durchgeführten Literaturrecherche ist in Kapitel 2.1.3 aufgeführt. Verweise auf weitere Literatur finden sich u. a. in den Referenzen dieser Publikationen. Nicht berücksichtigt wurden bei dieser Auflistung die von den verschiedenen Herstellern angebotenen Messplätze. Informationen hierzu können deren Webseiten entnommen werden. Nachfolgend sind die von den aufgeführten Publikationen behandelten Themengebiete zusammengefasst.

Eine eher historisch gesehen interessante Betrachtung der Entwicklung von Ganzkörpermessplätzen findet sich in **Andrews 1973**. In **Kozheurov 1994** werden ein spezifischer Ganzkörpermessplatz sowie sein Einsatz für die Bestimmung von ^{90}Sr über Bremsstrahlung beschrieben. Für das Vorhaben nicht direkt relevant, aber eventuell für die Entwicklung zukünftiger Messplätze von Interesse, sind bildgebende Ganzkörpermessplätze, wie sie derzeit bei der Untersuchung (kleiner) Tiere genutzt werden (**Wenze 2010**).

Viele der Publikationen behandeln die Bestimmung von Kalibrationsfaktoren für Ganzkörpermessplätze. Hierbei wird unterschieden zwischen der messtechnischen Bestimmung (**Abdel-Wahaw 1992, Ishikawa 2006**), der direkten Berechnung auf der Grundlage physikalischer Modelle (**Andrási 1975, Stein 2010**) sowie dem Einsatz von Simulationsberechnungen (**Carinou 2007, Kramer 2009, Bento 2010**). Zu letzterem werden in **Broggio 2012** die Ergebnisse eines internationalen Vergleichstests aufgezeigt für die Bestimmung von Kalibrationsfaktoren durch die Teilnehmer mittels Monte Carlo Simulationen für eine gemeinsame Datenbasis. Ein erweiterter Kalibrationsansatz wird in **Kim 2010** beschrieben. Dieser basiert auf einer Quasi-Echtzeit-Kalibration, welche die reale Geometrie des Probanden aus während der Messung aufgenommener Fotografien bestimmt und hierfür die Kalibrationsfaktoren mittels Monte Carlo Simulationen bestimmt.

Der mit dem Vorhaben abgedeckte Anwendungsbereich wird nur durch sehr wenige Publikationen angerissen. **Marzocchi 2011** beschreibt die Ergebnisse einer Simulationsstudie zur optimierten Auslegung eines Ganzkörper-Messplatzes unter Verwendung mehrerer Detektoren. Speziell wurden die Vor- und Nachteile sitzender bzw. liegender Probanden untersucht und die sitzende Anordnung hinsichtlich Detektionseffizienz und Nachweiswahrscheinlichkeit als geeigneter erachtet. Als Gründe wurden die optimierte Position der Detektoren sowie die unterschiedliche Stärke des Untergrundbeitrags im unteren Körperbereich durch ^{40}K angeführt. In **Kramer 2005** wird der Einsatz eines mobilen HPGe-Detektors als Ganzkörpermonitor diskutiert mit dem Ergebnis, dass dieser im Katastrophenfall eine ausreichende Sensitivität für Spalt- und Aktivierungsprodukte aufweist, allerdings nicht für Aktinide. Die Zähleffizienz wird durch eine Funktion beschrieben, die nur von der

Photonenenergie sowie der Größe und dem Gewicht des Probanden abhängt. Des Weiteren wird folgende Messanordnung empfohlen: Detektorposition 1 m über dem Boden und in 0,7 m Abstand von einer Wand; der Proband steht mit dem Rücken zur Wand und schaut in Richtung auf den Detektor. In **Kramer 2007** werden zwei Portalmonitore hinsichtlich ihrer Eignung für einen Einsatz im Katastrophenfall untersucht, mit dem Ergebnis, dass das Modell MiniSentry der Firma Canberra nur bedingt für einen Feldeinsatz geeignet ist. Dieser Portalmonitor stand auch im Rahmen des Vorhabens zur Verfügung.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass der Einsatz eines mobilen Gamma-Detektors (HPGe, LaBr₃, NaI) als Ganzkörpermonitor (im Katastrophenfall) in der Literatur bislang so gut wie nicht berücksichtigt wird.

2.1.3 Verzeichnis ausgewählter Publikationen

Andrews 1973 Andrews, G. A. ; Gibbs, W. D. ; Morris Jr., A. C. ; Ross, D. A. : *Whole-Body Counting*. Seminars in Nuclear Medicine, 3 (4), Oktober 1973, S. 367-388.

Andrási 1975 Andrási, A. ; Kötél, G. : *NaI(Tl) Detector Efficiency Calculations for Distributed Sources in a Human Phantom*. International Journal of Applied Radiation and Isotopes 26 (1975), S. 451-454.

Smith 1979 Smith, T. ; Hesp, R. ; Mackenzie, J. : Total body potassium calibrations for normal and obese subjects in two types of whole body counter. Phys. Med. Biol. , 24 (1979), S. 171-175.

Abdel-Wahaw 1992 Abdel-Wahaw, M. S. ; Youssef, S. K. ; Aly, A. M. ; El-Fikp, S. A. ; EIL-Enany, N. ; Abbas Magda T. : A simple calibration of a whole-body counter for the measurement of total body Potassium in humans. Journal of Applied Radiation Isotopes 43, (1992) 10, S. 1285-1289.

Kozheurov 1994 Kozheurov, Vyacheslav P. : *SICH-9.1- a unique whole-body counting system for measuring Sr-90 via bremsstrahlung. The main results from a long-term investigation of the Techa River population*. The Science of the Total Environment, 142 (1994), S. 37-48.

Kozheurov 2002 Kozheurov, V. P. ; Zalyapin, V. I. ; Shagina, N. B. ; Tokareva, E. E. ; Degteva, M. O. ; Tolstykh, E. I. ; Anspaugh, L. R. ; Napier, B. A. : *Evaluation of uncertainties in ⁹⁰Sr-body-burdens obtained by whole-body count: application of Bayes' rule to derive detection limits by analysis of a posteriori data*. Applied Radiation and Isotopes 57 (2002), S. 525-535.

Breustedt 2005 Breustedt, Bastian: *Entwicklung und Implementation von Monte-Carlo-Simulationen zur Auswertung von Messungen mit dem Kölner Ganzkörperzähler*. Köln, Universität. Diss., 2005.

Ishikawa 2006 Ishikawa T. : Performance of a whole-body counter with five high-purity germanium detectors. Applied Radiation and Isotopes 64 (2006), S. 386-389.

Carinou 2007 Carinou, E. ; Koukoulidou, V. ; Budayova, M. ; Potiriadis, C. ; Kamenopoulou, V. : *The calculation of a size correction factor for a whole-body counter*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 (2007), S. 197-200.

Kramer 2005 Kramer, Gary H. ; Capello, Kevin; Hauck, Barry M. : *The HML's new field deployable high-resolution whole body counter*. Health Physics 89, Suppl. 5 (2005), S. S60-S68.

Kramer 2007a Kramer, Gary H. ; Capello, Kevin; Sung, Jeremy: *Monte Carlo comparison of the St. Petersburg phantom with a bomb phantom in the HML's whole body counter*. Radiation Protection Dosimetry (2007), S. 1-6.

Kramer 2007 Kramer, Gary H. ; Capello, Kevin; Hauck, Barry M. : *Evaluation of two commercially available portal monitors for emergency responses*. Health Physics 92, Suppl. 1 (2007), S. S50-S56.

- Youngman 2008** Youngman, M. J. : *The Use of a High-resolution Radionuclide Identifier as a Portable Whole Body Monitor*. Health Protection Agency. Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards. Radiation Protection Division. Chilton, Didcot, Oxfordshire OX11 0RQ Oktober 2008.
- Kramer 2009** Kramer, Gary H. ; Capello, Kevin; Chiang, Albert; Hauck, Barry M. : *HML's whole body counter: Measuring highly radioactive persons*. Health Physics 97 (2009), Nr. 6, S. 630-636.
- Bento 2010** Bento, J. ; Teles, P. ; Silva, L. ; Nogueira, P. ; Neves, M. ; Vaz, P. : *Performance parameters of a whole body counter*. Radiation Measurements 45 (2010), S. 190-195.
- Kim 2010** Kim, Ji Seok ; Jong Hwi Jeong ; WiHoHa ; Kun Woo Cho ; Jai Ki Lee : *A validation of computational phantoms from photographic images for patient-tailored whole body counting*. Applied Radiation and Isotopes 68 (2010), S. 776-779.
- Stein 2010** Stein, O. ; Hettwig, B. ; Fischer, H. W. : *Untersuchungen zum Aufbau eines Ganzkörperzählers mit einfachen Mitteln*. In: Neu, Alfred; Bayer, Anton; Steinkopff, Thomas (Hrsg.) ; Fachverband für Strahlenschutz (Veranst.): *Natürliche und künstliche Radionuklide in unserer Umwelt (42. Jahrestagung des Fachverbandes Strahlenschutz e. V.)*, Borkum, 26. - 30. September 2010, S. 513-519.
- Wenze 2010** Wenze, Xi; Seidel, Jürgen; Kakareka, John W. ; Pohida, Thomas J. ; Milenic, Diane E. ; Proffitt, James; Majewski, Stan; Weisenberger, Andrew G. ; Green, Michael V. ; Choyke, Peter L. : *MONICA: a compact, portable dual gamma camera system for mouse whole-body imaging*. Nuclear Medicine and Biology 37 (2010), S. 245-253.
- Di Maria 2011** Di Maria, S. ; Barros, S. ; Bento, J. ; Teles, P. ; Figueira, C. ; Pereira, M. ; Vaz, P. ; Paulo, G. : *TLD measurements and Monte Carlo simulations for glandular dose and scatter fraction assessment in mammography: A comparative study*. Radiation Measurements 46 (2011), S. 1103-1108.
- Breustedt 2011** Breustedt, B. ; Mohr, U. ; Biegard, N. ; Cordes, G. : *Quality Management system and accreditation of the in vivo monitoring laboratory at Karlsruhe Institute of Technology*. Radiation Protection Dosimetry, 144 (2011), 1-4, S. 95-97.
- Fonseca 2011** Fonseca, Telma; Bogaerts, Ria; Vanhavere, Filip: *Improving in vivo measurements by Monte Carlo modeling*. SCK-CEN Mol, Belgien, Thesis. Februar 2011.
- Genicot 2011** Genicot, Jean L. ; Fonseca, Telma ; Kramer, Gary ; Wambersie, André: *Direct Determination of Radionuclides in the Body Optimisation of Measurements Parameters and Results Analysis*. World Journal of Nuclear Science and Technology, 1 (2011), S. 87-110.
- Marzocchi 2011** Marzocchi, O. ; Breustedt, B. ; Mostacci, D. ; Urban, M. : *Comparison of stretched and sitting configurations for partial-body measurements*. Applied Radiation and Isotopes, 69 (2011), S. 1156-1158.
- Broggio 2012** Broggio, D. ; Bento, J. ; et all: *Monte Carlo modelling for the in vivo lung monitoring of enriched uranium: Results of an international comparison*. Radiation Measurements 47 (2012), S. 492-500.
- van Wijk 2014** van Wijk, Roeland ; van Wijk, Eduard P. A. ; van Wietmarschen, Herman A. ; van der Greef, Jan: *Towards whole-body ultra-weak photon counting and imaging with a focus on human beings: A review*. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, (2013), In Press, Corrected Proof.

2.2 Herstellung der radioaktiven Quellen

2.2.1 Aufgabenstellung

Entsprechend der Leistungsbeschreibung /3/ waren sieben Gamma-Strahler in geeigneter Form¹ für die Bestückung des Ziegelphantoms /4/ herzustellen. Die hierfür erforderlichen Aktivitäten im Größenordnungsbe- reich von jeweils 10 MBq bis 100 MBq sollten von RCM durch Neutronen-Aktivierung an der Forschungs- Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz hergestellt oder extern beschafft werden. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde die erforderliche Mindestaktivität auf 1 MBq pro 77,8 kg-Phantom festgelegt bei einer Abweichung zwischen Stabquellen eines Nuklids von weniger als fünf Prozent.

2.2.2 Allgemeines

Für die Herstellung der Stabquellen waren geeignete Konzepte zu erstellen. In Absprache mit dem Auftragge- ber wurden nur „one-piece“-Quellen realisiert, d. h. alle Quellen haben dieselben geometrischen Abmessun- gen mit einem äußeren Durchmesser von 6 mm bei einer Länge von 162 mm.

Die Stabquellen (der langlebigen Nuklide) sind für eine wiederholte Nutzung über einen längeren Zeitraum vorgesehen, d. h. sie müssen für die bei der Bestückung des Ziegelphantoms auftretenden mechanischen Belastungen ausgelegt sein und die in ihnen enthaltenen Aktivitäten sicher einschließen².

Als Ausgangspunkt für die Erstellung eines Konzepts diente eine Publikation von Bailat /5/ sowie ein direkter Kontakt zu Mitarbeitern des Paul Scherrer Instituts, Schweiz, welche bereits Erfahrungen in der Herstellung entsprechender radioaktiver Stabquellen haben.

In zahlreichen Vorversuchen wurden unterschiedliche Verfahren zur Herstellung der Stabquellen getestet. Hierbei kristallisierten sich u. a. zwei wesentliche, zu berücksichtigende Punkte heraus:

- Trägerung der Ausgangslösung und
- Vermeidung von Ablagerungen des Feststoffes (d. h. des Radionuklids) in der Lösung.

Im nachfolgenden Kapitel sind die eingesetzten Verfahren für die Herstellung der Stabquellen näher beschrie- ben.

2.2.3 Realisation

2.2.3.1 Allgemeines

Die vorgegebenen Gamma-strahlenden Nuklide decken den Energiebereich zwischen 84 keV und 2754 keV mit einer Vielzahl an charakteristischen Linien ab. Hierdurch ermöglichen sie eine messtechnische Bestim- mung der Effizienzkurven in diesem Energiebereich für das Ziegelphantom für verschiedene Geometrien. Die wesentlichen charakteristischen Daten der eingesetzten Nuklide sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

¹ stabförmige Quellen, im Weiteren als Stabquellen bezeichnet.

² Für Stabquellen mit kurzlebigen Radionukliden wird auf eine mechanische Langzeitstabilität zugunsten einer minimierten Her- stellungszeit der Quelle verzichtet.

Tab. 1 Zusammenstellung der wichtigsten charakteristischen Daten der für die Erstellung der Stabquellen eingesetzten Gamma-strahlenden Nuklide /6/. Das Nuklid ^{99m}Tc wurde in die Liste mit aufgenommen, da es bei der Herstellung von ^{99m}Tc ebenfalls entsteht.

	Halbwertszeit	Energie in keV	Übergangswahrscheinlichkeit	Art	Lebensdauer
^{22}Na	2,6027 y	1274,5	9,99E-01	Gamma	L
		511,0	1,80E+00	Annihilation	
		84,86	1,25E-03	Röntgen	
^{24}Na	14,96 h	1368,6	1,00E+00	Gamma	K
		2754,0	9,99E-01	Gamma	
^{75}Se	119,6 d	264,7	5,90E-01	Gamma	L
		136,0	5,88E-01	Gamma	
		279,5	2,50E-01	Gamma	
		121,1	1,72E-01	Gamma	
		400,7	1,15E-01	Gamma	
		96,7	3,41E-02	Gamma	
		198,6	1,49E-02	Gamma	
^{99}Mo	2,75 d	739,5	1,21E-01	Gamma	K
		181,1	5,99E-02	Gamma	
		140,5	4,52E-02	Gamma	
		777,9	4,26E-02	Gamma	
		366,4	1,19E-02	Gamma	
^{99m}Tc	6,01 h	140,5	8,91E-01	Gamma	K
^{137}Cs (^{137m}Ba)	30,04 y	661,7	8,99E-01	Gamma	L
^{170}Tm	128,6 d	84,3	2,48E-02	Gamma	L
^{197}Hg	2,69 d	68,8	3,72E-01	Röntgen	K
		67,0	2,18E-01	Röntgen	
		77,4	1,80E-01	Gamma	
		77,9	1,28E-01	Röntgen	
		80,2	3,49E-02	Röntgen	
		191,4	6,12E-03	Gamma	

Abhängig von ihrer jeweiligen Halbwertszeit wird zwischen kurzlebigen (K) und langlebigen (L) Radionukliden unterschieden.

- Kurzlebige Radionuklide: ^{24}Na , ^{197}Hg und ^{99m}Tc .
- Langlebige Radionuklide: ^{22}Na , ^{75}Se , ^{137}Cs und ^{170}Tm .

Mit dieser (willkürlichen) Unterscheidung wurde dem benötigten zeitlichen Aufwand für die Realisierung der Stabquellen und den durchzuführenden Messungen Rechnung getragen und dementsprechend ihre Herstellungsart angepasst (Kapitel 2.2.3) .

2.2.3.2 Beschaffung des radioaktiven Ausgangsmaterials

Für die radioaktiven Ausgangsmaterialien, d. h. die radioaktiven Nuklide, welche die Basis für die Realisation der Stabquellen darstellten, standen drei Bezugsquellen zur Verfügung:

- Bei RCM vorhandene Nuklide,
- von RCM am FRM II durch Neutronen-Aktivierung erzeugte Nuklide sowie
- bei externen Firmen gekaufte Nuklide.

Von den erforderlichen Nukliden war bei RCM nur ^{137}Cs vorhanden. Dieses lag in Form einer wässrigen Lösung in HCl vor.

Neutronen-Aktivierung

Für die Herstellung der Stabquellen unter Verwendung der Neutronen-Aktivierung können prinzipiell zwei Verfahren eingesetzt werden:

- Bestrahlung einer kleinen Probenmenge in Form von Oxiden oder Salzen. Das aktivierte Material wird anschließend chemisch aufbereitet und für die Herstellung der Stabquellen eingesetzt.
- Die Stabquellen werden vollständig aus inaktivem Material hergestellt und daran anschließend als Ganzes bestrahlt.

Eine Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile bei der Herstellung zeigte, dass nur mit dem ersten Verfahren die Einhaltung der Homogenitätsanforderungen bei minimalem Zeitaufwand gewährleistet werden kann. Auch wird eine unerwünschte Aktivierung von weiteren Materialien (Hülle, Matrix etc.) vermieden. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der mittels Neutronen-Aktivierung am FRM II hergestellten Nuklide, die eingesetzten Ausgangsmaterialien und -mengen, deren Reinheitsgrad sowie die Bestrahlungsdauer. Die Bestrahlungen wurden in den Positionen RPA 2 (^{75}Se) und RPA 6 (restliche Nuklide) durchgeführt.

Tab. 2 Übersicht der mittels Neutronen-Aktivierung am FRM II hergestellten Nuklide, die eingesetzten Ausgangsmaterialien und -mengen sowie die Bestrahlungsdauer.

Nuklid	Ausgangsmaterial	Reinheitsgrad in %	Probenmenge in g	Bestrahlungsdauer in min
^{24}Na	NaCl		0,1016	4
^{75}Se	H_2SeO_3	> 99	1,525	30
$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	MoO_3	99,70	1,17	20
^{170}Tm	$\text{TmCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	99,99	0,116	15
^{197}Hg	HgCl_2 (wasserfrei)	99,99	0,0804	20

Die Angaben zur Reinheit des jeweiligen Ausgangsmaterials wurden vor der Bestrahlung am FRM II mittels Neutronen-Aktivierung verifiziert. Einzig bei Molybdän wurde eine unerwartete Menge an ^{187}W mit erzeugt, welches aber aufgrund der kurzen Halbwertszeit von 23,72 Stunden zum Zeitpunkt der eigentlichen Messungen bereits abgeklungen ist. Zusätzlich wurden als qualitätssichernde Maßnahme die aktivierten Proben jeweils Gamma-spektrometrisch gemessen.

Das radioaktive Nuklid ^{22}Na wurde als Aktivitätsnormal von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, Fachbereich 6.1, bezogen. Es wurde als Lösung (NaCl HCl 0,1 mol/L) in einer Quarzampulle mit einer Aktivität von 12,16 MBq (0,7% Messunsicherheit, Referenzdatum 1. Oktober 2013) geliefert.

2.2.4 Konzepte für die Herstellung der Stabquellen

Für jeden der sieben Gamma-Strahler waren 180 Stabquellen herzustellen. Damit ergab sich eine Gesamtanzahl von (mindestens) 1260 Quellen. Zu berücksichtigen war bei der Auswahl des Herstellungsverfahrens auch der hierfür erforderliche zeitliche Aufwand, da speziell bei den kurzlebigen Radionukliden (Halbwertszeiten im Bereich von Stunden bzw. wenigen Tagen) die eingesetzten Ausgangsaktivitäten entsprechend hoch sein mussten.

Ausgehend von der prinzipiellen Verfügbarkeit der radioaktiven Materialien sowie den geometrischen Randbedingungen an die Stabquellen /4/ wurden nach umfangreichen Vorversuchen zwei geeignete Herstellungsverfahren für die Quellen mit kurzlebigen bzw. langlebigen Gamma-Strahlern ermittelt und umgesetzt.

2.2.4.1 Stabquellen für langlebige Gamma-Strahler

Die Stabquellen für die langlebigen Gamma-Strahler bestehen aus einer doppelwandigen Verpackung um einen zusätzlichen Einschluss des radioaktiven Materials bei Bruch der äußeren Umhüllung zu gewährleisten. Die äußere Hülle besteht aus einem 162 mm langen PVC-Rohr mit einem Außendurchmesser von 6 mm und einer Wandstärke von 0,3 mm, die innere Hülle aus einem PE-Rohr mit einem Außendurchmesser von 4 mm und einer Wandstärke von 0,2 mm.

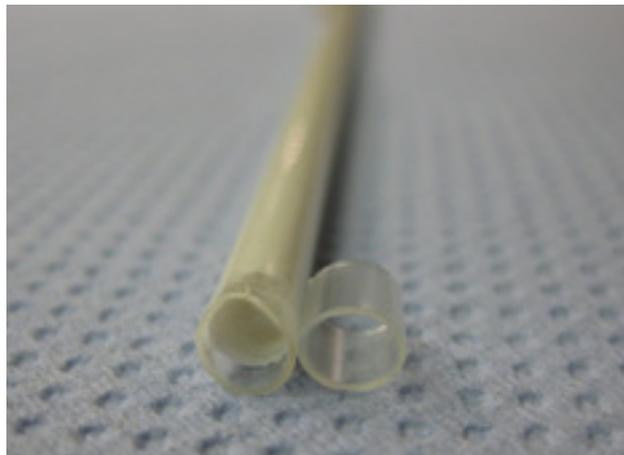


Abb. 1 Foto eines mit "Keraflott" befüllten PE-Rohrs.

Die vier radioaktiven Nuklide wurden jeweils mit 0,1 Molarer Salzsäure in flüssige Form gebracht und mit inaktivem Trägermaterial versetzt. Letzteres ist notwendig, um Wandeffekte zu vermeiden. Auf eine Einwegspritze wurde das innere Rohr aufgesetzt und die Spritze mit dem Reliefigießpulver „Keraflott“ der Fa. Hobbyfun und der radioaktiven Flüssigkeit in einem genau festgelegten Mischungsverhältnis befüllt und verrührt. Nach dem Eindrücken der Mischung in das Rohr wurde dieses an der oberen Seite mit Parafilm verschlossen und umgedreht in ein Becherglas zum Aushärten gestellt. Die Spritze wurde abgezogen und ein weiteres Innenrohr zur Befüllung aufgesteckt. Da „Keraflott“ innerhalb weniger Minuten zu einem homogenen, grauen,

keramikartigen Feststoff aushärtet konnten nur Chargen von 10 gefüllten Innenrohren in einem Durchgang erstellt werden (Abb. 1). Das ausgehärtete Material hat eine Dichte von ca. $2,6 \text{ g cm}^{-3}$. Die Innenrohre wurden mit einem Etikett versehen (Abb. 2), welches die Nuklidbezeichnung und eine Identifikationsnummer aufweist. Letztere besteht aus 5 Ziffern. Die beiden ersten Ziffern bezeichnen die Chargennummer, die letzten drei die entsprechende Stabnummer. Die so erstellten Innenrohre wurden in die Außenrohre eingebracht, welche mit Epoxidharz an beiden Seiten verschlossen wurden. Dem Harz wurden entsprechend dem Radionuklid unterschiedliche Farbpigmente beigelegt, um eine schnelle optische Identifizierung der Stabquellen zu ermöglichen.

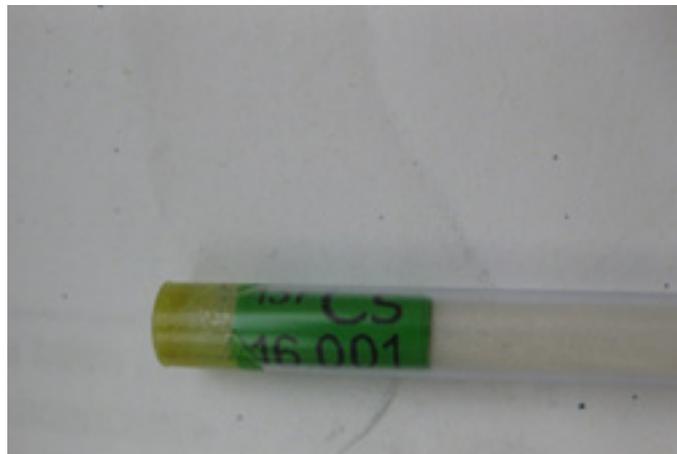


Abb. 2 Verschlussenes Rohr mit Etikett: Oben die Nuklidbezeichnung (hier: ^{137}Cs), darunter die Chargennummer (hier: 16) gefolgt von der Stabnummer (hier: 001). Das Ende wurde entsprechend der für ^{137}Cs gewählten Farbcodierung gelblich eingefärbt.

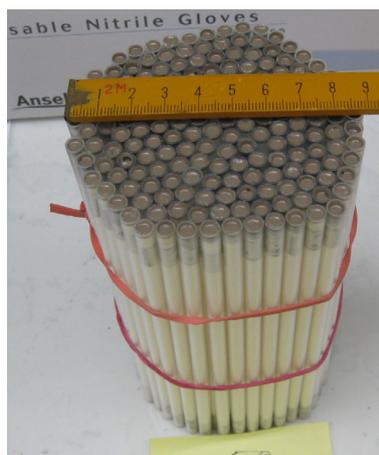


Abb. 3 Bündel mit 180 Stabquellen.

2.2.4.2 Stabquellen für kurzlebige Gamma-Strahler

Für die Herstellung der Stabquellen mit kurzlebigen Gamma-Strahlern wurde mit einer Ausnahme als Trägermaterial Agar-Agar eingesetzt, ein Galactose-Polymer (ein Polysaccharid). Gegenüber "Keraflott" weist Agar-Agar den Vorteil auf nicht so schnell auszuhärten, d. h. es kann eine ausreichend große Menge mit der radioaktiven Lösung angesetzt werden, um damit alle Stabquellen eines Nuklids in einem Durchgang herzustellen. Im Gegensatz zu den Quellen mit langlebigen Nukliden wurde auf das Innenrohr und eine spezielle Etikettierung verzichtet und das Material sofort mit einer Einwegspritze und einem Doppelschlauch (Abb. 4) zur Vermeidung von Blasenbildungen in das vorab auf einer Seite mit Silikon verschlossene Außenrohr eingefüllt. Um Verwechslungen der so erzeugten Stabquellen vorzubeugen, wurde das Agar-Agar nuklidspezifisch eingefärbt sowie die fertigen Quellen nach dem Verschließen der zweiten Seite (ebenfalls mit Silikon) entsprechend markiert. Während der gesamten Verarbeitungszeit war auf Einhaltung einer Temperatur von ca. 70°C für das Agar-Agar zu achten.

