



In situ gammaspektrometri vid låga energier

Semi-empirisk kalibrering av en semiplanar HPGe-detektor
för mätningar i närgeometri

ANGELICA HEDMAN, MICHAEL GRANSTRÖM,
LENNART JOHANSSON, GÖRAN ÅGREN, HENRIK RAMEBÄCK

Angelica Hedman, Micael Granström,
Lennart Johansson, Göran Ågren,
Henrik Ramebäck

In situ gammaspektrometri vid låga energier

Semi-empirisk kalibrering av en semiplanar HPGe-detektor för
mätningar i närgeometri

Titel	<i>In situ</i> gammaspektrometri vid låga energier - Semi-empirisk kalibrering av en semiplanar HPGe-detektor för mätningar i närgeometri
Title	<i>In situ</i> gamma spectrometry at low energies - Semi-empirical calibration of a semi-planar HPGe detector for measurements in close geometries
Rapportnr/Report no	FOI-R--4729--SE
Månad/Month	Mars
Utgivningsår/Year	2019
Sidor/Pages	45 p
Kund/Customer	SSM/Försvarsdepartementet
Forskningsområde	2. CBRN-frågor och icke-spridning
FoT-område	Ej FoT
Projektnr/Project no	B400101/A405418
Godkänd av/Approved by	Åsa Scott
Ansvarig avdelning	CBRN-skydd och säkerhet
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

En GEM-S HPGe-detektor har karakteriserats och kalibrerats för *in situ*-mätningar av lågenergetisk gammastrålning i närgeometri. Detektorn har ett tunt fönster och en tunn bred kristall, vilket är optimalt vid mätning av lågenergetiska fotoner. Inom det här projektet har följande moment genomförts:

1. En detaljerad detektormodell har skapats i MCNP utifrån data från tillverkaren i kombination med data från datortomografi (CT).
2. En effektivitetskalibrering erhöles genom mätning i närgeometri med en kalibreringslösning på detektorns fönster.
3. Mätningar har även utförts med punktkällor med olika energier och infallsvinklar mellan 0 till 90 ° för att mäta responsen vid olika vinklar.
4. En förbättrad detektormodell har skapats genom jämförelser av empiriska effektiviteter och Monte Carlo-simuleringar.
5. Verifiering av kalibreringen har gjorts genom mätningar på en kalibrerad ytkälla spårbar till en primär aktivitetsstandard.

Nyckelord: Gammaspektrometri, semiplanar HPGe, semi-empirisk kalibrering, låga energier, Monte Carlo-simuleringar

Summary

A GEM-SP HPGe detector has been characterized and calibrated for *in situ* measurements of low energy gamma radiation in close geometries. The detector has a thin window and a thin wide crystal, which is optimal when measuring low energy photons. Within this project, the following steps have been carried out:

1. A detailed detector model has been created in MCNP based on data from the manufacturer in combination with data from computed tomography (CT).
2. An efficiency calibration was obtained through measurement in close geometry with a calibration solution on the detector window.
3. Measurements have also been conducted with point sources with different energies and angles of incidence between 0 and 90 degrees to measure the response at different angles.
4. An improved detector model has been created through comparisons of empirical efficiencies and Monte Carlo simulations.
5. Verification of the calibration has been performed through measurements on a calibrated surface traceable to a primary activity standard.

Keywords: Gamma spectrometry, semi-planar HPGe, semi-empirical calibration, low energies, Monte Carlo simulations

Innehåll

1	Inledning	7
2	Material och metod	8
2.1	Detektor.....	8
2.2	Semi-empirisk kalibrering.....	9
2.2.1	Kalibreringslösning på detektorfönster	9
2.2.2	Punktkällor i olika infallsvinklar	9
2.2.3	Detektormodell	10
2.3	Verifiering	12
3	Resultat och diskussion	13
3.1	Semi-empirisk kalibrering.....	13
3.1.1	Kalibreringslösning på detektorfönster	13
3.1.2	Punktkällor i olika infallsvinklar	13
3.1.3	Detektormodell	14
3.2	Verifiering	18
4	Slutsats	19
5	Referenser	20
	Bilaga 1 - Certifikat för kalibreringslösning	23
	Bilaga 2 - Certifikat för punktkällor	25
	Bilaga 3 - Certifikat för kalibreringsytälla	39
	Bilaga 4 - Empiriska effektiviteter för olika energier och infallsvinklar	41

1 Inledning

Syftet med den här studien var att karaktärisera och kalibrera en HPGe-detektor för *in situ*-mätningar av lågenergetisk gammastrålning i närgeometri. *In situ* gammaspektrometri är en viktig, snabb och icke-förstörande mätmetod efter deposition av radionuklider, t.ex. efter en kärnkraftverksolycka [Beck *et al.* 1972, ICRU53 1994, Finck 1992, Nir-El *et al.* 1999]. Metoden är väl etablerad och används för mätningar av högre gammaenergier med detektorn ofta placerad 1 m ovanför marken. Den här studien syftar till att använda denna metod för mätningar i närgeometri och av lågenergetisk gammastrålning, för att mäta andra radionuklider än vad vi mäter idag och med ett mindre synfält¹.

Mätning, i detta fall identifiering och kvantifiering, av lågenergetiska fotoner ställer andra/högre krav på detektorn jämfört med mätning av fotoner med högre energi. Vid lägre energier är bland annat bakgrunden hög på grund av Comptonspridning i detektorn och kringliggande material, orsakat av fotoner med högre energi som växelverkar i materialen. Detektorn som har använts i den här studien är en GEM-S HPGe-detektor som är särskilt avsedd för att mäta lågenergetisk gammastrålning. Den har valts baserat på data från Monte Carlo-beräkningar gjorda i ett tidigare projekt finansierat av SSM (SSM2014-4664), där en undersökning gjordes genom Monte Carlo-simuleringar för att erhålla den bästa kombinationen av detektorparametrar som ger en låg minsta detekterbar aktivitet (MDA).

Detektorn har kalibrerats med en semi-empirisk metod med två olika mätuppställningar, en där en radionuklidlösning med ett flertal radionuklider som emitterar fotonenergier i lågenergiområdet ställts direkt på detektorns fönster och en där mätningar har gjorts i olika infallsvinklar runt detektorhuvudet med punktkällor med olika gammaenergier. I det första fallet kan man bl.a. bestämma ett mer exakt avstånd mellan detektorfönster och kristall, medan man i det andra fallet kan bestämma detektorns känslighet vid olika infallsvinklar. MCNP har använts för att skapa en detaljerad modell av detektorn, baserat på data från tillverkare och från datortomografi. Modellen har sedan modifierats för att stämma överens med empiriska mätningar. Slutligen gjordes en verifiering av kalibreringen genom mätning på en kalibrerad ²⁴¹Am-ytkälla (26,3 och 59,5 keV) som är spårbar till en primär aktivitetsstandard.

Det här projektet är en fortsättning på projekten SSM2014-4664 och SSM2013-5290. Inom alla dessa projekt delfinansieras en doktorand.

¹ Eng. *field-of-view*.

2 Material och metod

2.1 Detektor

Detektorn som har använts är en GEM-SP HPGe-detektor med ett tunt fönster och en bred tunn kristall (EG&G Ortec, TN, USA)², vilket är optimalt vid mätning av låg-energetiska fotoner. Fönstret är gjort av kolfiber, ett material med låg densitet och lågt atomnummer (Z). Kolfiber är mindre ömtåligt jämfört med exempelvis beryllium, som är ett vanligt fönstermaterial. Kristallen är bred och relativt tunn, vilket minskar Compton-bidraget, i bakgrunden vid lägre energier, från högenergetiska fotoner som växelverkar i kristallen. Detektorn är en p-typ coaxial semi-planar halvledare. En p-typ detektor har ett tjockare dödlager på kanterna av kristallen jämfört med en n-typ, vilket gjorde att n-typ-detektorer ofta föredrogs tidigare vid mätning av låga energier då dödlaget hos p-typ detektorer tidigare har varit tjockt på alla sidor runtom kristallen. Denna detektor har dock tillverkats på ett sätt där det är möjligt att erhålla ett relativt tunt dödlager ovanpå kristallen (< 0,010 mm). Fördelen med en p-typ är en bättre upplösning på grund av en effektivare laddningsinsamling. I en p-typ samlas elektronerna in i den yttre delen av kristallen och vid lägre energier skapas laddningarna närmre de yttre delarna av kristallen, vilket gör att elektronerna har kortare avstånd att röra sig inuti kristallen. Detektorn har även en längre hals mellan detektorhuvud och kärl för reducerat brus från elektroniken. Mer information om detektorns parametrar ges i tabell 1.

Tabell 1. Information om detektorn. Alla avstånd i mm om inget annat anges.

Parameter	Storlek eller material
Fönstermaterial	Kolfiber
Fönstertjocklek	0,76
Avstånd mellan fönster och kristall	3
Kristalldiameter	49,5
Kristalltjocklek/längd	13,3
Kristallmaterial	Ge
Håldiameter	5,5
Håldjup	3,2
Dödlagertjocklek ovanpå	< 0,010
Dödlagertjocklek yttersida	0,7
Dödlagertjocklek insida	0,3 µm
Isolatormaterial	Al/Mylar
Isolatortjocklek	0,03
Ytterhölje*-diameter	70
Ytterhölje-material	Al (HPA ^{**})
Ytterhölje-tjocklek	1
Kristallhållare-tjocklek	1,9
Kristallhållare-material	Cu

* Eng. *end-cap*.