Aufgrund der kurzen Halbwertszeiten wurde eine zweite Schutzhülle als nicht erforderlich angesehen. Hierdurch konnten die Herstellungszeiten deutlich reduziert und somit die eingesetzten Ausgangsaktivitäten minimiert werden.



Abb. 4 Foto einer Einwegspritze mit Doppelschlauch, welche zum Einfüllen des mit dem Gamma-strahlenden Material versetzten Agar-Agar in das PVC-Rohr verwendet wurde.



Abb. 5 Foto eines verschlossenen PVC-Rohres (Vorversuches), welches mit transparentem, festem Agar-Agar gefüllt ist.



Abb. 6 Foto mit ^{197}Hg Stabquellen in zwei Bechergläsern.

Die oben erwähnte Ausnahme bei der Herstellung der Stabquellen mit kurzlebigen Gamma-Strahlern betraf das Nuklid $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. Dieses wurde ohne Trägermaterial direkt in flüssiger Form in die Stäbe eingefüllt. Die weitere Verarbeitung erfolgte analog der Herstellung der anderen Stabquellen.

2.2.5 Qualitätssicherung

2.2.5.1 Allgemeines

Entsprechend der Vorgabe des Auftraggebers durften die Aktivitäten der einzelnen Stabquellen für ein Nuklid um maximal fünf Prozent voneinander abweichen bei einer Mindestaktivität von 1 MBq pro 77,8 kg-Phantom.

2.2.5.2 Aktivitätsbestimmung

Die Aktivitätsbestimmung erfolgte über Vergleichsmessungen. Ein für die Herstellung der Stabquellen verwendetes Rohr wurde entsprechend der in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Verfahren zur Realisierung der Stabquellen vorbereitet. Anstelle des mit dem radioaktiven Material vermischten Agar-Agar bzw. Keraflott wurde das Rohr mit einer zertifizierten QCY-Standard-Lösung befüllt³ und diente als Referenzquelle für die Aktivitätsbestimmung. Die Füllmenge entsprach exakt der Menge der bei der Stabquellenherstellung eingefüllten Menge. Die Dichten der Standardlösung und der Füllmaterialien sind annähernd gleich (ca. 1 g/cm³). In einem mit Blei abgeschirmten Messplatz wurden die Referenzquelle und die verschiedenen Stabquellen in identischer Messgeometrie mit einem HPGe-Detektor Gamma-spektrometrisch vermessen⁴. Aus den Nettopeakflächen der charakteristischen Linien der Referenzquelle wurde nach der Korrektur bezüglich der Übergangswahrscheinlichkeiten eine Effizienzkurve erstellt, welche die energieabhängige Proportionalität von Zählrate zu Aktivität beschreibt (Abb. 7). Unter Verwendung dieser Effizienzkurve wurden die Aktivitäten der gemessenen Stabquellen bestimmt (Tab. 3). In den durchgeführten Messungen (siehe Kapitel 2.3) standen nuklidabhängig Stabquellen mit Gesamtaktivitäten zwischen 0,95 MBq und 17,6 MBq zur Verfügung.

3 Zusammensetzung des QCY-Standards (Fa. Eckert-Ziegler): ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{88}Y , ^{60}Co . Mit diesen Nukliden wird ein Energiebereich von 59,5 keV bis 1836,1 keV mit 12 (belastbaren) Stützstellen abgedeckt.

4 Die Aktivitäten für die jeweiligen Nuklide wurden auf diese Weise nur für einige willkürlich herausgegriffene Stabquellen bestimmt.

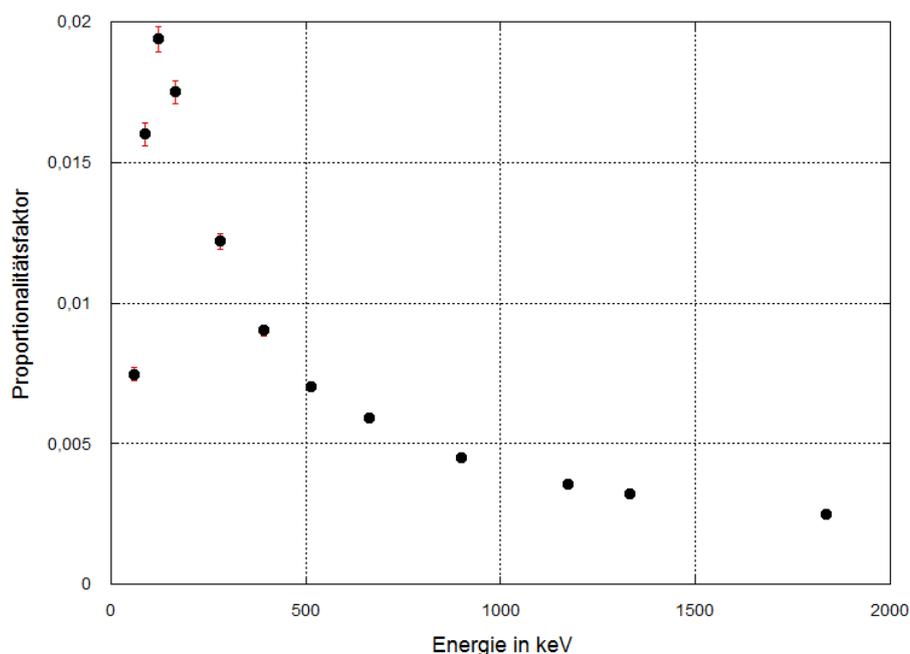


Abb. 7 Messtechnisch erstellte Proportionalitätskurve zur Bestimmung der Aktivitäten der Stabquellen. Schwarze Punkte: gemessenen Werte mit Fehlerbalken (rot);

Tab. 3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Aktivitätsbestimmungen für die Stabquellen der verschiedenen Nuklide. Die Aktivitäten sind pro Stabquelle angegeben. Die relative Unsicherheit wurde aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der in den einzelnen Stabquellen enthaltenen Aktivitäten bestimmt.

Nuklid	Bezugsdatum	Aktivität in Bq/Stab	relative Unsicherheit in %
^{22}Na	01.01.2014	5,12E+03	2,8
^{24}Na	20.01.2014	7,25E+04	2,8
^{75}Se	20.12.2013	2,90E+04	2,6
$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	09.09.2014	1,39E+04	4,1
^{137}Cs	01.01.2014	6,05E+03	3,5
^{170}Tm	07.02.2014	2,03E+04	4,5
^{197}Hg	22.01.2014	9,33E+04	2,6

2.2.5.3 Homogenitätsprüfung

Ergänzend zu den Messungen zur Bestimmung der Aktivitäten der Stabquellen wurde deren Homogenität für jedes der sieben Nuklide überprüft. Hierfür wurden zwei Verfahren gewählt:

- Für einen (größeren) Stichprobenumfang der Stabquellen für ein Nuklid wurden Einzelmessungen durchgeführt.
- Jeweils zehn Stabquellen (d.h. eine Charge) wurden zu einer Flächenquelle zusammengefügt und zusammen gemessen.

Für die Messungen wurde ein ISOCS-kalibrierter HPGe-Detektor, der in einer Blei-Burg eingebaut war, verwendet.

Die beiden Messgeometrien (d. h. Stab- und Flächengeometrie) wurden in ISOCS modelliert und mit diesen die Messdaten ausgewertet. In Tab. 4 sind exemplarisch die Aktivitäten aufgeführt, welche aus den Messungen einzelner Stabquellen des Nuklids ^{137}Cs für die Chargen 02 und (teilweise) 03 bestimmt wurden.

Tab. 4 Ergebnisse der Aktivitätsbestimmungen einzelner Stabquellen des Nuklids.

Charge	Stab-Nr.	Messzeit in s	Aktivität in Bq	Unsicherheit in Bq
02	1	2000	6,18E+03	3,75E+02
	2	2000	6,06E+03	3,67E+02
	3	2000	5,92E+03	3,59E+02
	4	2000	5,95E+03	3,61E+02
	5	2000	5,79E+03	3,51E+02
	6	2000	5,70E+03	3,46E+02
	7	2000	5,67E+03	3,43E+02
	8	2000	5,74E+03	3,49E+02
	9	2000	5,43E+03	3,33E+02
	10	2000	5,33E+03	3,23E+02
03	1	2000	5,98E+03	3,63E+02
	2	2000	5,89E+03	3,57E+02
	3	2000	5,94E+03	3,60E+02
	4	2000	5,88E+03	3,57E+02
	5	2000	5,68E+03	3,45E+02
	6	2000	5,71E+03	3,46E+02
	10	2000	5,60E+03	3,40E+02

Aufgrund der geringen Aktivitäten der einzelnen Stabquellen und den relativ kurzen Messzeiten von bis zu einigen 1000 Sekunden je Stab liegt die relative Unsicherheit der bestimmten Aktivitätswerte meist über 5 % und konnte somit nicht für eine direkte Aktivitätsbestimmung herangezogen werden. Ein Vergleich mit den Werten in Tabelle 3 zeigt aber innerhalb der Messunsicherheiten eine sehr gute Übereinstimmung der Werte der beiden Messreihen. Standen für ein Nuklid mehrere charakteristische Gamma-Linien für die Auswertung zur Verfügung, so wurden diese entsprechend ihrer Übergangswahrscheinlichkeiten bei der Aktivitätsbestimmung berücksichtigt.

In Abb. 8 sind die gemessenen Nettopeakzählraten von 81 willkürlich ausgewählten ^{170}Tm -Stabquellen für die charakteristische Gamma-Linie bei 84,3 keV (schwarzer Punkt) mit den jeweiligen Messunsicherheiten (rote Balken) dargestellt. Zum besseren Vergleich ist auch der Mittelwert über alle Zählraten (durchgezogene blaue Linie) sowie die Toleranzgrenzen (gestrichelte blaue Linien) von $\pm 5\%$ um den Mittelwert eingezeichnet. Mit Ausnahme eines Ausreißers liegen alle überprüften Stabquellen innerhalb des geforderten Homogenitätsbereichs.

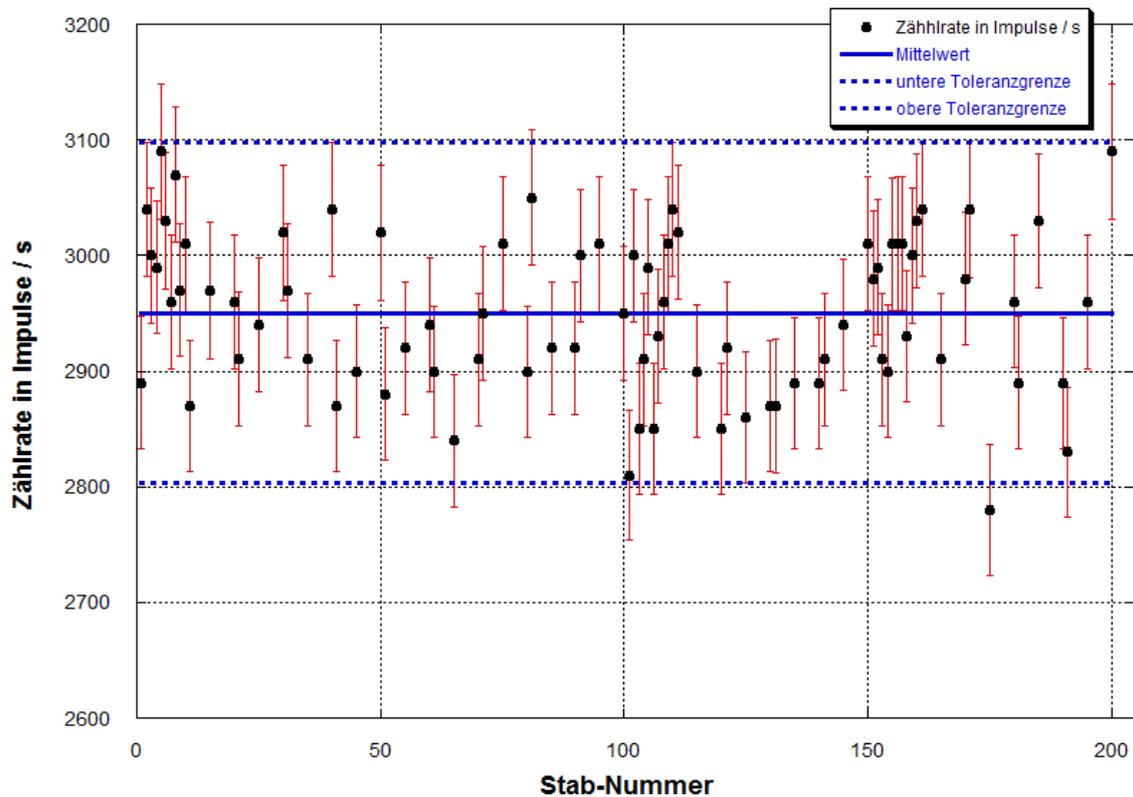


Abb. 8 Ergebnisse der Homogenitätsbestimmung der ^{170}Tm -Stabquellen. Es wurden 81 der ca. 200 produzierten Stabquellen willkürlich ausgewählt und mit einem abgeschirmten HPGe-Detektor vermessen.

Die Ergebnisse der Flächenmessungen für 20 Chargen (d. h. für alle 200 produzierten Stabquellen) für das Nuklid ^{137}Cs sind in Tab. 5 zusammengefasst. Wie bei den Einzelmessungen (Tab. 4) ergibt sich auch in diesen Messungen eine sehr gute Übereinstimmung der Aktivitätswerte für die einzelnen Chargen, d. h. die geforderte Homogenität der Stabquellen wird hierdurch bestätigt.

Tab. 5 Ergebnisse der Aktivitätsbestimmungen für die 20 Chargen mit jeweils 10 flächenförmig angeordneten Stabquellen des Nuklids ^{137}Cs .

Charge	Messzeit in s	Aktivität in Bq	Unsicherheit in Bq
01	1787	6,03E+04	3,63E+03
02	1699	6,09E+04	3,66E+03
03	1300	5,91E+04	3,56E+03
04	2000	6,10E+04	3,67E+03
05	2000	5,96E+04	3,58E+03
06	1671	6,03E+04	3,62E+03
07	1726	6,02E+04	3,62E+03
08	6389	6,05E+04	3,63E+03
09	1514	6,09E+04	3,66E+03
10	1508	6,08E+04	3,66E+03
11	1581	6,09E+04	3,66E+03
12	1510	6,03E+04	3,63E+03
13	1538	6,10E+04	3,67E+03
14	1687	6,12E+04	3,68E+03
15	1446	6,08E+04	3,66E+03
16	1468	6,00E+04	3,61E+03
17	1758	6,03E+04	3,63E+03
18	1090	5,97E+04	3,60E+03
19	1150	6,02E+04	3,63E+03
20	2000	6,11E+04	3,67E+03

In analoger Weise wurden Messungen und Auswertungen für die Stabquellen aller sieben Nuklide durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten für alle Nuklide die Einhaltung der geforderten Homogenität.

2.3 Messungen

2.3.1 Allgemeines

Die Details zur Durchführung der Messungen, insbesondere des Phantomaufbaus, wurden in enger Abstimmung mit der Leitstelle Inkorporationsüberwachung in Unterschleißheim (Neuherberg) getroffen und resultierten in folgenden Anforderungen für die durchzuführenden Messungen:

- Die Messungen waren für alle sieben Nuklide (siehe Kapitel 2.2) einzeln durchzuführen.
- Die Messungen waren mit zwei unterschiedlichen Geometrien des Petersburger Ziegelphantoms durchzuführen.

- Die Messungen mussten bei vier verschiedenen Aktivitätsniveaus je Nuklid erfolgen.
- Bei den Messungen waren drei unterschiedliche Messpositionen zu berücksichtigen.
- Die Messungen waren mit zwei unterschiedlichen Detektorsystemen durchzuführen.
- Die einzelnen Messungen waren nach Möglichkeit⁵ mehrfach (mindestens drei Mal) durchzuführen.

Ergänzend zu diesen Messungen sollte die Ansprechwahrscheinlichkeit eines Portalmonitors experimentell bestimmt und dokumentiert werden.

2.3.2 Eingesetzte Messgeräte

Die Gamma-spektrometrischen Messungen wurden mit einem mobilen, batteriebetriebenen elektrogekühlten HPGe-Detektor vom Typ Falcon 5000[®] der Fa. Canberra GmbH ausgeführt und für die Messungen von RCM zur Verfügung gestellt (Abb. 9). Der Auftraggeber stellte eine LaBr₃-Messsonde der Fa. Canberra GmbH für die Messungen zur Verfügung (Abb. 10).

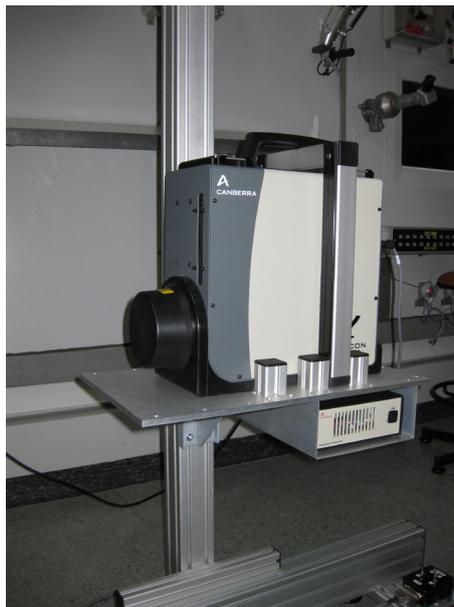


Abb. 9 Foto des mobilen batteriebetriebenen elektrogekühlten HPGe-Detektor vom Typ Falcon 5000.

⁵ Bei den kurzlebigen Nukliden waren Wiederholungsmessungen nur bedingt möglich.



Abb. 10 Fotos der LaBr_3 -Messsonde mit Zubehör. Links: Koffer mit Messsonde und Abschirmmaterialien; Rechts: Laptop und für den Betrieb des Detektorsystems benötigtes Zubehör.

Als Portalmonitor wurde vom Auftraggeber das Modell MinSentry der Fa. Canberra GmbH zur Verfügung gestellt (Abb. 11). Laut Herstellerangabe handelt es sich hierbei um einen transportablen, schnell einsatzbereiten Portalmonitor, der sensitiv auf Gamma-Strahlung ist (siehe auch /7/).



Abb. 11 Foto des transportablen Gamma-sensitiven Portal-Monitors MiniSentry mit Bedien- und Anzeigeeinheit.

2.3.3 Petersburger Ziegelphantom

Das Petersburger Ziegelphantom, in /4/ als UPh-07T Set bezeichnet, kann unter Verwendung von Polyethylen-Blöcke den menschlichen Körper in 18 verschiedenen Formen angenähert nachbilden. Die Formen betreffen Haltung (stehend bzw. liegend sowie gerade bzw. gekrümmt sitzend), Größe (von 44 cm bis zu 177,5 cm) und Masse (von 10,6 kg bis zu 95,2 kg). Hierfür stehen PE-Blöcke der Formate 165 mm x 110 mm x 55 mm (H X B x T) ("ganzer" PE-Block) und 165 mm x 110 mm x 25 mm ("halber" PE-Block) zur Verfügung. Die einzelnen PE-Blöcke können mit stabförmigen Radionuklidquellen bestückt werden und auf diese Weise die Inkorporation von radioaktiven Stoffen simulieren. Abbildung 12 zeigt die beiden Arten von PE-Blöcken.

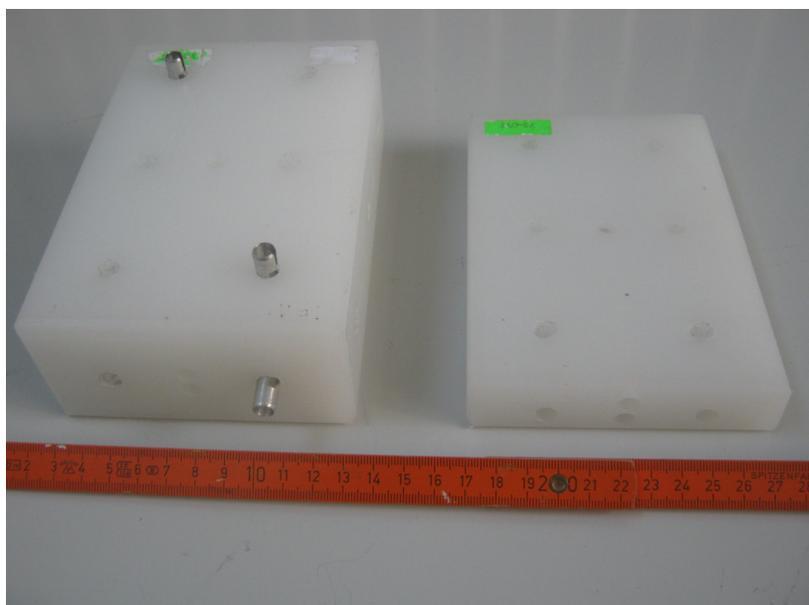


Abb. 12 Fotos eines "ganzen" (links) und eines "halben" (rechts) PE-Blocks.

Für die durchzuführenden Messungen wurden die beiden mit den Phantomindices P4 bzw. P5 bezeichneten Geometrien durch den Auftraggeber vorgegeben. Die wesentlichen Daten dieser beiden Phantome sind in Tab. 6 zusammengefasst (aus /4/). Fotos der beiden Phantomgrößen in sitzender bzw. stehender Anordnung zeigt Abb. 13.

Tab. 6 Zusammenfassung der wesentlichen Daten der beiden verwendeten Phantomgrößen (aus /4/).

Phantomgröße	Masse in kg	Höhe (stehend) in cm	Höhe (sitzend) in cm	Anzahl ganzer PE-Blöcke	Anzahl halber PE-Blöcke
P4	61,5	170,5	88,0	69	2
P5	77,8	170,5	88,0	72	36

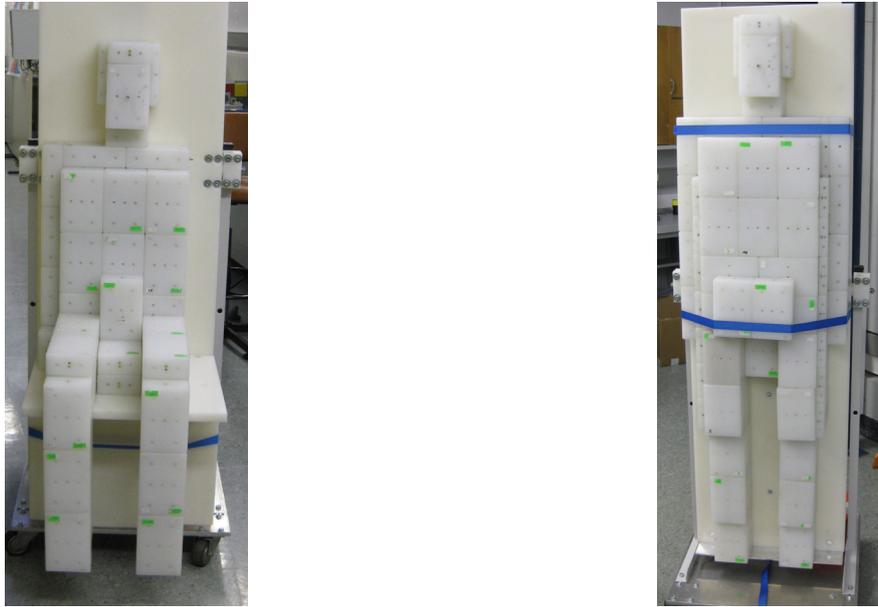


Abb. 13 Links: Foto des sitzenden Phantoms der Größe P4 (mit fehlendem linken Arm). Rechts: Foto des sitzenden Phantoms der Größe P5. Beide Aufbauten wurden vor einer PE-Platte aufgebaut. Für die stehenden Anordnungen wurden die Phantome mittels zweier Spanngurte an der PE-Platte fixiert.

2.3.4 Messaufbau und -durchführung

2.3.4.1 Allgemeines

Die Messungen an den beiden Phantomgrößen wurden jeweils

- sitzend, mit 50 cm Abstand sowie
- stehend, mit 50 cm und 100 cm Abstand

von Brustkorb zu Detektor für die verschiedenen Nuklide und Aktivitätsstufen durchgeführt. Als Messzeit wurde jeweils maximal eine Minute angestrebt. Lag die Unsicherheit der gemessenen Zählrate zu diesem Zeitpunkt noch über fünf Prozent, dann wurde die Messzeit entsprechend verlängert.

Die Messungen bei den vier Aktivitätsniveaus sollte jeweils für eine möglichst homogene Aktivitätsverteilung innerhalb der Phantome erfolgen. Ausgangspunkt hierfür war eine vollständige Bestückung des Phantoms, d. h. alle PE-Blöcke enthielten zwei (für "ganze" PE-Blöcke) Stabquellen bzw. eine (für "halbe" PE-Blöcke) Stabquelle. Aufgrund der unterschiedlichen Halbwertszeiten der eingesetzten Radionuklide wurden für die Messungen bei den drei niedrigeren Aktivitätsniveaus zwei unterschiedliche Ansätze gewählt:

- Für die kurzlebigen Radionuklide (Halbwertszeit unter drei Tagen) wurde die Abnahme der Aktivität über den radioaktiven Zerfall ausgenutzt.
- Für die langlebigen Radionuklide (Halbwertszeit über drei Tagen) wurde die Anzahl der im Phantom eingesetzten Stabquellen variiert.

2.3.4.2 Zusammenbau der Phantome

Für einen schnellen Zusammenbau der verschiedenen Phantomgeometrien wurde als Basis eine große PE-Platte verwendet. Auf dieser wurden die Phantome in liegender Anordnung aufgebaut und mittels Spanngurten an der Platte fixiert. Eine zusätzliche kleine Platte, welche senkrecht zur Grundplatte an diese befestigt werden kann, ermöglicht auch den Aufbau der sitzenden Geometrien. Für die Messungen wurde die Platte mit dem Phantom in eine senkrechte Position gebracht (Abb. 13 und 14).

2.3.4.3 Anordnung für spektrometrische Messungen

Die Anordnung der für eine Messung erforderlichen Komponenten zeigt exemplarisch Abb. 14. Die beiden Gamma-Detektoren wurden auf einem mobilen Manipulator übereinander befestigt (Abstand zwischen den beiden Detektorachsen: 19,2 cm). Die Höhenpositionen des HPGe- (LaBr₃-) Detektors betragen 92,5 cm (73,3 cm) bzw. 93,8 cm (74,6 cm) für die stehende bzw. sitzende Phantomgeometrie⁶. Diese Anordnung ermöglicht die simultane Messung mit dem HPGe- und der LaBr₃-Messsonde, was speziell im Hinblick auf die Messung der kurzlebigen Radionuklide erforderlich ist.

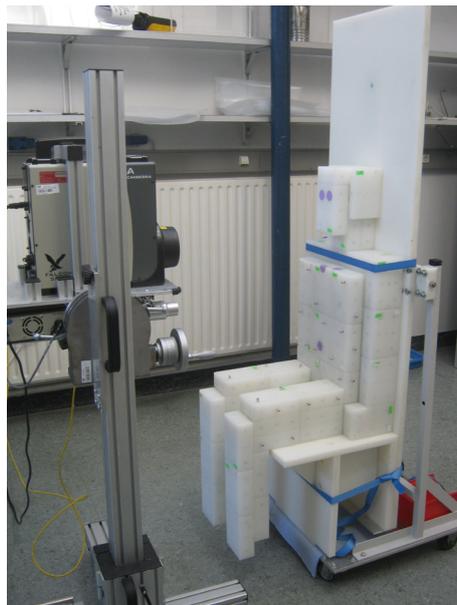


Abb. 14 Fotografie der Messanordnung. Rechts das Phantom (P5) in sitzender Position. Links die beiden auf einem mobilen Manipulator befestigten Detektoren (oben: HPGe-Detektor; unten: LaBr₃-Messsonde). Die gezeigte Anordnung der Detektoren entspricht der Messung eines stehenden Phantoms.