** Eng. *High Purity Aluminium*. Aluminium med hög renhetsgrad.

² www.ortec-online.com/download/Profile-SP-Detectors.pdf

2.2 Semi-empirisk kalibrering

En semi-empirisk kalibrering av detektorn gjordes, vilket innebär att man använder data från empiriska mätningar tillsammans med en detektormodell och Monte Carlo-beräkningar. Fördelen med en semi-empirisk kalibrering är att den erbjuder möjligheten att beräkna mäteffektiviteter för situationer där empirisk kalibrering inte genomförts, eller där empirisk kalibrering är mycket svår att genomföra. Denna metodik kallas effektivitetsöverföring [Vidmar *et al.* 2010] och börjar bli vanlig inom laboratoriemätningar.

Två olika empiriska mätningar gjordes, vilka beskrivs nedan. Den ena gjordes i närgeometri med en kalibreringslösning på detektorns fönster. Den andra gjordes med punktkällor i olika infallsvinklar mot detektorn för att mäta responsen vid olika vinklar. Anledningen att göra en empirisk kalibrering på detektorns fönster är att med den kan man bestämma avståndet mellan kristall och fönster. GammaVision (EG&G Ortec, TN, USA) användes vid mätning, utvärdering samt för att skapa energi- och effektivitetskalibreringsdata.

2.2.1 Kalibreringslösning på detektorfönster

En kalibreringslösning bestående av radionuklider som emitterar lågenergetiska fotoner användes, se tabell 2 (Eckert & Ziegler, Tyskland). Certifikat finns i bilaga 1. En 5 ml burk fylldes med 0,5 ml kalibreringslösning och ca 4,5 ml 0,5 M HNO₃. Burken placerades inuti en plastpåse och centrerad direkt på detektorns kolfiberfönster, se figur 1. Mättiden var 78 406 s. En bakgrundsmätning gjordes.



Figur 1. Kalibreringslösning inuti en 5 ml burk på detektorfönster.

Tabell 2. Radionuklider i kalibreringslösningen. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

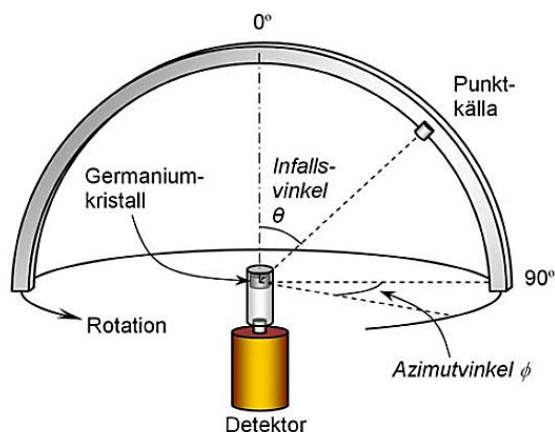
Nuklid	Energi (keV)	Fotonutbyte ³ (%)	Aktivitet vid mätning (kBq)	Osäkerhet (%)
²¹⁰ Pb	46,5	4,252	4,8	4
²⁴¹ Am	26,3	2,31	1,0	4
	59,5	35,92		
¹⁰⁹ Cd	88,0	3,66	2,8	5
⁵⁷ Co	14,4	9,18	0,2	2
	122,1	85,49		
	136,5	10,71		

2.2.2 Punktkällor i olika infallsvinklar

Flertalet punktkällor med olika radionuklider som emitterar lågenergetiska fotoner (PTB, Tyskland) placerades i olika vinklar relativt detektorn, på 641 mm avstånd från detektorns mittpunkt i en hållare som roterar runt detektorn för att ta hänsyn till eventuell asymmetri. En illustration över mätuppställningen visas i figur 2. De radionuklider som användes visas i tabell 3. Certifikaten finns i bilaga 2. Mätningar gjordes i vinklarna 0-90 ° med 10 ° intervall. Vinkel 0 ° innebär mätning rakt framifrån och vinkel 90 °, mätning från sidan.

³ http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/

Inställningar gjordes så att när punktkällorna var i 90 ° vinkel var de i nivå med kristallens mittpunkt. Mätningarna fick pågå tills osäkerheten i nettoarean var mindre än 2 %. För vinklar högre än 60 ° blev dock mättiderna för långa för att det skulle vara praktiskt genomförbart att uppnå det ställda osäkerhetskravet. Två bakgrundsmätningar gjordes eftersom mätningarna blev utspridda över tid.



Figur 2. Illustration över mätupställning.

Tabell 3. Radionuklider/punktkällor som användes vid effektivitetsmätningar för olika infallsvinklar. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidenstervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Fotonutbyte ⁴ (%)	Aktivitet vid första mättillfället (kBq)	Osäkerhet (%)
²¹⁰ Pb	46,5	4,252	20,6	2,4
²⁴¹ Am	26,3	2,31	33,3	1,2
	59,5	35,92		
¹⁰⁹ Cd	88,0	3,66	81,0	1,7
⁵⁷ Co	14,4	9,18	23,3	1,0
	122,1	85,49		
	136,5	10,71		
¹³³ Ba	53,2	2,14	310,6	1,1
	79,6	2,63		
	81,0	33,31		
	276,4	7,13		
	302,9	18,3		
	356,0	62,1		
	383,8	8,9		

2.2.3 Detektormodell

En modell av detektorn skapades i MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code, Los Alamos National Laboratory, USA). En första modell skapades med hjälp av detaljerad information från tillverkaren. Informationen från tillverkaren är till viss del generell för detektortypen. Det har visats att modeller som baserats på tillverkarnas specifikationer ofta skiljer sig från verkligheten [Aaltonen *et al.* 1994, Gasparro *et al.* 2008, Helmer *et al.* 2003, Johnston *et al.* 2006]. Avvikelser på 10-20 % har rapporterats mellan beräknad effektivitet från empirisk kalibrering och effektivitet från simuleringar baserat på data från

⁴ http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/

tillverkare [Boson *et al.* 2008, Lepy *et al.* 2001, Korum *et al.* 1997]. För att få fram en bättre detektormodell är det vanligt att bilder tas på detektorer med konventionell röntgen i två dimensioner i rumstemperatur [Boson *et al.* 2008, Budjás *et al.* 2009, Çelik *et al.* 2012, Johnston *et al.* 2006, Keyser *et al.* 2004, McNamara *et al.* 2012, Peyres *et al.* 2007]. I ett tidigare arbete har det visats att det vid mätning i närgeometri har betydelse att kyla detektorer innan bilder tas eftersom avståndet mellan kristall och fönster ändras, vilket påverkar effektiviteten speciellt vid mätningar i närgeometri [Hedman *et al.* 2015]. För att få information om den specifika detektorn gjordes därför en datortomografi (CT) av detektorer när den var kyld och modellen korrigerades utifrån denna. En SOMATOM Definition Flash (Siemens, Tyskland) CT användes. De inställningar som användes redovisas i tabell 4.

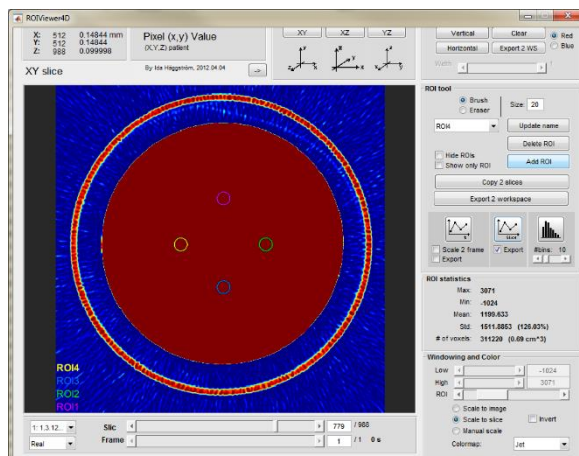
Tabell 4. Datortomografi-inställningar. Dimensioner är angivna i millimeter (mm) om inte annat anges.

Protokoll	Brain
Skivtjocklek hos rådata	0,6
Inkrement	0,1
Spiralstigningsfaktor*	0,35
Rörspänning (kV)	120
Ref. rörström (mAs)	2000

* Eng. *spiral pitch factor*.

Analys och utvärdering av datortomografin har beskrivits i tidigare projekt [Hedman *et al.* 2015]. Avståndet mellan fönster och kristall mättes på fyra områden⁵ och medelvärdet beräknades. I tidigare metod mättes data endast på ett ställe p.g.a. att data samlades in manuellt vilket var tidskrävande, medan i detta arbete användes ett program för att automatiskt samla in data. Figur 3 visar var i kristallen mätdata hämtades. För att få modellen att stämma överens ytterligare med verkligheten gjordes simuleringar som jämfördes med de två olika empiriska mätningarna. När den beräknade effektiviteten från simuleringarna och de empiriska mätningarna för alla mätgeometrier och energier stämde överens inom 5 % ansågs modellen vara klar. Större avvikelse accepterades för infallsvinklarna 80 och 90 °.

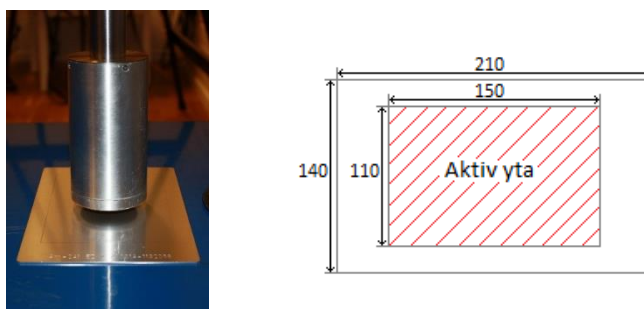
⁵ Eng. *region of interests* (ROI's).



Figur 3. Genomsnitt av detektorn i ett program som samlar in data (Hounsfield Units) från datortomografin. De mindre cirklarna, i blått, grönt, gult och rosa, markerar i kristallen de fyra områden som data hämtades från för att bestämma avståndet mellan fönster och kristall.