2.3.4.4 Spektrometrische Messungen mit kurzlebigen Radionukliden

Für die Messung mit den kurzlebigen Radionukliden wurde mit einer vollständigen Bestückung des Phantoms in der Geometrie P4 sitzend begonnen. Hierfür wurden die PE-Blöcke mit insgesamt 140 Stabquellen bestückt. Die Messungen für dieses (maximale) Aktivitätsniveau wurden in der in Tabelle 7 angegebenen Reihenfolge für die verschiedenen Anordnungen ausgeführt. Die einzelnen Messungen wurden nach Möglichkeit mindestens dreimal wiederholt. Für den Umbau von P4 auf P5 wurden 37 weitere hauptsächlich "halbe" PE-Blöcke mit insgesamt 40 weiteren Stabquellen eingesetzt.

⁶ Die Höhenangaben beziehen sich auf die unteren Enden des Phantoms (Unterseite Fuß).

Tab. 7 Reihenfolge der Messungen für ein Aktivitätsniveau beim Einsatz der kurzlebigen Radionuklide.

Messung	Phantom	Geometrie
1	P4	sitzend
2	P4	stehend 100 cm
3	P4	stehend 50 cm
4	P5	sitzend
5	P5	stehend 100 cm
6	P5	stehend 50 cm

Die gesamte in Tab. 7 angegebene Messprozedur wurde jeweils nach der Messung 6 für das nächste niedrigere Aktivitätsniveau wiederholt. Abhängig von der Halbwertszeit des Radionuklids erfolgten die nächsten Messungen erst nach Ablauf einer entsprechenden Wartezeit.

2.3.4.5 Spektrometrische Messungen mit langlebigen Radionukliden

Für die Messungen mit den langlebigen Radionukliden kann die Abnahme der Aktivität über den radioaktiven Zerfall nicht genutzt werden. Hier wurden die verschiedenen Aktivitätsniveaus über die Anzahl der für die Messungen eingesetzten Stabquellen eingestellt (Tab. 8 und 9). Die Bestückung der Phantome mit den Stabquellen erfolgte für die Aktivitätsniveaus und Geometrien entsprechend einem festgelegten Schema, welches eine weitestgehend homogene Aktivitätsverteilung trotz reduzierter Anzahl an Stabquellen sicherstellen sollte. Ausgehend von einer Bestückung der "ganzen" PE-Blöcke mit jeweils zwei Stabquellen im Aktivitätsniveau A1, wurde für das Niveau A2 aus jedem zweiten "ganzen" PE-Block eine Stabquelle entfernt. Im Niveau A3 sind alle und im Niveau A4 nur jeder zweite "ganze" PE-Block mit einer Stabquelle bestückt. Die in den Aktivitätsniveaus A2 bis A4 nicht mit Stabquellen bestückten "halben" PE-Blöcke sind schematisch in Abb. 15 dargestellt.

Die Durchführung der Messungen erfolgte aus praktischen Gründen beginnend bei dem Niveau niedrigster Aktivität (A4) hin zu höchster Aktivität (A1).

Tab. 8 Anzahl der in Phantom P4 eingesetzten Stabquellen für die verschiedenen Aktivitätsniveaus.

Aktivitätsniveau	A1	A2	A3	A4
Stabquellen in "ganzen" PE-Blöcken	138	103	69	34
Stabquellen in "halben" PE-Blöcken	2	2	0	0
Stabquellen insgesamt	140	105	69	34

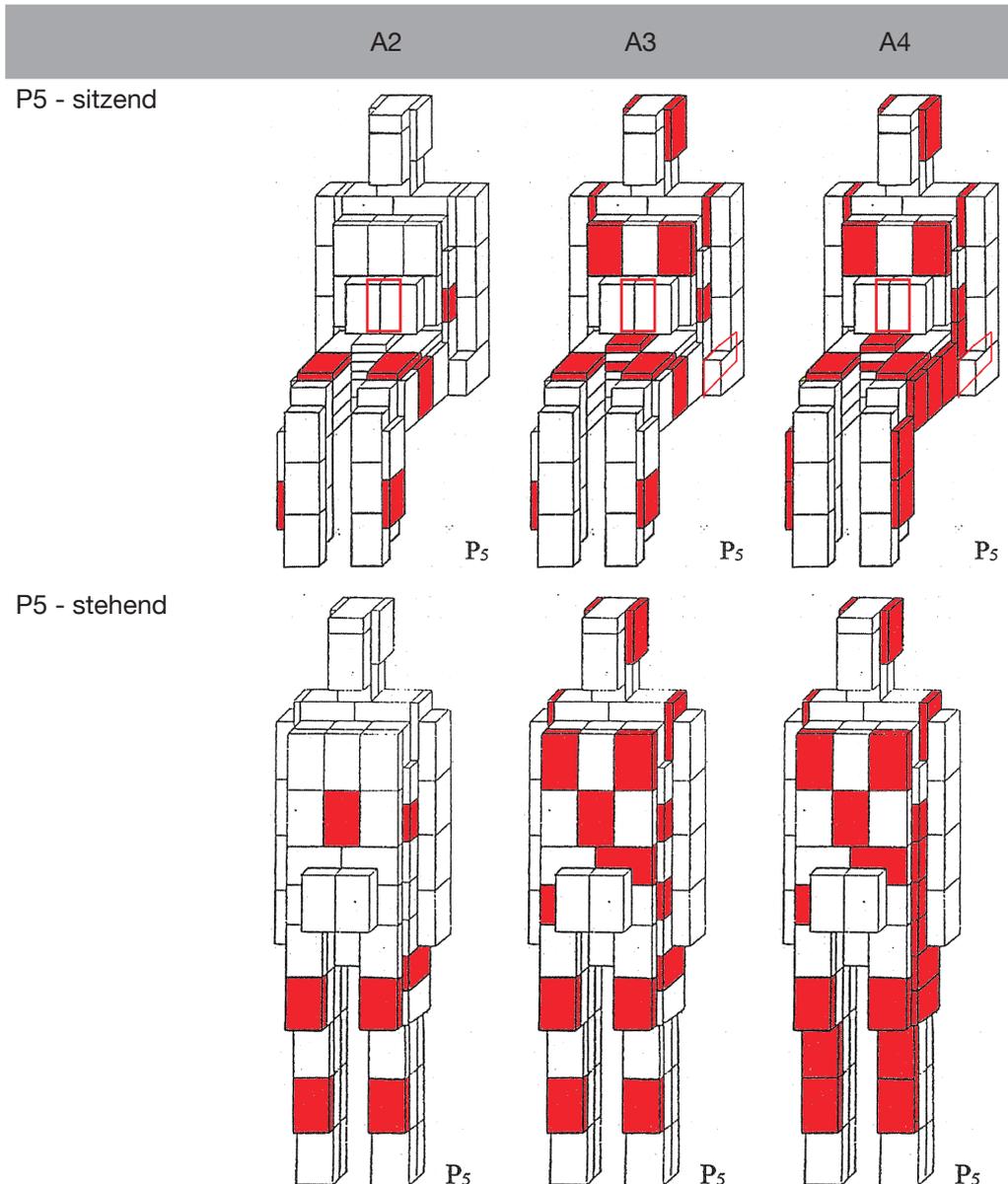


Abb. 15 Schematische Darstellung der in den Aktivitätsniveaus A2 bis A4 nicht mit Stabquellen bestückten "halben" PE-Blöcken (rote Bereiche).

Tab. 9 Anzahl der in Phantom P5 eingesetzten Stabquellen für die verschiedenen Aktivitätsniveaus.

Aktivitätsniveau	A1	A2	A3	A4
Stabquellen in "ganzen" PE-Blöcken	144	107	72	35
Stabquellen in "halben" PE-Blöcken	36	27	17	9
Stabquellen insgesamt	180	134	89	44

2.3.4.6 Messungen der Dosisleistung

Für die Dosisleistungsmessungen wurde das Modell FH 40 F1 der Fa. FAG eingesetzt. Die Messungen erfolgten in direktem Kontakt jeweils am Bauch der stehenden Aufbauten der Phantomen P4 und P5.

2.3.4.7 Messungen mit dem Portalmonitor

Der Portalmonitor wurde in den Modus "Enter Wait" versetzt und das stehende Phantom in das Portal geschoben. Diese Messung wurde mindestens dreimal wiederholt.

2.3.4.8 Eingesetzte Aktivitäten

Für die Messungen ergaben sich für die Aktivitätsniveaus für die beiden Phantomgeometrien P4 und P5 die in Tab. 10 und Tab. 11 aufgeführten Aktivitäten⁷.

Tab. 10 In den Messungen am Phantom P4 für die verschiedenen Radionuklide eingesetzte Aktivitäten. Die Werte beziehen sich jeweils auf den Zeitpunkt der ersten Messung für das jeweilige Aktivitätsniveau.

Nuklid	A1 in Bq	A2 in Bq	A3 in Bq	A4 in Bq
²² Na	7,03E+05	5,25E+05	3,45E+05	1,70E+05
²⁴ Na	2,72E+06	1,33E+06	8,24E+05	4,19E+05
⁷⁵ Se	2,17E+06	1,63E+06	1,07E+06	5,37E+05
⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	1,53E+06	9,30E+05	4,23E+05	2,04E+05
¹³⁷ Cs	8,41E+05	6,31E+05	4,14E+05	2,04E+05
¹⁷⁰ Tm	2,06E+06	1,55E+06	1,03E+06	5,20E+05
¹⁹⁷ Hg	7,91E+06	6,11E+04	4,38E+04	3,65E+04

⁷ Die Aktivitäten wurden aus den zerfallskorrigierten Werten der Aktivitätsbestimmung (Tab. 3) bestimmt und gelten für die jeweils erste durchgeführte Messung einer Messreihe.

Tab. 11 In den Messungen am Phantom P5 für die verschiedenen Radionuklide eingesetzte Aktivitäten. Die Werte beziehen sich auf den Zeitpunkt der ersten Messung für das jeweilige Aktivitätsniveau.

Nuklid	A1 in Bq	A2 in Bq	A3 in Bq	A4 in Bq
²² Na	9,04E+05	6,70E+05	4,45E+05	2,20E+05
²⁴ Na	3,56E+06	1,70E+06	1,08E+06	5,29E+05
⁷⁵ Se	2,80E+06	2,08E+06	1,38E+06	6,95E+05
⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	1,88E+06	1,21E+06	5,37E+05	2,66E+05
¹³⁷ Cs	1,08E+06	8,05E+05	5,35E+05	2,64E+05
¹⁷⁰ Tm	2,65E+06	1,98E+06	1,33E+06	6,72E+05
¹⁹⁷ Hg	1,02E+07	4,81E+06	3,49E+06	2,79E+06

2.3.4.9 Abstandsmessung

Für die Messung des Abstands zwischen Detektor und Phantom wurde ein Laser-Entfernungsmesser vom Typ Leica DISTO lite eingesetzt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Laserlicht vor seiner Reflexion in die PE-Blöcke eindringt und nicht bereits an der Oberfläche reflektiert wird. Hierdurch wird ein um ca. 1,0 bis 1,5 cm größerer Abstand angezeigt, als tatsächlich vorhanden. Abhilfe schafft ein auf dem PE-Block aufgebrachter reflektierender Aufkleber.

2.3.5 Messergebnisse

2.3.5.1 Allgemeines

Nachfolgend sind exemplarisch die gemessenen Spektren für das Phantom P4 in sitzender Geometrie für das höchste Aktivitätsniveau A1 unter Verwendung des HPGe-Detektors (Abschnitt 2.3.5.2) und des LaBr₃-Messsonde (Abschnitt 2.3.5.3) dargestellt. Die Ergebnisse der Dosisleistungsmessungen sind in Abschnitt 2.3.5.3, für den Portalmonitor in Abschnitt 2.3.5.4 zusammengefasst.

Alle gemessenen Spektren sind auch im Datenformat von Genie 2000 der Fa. Canberra (*.cnf-Datei) in elektronischer Form verfügbar. Eine einfache Identifizierung der gespeicherten Spektren kann über den Dateinamen erfolgen, für den das nachfolgende Format gewählt wurde:

Datum_Nuklid_Detektor_Phantomgröße_Geometrie_Aktivitätsniveau_Anzahl.cnf

- *Datum*: "MMTT" (M=Monat, T=Tag). Die Angabe des Jahres bleibt unberücksichtigt, da alle Spektren in 2014 gemessen wurden (Beispiel: 0109 entspricht dem 9. Januar 2014).
- *Nuklid*: Elementbezeichnung gefolgt von der Massenzahl (Beispiel: Na24).
- *Detektor*: "Ge" für den HPGe-Detektor und "La" für die LaBr₃-Sonde.
- *Phantomgröße*: "P4" oder "P5".
- *Geometrie*: "sit" für sitzende Position, "stg" für stehende Position mit 100 cm Abstand und "stk" für stehende Position mit 50 cm Abstand.

- *Aktivitätsniveau*: "A1", "A2", "A3" und "A4".
- *Anzahl*: Nummer der Messung⁸.

Beispiel: Der Dateiname "0213_Tm170_Ge_P5_stk_A2_3.cnf" enthält somit das am 13. Februar 2014 gemessene Spektrum für das Nuklid ^{170}Tm . Die Messung erfolgte mit dem HPGe-Detektor an dem stehenden Phantom P5 für das Aktivitätsniveau A2 (zweithöchstes Aktivitätsniveau) in 50 cm Abstand zwischen Detektor und Phantom.

2.3.5.2 Ergebnisse der spektrometrischen Messungen mit dem HPGe-Detektor

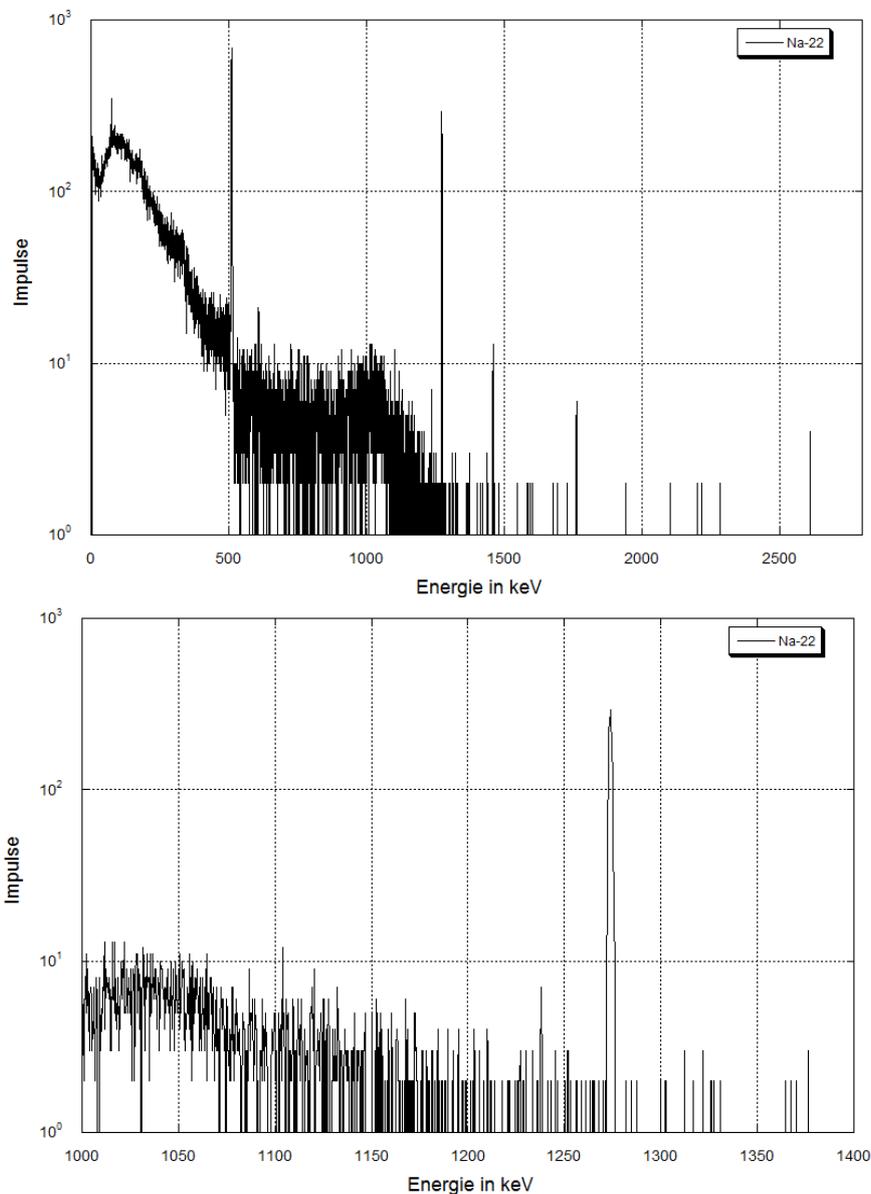


Abb. 16 HPGe-Spektrum von ^{22}Na (oben: vollständiges Spektrum; unten: Ausschnitt 1000 keV - 1400 keV).

⁸ Nach Möglichkeit wurden mindestens 3 Messungen für jede Anordnung durchgeführt.

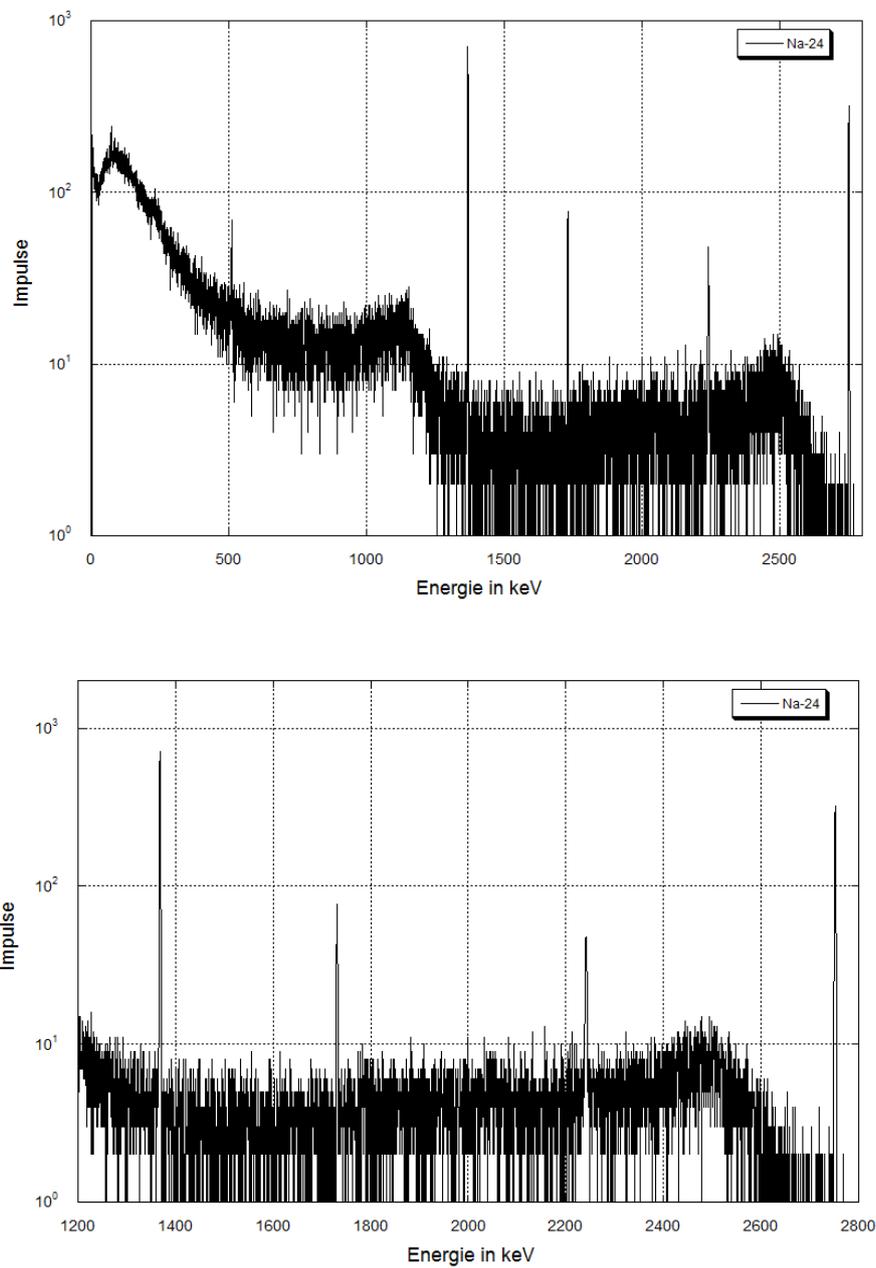


Abb. 17 HPGe-Spektrum von ^{24}Na (oben: vollständiges Spektrum; unten: Ausschnitt 1200 keV - 2800 keV).

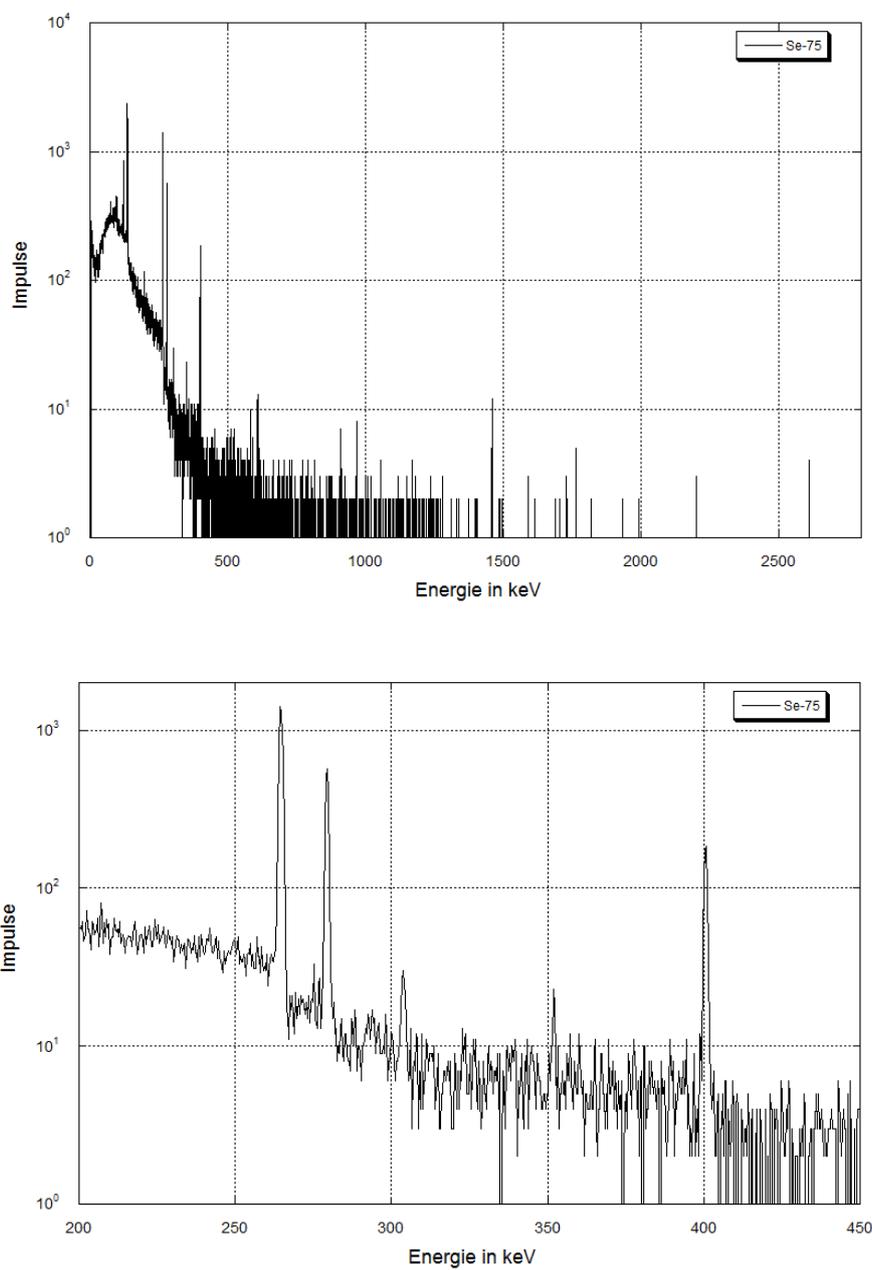


Abb. 18 HPGe-Spektrum von ^{75}Se (oben: vollständiges Spektrum; unten: Ausschnitt 200 keV - 450 keV).

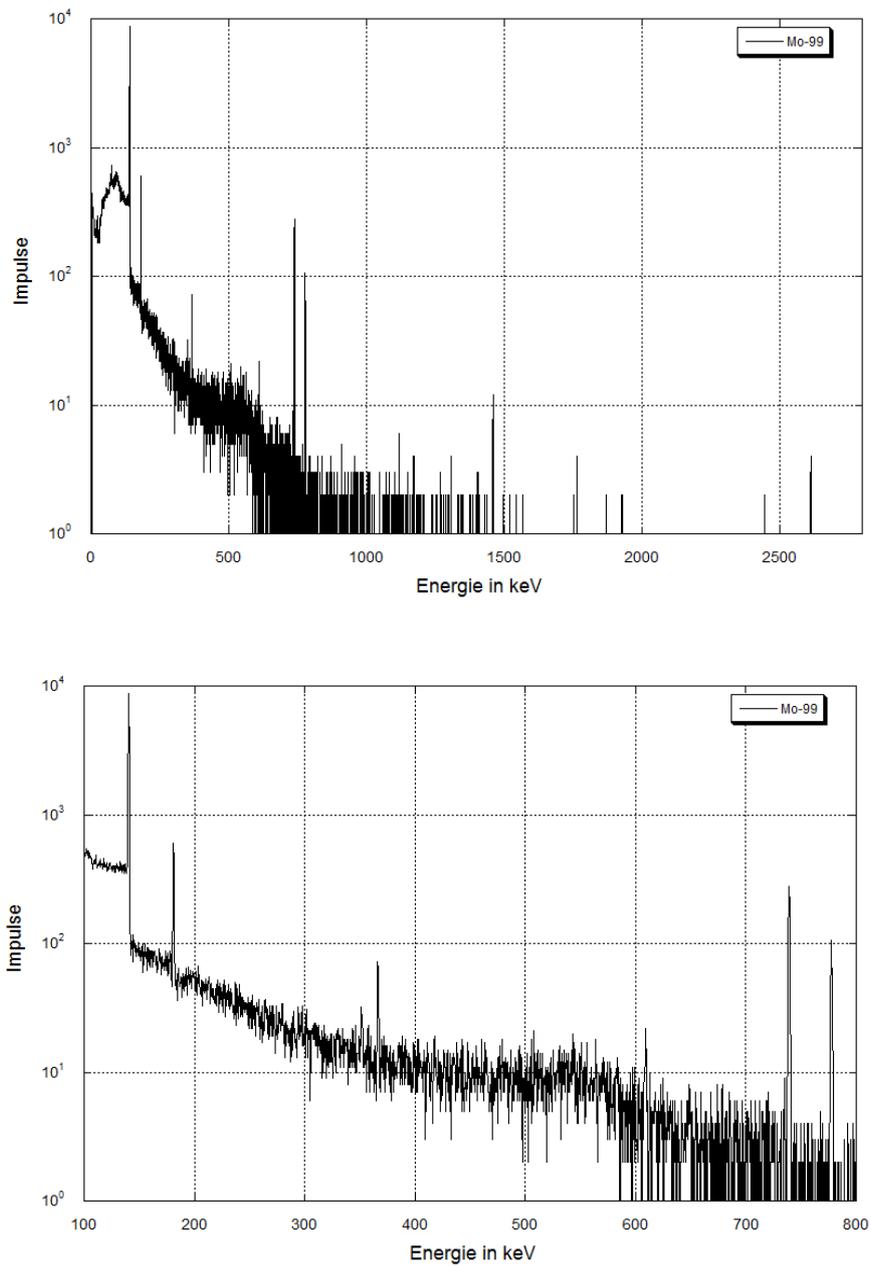


Abb. 19 HPGe-Spektrum von $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ (oben: vollständiges Spektrum; unten: Ausschnitt 100 keV - 800 keV).