2.3 Verifiering

För att verifiera den semi-empiriska kalibreringen gjordes en mätning på en ^{241}Am -ytkälla med känd aktivitet, spårbar till en primär aktivitetsstandard (Eurostandard, Tjeckien). Certifikat finns i bilaga 3. Den aktiva ytan på ytkällan var 150x110 mm. Mätningen gjordes med detektorn centrerad ovanför ytan med ett avstånd på 11,5 mm mellan detektorfönster och ytkälla, se figur 4. Även här gjordes en bakgrundsmätning. Mätning, analys och utvärdering gjordes i GammaVision. En simulering genomfördes med den framtagna detektormodellen för en likadan mätgeometri för att beräkna mäteffektiviteterna vid 26,3 och 59,5 keV. Eftersom en känd avvikelse mellan modellen och den empiriska effektiviteten förekom för kalibreringen som gjordes med referenslösningen direkt på detektorns fönster, korregerades de beräknade effektiviteterna för ytkällegeometrin med denna avvikelse, $k_{\text{corr}MC26,3}$ resp. $k_{\text{corr}MC59,5}$. Dock behövdes inte någon extra osäkerhet för avvikelsen läggas till. Aktiviteten beräknades och jämfördes med aktiviteten enligt certifikatet. Den beräknade aktiviteten korregerades till referensdatumet på certifikatet.



Figur 4. 1) Mätning på ytkälla. 2) Ytkällans mått i mm.

3 Resultat och diskussion

3.1 Semi-empirisk kalibrering

3.1.1 Kalibreringslösning på detektorfönster

I tabell 5 visas beräknade effektiviteter för mätningen med en kalibreringslösning på detektorns fönster. Mättiden var 78406 s. Effektiviteten ökar upp till 59,5 keV varefter den minskar när energin ökar. Osäkerheten i effektiviteterna hamnade mellan ca 3-5 % ($k=2$). Både ^{57}Co och ^{109}Cd sönderfaller med elektroninfångning⁶, vilket i närgeometri kan orsaka koincidenssummation p.g.a. samtidig växelverkan av en gamma- och en röntgenfoton. Detta är dock inget problem i fallet ^{109}Cd eftersom den sönderfaller till $^{109\text{m}}\text{Ag}$, som har en halveringstid på ca 40 s, då gammafotonen på 88 keV kommer från sönderfallet av $^{109\text{m}}\text{Ag}$. För ^{57}Co kan man dels få γ - γ -koincidens mellan 122 keV och 14 keV, som ger summationsförluster vid 122 keV (och extrapulser i toppen vid 136 keV (122+14 keV)), dels få γ -X-koincidenser. Dock är mäteffektiviteten i det här fallet tillräckligt låg för gammafotonen med energin 14 keV och för de röntgenfotoner (6-7 keV) som emitteras i sönderfallet för att orsaka något signifikant problem. Den låga mäteffektiviteten vid dessa energier beror på självabsorption i provburken.

Tabell 5. Empiriska effektiviteter för olika energier. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

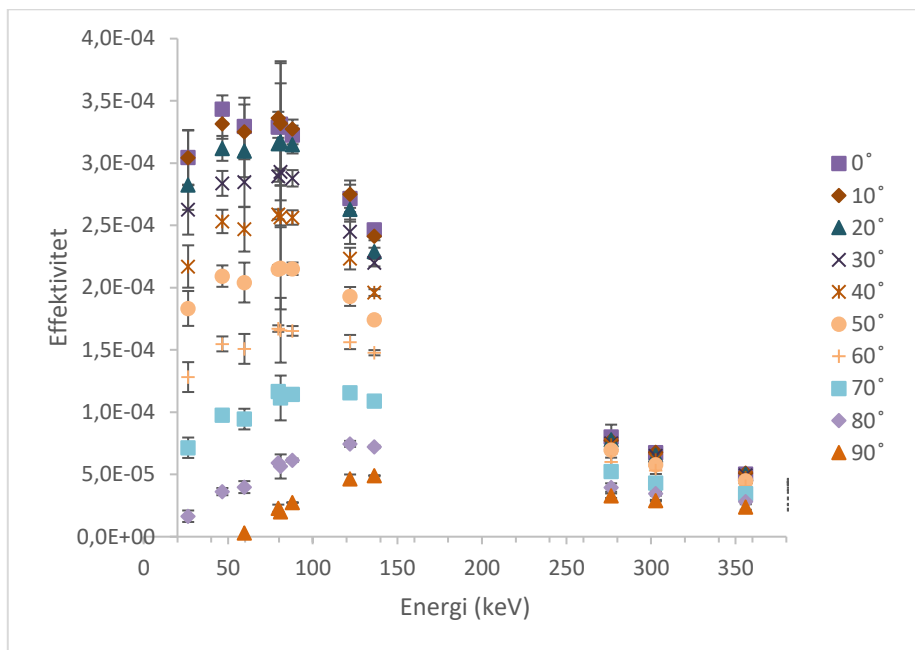
Nuklid	Energi (keV)	Nettoarea	Effektivitet	Osäkerhet (%)
^{57}Co	14,4	29986 ± 625	0,0209	5,3
^{241}Am	26,3	234562 ± 895	0,135	8,0
^{210}Pb	46,5	2841627 ± 2172	0,177	4,4
^{241}Am	59,5	4882720 ± 2556	0,181	4,1
^{109}Cd	88,0	1422704 ± 1558	0,175	5,7
^{57}Co	122,1	1944062 ± 1611	0,145	2,1
^{57}Co	136,5	230121 ± 551	0,137	3,5

3.1.2 Punktkällor i olika infallsvinklar

Figur 5 visar effektivitetens beroende av fotonenergin baserat på empiriska mätningar med punktkällor i olika infallsvinklar. Dessa effektiviteter visas även i tabell 4.1-4.10 i bilaga 4. Effektiviteten ökar till ett maximum vid ca 50 keV för att sedan minska. De variationer som syns i effektiviteten beror på osäkerheter. Vid låga energier (t.o.m. 122 keV) minskar effektiviteten mycket med högre infallsvinkel. Det beror både på att kristallen är tunn och på att fotonerna attenueras i det tjockare materialet, d.v.s. ytterhölje och hållare, som finns på sidorna av kristallen. Vid låga energier och vid en liten infallsvinkel absorberas en stor del av partiklarna i kristallen, d.v.s. energin deponeras i kristallen, eftersom den fria medelväglängden⁷ är mindre än dimensionerna av kristallen vilket ger en högre effektivitet. Vid högre energier och en liten infallsvinkel minskar effektiviteten eftersom en mindre del av partiklarna absorberas i kristallen på grund av att detektorn är tunn.

⁶ Eng. *electron capture (EC)*.

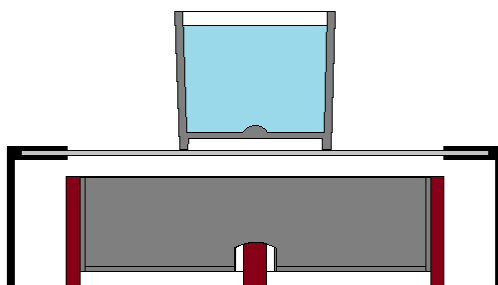
⁷ Eng. *mean free path*.



Figur 5. Empiriska effektiviteter med punktkällor i olika infallsvinklar. Vinkel 0 ° innebär mätning rakt framifrån och vinkel 90 ° från sidan.

3.1.3 Detektormodell

En bild på detektormodellen med 5 ml kalibreringslösning visas i figur 6. Effektiviteten som beräknades med MCNP utifrån den första detektormodellen stämde överens inom 5 % med empiriska data från mätningen med en kalibreringslösning direkt på detektorns fönster. Den stämde även överens inom 5 % med empiriska data från mätningarna med punktkällor för energier 26,3-122,1 keV, då infallsvinklarna var mellan 0-20 °. Avvikelsen var däremot stor vid större infallsvinklar, upp till 8 % vid 30-40 °, upp till 13 % vid 40-50 °, upp till 20 % vid 60 °, upp till 39 % vid 70 ° och upp till 98 % vid 80 °. Det visade sig att tillverkaren angett fel material på hållaren av kristallen. De hade angivit aluminium istället för koppar. När detta korrigerats stämde simuleringarna inom 5 % för energier 46,5-122,1 keV vid alla infallsvinklar utom 80-90 °. I tabell 6 listas de densiteter som använts.

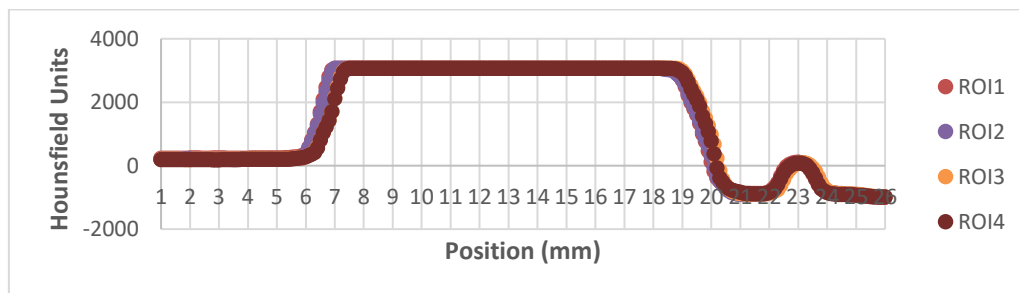


Figur 6. Detektormodellen med 5 ml burk fylld med kalibreringslösning.

Tabell 6. Information om detektormodellens material och densiteter.