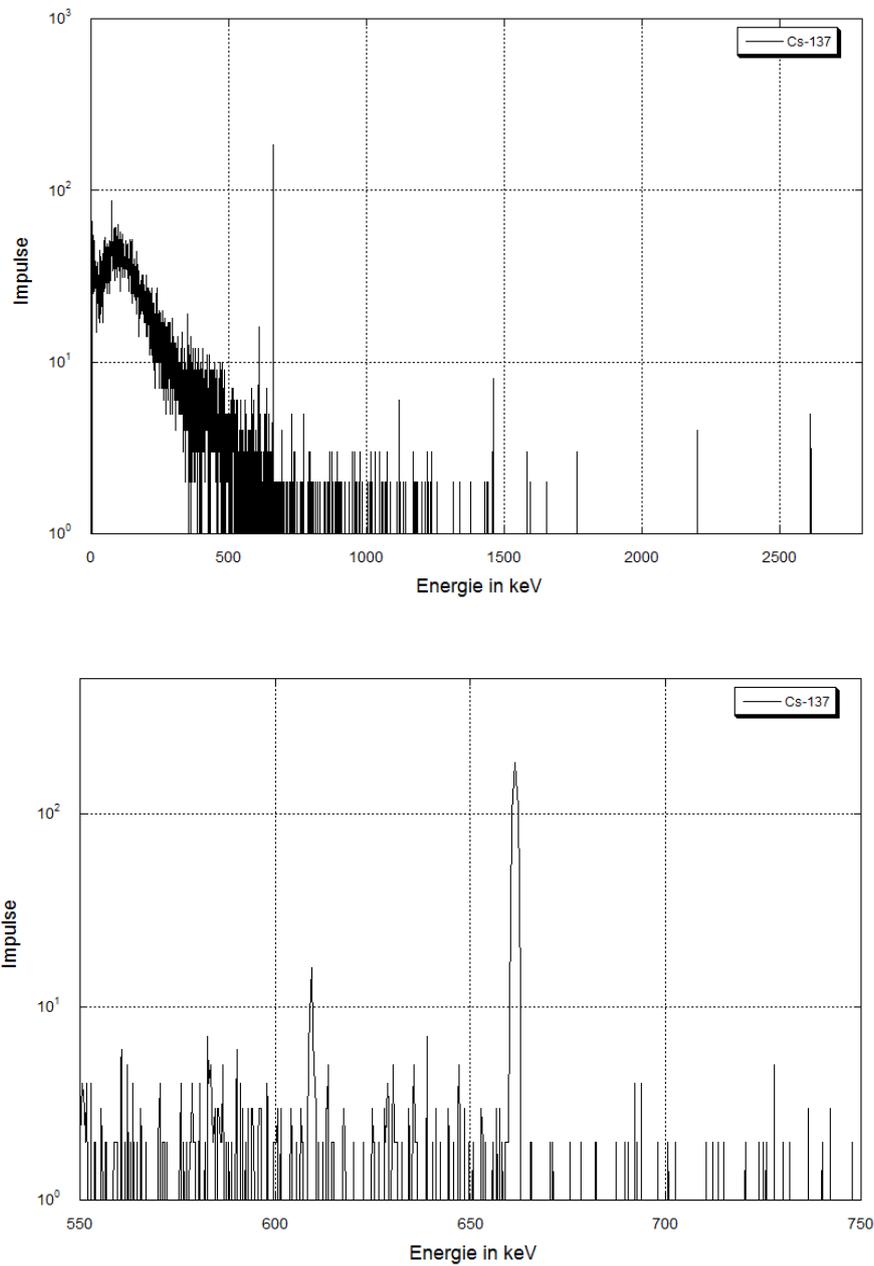


Abb. 20 HPGe-Spektrum von ^{137}Cs (oben: vollständiges Spektrum; unten: Ausschnitt 550 keV - 750 keV).

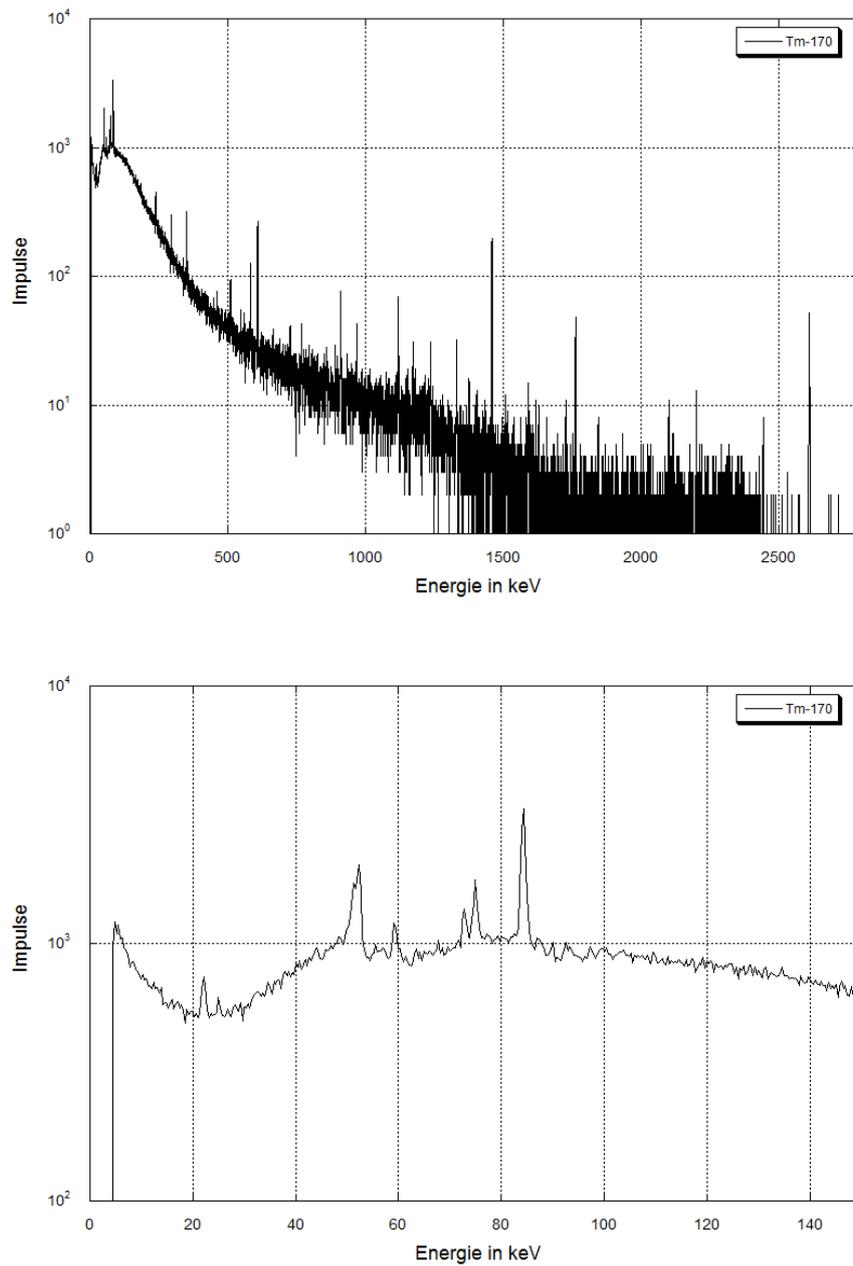


Abb. 21 HPGe-Spektrum von ^{170}Tm (oben: vollständiges Spektrum; unten: Ausschnitt 0 keV - 150 keV).

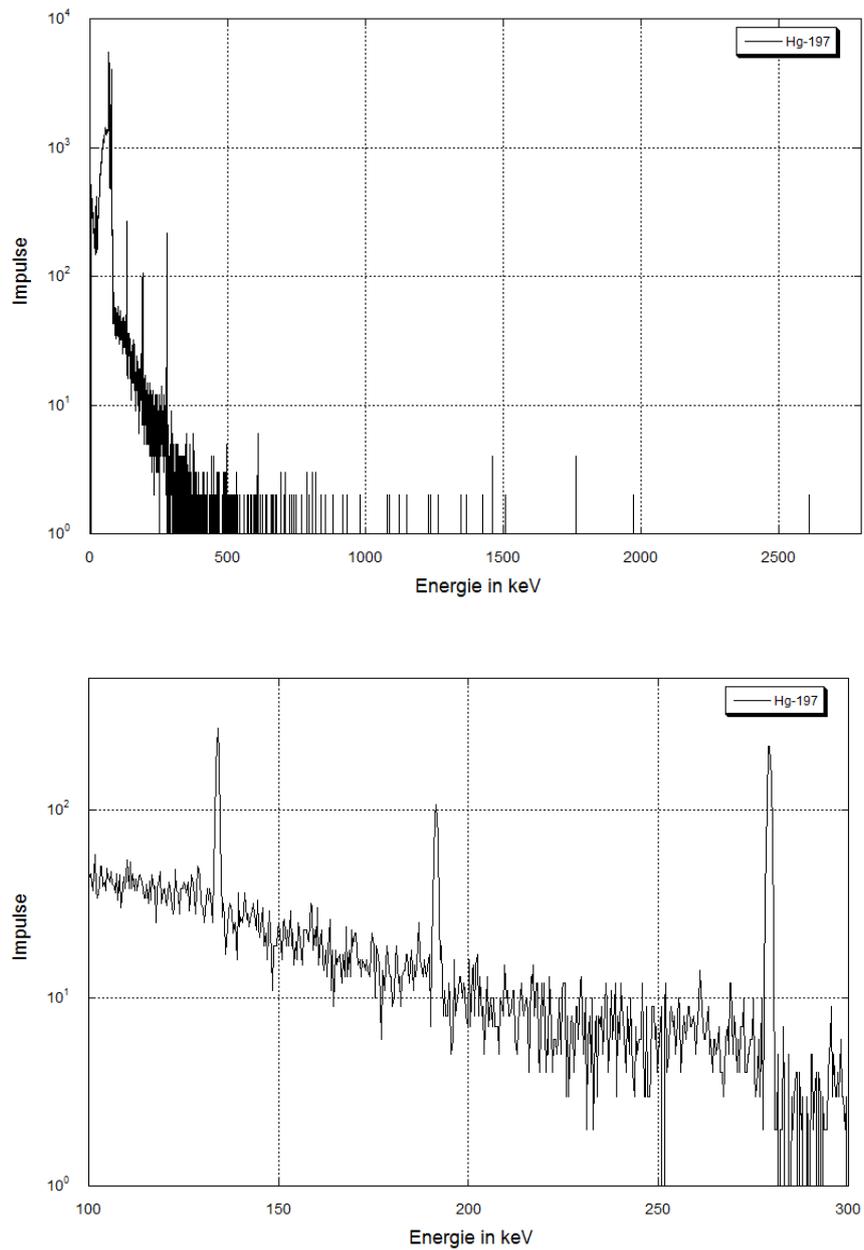


Abb. 22 HPGe-Spektrum von ^{197}Hg (oben: vollständiges Spektrum; unten: Ausschnitt 100 keV - 300 keV).

2.3.5.3 Ergebnisse der spektrometrischen Messungen mit dem LaBr_3 -Messsonde

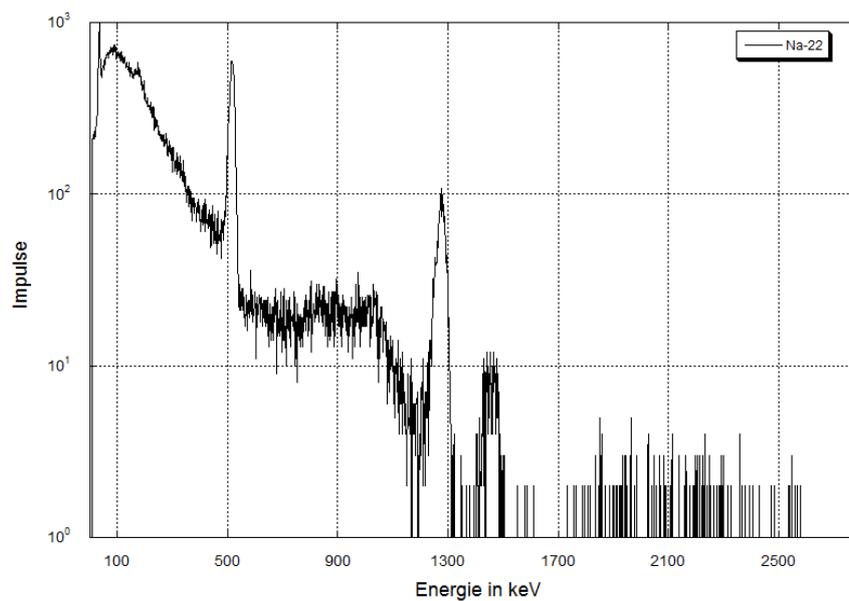


Abb. 23 LaBr_3 -Spektrum von ^{22}Na .

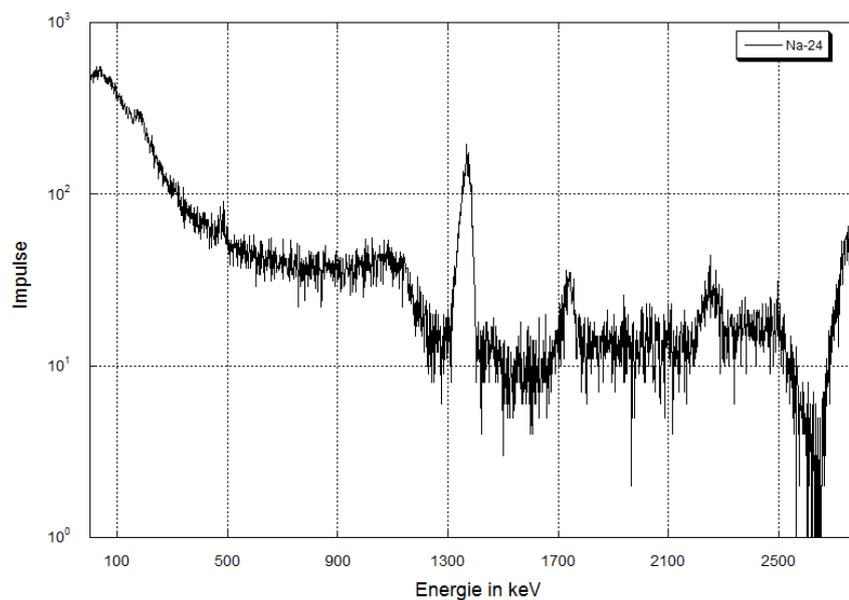


Abb. 24 LaBr_3 -Spektrum von ^{24}Na .

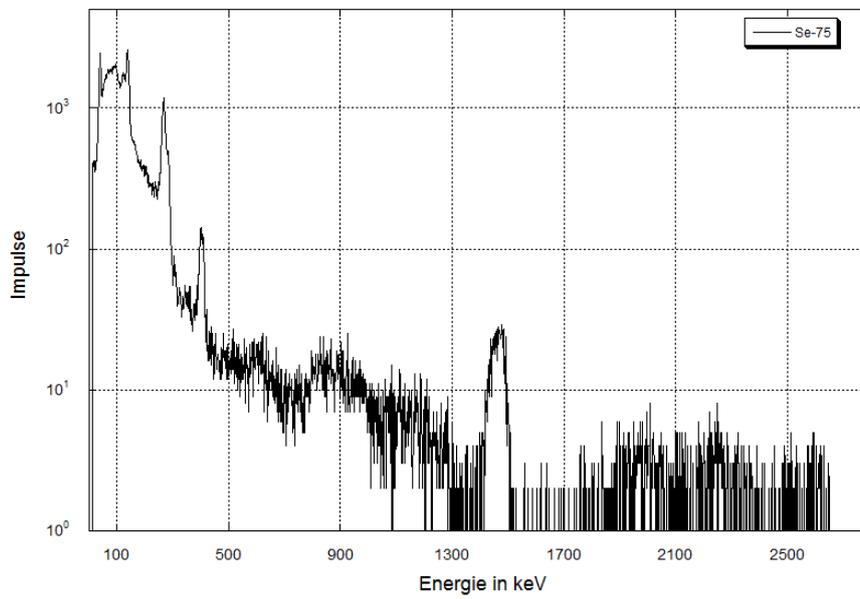


Abb. 25 LaBr_3 -Spektrum von ^{75}Se .

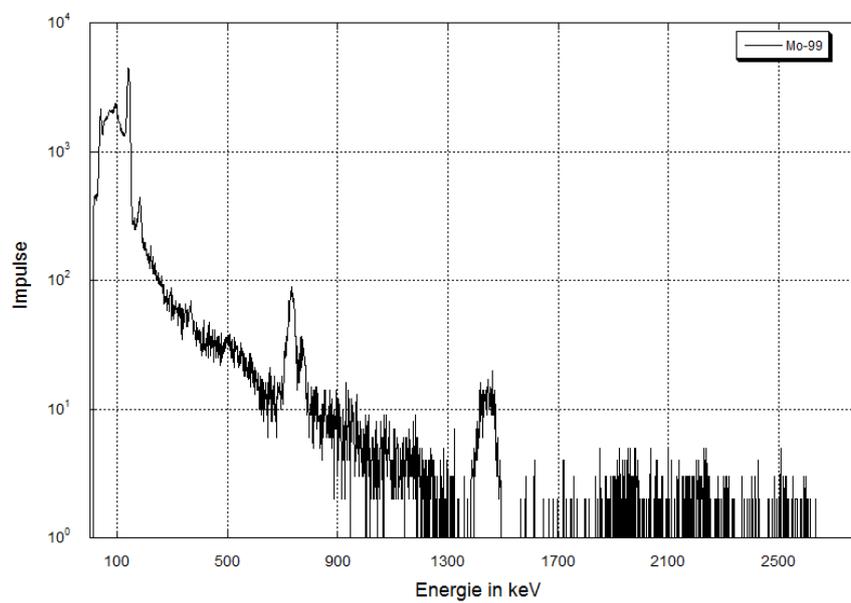


Abb. 26 LaBr_3 -Spektrum von $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$.

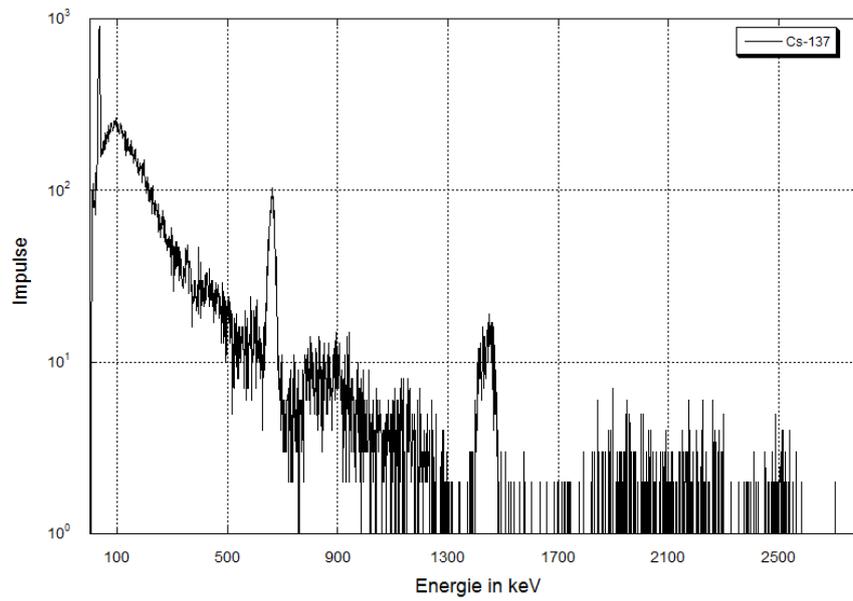


Abb. 27 LaBr_3 -Spektrum von ^{137}Cs .

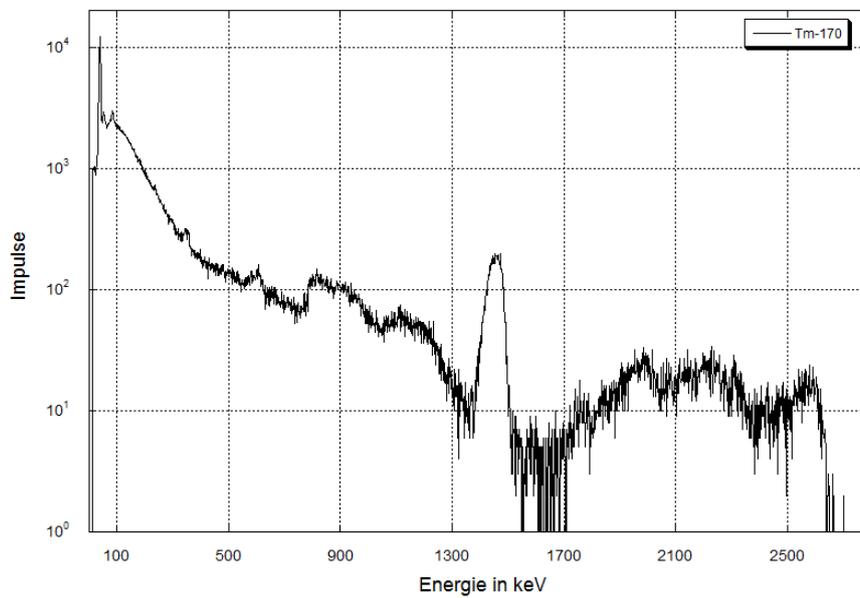


Abb. 28 LaBr_3 -Spektrum von ^{170}Tm .

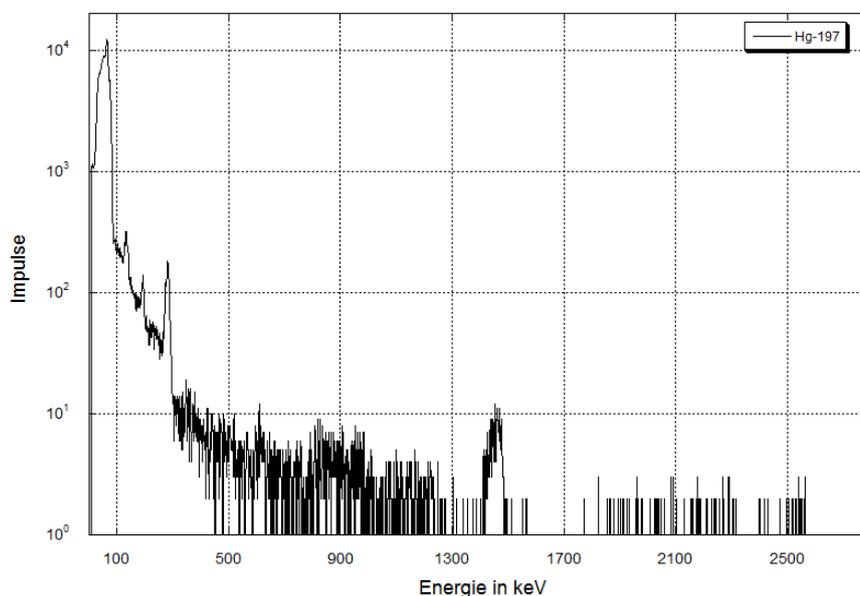


Abb. 29 LaBr_3 -Spektrum von ^{197}Hg .

2.3.5.4 Ergebnisse der Dosisleistungsmessungen

In den Tabellen 12 und 13 sind die Ergebnisse der Dosisleistungsmessungen für die verschiedenen Nuklide und Aktivitätsniveaus für die beiden Phantomgrößen jeweils zusammengefasst. Für das Nuklid ^{170}Tm wurden keine signifikant vom Untergrund abweichenden Werte gemessen.

Tab. 12 Gemessene Dosisleistungsmesswerte für die Phantomgröße P4. Die Messungen erfolgten am stehenden Phantom.

P4	Aktivitätsniveau	Dosisleistung in $\mu\text{Sv/h}$						
		^{22}Na	^{24}Na	^{75}Se	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{137}Cs	^{170}Tm	^{197}Hg
	A1	4,0	39	2,1	1,7	0,8	-	1,7
	A2	3,1	20	1,2	1,3	0,7	-	0,5
	A3	1,8	12	1,0	0,6	0,5	-	0,7
	A4	1,1	7	0,4	0,3	0,3	-	0,2

Tab. 13 Gemessene Dosisleistungsmesswerte für die Phantomgröße P5. Die Messungen erfolgten am stehenden Phantom.

P5	Aktivitäts-niveau	Dosisleistung in $\mu\text{Sv/h}$						
		^{22}Na	^{24}Na	^{75}Se	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{137}Cs	^{170}Tm	^{197}Hg
	A1	4,0	42	2,2	1,5	1,1	-	1,7
	A2	3,7	19	1,8	0,9	0,8	-	0,7
	A3	2,7	12	1,1	0,5	0,7	-	0,5
	A4	1,3	6	0,7	0,3	0,4	-	0,2

2.3.5.5 Messungen mit Portalmonitor

In den Tabellen 14 und 15 sind die Ergebnisse der Messungen mit dem Portalmonitor für die verschiedenen Nuklide und Aktivitätsniveaus für die beiden Phantomgrößen jeweils zusammengefasst. Für das Nuklid ^{170}Tm wurden keine signifikant vom Untergrund abweichenden Werte gemessen. Die Messungen für das Nuklid ^{24}Na erfolgten nur für die Aktivitätsniveaus A1 und A4.

Tab. 14 Messwerte am Portalmonitor für die Phantomgröße P4. Die Messungen erfolgten am stehenden Phantom.

P4	Aktivitäts-niveau	Zählrate in 1/s						
		^{22}Na	^{24}Na	^{75}Se	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{137}Cs	^{170}Tm	^{197}Hg
	A1	17500	2000	7100	2630	7580	-	1000
	A2	13560	-	5500	1490	6470	-	600
	A3	9790	-	3580	780	4920	-	550
	A4	5900	2000	1810	230	3610	-	250

Tab. 15 Messwerte am Portalmonitor für die Phantomgröße P5. Die Messungen erfolgten am stehenden Phantom.

P5	Aktivitäts-niveau	Zählrate in 1/s						
		^{22}Na	^{24}Na	^{75}Se	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{137}Cs	^{170}Tm	^{197}Hg
	A1	21000	1700	8810	3050	9200	-	1300
	A2	16560	-	6720	1830	7450	-	800
	A3	11600	-	4310	800	5550	-	750
	A4	6640	1700	2200	270	3950	-	300

2.4 Auswertung und Dokumentation der Messergebnisse

2.4.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Kapiteln werden die gewonnenen Messdaten (siehe Kapitel 2.3) ausgewertet. Aus den Daten der mit dem HPGe-Detektor und der LaBr₃-Messsonde bestimmten Gamma-Spektren wurden die energieabhängigen Effizienzkurven in Abhängigkeit der Phantomgröße und der Messgeometrie abgeleitet (Kapitel 2.4.2). Ein Vergleich der Aussagekraft der mit dem HPGe-Detektor bestimmten Spektren im Vergleich zu den mit der LaBr₃-Messsonde bestimmten Spektren erfolgt in Kapitel 2.4.3. Für 18 Nuklide wurden auf der Grundlage von Untergrundspektren, die mit dem HPGe-Detektor bzw. der LaBr₃-Messsonde gemessen wurden, Nachweis- und Erkennungsgrenzen berechnet (Kapitel 2.4.4). Ergänzend zu diesen Gamma-spektrometrischen Auswertungen folgen Auswertungen von Messungen mit dem Portalmonitor (Kapitel 2.4.5) und der Dosisleistungsmesssonde (Kapitel 2.4.6).

2.4.2 Bestimmung der Effektivität für spektrometrische Messungen

Für die Bestimmung der energieabhängigen Effektivität ε wurde die Beziehung

$$A = \frac{\varepsilon}{\eta} \cdot \frac{NPF}{t_{live}}$$

herangezogen. Hierbei bedeutet A die bei der Messung eingesetzte Aktivität in Bq, η die Übergangswahrscheinlichkeit der für die Effektivitätsbestimmung herangezogenen Gamma-Linie, NPF die Nettopeakfläche des Peaks bei dieser Gamma-Linie sowie t_{live} die Live-Time der Messung in Sekunden. Die Ergebnisse der Auswertungen für die beiden Phantomgrößen P4 und P5 sind für den HPGe-Detektor in den Tabellen 16 und 17 sowie für die LaBr₃-Messsonde in den Tabellen 18 und 19 zusammengefasst. Die entsprechenden Kurvenverläufe sind in den Abbildungen 30 und 31 sowie 32 und 33 dargestellt.

2.4.2.1 HPGe-Detektor

Die Effektivitätsverläufe (Tab. 16 und 17) können näherungsweise durch die folgenden Beziehungen mathematisch beschrieben werden mit der Energie E in keV:

Für die Anordnung P4 sitzend:

$$\varepsilon_{sitzend}^{P4} = \exp\left[-10,65 + 0,6366 \cdot x - 0,1045 \cdot x^2 + 0,153 \cdot x^3 - 0,04767 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P4 stehend und 50 cm Abstand:

$$\varepsilon_{50cm}^{P4} = \exp\left[-10,65 + 0,5938 \cdot x - 0,1202 \cdot x^2 + 0,2213 \cdot x^3 - 0,0675 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Tab. 16 Ergebnis der mit dem HPGe-Detektor bestimmten energieabhängigen Effektivitätswerte für das Phantom P4.

Energie in keV	Nuklid	sitzend	stehend 50 cm	stehend 100 cm
84,0	¹⁷⁰ Tm	(9,8 ± 0,5)E-05	(1,0 ± 0,1)E-04	(4,3 ± 0,2)E-05
136,0	⁷⁵ Se	(1,0 ± 0,1)E-04	(1,1 ± 0,1)E-04	(4,4 ± 0,1)E-05
140,0	^{99m} Tc	(1,0 ± 0,1)E-04	(1,1 ± 0,1)E-04	(4,6 ± 0,1)E-05
181,0	⁹⁹ Mo	(9,7 ± 0,4)E-05	(1,1 ± 0,1)E-04	(4,1 ± 0,5)E-05
191,4	¹⁹⁷ Hg	(1,0 ± 0,1)E-04	(1,1 ± 0,1)E-04	(4,2 ± 0,3)E-05
264,0	⁷⁵ Se	(7,3 ± 0,5)E-05	(7,7 ± 0,1)E-05	(3,1 ± 0,1)E-05
400,5	⁷⁵ Se	(5,3 ± 0,1)E-05	(5,5 ± 0,2)E-05	(2,1 ± 0,5)E-05
661,7	¹³⁷ Cs	(3,7 ± 0,1)E-05	(3,6 ± 0,1)E-05	(1,4 ± 0,1)E-05
1274,5	²² Na	(2,6 ± 0,1)E-05	(2,6 ± 0,1)E-05	(9,5 ± 0,1)E-06
1368,0	²⁴ Na	(2,4 ± 0,1)E-05	(2,4 ± 0,1)E-05	(9,2 ± 0,1)E-06
2754,0	²⁴ Na	(1,4 ± 0,1)E-05	(1,4 ± 0,1)E-05	(5,1 ± 0,1)E-06

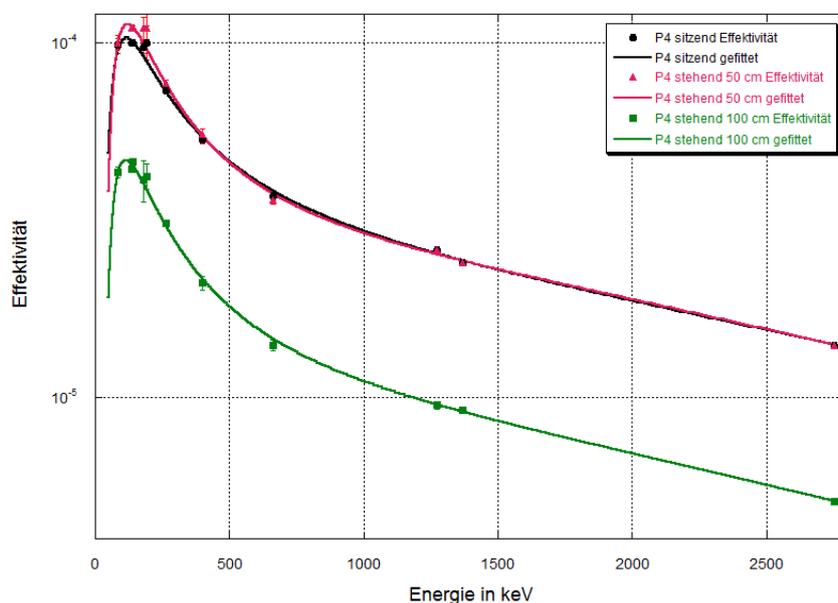


Abb. 30 Grafische Darstellung der für den HPGe-Detektor bestimmten Effizienzdaten aus Tab. 17 für das Phantom P4.

Tab. 17 Ergebnis der mit dem HPGe-Detektor bestimmten energieabhängigen Effektivitätswerte für das Phantom P5.

Energie in keV	Nuklid	sitzend	stehend 50 cm	stehend 100 cm
84,0	¹⁷⁰ Tm	(8,1 ± 0,4)E-05	(9,4 ± 0,4)E-05	(4,0 ± 0,2)E-05
136,0	⁷⁵ Se	(8,8 ± 0,1)E-05	(9,8 ± 0,2)E-05	(4,0 ± 0,1)E-05
140,0	^{99m} Tc	(1,0 ± 0,1)E-04	(9,8 ± 0,1)E-05	(4,0 ± 0,1)E-05
181,0	⁹⁹ Mo	(9,7 ± 0,4)E-05	(8,7 ± 0,6)E-05	(3,7 ± 0,5)E-05
191,4	¹⁹⁷ Hg	(8,6 ± 0,8)E-05	(9,1 ± 0,8)E-05	(3,8 ± 0,1)E-05
264,0	⁷⁵ Se	(6,5 ± 0,1)E-05	(6,8 ± 0,1)E-05	(2,8 ± 0,1)E-05
400,5	⁷⁵ Se	(4,7 ± 0,1)E-05	(5,0 ± 0,2)E-05	(1,9 ± 0,1)E-05
661,7	¹³⁷ Cs	(3,4 ± 0,1)E-05	(3,4 ± 0,1)E-05	(1,3 ± 0,1)E-05
1274,5	²² Na	(2,4 ± 0,1)E-05	(2,3 ± 0,1)E-05	(9,0 ± 0,3)E-06
1368,0	²⁴ Na	(2,4 ± 0,1)E-05	(2,2 ± 0,1)E-05	(8,4 ± 0,1)E-06
2754,0	²⁴ Na	(1,3 ± 0,1)E-05	(1,2 ± 0,1)E-05	(4,7 ± 0,1)E-06

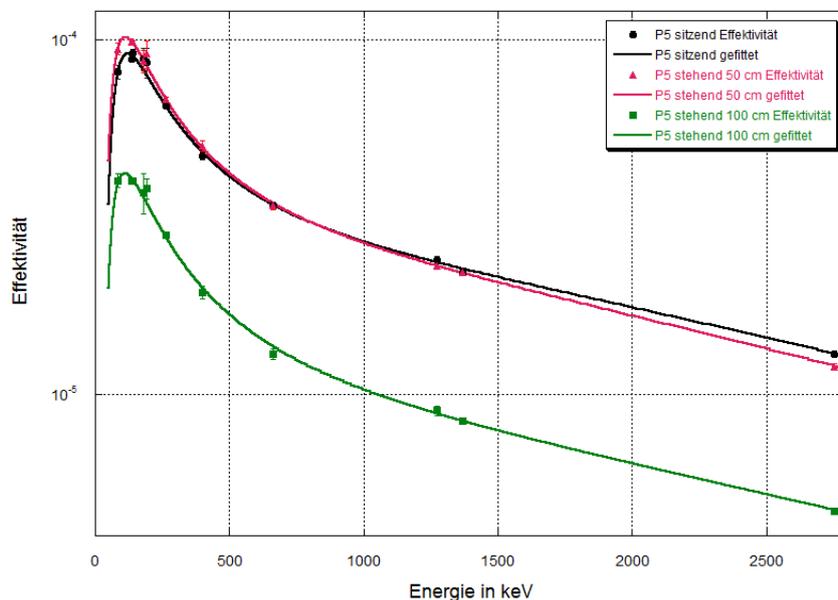


Abb. 31 Grafische Darstellung der für den HPGe-Detektor bestimmten Effizienzdaten aus Tab. 18 für das Phantom P5.

Für die Anordnung P4 stehend und 100 cm Abstand:

$$\varepsilon_{100cm}^{P4} = \exp\left[-11,63 + 0,653 \cdot x - 0,1202 \cdot x^2 + 0,2015 \cdot x^3 - 0,06081 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P5 sitzend:

$$\varepsilon_{sitzend}^{P5} = \exp\left[-10,72 + 0,5919 \cdot x - 0,1476 \cdot x^2 + 0,2081 \cdot x^3 - 0,06132 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P5 stehend und 50 cm Abstand:

$$\varepsilon_{50cm}^{P5} = \exp\left[-10,75 + 0,6567 \cdot x - 0,164 \cdot x^2 + 0,2056 \cdot x^3 - 0,05831 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P5 stehend und 100 cm Abstand:

$$\varepsilon_{100cm}^{P5} = \exp\left[-11,71 + 0,6727 \cdot x - 0,1079 \cdot x^2 + 0,1695 \cdot x^3 - 0,05192 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Bestimmung dieser Beziehungen wurde die Effizienzkalibration von Genie 2000 eingesetzt und eine empirische Angleichung durch ein Polynom vierten Grades angesetzt.

2.4.2.2 LaBr₃-Messsonde

Die Effektivitätsverläufe⁹ (Tab. 18 und 19) können näherungsweise durch die folgenden Beziehungen mathematisch beschrieben werden mit der Energie E in keV:

Für die Anordnung P4 sitzend:

$$\varepsilon_{sitzend}^{P4} = \exp\left[-10,57 + 0,5044 \cdot x - 0,7009 \cdot x^2 + 0,9965 \cdot x^3 - 0,2435 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P4 stehend und 50 cm Abstand:

$$\varepsilon_{50cm}^{P4} = \exp\left[-10,93 + 0,6693 \cdot x - 0,7321 \cdot x^2 + 0,9035 \cdot x^3 - 0,211 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

⁹ Aufgrund der deutlich schlechteren Energieauflösung (siehe Kapitel 2.5.3.5) und der zum Teil großen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Peakflächen sind die aufgeführten Effektivitätsdaten und -kurven nur als grobe Abschätzung für die tatsächlichen Effektivitätswerte zu betrachten.

Tab. 18 Ergebnis der mit der LaBr_3 -Messsonde bestimmten energieabhängigen Effektivitätswerte für das für das Phantom P4.

Energie in keV	Nuklid	sitzend	stehend 50 cm	stehend 100 cm
84,0	^{170}Tm	$(4,1 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(3,5 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(9,1 \pm 0,2)\text{E-05}$
136,0	^{75}Se	$(4,3 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(3,0 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(1,1 \pm 0,1)\text{E-04}$
181,0	^{99}Mo	$(7,3 \pm 0,2)\text{E-04}$	$(5,8 \pm 0,2)\text{E-04}$	$(2,0 \pm 0,1)\text{E-04}$
191,4	^{197}Hg	$(4,8 \pm 0,2)\text{E-04}$	$(4,0 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(2,5 \pm 0,1)\text{E-04}$
264,0	^{75}Se	$(1,3 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(9,3 \pm 0,2)\text{E-05}$	$(3,4 \pm 0,1)\text{E-05}$
400,5	^{75}Se	$(6,5 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(5,0 \pm 0,3)\text{E-05}$	$(1,7 \pm 0,1)\text{E-05}$
661,7	^{137}Cs	$(4,2 \pm 0,2)\text{E-05}$	$(2,9 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(1,1 \pm 0,1)\text{E-05}$
1274,5	^{22}Na	$(2,6 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(1,9 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(6,5 \pm 0,4)\text{E-06}$
1368,0	^{24}Na	$(2,5 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(1,8 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(6,2 \pm 0,2)\text{E-06}$
2754,0	^{24}Na	$(1,0 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(6,3 \pm 0,1)\text{E-06}$	$(2,6 \pm 0,1)\text{E-06}$

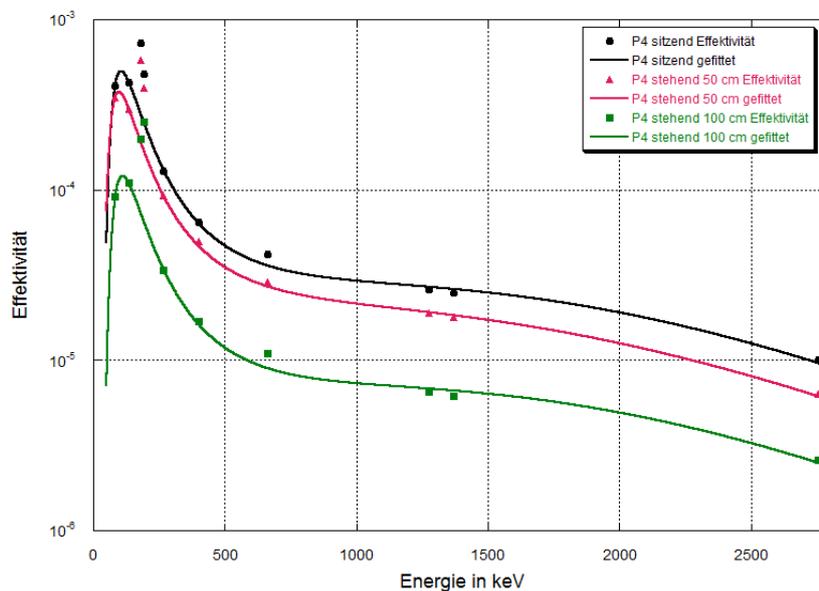


Abb. 32 Grafische Darstellung der für die LaBr_3 -Messsonde bestimmten Effizienzdaten aus Tab. 18 für das Phantom P4.

Tab. 19 Ergebnis der mit der LaBr_3 -Messsonde bestimmten energieabhängigen Effektivitätswerte für das für das Phantom P5.

Energie in keV	Nuklid	sitzend	stehend 50 cm	stehend 100 cm
84,0	^{170}Tm	$(2,4 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(2,8 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(1,0 \pm 0,1)\text{E-04}$
136,0	^{75}Se	$(3,9 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(2,8 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(9,8 \pm 0,1)\text{E-05}$
181,0	^{99}Mo	$(7,1 \pm 0,2)\text{E-04}$	$(1,9 \pm 0,1)\text{E-04}$	
191,4	^{197}Hg	$(4,1 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(2,1 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(3,3 \pm 0,1)\text{E-05}$
264,0	^{75}Se	$(1,1 \pm 0,1)\text{E-04}$	$(8,4 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(3,2 \pm 0,1)\text{E-05}$
400,5	^{75}Se	$(5,8 \pm 0,2)\text{E-05}$	$(4,4 \pm 0,2)\text{E-05}$	$(1,5 \pm 0,1)\text{E-05}$
661,7	^{137}Cs	$(3,9 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(2,9 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(1,0 \pm 0,1)\text{E-05}$
1274,5	^{22}Na	$(2,5 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(1,7 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(5,8 \pm 0,1)\text{E-06}$
1368,0	^{24}Na	$(2,3 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(1,6 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(5,7 \pm 0,1)\text{E-06}$
2754,0	^{24}Na	$(1,1 \pm 0,1)\text{E-05}$	$(6,3 \pm 0,4)\text{E-06}$	$(2,3 \pm 0,1)\text{E-06}$

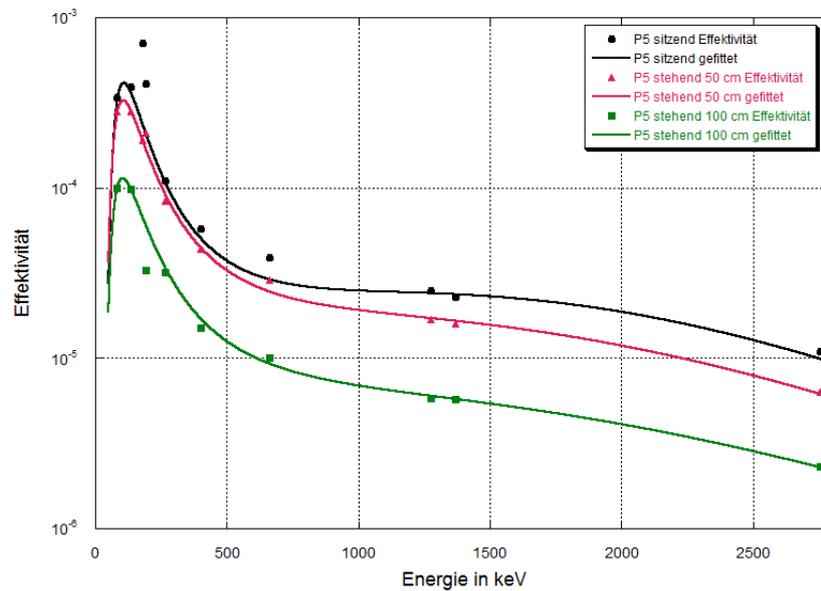


Abb. 33 Grafische Darstellung der für die LaBr_3 -Messsonde bestimmten Effizienzdaten aus Tab. 19 für das Phantom P5.

Für die Anordnung P4 stehend und 100 cm Abstand:

$$\varepsilon_{100cm}^{P4} = \exp\left[-11,94 + 0,4523 \cdot x - 0,6895 \cdot x^2 + 1,045 \cdot x^3 - 0,2621 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P5 sitzend:

$$\varepsilon_{sitzend}^{P5} = \exp\left[-10,60 + 0,2896 \cdot x - 0,6866 \cdot x^2 + 1,083 \cdot x^3 - 0,2688 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P5 stehend und 50 cm Abstand:

$$\varepsilon_{50cm}^{P5} = \exp\left[-11,03 + 0,5897 \cdot x - 0,6131 \cdot x^2 + 0,9007 \cdot x^3 - 0,2236 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Anordnung P5 stehend und 100 cm Abstand:

$$\varepsilon_{100cm}^{P5} = \exp\left[-12,09 + 0,668 \cdot x - 0,4648 \cdot x^2 + 0,738 \cdot x^3 - 0,1873 \cdot x^4\right] \quad \text{mit } x = \ln\left(\frac{1419}{E}\right)$$

Für die Bestimmung dieser Beziehungen wurde die Effizienzkalibration von Genie 2000 eingesetzt und eine empirische Angleichung durch ein Polynom vierten Grades angesetzt.

2.4.3 Vergleich mit HPGe- und LaBr₃-Messsonde gemessenen Spektren

Im Rahmen des Vorhabens sollte auch eine Aussage bezüglich der Eignung von LaBr₃-Messsonden für die in-situ-Gamma-Spektrometrie für den Nachweis inkorporierter Gamma-strahlender Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen getroffen werden. Entscheidend sind hierbei die eindeutige Identifizierbarkeit der charakteristischen Linien der Nuklide in den aufgenommenen Spektren sowie eine ausreichend hoher Effektivität für ihren Nachweis. In den nachfolgenden Abbildungen 34 bis 40 sind jeweils für das Phantom P4 in sitzender Geometrie die mit dem HPGe-Detektor (schwarze Kurven) und der LaBr₃-Messsonde (blaue Kurven) für die zu untersuchenden Nuklide aufgenommenen Spektren bei gleicher Messzeit einander gegenüber gestellt.

Trotz der deutlich kleineren Abmessungen des aktiven Detektorvolumens der LaBr₃-Messsonde gegenüber dem HPGe-Detektor sind die resultierenden Zählraten (Nettopeakflächen) von ähnlicher Größenordnung. Auch können alle relevanten charakteristischen Gamma-Linien mit der LaBr₃-Messsonde detektiert werden. Die bessere Energieauflösung und der reduzierte Anteil an Untergrundbeiträgen in den Spektren des HPGe-Detektors resultieren aber in einer höheren Genauigkeit, welche sich z. B. in kleineren Fehlern bei der Bestimmung der Effizienzwerte niederschlagen.

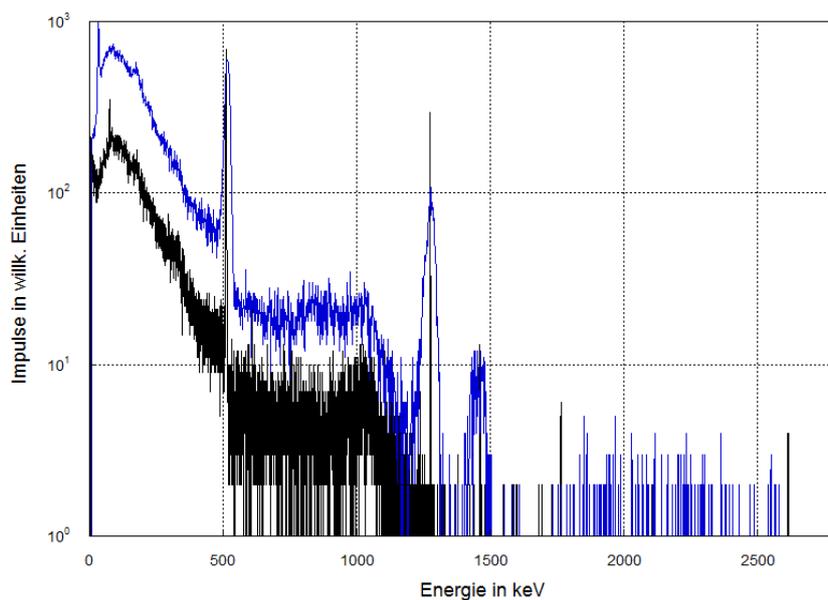


Abb. 34 Vergleich der mit dem HPGe- (schwarz) und der LaBr_3 -Messsonde (blau) gemessenen Spektren von ^{22}Na .

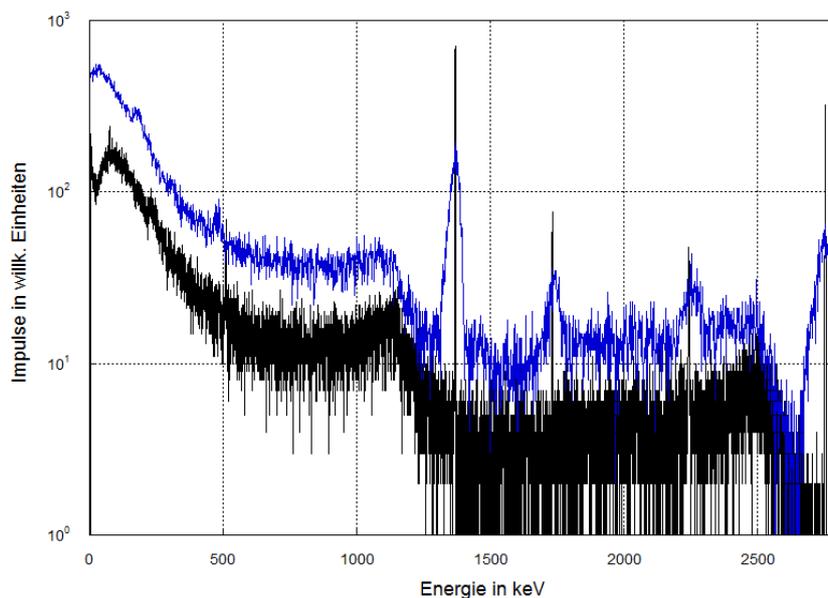


Abb. 35 Vergleich der mit dem HPGe- (schwarz) und der LaBr_3 -Messsonde (blau) gemessenen Spektren von ^{24}Na .

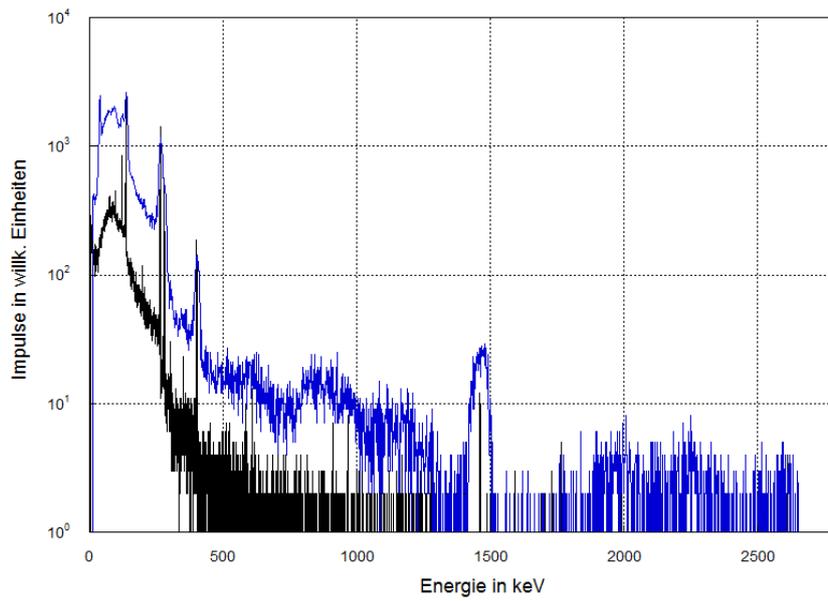


Abb. 36 Vergleich der mit dem HPGe- (schwarz) und der LaBr_3 -Messsonde (blau) gemessenen Spektren von ^{75}Se .