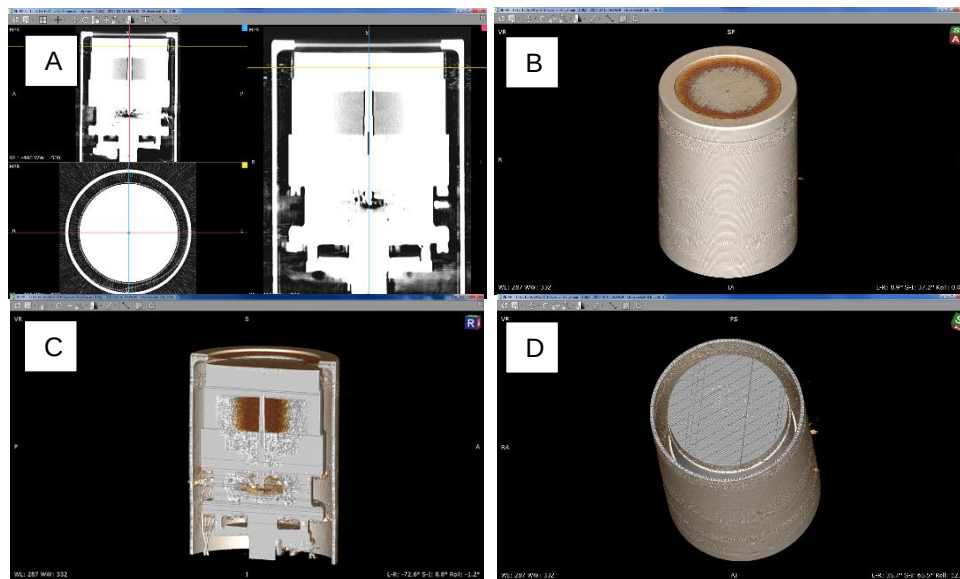
Parameter	Material	Densitet [kg/m ³]
Fönster	C	1600
Kristall	Ge	5320
Dödlager	Ge	5320
Isolatormaterial	Mylar	1380
Ytterhölje	Al	2700
Kristallhållare och ring	Cu	8960

Figur 7 visar resultatet från datortomografi/CT-bilderna. Det första maximumet motsvarar kristallen, det andra motsvarar fönstret, medan minimumet motsvarar avståndet mellan dessa. I figuren kan man utläsa att det är en viss skillnad på var kristallen befinner sig d.v.s. den ligger aningen snett. Med dessa data uppmättes avståndet mellan fönster och kristall enligt tidigare metod till mellan 2,0 mm och 2,1 mm för de olika områdena med ett medelvärde på 2,03 mm, vilket var det värde som först användes i modellen. Det visade sig dock att i närgeometri stämmer simuleringarna bättre överens med empiriska mätningar om avståndet mellan fönster och kristall är 3 mm, vilket överensstämmer med tillverkarens specifikationer.



Figur 7. Data från CT-körningar som visar HU-värden för kristall, fönster och avståndet mellan dessa. De olika kurvorna motsvarar olika region-of-interests, d.v.s. olika ställen i detektorn där HU-värden samlades in.

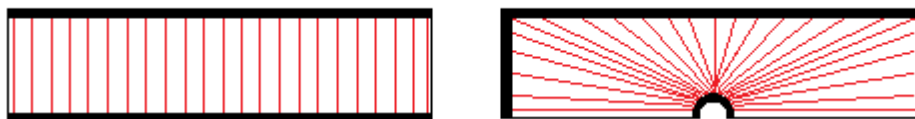
Figur 8 visar 2D- och 3D-bilder från datortomografin. I bilderna kan man se ett överlapp mellan fönster och aluminiumhölje vid fönstrets sidor. Detta korrigerades i modellen så att sidorna vid fönstret blev 1,76 mm tjocka totalt med fönster och hölje. Utifrån CT-bilderna kan man även notera att det finns ytterligare material runt om kristallen som vid högre vinklar täcker en del av den nedre delen av kristallen. Detta är enligt tillverkarna en hållare med skruvar för kristallhållaren. Simuleringar gjordes med en extra ring i koppar runt kristallen utanför hållaren, men resultatet blev sämre så den togs bort från den slutliga modellen.



Figur 8. 2D- och 3D-bilder på detektorn från datortomografin. A) Genomsnittningar av detektorn i 2D. B) Utsidan på detektorn i 3D. C) och D) Genomsnittningar av detektorn i 3D.