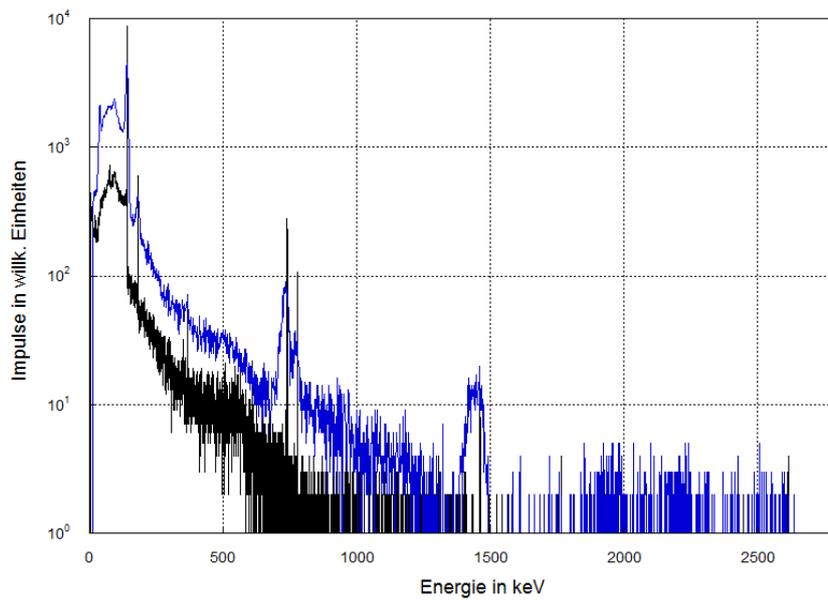


Abb. 37 Vergleich der mit dem HPGe- (schwarz) und der LaBr_3 -Messsonde (blau) gemessenen Spektren von $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

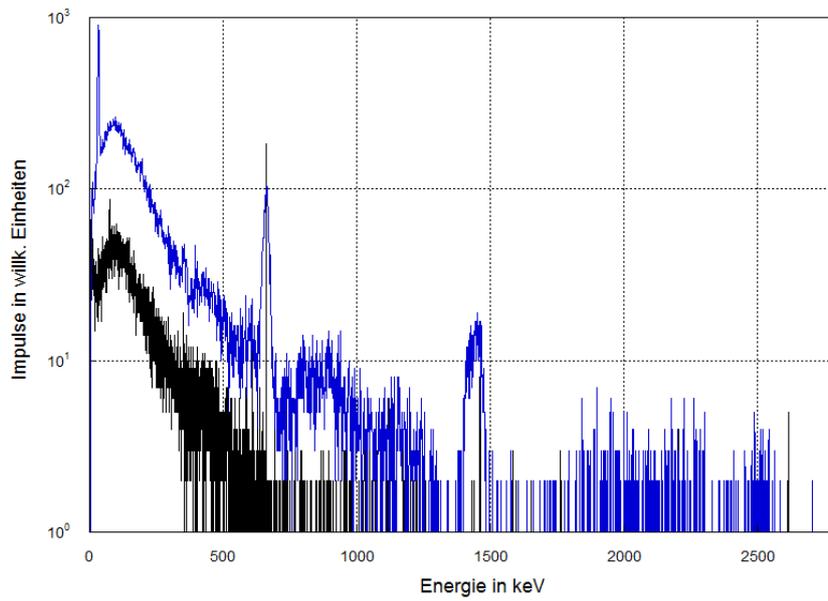


Abb. 38 Vergleich der mit dem HPGe- (schwarz) und der LaBr_3 -Messsonde (blau) gemessenen Spektren von ^{137}Cs .

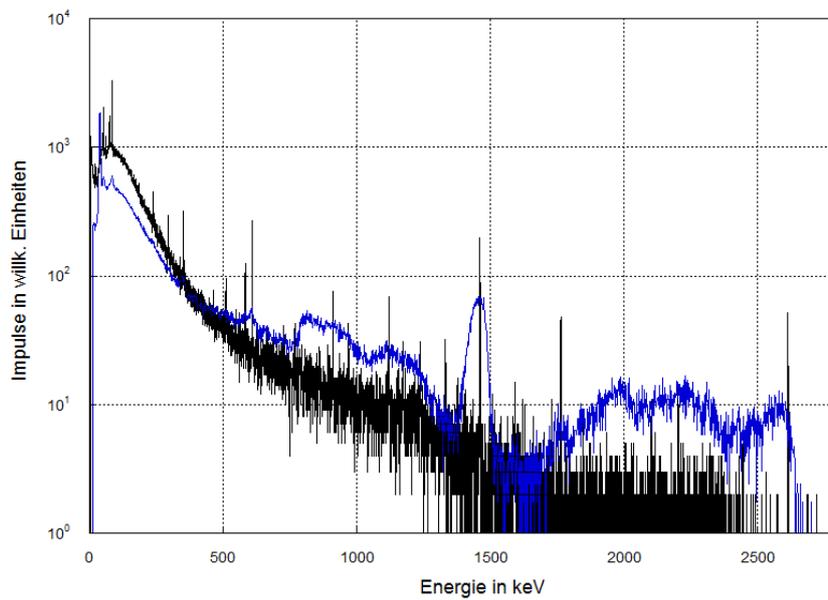


Abb. 39 Vergleich der mit dem HPGe- (schwarz) und der LaBr_3 -Messsonde (blau) gemessenen Spektren von ^{170}Tm .

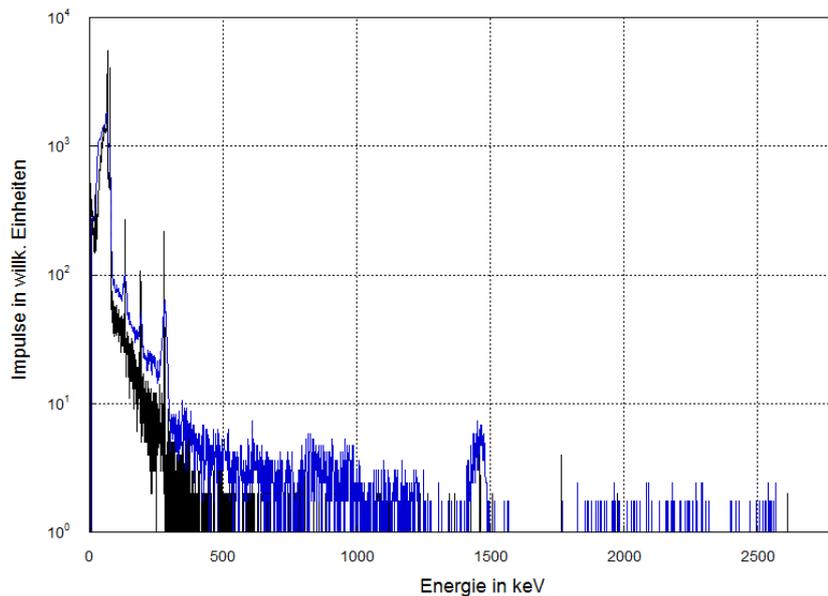


Abb. 40 Vergleich der mit dem HPGe- (schwarz) und der LaBr₃-Messsonde (blau) gemessenen Spektren von ¹⁹⁷Hg.

2.4.4 Nachweis- und Erkennungsgrenzen weiterer Nuklide

2.4.4.1 Allgemeines

Die Bestimmung der Nachweis- und Erkennungsgrenzen erfolgte nach DIN ISO 11929. Diese Methode setzt voraus, dass zwei gemessene Spektren vorhanden sind: Ein Untergrundspektrum sowie das eigentliche auszuwertende Spektrum mit den gegebenenfalls darin enthaltenen Nuklidinformationen. Für die Bestimmung der Nachweis- und Erkennungsgrenzen wurden als Untergrundspektren die Ergebnisse von Langzeitmessungen herangezogen. Für das auszuwertende Spektrum wurden ebenfalls Ergebnisse von Messungen ohne radioaktive Quellen¹⁰ verwendet, aber mit deutlich reduzierter Messzeit.

Tab. 20 führt die Nuklide auf, für welche die Nachweis- und Erkennungsgrenzen bestimmt wurden sowie die Energien und Emissionswahrscheinlichkeiten der hierfür ausgewerteten charakteristischen Linien.

¹⁰ d. h. ebenfalls Untergrundmessungen

Tab. 20 Übersicht der charakteristischen Linien und den zugehörigen Emissionswahrscheinlichkeiten der Nuklide, für welche die Nachweis- und Erkennungsgrenzen bestimmt werden sollen. Die Daten wurden aus /6/ entnommen (Ausnahme: ^{73}As aus nucleardata.nuclear.lu.se/toi/radSearch.asp).

Nuklid	^{22}Na	^{54}Mn	^{59}Fe	^{57}Co	^{60}Co	^{73}As
Linie in keV (Emissionswahrscheinlichkeit)	1274,5 (0,99)	834,8 (1,00)	1099,3 (0,566)	122,1 (0,855)	1173,2 (0,999)	53,4 (0,103)
			1291,6 (0,432)		1332,4 (1,00)	
Nuklid	^{75}Se	$^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$	$^{113}\text{Sn}/^{113m}\text{In}$	^{125}Sb	^{131}I	^{134}Cs
Linie in keV (Emissionswahrscheinlichkeit)	136,0 (0,588)	140,5 (0,891)	391,7 (0,65)	427,9 (0,298)	364,4 (0,812)	604,7 (0,976)
	264,7 (0,59)	739,5 (0,121)		600,6 (0,178)	637,0 (0,0726)	795,8 (0,855)
Nuklid	^{137}Cs	^{133}Ba	^{140}Ba	^{192}Ir	^{204}Tl	^{241}Am
Linie in keV (Emissionswahrscheinlichkeit)	661,7 (0,901)	356,0 (0,62)	573,3 (0,24)	316,5 (0,828)	899,2 (0,99)	59,5 (0,36)
				468,1 (0,478)	374,7 (0,941)	

2.4.4.2 HPGe-Detektor

Für die Bestimmung der Nachweis- und Erkennungsgrenzen nach DIN ISO 11929 wurden zwei mit dem HP-Ge-Detektor gemessene Untergrundspektren herangezogen. Die Messzeiten für die Aufnahme dieser Spektren betragen 60 bzw. 900 Sekunden. Die Messzeit des eigentlichen Untergrundspektrums betrug 14400 Sekunden. Für die Berechnung der Nachweis- und Erkennungsgrenzen wurden die energiespezifischen Effektivitätswerte für die beiden Phantomgrößen P4 und P5 sowie für die unterschiedlichen Messgeometrien benötigt. Diese wurden mittels der in Kapitel 2.4.2.1 aufgeführten Näherungen für die Effektivitätsverläufe berechnet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 21 bis 26 für die Untergrundmessungen mit 60 Sekunden Messzeit bzw. in den Tabellen 27 bis 32 für 900 Sekunden zusammengefasst.

Tab. 21 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in sitzender Geometrie bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 60 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	1,2E+04	1,4E+04	3,2E+04	2,7E+04	1,8E+04	2,2E+04
Nachweisgrenze in Bq	2,6E+04	3,0E+04	6,8E+04	6,0E+04	3,7E+04	4,8E+04
untere Grenze VB in Bq	2,2E+02	2,6E+02	6,0E+02	5,2E+02	3,3E+02	4,3E+02
obere Grenze VB in Bq	1,6E+04	1,9E+04	4,3E+04	3,7E+04	2,4E+04	3,1E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	1,8E+04	2,4E+05	2,5E+04	2,2E+04	1,7E+04	9,5E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,9E+04	5,1E+05	5,3E+04	4,7E+04	3,5E+04	2,1E+05
untere Grenze VB in Bq	3,4E+02	4,6E+03	4,8E+02	4,3E+02	3,2E+02	1,8E+03
obere Grenze VB in Bq	2,4E+04	3,3E+05	3,5E+04	3,0E+04	2,3E+04	1,3E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,9E+04	4,1E+04	6,8E+04	1,4E+04	1,8E+05	1,3E+04
Nachweisgrenze in Bq	4,0E+04	8,7E+04	1,5E+05	3,1E+04	3,8E+05	2,7E+04
untere Grenze VB in Bq	3,6E+02	7,8E+02	1,3E+03	2,7E+02	3,4E+03	2,4E+02
obere Grenze VB in Bq	2,5E+04	5,6E+04	9,2E+04	2,0E+04	2,4E+05	1,7E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,6E+04	1,4E+04	2,0E+04	5,0E+04	1,6E+04	2,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,5E+04	3,0E+04	4,3E+04	1,1E+05	3,3E+04	5,1E+04
untere Grenze VB in Bq	3,1E+02	2,7E+02	3,9E+02	9,4E+02	3,0E+02	4,6E+02
obere Grenze VB in Bq	2,2E+04	1,9E+04	2,8E+04	6,7E+04	2,1E+04	3,3E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,4E+04	1,3E+04	2,5E+05			
Nachweisgrenze in Bq	3,0E+04	2,7E+04	5,3E+05			
untere Grenze VB in Bq	2,7E+02	2,5E+02	4,8E+03			
obere Grenze VB in Bq	1,9E+04	1,8E+04	3,5E+05			

Tab. 22 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in stehender Geometrie mit 50 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 60 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	1,2E+04	1,4E+04	3,2E+04	2,7E+04	1,6E+04	2,3E+04
Nachweisgrenze in Bq	2,6E+04	3,1E+04	6,9E+04	6,0E+04	3,3E+04	4,8E+04
untere Grenze VB in Bq	2,2E+02	2,7E+02	6,1E+02	5,2E+02	3,0E+02	4,3E+02
obere Grenze VB in Bq	1,6E+04	1,9E+04	4,4E+04	3,7E+04	2,2E+04	3,1E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	1,8E+04	3,0E+05	2,3E+04	2,1E+04	1,5E+04	9,7E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,9E+04	6,2E+05	4,8E+04	4,5E+04	3,2E+04	2,1E+05
untere Grenze VB in Bq	3,4E+02	5,6E+03	4,4E+02	4,0E+02	2,9E+02	1,8E+03
obere Grenze VB in Bq	2,4E+04	4,0E+05	3,1E+04	2,9E+04	2,1E+04	1,3E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,8E+04	4,1E+04	6,9E+04	1,4E+04	1,8E+05	1,3E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,9E+04	8,7E+04	1,5E+05	3,0E+04	3,9E+05	2,8E+04
untere Grenze VB in Bq	3,5E+02	7,8E+02	1,3E+03	2,7E+02	3,4E+03	2,5E+02
obere Grenze VB in Bq	2,5E+04	5,6E+04	9,4E+04	1,9E+04	2,4E+05	1,8E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,6E+04	1,4E+04	2,0E+04	5,0E+04	1,5E+04	2,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,5E+04	3,1E+04	4,3E+04	1,1E+05	3,2E+04	5,2E+04
untere Grenze VB in Bq	3,1E+02	2,7E+02	3,8E+02	9,6E+02	2,9E+02	4,6E+02
obere Grenze VB in Bq	2,2E+04	1,9E+04	2,7E+04	6,8E+04	2,1E+04	3,3E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,4E+04	1,3E+04	2,5E+05			
Nachweisgrenze in Bq	3,1E+04	2,7E+04	5,3E+05			
untere Grenze VB in Bq	2,7E+02	2,4E+02	4,8E+03			
obere Grenze VB in Bq	1,9E+04	1,7E+04	3,5E+05			

Tab. 23 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in stehender Geometrie mit 100 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 60 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	3,1E+04	3,7E+04	8,4E+04	7,2E+04	3,9E+04	6,0E+04
Nachweisgrenze in Bq	6,8E+04	7,9E+04	1,8E+05	1,6E+05	8,1E+04	1,3E+05
untere Grenze VB in Bq	5,9E+02	7,0E+02	1,6E+03	1,4E+03	7,3E+02	1,1E+03
obere Grenze VB in Bq	4,2E+04	5,0E+04	1,1E+05	9,9E+04	5,3E+04	8,1E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	4,8E+04	6,0E+05	5,6E+04	5,3E+04	3,8E+04	2,5E+05
Nachweisgrenze in Bq	1,0E+05	1,3E+06	1,2E+05	1,1E+05	7,8E+04	5,4E+05
untere Grenze VB in Bq	9,0E+02	1,1E+04	1,1E+03	1,0E+03	7,2E+02	4,8E+03
obere Grenze VB in Bq	6,5E+04	8,2E+05	7,7E+04	7,3E+04	5,1E+04	3,4E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	4,7E+04	1,0E+05	1,8E+05	3,6E+04	4,6E+05	3,3E+04
Nachweisgrenze in Bq	9,9E+04	2,2E+05	3,8E+05	7,6E+04	9,9E+05	7,1E+04
untere Grenze VB in Bq	8,9E+02	2,0E+03	3,3E+03	6,8E+02	8,7E+03	6,3E+02
obere Grenze VB in Bq	6,4E+04	1,4E+05	2,4E+05	4,9E+04	6,3E+05	4,5E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	4,2E+04	3,6E+04	5,1E+04	1,3E+05	3,8E+04	6,1E+04
Nachweisgrenze in Bq	9,2E+04	7,8E+04	1,1E+05	2,8E+05	8,0E+04	1,3E+05
untere Grenze VB in Bq	8,1E+02	6,9E+02	9,7E+02	2,4E+03	7,2E+02	1,2E+03
obere Grenze VB in Bq	5,8E+04	5,0E+04	6,9E+04	1,7E+05	5,2E+04	8,3E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	3,7E+04	3,2E+04	6,7E+05			
Nachweisgrenze in Bq	8,0E+04	6,8E+04	1,4E+06			
untere Grenze VB in Bq	7,0E+02	6,1E+02	1,3E+04			
obere Grenze VB in Bq	5,0E+04	4,4E+04	9,2E+05			

Tab. 24 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in sitzender Geometrie bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 60 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	1,2E+04	1,5E+04	3,4E+04	2,9E+04	2,0E+04	2,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	2,8E+04	3,3E+04	7,4E+04	6,5E+04	4,1E+04	5,2E+04
untere Grenze VB in Bq	2,4E+02	2,9E+02	6,6E+02	5,6E+02	3,7E+02	4,6E+02
obere Grenze VB in Bq	1,7E+04	2,1E+04	4,7E+04	4,0E+04	2,7E+04	3,3E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	1,9E+04	3,3E+05	2,8E+04	2,5E+04	1,9E+04	1,1E+05
Nachweisgrenze in Bq	4,2E+04	7,0E+05	5,9E+04	5,3E+04	3,9E+04	2,3E+05
untere Grenze VB in Bq	3,7E+02	6,4E+03	5,4E+02	4,8E+02	3,6E+02	2,0E+03
obere Grenze VB in Bq	2,6E+04	4,5E+05	3,9E+04	3,4E+04	2,6E+04	1,4E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	2,1E+04	4,6E+04	7,6E+04	1,6E+04	2,0E+05	1,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	4,5E+04	9,8E+04	1,6E+05	3,4E+04	4,2E+05	3,1E+04
untere Grenze VB in Bq	4,0E+02	8,8E+02	1,4E+03	3,1E+02	3,8E+03	2,7E+02
obere Grenze VB in Bq	2,9E+04	6,3E+04	1,0E+05	2,2E+04	2,7E+05	1,9E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,8E+04	1,6E+04	2,3E+04	5,6E+04	1,7E+04	2,7E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,8E+04	3,4E+04	4,9E+04	1,2E+05	3,7E+04	5,8E+04
untere Grenze VB in Bq	3,4E+02	3,0E+02	4,4E+02	1,1E+03	3,3E+02	5,1E+02
obere Grenze VB in Bq	2,4E+04	2,1E+04	3,1E+04	7,6E+04	2,4E+04	3,7E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+04	1,5E+04	2,7E+05			
Nachweisgrenze in Bq	3,3E+04	3,1E+04	5,6E+05			
untere Grenze VB in Bq	2,9E+02	2,8E+02	5,2E+03			
obere Grenze VB in Bq	2,1E+04	2,0E+04	3,7E+05			

Tab. 25 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in stehender Geometrie mit 50 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 60 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	1,3E+04	1,5E+04	3,5E+04	3,0E+04	1,8E+04	2,5E+04
Nachweisgrenze in Bq	2,8E+04	3,3E+04	7,5E+04	6,6E+04	3,7E+04	5,3E+04
untere Grenze VB in Bq	2,4E+02	2,9E+02	6,7E+02	5,7E+02	3,4E+02	4,7E+02
obere Grenze VB in Bq	1,7E+04	2,1E+04	4,8E+04	4,1E+04	2,4E+04	3,4E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	2,0E+04	2,6E+05	2,6E+04	2,4E+04	1,7E+04	1,1E+05
Nachweisgrenze in Bq	4,3E+04	5,4E+05	5,4E+04	5,0E+04	3,6E+04	2,3E+05
untere Grenze VB in Bq	3,8E+02	4,9E+03	4,9E+02	4,6E+02	3,3E+02	2,0E+03
obere Grenze VB in Bq	2,7E+04	3,5E+05	3,5E+04	3,3E+04	2,4E+04	1,4E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	2,0E+04	4,5E+04	7,5E+04	1,6E+04	1,9E+05	1,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	4,3E+04	9,6E+04	1,6E+05	3,3E+04	4,2E+05	3,0E+04
untere Grenze VB in Bq	3,9E+02	8,6E+02	1,4E+03	3,0E+02	3,7E+03	2,7E+02
obere Grenze VB in Bq	2,8E+04	6,1E+04	1,0E+05	2,1E+04	2,7E+05	1,9E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,8E+04	1,5E+04	2,2E+04	5,5E+04	1,7E+04	2,6E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,8E+04	3,3E+04	4,7E+04	1,2E+05	3,6E+04	5,7E+04
untere Grenze VB in Bq	3,4E+02	2,9E+02	4,3E+02	1,0E+03	3,2E+02	5,0E+02
obere Grenze VB in Bq	2,4E+04	2,1E+04	3,0E+04	7,4E+04	2,3E+04	3,6E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+04	1,4E+04	2,8E+05			
Nachweisgrenze in Bq	3,3E+04	3,0E+04	5,8E+05			
untere Grenze VB in Bq	2,9E+02	2,7E+02	5,3E+03			
obere Grenze VB in Bq	2,1E+04	1,9E+04	3,8E+05			

Tab. 26 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in stehender Geometrie mit 100 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 60 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	3,3E+04	3,9E+04	9,1E+04	7,8E+04	4,3E+04	6,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	7,4E+04	8,5E+04	1,9E+05	1,7E+05	9,0E+04	1,4E+05
untere Grenze VB in Bq	6,3E+02	7,5E+02	1,7E+03	1,5E+03	8,1E+02	1,2E+03
obere Grenze VB in Bq	4,5E+04	5,4E+04	1,2E+05	1,1E+05	5,9E+04	8,8E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	5,1E+04	5,9E+05	6,3E+04	5,9E+04	4,2E+04	2,7E+05
Nachweisgrenze in Bq	1,1E+05	1,2E+06	1,3E+05	1,2E+05	8,8E+04	5,8E+05
untere Grenze VB in Bq	9,8E+02	1,1E+04	1,2E+03	1,1E+03	8,0E+02	5,1E+03
obere Grenze VB in Bq	7,0E+04	8,1E+05	8,6E+04	8,0E+04	5,7E+04	3,6E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	5,1E+04	1,1E+05	1,9E+05	3,9E+04	4,9E+05	3,6E+04
Nachweisgrenze in Bq	1,1E+05	2,4E+05	4,1E+05	8,2E+04	1,1E+06	7,6E+04
untere Grenze VB in Bq	9,6E+02	2,1E+03	3,6E+03	7,4E+02	9,4E+03	6,8E+02
obere Grenze VB in Bq	6,9E+04	1,5E+05	2,6E+05	5,3E+04	6,7E+05	4,8E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	4,5E+04	3,9E+04	5,5E+04	1,4E+05	4,1E+04	6,6E+04
Nachweisgrenze in Bq	9,8E+04	8,4E+04	1,2E+05	3,0E+05	8,7E+04	1,4E+05
untere Grenze VB in Bq	8,7E+02	7,4E+02	1,0E+03	2,6E+03	7,9E+02	1,3E+03
obere Grenze VB in Bq	6,2E+04	5,3E+04	7,5E+04	1,9E+05	5,6E+04	9,0E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	4,0E+04	3,5E+04	7,3E+05			
Nachweisgrenze in Bq	8,6E+04	7,4E+04	1,5E+06			
untere Grenze VB in Bq	7,6E+02	6,6E+02	1,4E+04			
obere Grenze VB in Bq	5,4E+04	4,8E+04	1,0E+06			

Tab. 27 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in sitzender Geometrie bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 900 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	5,3E+02	5,8E+02	7,2E+02	9,1E+02	1,5E+03	9,0E+02
Nachweisgrenze in Bq	1,2E+03	1,3E+03	1,7E+03	2,2E+03	3,1E+03	2,0E+03
untere Grenze VB in Bq	8,8E+00	8,4E+00	1,0E+01	1,4E+01	7,9E+00	1,2E+01
obere Grenze VB in Bq	6,8E+02	7,0E+02	8,6E+02	1,1E+03	9,9E+02	1,1E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	8,2E+02	1,8E+04	2,0E+03	1,5E+03	1,3E+03	4,1E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,8E+03	3,7E+04	4,3E+03	3,2E+03	2,8E+03	9,2E+03
untere Grenze VB in Bq	9,9E+00	3,3E+02	3,9E+01	2,9E+01	2,6E+01	7,9E+01
obere Grenze VB in Bq	9,0E+02	2,4E+04	2,8E+03	2,0E+03	1,8E+03	5,6E+03
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,0E+03	2,2E+03	2,9E+03	8,5E+02	7,3E+03	5,5E+02
Nachweisgrenze in Bq	2,2E+03	4,8E+03	6,4E+03	1,8E+03	1,6E+04	1,2E+03
untere Grenze VB in Bq	2,0E+01	4,2E+01	5,6E+01	1,6E+01	1,4E+02	1,0E+01
obere Grenze VB in Bq	1,4E+03	3,0E+03	4,0E+03	1,2E+03	1,0E+04	7,5E+02
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	6,7E+02	7,1E+02	6,7E+02	2,5E+03	9,2E+02	1,3E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,5E+03	1,5E+03	1,5E+03	5,5E+03	1,9E+03	2,7E+03
untere Grenze VB in Bq	1,3E+01	1,4E+01	1,3E+01	4,8E+01	1,7E+01	2,4E+01
obere Grenze VB in Bq	9,1E+02	9,7E+02	9,1E+02	3,4E+03	1,3E+03	1,7E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	4,1E+02	7,3E+02	1,3E+04			
Nachweisgrenze in Bq	9,4E+02	1,6E+03	2,6E+04			
untere Grenze VB in Bq	7,8E+00	1,4E+01	2,3E+02			
obere Grenze VB in Bq	5,6E+02	1,0E+03	1,7E+04			

Tab. 28 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in stehender Geometrie mit 50 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 900 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	5,3E+02	5,9E+02	7,2E+02	9,1E+02	1,4E+03	9,1E+02
Nachweisgrenze in Bq	1,2E+03	1,3E+03	1,7E+03	2,2E+03	2,8E+03	2,0E+03
untere Grenze VB in Bq	8,8E+00	8,6E+00	1,1E+01	1,5E+01	7,2E+00	1,3E+01
obere Grenze VB in Bq	6,8E+02	7,1E+02	8,7E+02	1,1E+03	9,0E+02	1,1E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	8,2E+02	2,1E+04	1,9E+03	1,4E+03	1,2E+03	4,2E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,8E+03	4,5E+04	3,9E+03	3,0E+03	2,5E+03	9,4E+03
untere Grenze VB in Bq	1,0E+01	4,1E+02	3,6E+01	2,7E+01	2,3E+01	8,0E+01
obere Grenze VB in Bq	9,0E+02	2,9E+04	2,5E+03	1,9E+03	1,7E+03	5,7E+03
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,0E+03	2,2E+03	3,0E+03	8,4E+02	7,5E+03	5,6E+02
Nachweisgrenze in Bq	2,2E+03	4,7E+03	6,5E+03	1,8E+03	1,6E+04	1,2E+03
untere Grenze VB in Bq	2,0E+01	4,2E+01	5,7E+01	1,6E+01	1,4E+02	1,1E+01
obere Grenze VB in Bq	1,4E+03	3,0E+03	4,0E+03	1,1E+03	1,0E+04	7,6E+02
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	6,8E+02	7,2E+02	6,6E+02	2,5E+03	8,9E+02	1,3E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,5E+03	1,6E+03	1,4E+03	5,6E+03	1,9E+03	2,7E+03
untere Grenze VB in Bq	1,3E+01	1,4E+01	1,2E+01	4,9E+01	1,7E+01	2,4E+01
obere Grenze VB in Bq	9,3E+02	9,8E+02	8,9E+02	3,5E+03	1,2E+03	1,7E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	4,1E+02	7,2E+02	1,3E+04			
Nachweisgrenze in Bq	9,5E+02	1,5E+03	2,6E+04			
untere Grenze VB in Bq	7,9E+00	1,4E+01	2,3E+02			
obere Grenze VB in Bq	5,6E+02	9,9E+02	1,7E+04			

Tab. 29 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in stehender Geometrie mit 100 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 900 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	1,4E+03	1,5E+03	1,9E+03	2,4E+03	3,3E+03	2,4E+03
Nachweisgrenze in Bq	3,2E+03	3,4E+03	4,4E+03	5,7E+03	6,9E+03	5,2E+03
untere Grenze VB in Bq	2,3E+01	2,2E+01	2,8E+01	3,8E+01	1,7E+01	3,3E+01
obere Grenze VB in Bq	1,8E+03	1,8E+03	2,3E+03	3,0E+03	2,2E+03	2,8E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	2,2E+03	4,3E+04	4,6E+03	3,6E+03	3,0E+03	1,1E+04
Nachweisgrenze in Bq	4,8E+03	9,1E+04	9,5E+03	7,5E+03	6,2E+03	2,4E+04
untere Grenze VB in Bq	2,6E+01	8,3E+02	8,7E+01	6,8E+01	5,7E+01	2,1E+02
obere Grenze VB in Bq	2,4E+03	5,9E+04	6,2E+03	4,9E+03	4,1E+03	1,5E+04
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	2,6E+03	5,6E+03	7,6E+03	2,1E+03	1,9E+04	1,4E+03
Nachweisgrenze in Bq	5,6E+03	1,2E+04	1,7E+04	4,5E+03	4,2E+04	3,1E+03
untere Grenze VB in Bq	5,0E+01	1,1E+02	1,4E+02	4,0E+01	3,6E+02	2,7E+01
obere Grenze VB in Bq	3,6E+03	7,6E+03	1,0E+04	2,9E+03	2,6E+04	1,9E+03
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,8E+03	1,9E+03	1,7E+03	6,5E+03	2,2E+03	3,2E+03
Nachweisgrenze in Bq	3,9E+03	4,0E+03	3,6E+03	1,4E+04	4,8E+03	6,9E+03
untere Grenze VB in Bq	3,3E+01	3,5E+01	3,2E+01	1,2E+02	4,3E+01	6,1E+01
obere Grenze VB in Bq	2,4E+03	2,5E+03	2,3E+03	8,9E+03	3,1E+03	4,4E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,1E+03	1,8E+03	3,4E+04			
Nachweisgrenze in Bq	2,5E+03	3,9E+03	7,0E+04			
untere Grenze VB in Bq	2,1E+01	3,5E+01	6,0E+02			
obere Grenze VB in Bq	1,5E+03	2,5E+03	4,5E+04			

Tab. 30 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in sitzender Geometrie bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 900 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	5,7E+02	6,4E+02	7,8E+02	9,8E+02	1,7E+03	9,7E+02
Nachweisgrenze in Bq	1,3E+03	1,4E+03	1,8E+03	2,3E+03	3,5E+03	2,1E+03
untere Grenze VB in Bq	9,4E+00	9,3E+00	1,1E+01	1,6E+01	8,9E+00	1,4E+01
obere Grenze VB in Bq	7,3E+02	7,7E+02	9,4E+02	1,2E+03	1,1E+03	1,1E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	8,8E+02	2,4E+04	2,3E+03	1,7E+03	1,5E+03	4,6E+03
Nachweisgrenze in Bq	2,0E+03	5,0E+04	4,8E+03	3,5E+03	3,1E+03	1,0E+04
untere Grenze VB in Bq	1,1E+01	4,6E+02	4,4E+01	3,2E+01	2,9E+01	8,7E+01
obere Grenze VB in Bq	9,7E+02	3,3E+04	3,1E+03	2,3E+03	2,0E+03	6,2E+03
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,2E+03	2,5E+03	3,3E+03	9,6E+02	8,2E+03	6,2E+02
Nachweisgrenze in Bq	2,5E+03	5,3E+03	7,2E+03	2,0E+03	1,8E+04	1,4E+03
untere Grenze VB in Bq	2,2E+01	4,7E+01	6,2E+01	1,8E+01	1,6E+02	1,2E+01
obere Grenze VB in Bq	1,6E+03	3,4E+03	4,5E+03	1,3E+03	1,1E+04	8,4E+02
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	7,4E+02	7,9E+02	7,5E+02	2,8E+03	1,0E+03	1,4E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,6E+03	1,7E+03	1,6E+03	6,1E+03	2,2E+03	3,1E+03
untere Grenze VB in Bq	1,4E+01	1,5E+01	1,4E+01	5,4E+01	2,0E+01	2,7E+01
obere Grenze VB in Bq	1,0E+03	1,1E+03	1,0E+03	3,8E+03	1,4E+03	1,9E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	4,5E+02	8,3E+02	1,4E+04			
Nachweisgrenze in Bq	1,0E+03	1,8E+03	2,8E+04			
untere Grenze VB in Bq	8,5E+00	1,6E+01	2,4E+02			
obere Grenze VB in Bq	6,1E+02	1,1E+03	1,8E+04			

Tab. 31 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in stehender Geometrie mit 50 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 900 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	5,9E+02	6,4E+02	7,9E+02	1,0E+03	1,5E+03	9,9E+02
Nachweisgrenze in Bq	1,3E+03	1,4E+03	1,8E+03	2,4E+03	3,2E+03	2,2E+03
untere Grenze VB in Bq	9,7E+00	9,3E+00	1,2E+01	1,6E+01	8,0E+00	1,4E+01
obere Grenze VB in Bq	7,5E+02	7,7E+02	9,5E+02	1,3E+03	1,0E+03	1,2E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	9,1E+02	1,8E+04	2,1E+03	1,6E+03	1,4E+03	4,6E+03
Nachweisgrenze in Bq	2,0E+03	3,9E+04	4,4E+03	3,4E+03	2,9E+03	1,0E+04
untere Grenze VB in Bq	1,1E+01	3,5E+02	4,0E+01	3,1E+01	2,6E+01	8,7E+01
obere Grenze VB in Bq	9,9E+02	2,5E+04	2,9E+03	2,2E+03	1,9E+03	6,2E+03
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,1E+03	2,4E+03	3,2E+03	9,3E+02	8,1E+03	6,1E+02
Nachweisgrenze in Bq	2,5E+03	5,2E+03	7,1E+03	2,0E+03	1,8E+04	1,3E+03
untere Grenze VB in Bq	2,2E+01	4,6E+01	6,1E+01	1,8E+01	1,5E+02	1,2E+01
obere Grenze VB in Bq	1,6E+03	3,3E+03	4,4E+03	1,3E+03	1,1E+04	8,3E+02
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	7,4E+02	7,8E+02	7,3E+02	2,8E+03	9,9E+02	1,4E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,6E+03	1,7E+03	1,6E+03	6,0E+03	2,1E+03	3,0E+03
untere Grenze VB in Bq	1,4E+01	1,5E+01	1,4E+01	5,3E+01	1,9E+01	2,6E+01
obere Grenze VB in Bq	1,0E+03	1,1E+03	9,9E+02	3,8E+03	1,4E+03	1,9E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	4,5E+02	8,0E+02	1,4E+04			
Nachweisgrenze in Bq	1,0E+03	1,7E+03	2,9E+04			
untere Grenze VB in Bq	8,6E+00	1,5E+01	2,5E+02			
obere Grenze VB in Bq	6,1E+02	1,1E+03	1,9E+04			

Tab. 32 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in stehender Geometrie mit 100 cm Abstand bei Messung mit dem HPGe-Detektor und 900 s Messzeit.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+03	1,6E+03	2,0E+03	2,6E+03	3,7E+03	2,6E+03
Nachweisgrenze in Bq	3,5E+03	3,6E+03	4,8E+03	6,2E+03	7,6E+03	5,6E+03
untere Grenze VB in Bq	2,5E+01	2,4E+01	3,0E+01	4,2E+01	1,9E+01	3,6E+01
obere Grenze VB in Bq	1,9E+03	2,0E+03	2,5E+03	3,3E+03	2,4E+03	3,0E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	2,4E+03	4,3E+04	5,1E+03	3,9E+03	3,3E+03	1,2E+04
Nachweisgrenze in Bq	5,2E+03	8,9E+04	1,1E+04	8,3E+03	7,0E+03	2,6E+04
untere Grenze VB in Bq	2,9E+01	8,1E+02	9,7E+01	7,5E+01	6,4E+01	2,2E+02
obere Grenze VB in Bq	2,6E+03	5,8E+04	6,9E+03	5,4E+03	4,6E+03	1,6E+04
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	2,8E+03	6,0E+03	8,1E+03	2,3E+03	2,0E+04	1,5E+03
Nachweisgrenze in Bq	6,1E+03	1,3E+04	1,8E+04	4,9E+03	4,5E+04	3,4E+03
untere Grenze VB in Bq	5,4E+01	1,1E+02	1,5E+02	4,4E+01	3,9E+02	2,9E+01
obere Grenze VB in Bq	3,9E+03	8,2E+03	1,1E+04	3,1E+03	2,8E+04	2,1E+03
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,9E+03	2,0E+03	1,8E+03	7,0E+03	2,4E+03	3,5E+03
Nachweisgrenze in Bq	4,2E+03	4,3E+03	3,9E+03	1,5E+04	5,2E+03	7,5E+03
untere Grenze VB in Bq	3,6E+01	3,8E+01	3,4E+01	1,3E+02	4,7E+01	6,6E+01
obere Grenze VB in Bq	2,6E+03	2,7E+03	2,4E+03	9,5E+03	3,3E+03	4,7E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,2E+03	2,0E+03	3,6E+04			
Nachweisgrenze in Bq	2,7E+03	4,2E+03	7,6E+04			
untere Grenze VB in Bq	2,2E+01	3,8E+01	6,5E+02			
obere Grenze VB in Bq	1,6E+03	2,7E+03	4,8E+04			

Tab. 33 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in sitzender Geometrie bei Messung mit der LaBr₃-Messsonde.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	1,9E+03	4,1E+03	5,3E+03	5,1E+03	1,3E+03	3,0E+03
Nachweisgrenze in Bq	3,9E+03	8,5E+03	1,1E+04	1,1E+04	2,7E+03	6,3E+03
untere Grenze VB in Bq	3,5E+01	7,7E+02	1,0E+02	9,8E+01	2,5E+01	5,8E+01
obere Grenze VB in Bq	2,5E+03	5,5E+03	7,3E+03	7,0E+03	1,8E+03	4,1E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+03	7,3E+04	2,0E+03	3,4E+03	1,3E+03	2,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,2E+03	1,5E+05	4,0E+03	7,1E+03	2,8E+03	5,1E+04
untere Grenze VB in Bq	2,8E+01	1,4E+03	3,7E+01	6,5E+01	2,6E+01	4,6E+02
obere Grenze VB in Bq	2,0E+03	1,0E+05	2,7E+03	4,6E+03	1,8E+03	3,3E+04
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	4,0E+03	8,9E+03	1,9E+04	3,0E+03	4,3E+04	3,5E+03
Nachweisgrenze in Bq	8,2E+03	1,9E+04	4,0E+04	6,3E+03	9,0E+04	7,2E+03
untere Grenze VB in Bq	7,5E+02	1,7E+02	3,6E+02	5,8E+01	8,3E+02	6,6E+01
obere Grenze VB in Bq	5,4E+03	1,2E+04	2,6E+04	4,1E+03	5,9E+04	4,7E+03
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	4,7E+03	3,4E+03	4,0E+03	1,4E+04	2,8E+03	5,9E+03
Nachweisgrenze in Bq	9,9E+03	7,0E+03	8,3E+03	2,8E+04	5,9E+03	1,2E+04
untere Grenze VB in Bq	9,0E+01	6,4E+01	7,6E+01	2,6E+02	5,4E+01	1,1E+02
obere Grenze VB in Bq	6,5E+03	4,6E+03	5,5E+03	1,9E+04	3,9E+03	8,1E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	3,8E+03	2,7E+03	6,3E+04			
Nachweisgrenze in Bq	8,0E+03	5,6E+03	1,3E+05			
untere Grenze VB in Bq	7,3E+01	5,2E+01	1,2E+03			
obere Grenze VB in Bq	5,2E+03	3,7E+03	8,6E+04			

Tab. 34 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in stehender Geometrie mit 50 cm Abstand bei Messung mit der LaBr₃-Messsonde.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	2,6E+03	5,4E+03	7,3E+03	7,3E+03	1,8E+03	4,2E+03
Nachweisgrenze in Bq	5,5E+03	1,1E+04	1,5E+04	1,5E+04	3,8E+03	8,8E+03
untere Grenze VB in Bq	5,0E+01	1,0E+02	1,4E+02	1,4E+02	3,5E+01	8,0E+01
obere Grenze VB in Bq	3,6E+03	7,4E+03	1,0E+04	9,9E+03	2,5E+03	5,7E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	2,1E+03	5,3E+04	2,8E+03	4,9E+03	1,9E+03	3,2E+04
Nachweisgrenze in Bq	4,5E+03	1,1E+05	5,8E+03	1,0E+04	4,0E+03	6,8E+04
untere Grenze VB in Bq	4,0E+01	1,0E+03	5,3E+01	9,2E+01	3,7E+01	6,2E+02
obere Grenze VB in Bq	2,9E+03	7,2E+04	3,8E+03	6,6E+03	2,6E+03	4,4E+04
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	5,4E+03	1,2E+04	2,5E+04	4,2E+03	5,7E+04	4,6E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,1E+04	2,5E+04	5,3E+04	8,6E+03	1,2E+05	9,5E+03
untere Grenze VB in Bq	1,0E+02	2,3E+02	4,8E+02	7,9E+01	1,1E+03	8,7E+01
obere Grenze VB in Bq	7,3E+03	1,6E+04	3,5E+04	5,7E+03	7,8E+04	6,2E+03
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	6,3E+03	4,5E+03	5,5E+03	1,8E+04	3,9E+03	7,9E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,3E+04	9,3E+03	1,1E+04	3,7E+04	8,2E+03	1,7E+04
untere Grenze VB in Bq	1,2E+02	8,5E+01	1,0E+02	3,4E+02	7,5E+01	1,5E+02
obere Grenze VB in Bq	8,6E+03	6,1E+03	7,5E+03	2,5E+04	5,4E+03	1,1E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	5,2E+03	3,7E+03	9,0E+04			
Nachweisgrenze in Bq	1,1E+04	7,7E+03	1,9E+05			
untere Grenze VB in Bq	9,8E+01	7,1E+01	1,7E+03			
obere Grenze VB in Bq	7,0E+03	5,0E+03	1,2E+05			

Tab. 35 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P4 in stehender Geometrie mit 100 cm Abstand bei Messung mit der LaBr₃-Messsonde.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	7,3E+03	1,6E+04	2,1E+04	2,0E+04	5,2E+03	1,2E+04
Nachweisgrenze in Bq	1,6E+04	3,4E+04	4,4E+04	4,3E+04	1,1E+04	2,5E+04
untere Grenze VB in Bq	1,4E+02	3,1E+02	4,0E+02	3,9E+02	9,9E+01	2,3E+02
obere Grenze VB in Bq	1,0E+04	2,2E+04	2,9E+04	2,8E+04	7,1E+03	1,6E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	5,8E+03	4,7E+05	7,7E+03	1,3E+04	5,2E+03	9,7E+04
Nachweisgrenze in Bq	1,2E+04	9,6E+05	1,6E+04	2,7E+04	1,1E+04	2,0E+05
untere Grenze VB in Bq	1,1E+02	8,9E+03	1,5E+02	2,5E+02	9,9E+01	1,9E+03
obere Grenze VB in Bq	7,9E+03	6,4E+05	1,0E+04	1,8E+04	7,1E+03	1,3E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+04	3,5E+04	7,7E+04	1,2E+04	1,7E+05	1,4E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,2E+04	7,3E+04	1,6E+05	2,5E+04	3,6E+05	2,9E+04
untere Grenze VB in Bq	2,9E+02	6,7E+02	1,5E+03	2,3E+02	3,3E+03	2,6E+02
obere Grenze VB in Bq	2,1E+04	4,8E+04	1,0E+05	1,6E+04	2,4E+05	1,9E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,9E+04	1,3E+04	1,6E+04	5,4E+04	1,1E+04	2,3E+04
Nachweisgrenze in Bq	4,0E+04	2,8E+04	3,2E+04	1,1E+05	2,3E+04	4,9E+04
untere Grenze VB in Bq	3,6E+02	2,6E+02	3,0E+02	1,0E+03	2,1E+02	4,5E+02
obere Grenze VB in Bq	2,6E+04	1,8E+04	2,1E+04	7,4E+04	1,5E+04	3,2E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+04	1,1E+04	2,5E+05			
Nachweisgrenze in Bq	3,2E+04	2,2E+04	5,1E+05			
untere Grenze VB in Bq	2,9E+02	2,0E+02	4,7E+03			
obere Grenze VB in Bq	2,1E+04	1,4E+04	3,4E+05			

Tab. 36 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in sitzender Geometrie bei Messung mit der LaBr₃-Messsonde.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	2,0E+03	4,6E+03	5,8E+03	5,4E+03	1,4E+03	3,2E+03
Nachweisgrenze in Bq	4,1E+03	9,6E+03	1,2E+04	1,1E+04	3,0E+03	6,8E+03
untere Grenze VB in Bq	3,7E+01	8,8E+01	1,1E+02	1,0E+02	2,8E+01	6,2E+01
obere Grenze VB in Bq	2,7E+03	6,3E+03	7,9E+03	7,4E+03	2,0E+03	4,4E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+03	1,1E+05	2,2E+03	3,9E+03	1,5E+03	2,8E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,3E+03	2,4E+05	4,5E+03	8,1E+03	3,0E+03	5,9E+04
untere Grenze VB in Bq	2,9E+01	2,2E+03	4,1E+01	7,5E+01	2,8E+01	5,3E+02
obere Grenze VB in Bq	2,1E+03	1,6E+05	3,0E+03	5,4E+03	2,0E+03	3,8E+04
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	4,7E+03	1,1E+04	2,3E+04	3,6E+03	5,1E+04	4,1E+03
Nachweisgrenze in Bq	9,7E+03	2,2E+04	4,7E+04	7,4E+03	1,1E+05	8,4E+03
untere Grenze VB in Bq	8,9E+01	2,0E+02	4,3E+02	6,8E+01	9,7E+02	7,7E+01
obere Grenze VB in Bq	6,4E+03	1,4E+04	3,1E+04	4,9E+03	6,9E+04	5,5E+03
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	5,4E+03	3,9E+03	4,7E+03	1,6E+04	3,3E+03	7,0E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,1E+04	8,2E+03	9,8E+03	3,3E+04	6,8E+03	1,5E+04
untere Grenze VB in Bq	1,0E+02	7,5E+01	9,0E+01	3,0E+02	6,3E+01	1,3E+02
obere Grenze VB in Bq	7,4E+03	5,4E+03	6,4E+03	2,2E+04	4,5E+03	9,6E+03
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	4,3E+03	3,2E+03	6,5E+04			
Nachweisgrenze in Bq	9,0E+03	6,6E+03	1,3E+05			
untere Grenze VB in Bq	8,2E+01	6,1E+01	1,2E+03			
obere Grenze VB in Bq	5,9E+03	4,4E+03	8,8E+04			

Tab. 37 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in stehender Geometrie mit 50 cm Abstand bei Messung mit der LaBr₃-Messsonde.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	2,9E+03	6,1E+03	8,2E+03	8,1E+03	2,0E+03	4,7E+03
Nachweisgrenze in Bq	6,2E+03	1,3E+04	1,7E+04	1,7E+04	4,1E+03	9,8E+03
untere Grenze VB in Bq	5,5E+01	1,2E+02	1,6E+02	1,5E+02	3,7E+01	8,9E+01
obere Grenze VB in Bq	4,0E+03	8,3E+03	1,1E+04	1,1E+04	2,7E+03	6,4E+03
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	2,3E+03	1,0E+05	2,9E+03	4,9E+03	2,0E+03	3,6E+04
Nachweisgrenze in Bq	5,0E+03	2,1E+05	6,1E+03	1,0E+04	4,1E+03	7,5E+04
untere Grenze VB in Bq	4,4E+01	1,9E+03	5,6E+01	9,4E+01	3,8E+01	6,8E+02
obere Grenze VB in Bq	3,2E+03	1,4E+05	4,0E+03	6,7E+03	2,7E+03	4,9E+04
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	5,6E+03	1,3E+04	2,8E+04	4,3E+03	6,3E+04	5,0E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,2E+04	2,6E+04	5,8E+04	9,0E+03	1,3E+05	1,0E+04
untere Grenze VB in Bq	1,1E+02	2,4E+02	5,3E+02	8,2E+01	1,2E+03	9,5E+01
obere Grenze VB in Bq	7,7E+03	1,7E+04	3,8E+04	5,9E+03	8,6E+04	6,8E+03
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	7,1E+03	4,9E+03	5,7E+03	2,0E+04	4,0E+03	8,5E+03
Nachweisgrenze in Bq	1,5E+04	1,0E+04	1,2E+04	4,1E+04	8,4E+03	1,8E+04
untere Grenze VB in Bq	1,3E+02	9,4E+01	1,1E+02	3,7E+02	7,7E+01	1,6E+02
obere Grenze VB in Bq	9,6E+03	6,7E+03	7,8E+03	2,7E+04	5,5E+03	1,2E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	5,8E+03	3,9E+03	1,0E+05			
Nachweisgrenze in Bq	1,2E+04	8,0E+03	2,1E+05			
untere Grenze VB in Bq	1,1E+02	7,4E+01	1,9E+03			
obere Grenze VB in Bq	7,9E+03	5,3E+03	1,4E+05			

Tab. 38 Erkennungs- und Nachweisgrenzen sowie untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs für verschiedene Nuklide für die Phantomgröße P5 in stehender Geometrie mit 100 cm Abstand bei Messung mit der LaBr₃-Messsonde.

Nuklid	²² Na	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co
Linie in keV	1274,5	834,8	1099,3	1291,6	122,1	1173,2
Erkennungsgrenze in Bq	8,3E+03	1,6E+04	2,3E+04	2,3E+04	5,7E+03	1,3E+04
Nachweisgrenze in Bq	1,8E+04	3,4E+04	4,8E+04	4,9E+04	1,2E+04	2,8E+04
untere Grenze VB in Bq	1,6E+02	3,1E+02	4,4E+02	4,4E+02	1,1E+02	2,5E+02
obere Grenze VB in Bq	1,1E+04	2,2E+04	3,1E+04	3,1E+04	7,8E+03	1,8E+04
Nuklid	⁶⁰ Co	⁷³ As	⁷⁵ Se	⁷⁵ Se	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc
Linie in keV	1332,4	53,4	136,0	264,7	140,5	739,5
Erkennungsgrenze in Bq	6,7E+03	2,1E+05	8,5E+03	1,3E+04	5,8E+03	9,6E+04
Nachweisgrenze in Bq	1,4E+04	4,3E+05	1,8E+04	2,7E+04	1,2E+04	2,0E+05
untere Grenze VB in Bq	1,3E+02	4,0E+03	1,6E+02	2,5E+02	1,1E+02	1,8E+03
obere Grenze VB in Bq	9,1E+03	2,9E+05	1,2E+04	1,8E+04	7,9E+03	1,3E+05
Nuklid	¹¹³ Sn/ ^{113m} In	¹²⁵ Sb	¹²⁵ Sb	¹³¹ I	¹³¹ I	¹³⁴ Cs
Linie in keV	391,7	427,9	600,6	364,5	637,0	604,7
Erkennungsgrenze in Bq	1,5E+04	3,3E+04	7,3E+04	1,1E+04	1,7E+05	1,3E+04
Nachweisgrenze in Bq	3,1E+04	6,9E+04	1,5E+05	2,3E+04	3,5E+05	2,7E+04
untere Grenze VB in Bq	2,8E+02	6,3E+02	1,4E+03	2,2E+02	3,2E+03	2,5E+02
obere Grenze VB in Bq	2,0E+04	4,5E+04	9,9E+04	1,5E+04	2,3E+05	1,8E+04
Nuklid	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³³ Ba	¹⁴⁰ Ba	¹⁹² Ir	¹⁹² Ir
Linie in keV	795,8	661,7	356,0	573,3	316,5	468,1
Erkennungsgrenze in Bq	1,9E+04	1,3E+04	1,5E+04	5,1E+04	1,1E+04	2,2E+04
Nachweisgrenze in Bq	4,0E+04	2,7E+04	3,1E+04	1,1E+05	2,2E+04	4,6E+04
untere Grenze VB in Bq	3,6E+02	2,5E+02	2,9E+02	9,8E+02	2,0E+02	4,2E+02
obere Grenze VB in Bq	2,6E+04	1,8E+04	2,0E+04	7,0E+04	1,5E+04	3,0E+04
Nuklid	²⁰⁴ Tl	²⁰⁴ Tl	²⁴¹ Am			
Linie in keV	899,2	374,7	59,5			
Erkennungsgrenze in Bq	1,6E+04	1,0E+04	2,9E+05			
Nachweisgrenze in Bq	3,3E+04	2,1E+04	5,9E+05			
untere Grenze VB in Bq	3,0E+02	1,9E+02	5,5E+03			
obere Grenze VB in Bq	2,2E+04	1,4E+04	3,9E+05			

2.4.4.3 LaBr₃-Messsonde

Die Bestimmung der Nachweis- und Erkennungsgrenzen nach DIN ISO 11929 mit der LaBr₃-Messsonde erfolgte analog der Bestimmung mit dem HPGe-Detektor (siehe Kapitel 2.4.4.2). Die Messzeit für das eigentliche Untergrundspektrum betrug 172800 Sekunden (48 Stunden), für das auszuwertende Spektrum 900 Sekunden. Die energiespezifischen Effektivitätswerte wurden mittels der in Kapitel 2.4.2.2 aufgeführten Näherungen berechnet. In den Tabellen 33 bis 38 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

2.4.5 Messungen mit dem Portalmonitor

Der Portalmonitor liefert als Ergebnis einer Messung eine Zählrate. Dieser Wert wurde mit der Untergrundzählrate korrigiert. Um seine prinzipielle Eignung für den mobilen Einsatz einschätzen zu können wurden die derart bestimmten Nettozählraten auf die spezifischen Aktivitäten der in den Messungen jeweils eingesetzten Nuklide normiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 39 und in den Abbildungen 41 und 42 für die Phantomgrößen P4 und P5 dargestellt. In Tabelle 40 sind die in einer Auswertung anzusetzenden Werte (Mittelwert, Standardabweichung und Unsicherheit) zusammengefasst.

Tab. 39 Mit der jeweiligen spezifischen Aktivität normierte Zählraten des Portalmonitors für die Phantomgrößen P4 und P5 sowie jeweils vier Aktivitätsniveaus. Die Werte sind in Einheiten von ips/(Bq/kg) angegeben.

	P4-A1	P4-A2	P4-A3	P4-A4	P5-A1	P5-A2	P5-A3	P5-A4
²² Na	1,5E+00	1,6E+00	1,8E+00	2,4E+00	1,8E+00	1,9E+00	2,0E+00	2,4E+00
²⁴ Na	2,3E-02	2,8E-02	4,1E-02	3,7E-02	2,8E-02	3,7E-02	4,1E-02	4,4E-02
⁷⁵ Se	2,0E-01	2,1E-01	2,1E-01	2,1E-01	2,5E-01	2,5E-01	2,4E-01	2,5E-01
⁹⁰ Mo/ ^{99m} Tc	1,1E-01	9,9E-02	1,1E-01	6,9E-02	1,2E-01	1,2E-01	1,2E-01	8,2E-02
¹³⁷ Cs	5,5E-01	6,3E-01	7,3E-01	1,1E+00	6,6E-01	7,2E-01	8,1E-01	1,2E+00
¹⁷⁰ Tm	0,0E+00							
¹⁹⁷ Hg	7,8E-03	9,8E-03	1,3E-02	6,8E-03	1,0E-02	1,3E-02	1,7E-02	8,2E-03

Tab. 40 Aus Tabelle 39 abgeleitet Mittelwerte, Standardabweichungen und Unsicherheiten für die Korrelationsfaktoren zu den Messungen mit dem Portalmonitor für die Phantomgrößen P4 und P5. Soweit nicht anders angegeben sind die Werte in Einheiten von ips/(Bq/kg) angegeben.

	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit in %
²² Na	1,9E+00	2,8E-01	15%
²⁴ Na	3,5E-02	7,7E-03	22%
⁷⁵ Se	2,3E-01	2,2E-02	10%
⁹⁰ Mo/ ^{99m} Tc	1,0E-01	1,9E-02	19%
¹³⁷ Cs	7,9E-01	2,2E-01	27%
¹⁷⁰ Tm	0,0E+00	0,0E+00	-
¹⁹⁷ Hg	1,1E-02	3,4E-03	32%

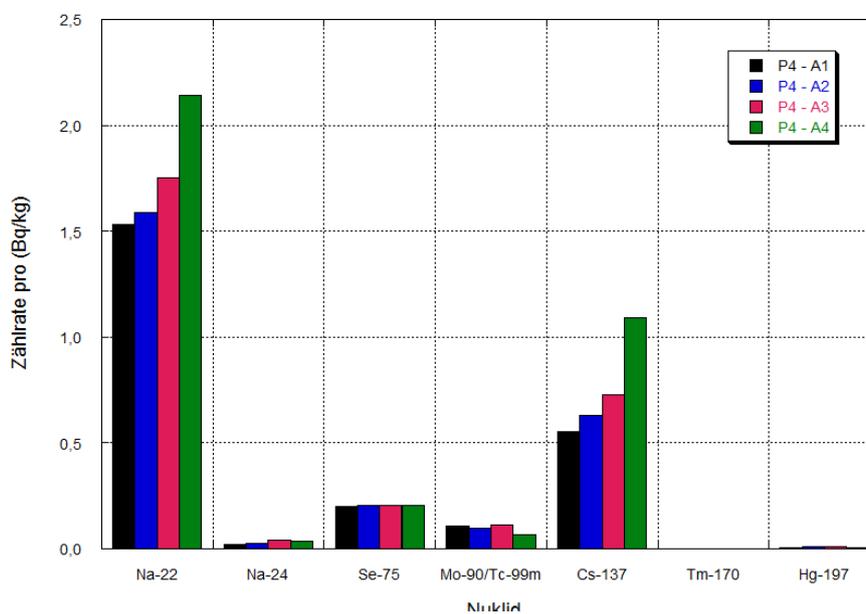


Abb. 41 Gemessene, normierte Nettozählraten des Portalmonitors für das mit unterschiedlichen Nukliden und Aktivitäten bestückte Phantom P4.

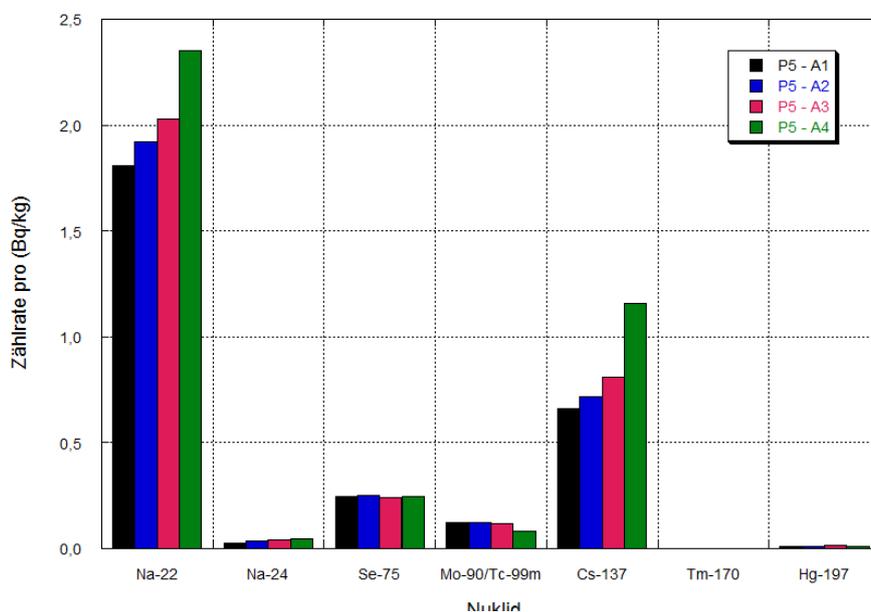


Abb. 42 Gemessene, normierte Nettozählraten des Portalmonitors für das mit unterschiedlichen Nukliden und Aktivitäten bestückte Phantom P5.

Die Abbildungen zeigen, dass für beide Phantomgrößen nicht alle untersuchten Nuklide mit gleicher Wahrscheinlichkeit nachgewiesen werden können. Speziell ^{170}Tm führt zu gar keinem nachweisbaren Signal. Andere Nuklide, wie ^{22}Na und ^{137}Cs , ergeben hingegen ein ausreichendes Signal für einen Nachweis¹¹. Die teilweise deutlich sichtbaren Variationen der normierten Zählraten für die vier unterschiedlichen Aktivitätsniveaus eines Nuklids werden durch die Zählstatistik hervorgerufen und sind ein Maß für die Schwankungsbreite der zu erwartenden Ergebnisse der Messungen mit dem Portalmonitor.

Anhand der Abbildungen können die Ergebnisse einer Messung mit einem Portalmonitor nuklidspezifisch bewertet werden. Bei einer gemessenen (Netto-)Zählrate von 6000 Impulsen pro Sekunde ergibt sich für eine 61,5 kg schwere Person¹² und der Annahme, dass es sich bei dem Nuklid um ^{22}Na handelt eine von der Person inkorporierte Aktivitätsmenge von ca. $7\text{E}+05$ Bq¹³. Ein Vergleich der registrierten Impulse für das Aktivitätsniveau A4 (Tab. 12: A4 (^{22}Na) = $2,2\text{E}+05$ Bq) zeigt, dass dieser Ansatz als erste grobe Näherung eingesetzt werden kann.

¹¹ Unter Identifikation wird hier der prinzipielle Nachweis von Radioaktivität verstanden. Eine Identifikation des Nuklids ist aufgrund der rein zählenden Funktionsweise des Portalmonitors nicht möglich.

¹² entspricht dem Phantom P4

¹³ gemessene Impulse mal Gewicht in kg mal nuklidspezifische normierte Zählrate (im Beispiel: $6000 \times 61,5 \times 1,89$).

2.4.6 Messungen der Dosisleistungen

Die Dosisleistungsmessung erfolgte in direktem Kontakt mit dem Phantom in Bauchhöhe. Die gemessenen Dosisleistungsmesswerte wurden bezüglich des am Messort vorhandenen Untergrunds korrigiert. Um die prinzipielle Eignung von Dosisleistungsmessungen für den Nachweis inkorporierter Gamma-strahlender Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen einschätzen zu können, wurden die derart bestimmten Dosisleistungsmesswerte auf die spezifischen Aktivitäten der in den Messungen jeweils eingesetzten Nuklide normiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 41 und in den Abbildungen 43 und 44 für die Phantomgrößen P4 und P5 dargestellt. In Tabelle 42 sind die in einer Auswertung anzusetzenden Werte (Mittelwert, Standardabweichung und Unsicherheit) zusammengefasst.

Tab. 41 Mit der jeweiligen spezifischen Aktivität normierte Dosisleistungsmesswerte für die Phantomgrößen P4 und P5 sowie jeweils vier Aktivitätsniveaus. Die Werte sind in Einheiten von $(\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq/kg})$ angegeben.

	P4-A1	P4-A2	P4-A3	P4-A4	P5-A1	P5-A2	P5-A3	P5-A4
²² Na	3,5E-04	3,6E-04	3,2E-04	4,0E-04	3,4E-04	4,3E-04	4,7E-04	4,6E-04
²⁴ Na	8,8E-04	9,2E-04	9,0E-04	1,0E-03	9,2E-04	8,7E-04	8,7E-04	8,8E-04
⁷⁵ Se	5,9E-05	4,5E-05	5,6E-05	4,4E-05	6,1E-05	6,7E-05	6,2E-05	7,8E-05
⁹⁰ Mo/ ^{99m} Tc	6,8E-05	8,3E-05	8,0E-05	7,5E-05	6,0E-05	6,0E-05	7,3E-05	9,1E-05
¹³⁷ Cs	5,9E-05	6,8E-05	7,4E-05	8,1E-05	7,9E-05	7,7E-05	1,0E-04	1,2E-04
¹⁷⁰ Tm	3,0E-07	4,0E-07	4,8E-06	-	9,0E-07	4,0E-07	1,2E-06	5,9E-06
¹⁹⁷ Hg	1,3E-05	8,2E-06	1,6E-05	5,5E-06	1,3E-05	1,2E-05	1,1E-05	5,5E-06

Tab. 42 Aus Tabelle 41 abgeleitet Mittelwerte, Standardabweichungen und Unsicherheiten für die Korrelationsfaktoren zu den Dosisleistungsmessungen für die Phantomgrößen P4 und P5. Soweit nicht anders angegeben sind die Werte in Einheiten von $(\mu\text{Sv/h})/(\text{Bq/kg})$ angegeben.

	Mittelwert	Standardabweichung	Unsicherheit in %
²² Na	3,9E-04	5,7E-05	14%
²⁴ Na	9,1E-04	5,2E-05	6%
⁷⁵ Se	5,9E-05	1,1E-05	19%
⁹⁰ Mo/ ^{99m} Tc	7,4E-05	1,1E-05	15%
¹³⁷ Cs	8,2E-05	1,9E-05	23%
¹⁷⁰ Tm	1,7E-06	2,3E-06	132%
¹⁹⁷ Hg	1,1E-05	3,8E-06	36%

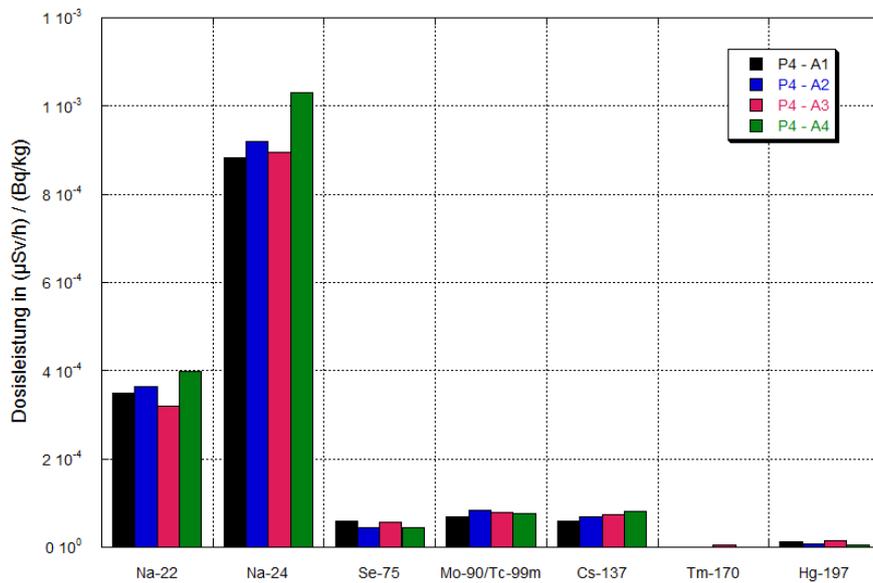


Abb. 43 Gemessene, normierte Dosisleistungsmesswerte für das mit unterschiedlichen Nukliden und Aktivitäten bestückte Phantom P4.

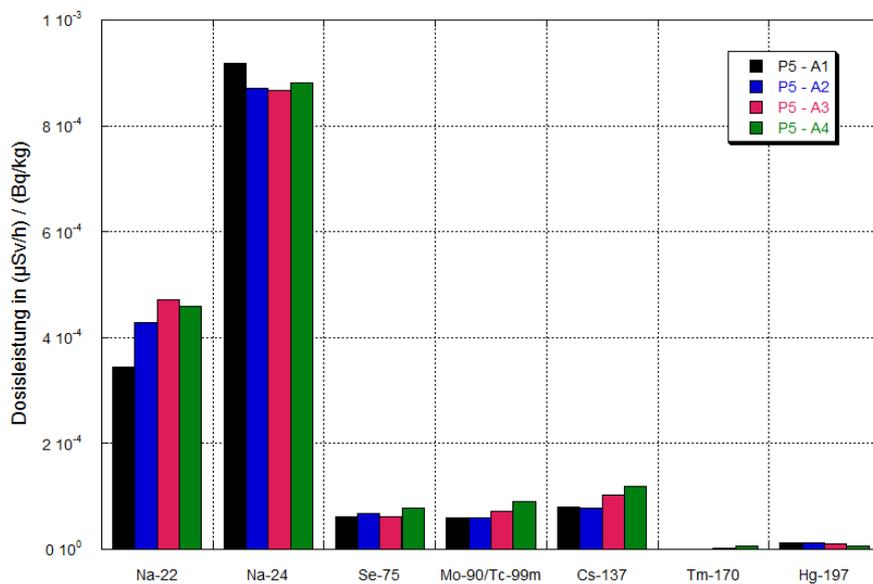


Abb. 44 Gemessene, normierte Dosisleistungsmesswerte für das mit unterschiedlichen Nukliden und Aktivitäten bestückte Phantom P5.

Die Abbildungen (Abb. 43 und 44) zeigen, dass für beide Phantomgrößen nicht alle untersuchten Nuklide mit gleicher Wahrscheinlichkeit nachgewiesen werden können. Speziell ¹⁷⁰Tm liefert kein auswertbares Signal für die Dosisleistung. Andere Nuklide, wie ²²Na und ¹³⁷Cs, ergeben hingegen ein ausreichendes Signal für einen

Nachweis¹⁴. Die teilweise deutlich sichtbaren Variationen der normierten Dosisleistungsmesswerte für die vier unterschiedlichen Aktivitätsniveaus eines Nuklids werden durch statistische Effekte hervorgerufen und sind ein Maß für die Schwankungsbreite der zu erwartenden Ergebnisse der Dosisleistungsmessungen.

Zur Überprüfung, ob wie beim Portalmonitor mit einer einfachen zählenden Messung eine grobe Abschätzung der inkorporierten Aktivitätsmenge bei bekanntem Nuklid möglich ist, wurde für das Nuklid ²²Na eine Abschirmrechnung mit Nucleonica /6/ durchgeführt. Bei einer unterstellten punktförmigen Quelle mit einer Aktivität von 6,5E+05 Bq ergibt sich in 1 cm Abstand ein Dosisleistungswert von 2 mSv/h, welcher Größensordnungsmäßig als grober Anhaltspunkt für den in einer Messung zu erwartenden Dosisleistungsmesswert herangezogen werden kann. Unberücksichtigt blieben bei dieser Berechnung Abschirmeffekte. Wird nun die gleiche Aktivitätsmenge als von einer Person (P4) inkorporiert unterstellt, dann liefert eine Auswertung unter Verwendung der Werte aus Tabelle 42 für die bei einer Messung zu erwartende Dosisleistung einen Wert von ca. 16 mSv/h. Ein Vergleich mit dem oben berechneten Wert zeigt, dass aus gemessenen Dosisleistungsmesswerten nur sehr eingeschränkt eine Abschätzung der tatsächlich inkorporierten Aktivitätsmenge möglich ist. Gründe hierfür liegen vor allem in der Messgeometrie, da nur ein Bereich des Phantoms in direktem Kontakt gemessen wird, und in der Messstatistik¹⁵.

14 Unter Nachweis wird hier der prinzipielle Nachweis von vorhandener Radioaktivität verstanden. Eine Identifikation des Nuklids ist aufgrund der rein zählenden Funktionsweise des Dosisleistungsmessgerätes nicht möglich.

15 Die zur Berechnung der Korrelationsfaktoren verwendeten (gemessenen) Dosisleistungswerte lagen im Allgemeinen im Bereich von wenigen µSv/h.

3 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung der Eignung von in-situ Gamma-Spektrometern für den Nachweis inkorporierter Gamma-strahlender Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen. Hierzu wurden Gamma-spektrometrische Messungen für zwei Größen des Petersburger Phantoms jeweils in sitzender sowie in zwei stehenden (50 cm und 100 cm Abstand) Geometrien mit einem HPGe-Detektor (Falcon 5000) und einer LaBr₃-Messsonde durchgeführt. Ergänzend fanden Messungen mit einem Portalmonitor und einer Dosisleistungsmesssonde statt.

Die in den Messungen eingesetzten Stabquellen wurden von RCM hergestellt und einer entsprechenden Qualitätssicherung zum Nachweis der Einhaltung der vom Auftraggeber geforderten Randbedingungen unterworfen.

Aus den Gamma-spektrometrisch bestimmten Spektren wurden für den HPGe-Detektor und die LaBr₃-Messsonde die energie- und geometrieabhängigen Effizienzkurven abgeleitet, welche im Falle eines Einsatzes der beiden Detektoren in einer nuklearen Notfallsituation zur quantitativen Auswertung der gemessenen Spektren herangezogen werden können (Kapitel 2.4.2). Eigens bestimmte Nachweis- und Erkennungsgrenzen nach DIN ISO 11929 für 18 Radionuklide erlauben eine Aussage über die minimalen Aktivitäten, die mit dem eingesetzten Detektorsystem zum Nachweis inkorporierter Gamma-strahlender Radionuklide nachgewiesen werden können (Kapitel 2.4.4).

Der Vergleich der registrierten Gamma-Spektren mit dem HPGe-Detektor und der LaBr₃-Messsonde unter identischen Messbedingungen zeigt, dass letztere prinzipiell auch für den Nachweis inkorporierter Gamma-strahlender Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen geeignet ist (Kapitel 2.4.3), vorausgesetzt es handelt sich nicht um ein Radionuklidgemisch¹⁶ mit vielen charakteristischen Linien, welche sich im gemessenen Gamma-Spektrum überlagern und eine Identifizierung und quantitative Auswertung erschweren oder verhindern. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei Einsatz der LaBr₃-Messsonde in der Regel wesentlich längere Messzeiten erforderlich sind als bei Einsatz des HPGe-Detektors.

Der Einsatz von Portalmonitoren oder von Dosisleistungsmesssonden stellt für einige Radionuklide eine alternative und schnelle Messmöglichkeit zur groben Bestimmung inkorporierter Gamma-strahlender Radionuklide dar. Entsprechende Korrelationsfaktoren für den Zusammenhang zwischen Zählrate (Portalmonitor) bzw. Dosisleistung (Dosisleistungsmessgerät) und der inkorporierten Aktivitätsmenge wurden bestimmt (Kapitel 2.4.5 bzw. 2.4.6). Vor einem Einsatz eines Portalmonitors bzw. einer Dosisleistungsmesssonde muss aber vorab (einmalig) durch eine Gamma-spektrometrische Messung verifiziert werden, dass es sich bei dem potentiell inkorporierten Gamma-Strahler um ein mit diesen Methoden nachweisbares Radionuklid handelt. Von den sieben im Rahmen des Vorhabens untersuchten Radionukliden sind fünf (²²Na, ²⁴Ne, ⁷⁵Se, ⁹⁹Mo/^{99m}Tc, und ¹³⁷Cs) nachweisbar, zwei (¹⁷⁰Tm und ¹⁹⁶Hg) nicht.

¹⁶ Diese Art von Radionuklidquelle wurde im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht.

4 Referenzen

- /1/ Untersuchung der Eignung von In-situ-Gammaspektrometern für den Nachweis inkorporierter gammastrahlender Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen, Vorhaben 3612S20014, Angebotsanfrage, Schreiben vom 12.07.2012, Bundesamt für Strahlenschutz.
- /2/ Aufforderung zur Abgabe eines Angebotes für die Durchführung eines Vorhabens zum Thema "Untersuchung der Eignung von In-situ-Gammaspektrometern für den Nachweis inkorporierter gammastrahlender Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen" Schreiben des Bundesamts für Strahlenschutz an die Technische Universität München, ZTWB Radiochemie (RCM), vom 21.02.2012, Zeichen AG-F 3.2 08303_3612S20014.
- /3/ Gerstmann, Leistungsbeschreibung, FKZ 3612 S 20014, *Untersuchung der Eignung von In-situ-Gammaspektrometern für den Nachweis inkorporierter gammastrahlender Radionuklide in nuklearen Notfallsituationen*, vom 25.6.2012,
- /4/ *Technical Documents for Human Whole Body Phantom with Reference Samples of Radionuclides Potassium-40, Cobalt-57, Cobalt-60 and Caesium-137, Set UPh-07T*. Saint-Petersburg, Russia (1995), designed by Research Institute for Industrial and Sea Hygiene, produced by Scientific and Technical Centre "Protection Ltd".
- /5/ Bailat, Claude ; Bochud, Francois ; Juget, Frédéric, Buchillier, Thierry: *Development, design and validation of solid reference samples*. Applied Radiation and Isotopes, 87 (2014), S. 480-484.
- /6/ Nucleonica GmbH, Nuclide Datasheets++, Nucleonica Nuclear Science Portal (www.nucleonica.com), Version 2014.04.30, Karlsruhe (2014).
- /7/ Kramer, Gary H. ; Capello, Kevin; Hauck, Barry M. : *Evaluation of two commercially available portal monitors for emergency responses*. Health Physics 92, Suppl. 1 (2007), S. S50-S56.

5 Anhang: Messanleitungen

5.1 HPGe-Detektor Falcon 5000

5.1.1 Erforderliches Equipment

Nachfolgendes Equipment ist für den Einsatz des Falcon 5000 für eine in-situ-Gamma-Spektrometriemessung erforderlich:

- Falcon 5000
- Netzteil, Netzkabel und Verbindungskabel zum Falcon
- PC (bevorzugt Laptop) mit WLAN-Möglichkeit und installierter Genie 2000-Software für den Falcon-Detektor.
- ggf. Maus und Tastatur für PC
- Entfernungsmessgerät (elektrisch oder mechanisch)
- Vorrichtung zur Positionierung des Detektors in der erforderlichen Höhenposition

5.1.2 Vorbereitung

Für die Inbetriebnahme des Falcon 5000 sind nachfolgende Schritte auszuführen (Es wird davon ausgegangen, dass der Detektor bereits gekühlt ist):

- Falcon 5000 positionieren (z. B. mit Hilfe einer geeigneten Positioniervorrichtung)
- Falcon 5000 mit Netzteil verbinden (optional: erforderlich falls nicht im Batteriebetrieb)
- Netzteil mit Steckdose verbinden (optional: erforderlich falls nicht im Batteriebetrieb)
- Netzteil einschalten (optional: erforderlich falls nicht im Batteriebetrieb)
- Netzschalter am Falcon auf "ein" schalten
- Falcon ist im Standby-Modus
- PC einschalten und Benutzer anmelden
- WLAN am PC über das Netzwerk- und Freigabecenter anschalten
- WLAN-Verbindung zum Falcon 5000 aufbauen (ebenfalls über Netzwerk- und Freigabecenter)
- Auf PC die Falcon 5000 Software starten
- Bedienung der Software nach dessen Start
 - Zweimal den "Next"-Button im Menü anklicken
 - "Operate" anklicken
 - Die Meldung "Switch to Operate-Mode?" durch Anklicken des Buttons "Yes" quittieren
 - Es wird nun in der Regel ein Spektrum angezeigt. Hier zweimal den Button "Previous" anklicken

- Nun den "Start"-Button anklicken
- Bei erstmaligem (Wieder-)Einschalten des Detektors erscheint die Meldung "HV ist aus. Wollen Sie die HV einschalten?". Durch Klick auf "Yes" quittieren. Die Hochspannung des Falcon 5000 wird hochgefahren.
- Eventuell laufende Messung in "Falconprogramm" stoppen
- Den Button "Next" anklicken
- Programm Genie 2000 starten
- Eventuell erscheinende Meldung wegen fragwürdiger Daten mit „OK“ quittieren
- Einstellen der gewünschten Messparameter ("Gammamessprogramm")
 - Im Menüpunkt "VKA" die gewünschte Messzeit vorwählen
 - Im Menüpunkt "Bearbeiten" die Probeninformationen (z. B. Name des Probanden) eingeben
- Vorangegangene Messung löschen
- Der Falcon 5000 ist jetzt messbereit und kann durch Anklicken des "Start"-Buttons gestartet werden
- Proband in vorgegebenem Abstand und vorgegebener Geometrie vor dem Detektor positionieren
- Starten der Messung

5.2 LaBr₃-Messsonde

5.2.1 Erforderliches Equipment

Nachfolgendes Equipment ist für den Einsatz der LaBr₃-Messsonde für eine in-situ-Gamma-Spektrometrie-messung erforderlich:

- Osprey mit LaBr₃-Messsonde
- Netz- und LAN-Kabel
- PC (bevorzugt Laptop) mit LAN-Anschluss und installierter Genie 2000-Software für den Osprey.
- ggf. Maus und Tastatur für PC
- Entfernungsmessgerät (elektrisch oder mechanisch)
- Vorrichtung zur Positionierung des Detektors in der erforderlichen Höhenposition

5.2.2 Vorbereitung

Für die Inbetriebnahme der LaBr₃-Messsonde sind nachfolgende Schritte auszuführen:

- LaBr₃-Messsonde positionieren (z. B. mit Hilfe einer geeigneten Positioniervorrichtung)
- Den Anschluss „Out“ am Osprey mit einem LAN-Kabel mit dem zugehörigen Netzteil verbinden
- PC mit einem LAN-Kabel mit dem Netzteil des Osprey verbinden
- Netzteil mit Stromnetz verbinden
- Programm "VKA-Eingangseditor" starten und die zugehörige "MID"-Datei laden (Menü punkt "Datenbank / Laden in / „Name der MID-Datei“). Auswahl durch Klick auf "OK"-Button quittieren
- Programm "Gammamessung und -analyse" starten.
 - Im Menüpunkt "Datei / Datenquelle öffnen / LaBr“ den Detektor auswählen.
 - Einstellen der gewünschten Messparameter
- Die LaBr₃-Messsonde ist jetzt messbereit und kann durch Anklicken des "Start"-Buttons gestartet werden
- Proband in vorgegebenem Abstand und vorgegebener Geometrie vor dem Detektor positionieren
- Starten der Messung