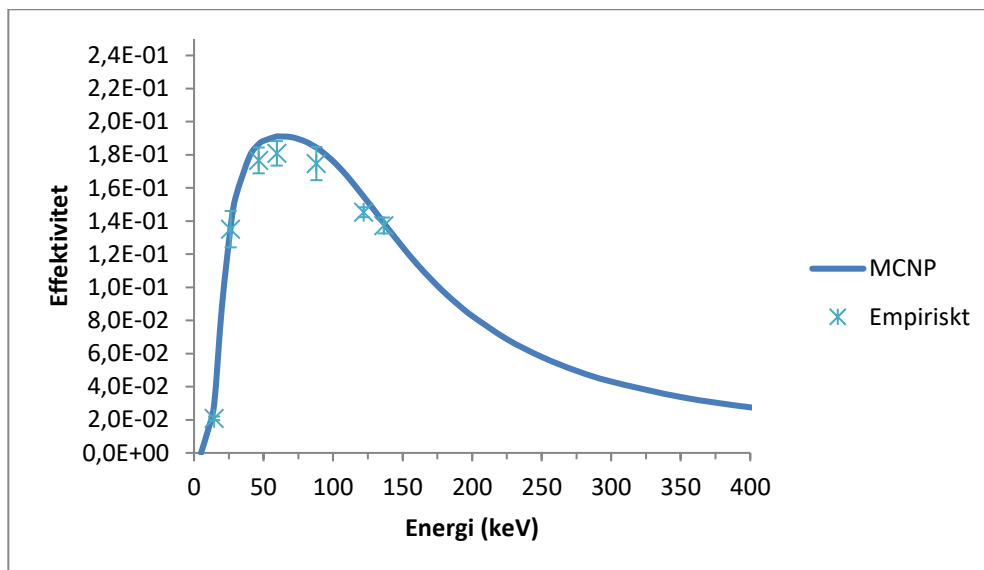
Korrigeringar har gjorts genom att kristallens dödlager ändrats, d.v.s. delar av kristallen där laddningsinsamlingen fungerar dåligt och således påverkar effektiviteten negativt. Tidigare undersökningar har visat att dödlagret ibland kan vara ett par mm tjockt. En bra sammanställning har gjorts av [Boson *et al.* 2008]. Dödlagret påverkas bland annat av om detektorn har varit varm/rumstempererad längre perioder och om laddningsuppsamlingen är ofullständig, vilket bland annat beror på hur det elektriska fältet ser ut inuti kristallen [Budjáš *et al.* 2009]. Figur 9 visar två olika varianter på hur det elektriska fältet kan se ut. I planära detektorer går det elektriska fältet inuti kristallen enligt 1), vilket skapar en sämre laddningsinsamling på sidorna av kristallen. I kristallen som har använts går det elektriska fältet enligt 2), vilket skapar en sämre insamling på den bakre delen av kristallen. Det inre dödlagret runt kopparstaven har ökat till 0,2 mm på sidorna. Ett dödlager på 0,7 mm har lagts till i den nedre/bakre delen av kristallen.

Med korrigeringarna stämmer effektiviteten överens inom 5 % för energier mellan 46,5-122,1 keV vid alla vinklar utom 80 och 90 °. Vid infallsvinkel 90 ° är effektiviteten inte mätbar för energier upp till 46,5 keV och väldigt låg för övriga energier.



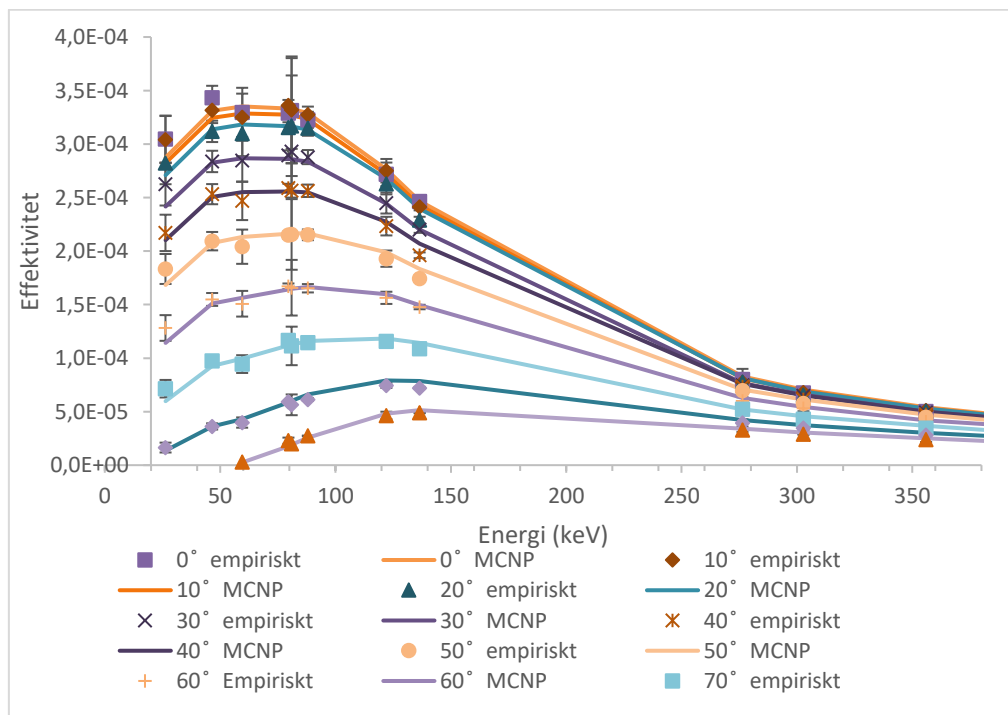
Figur 9. Två varianter på hur det elektriska fältet kan se ut inuti kristallen. 1) Fältet inuti planära detektorer. 2) Fältet inuti coaxiala detektorer, och även detektorn som använts i den här studien som är en coaxial semi-planar detektor.

Figur 10 visar en jämförelse mellan effektiviteten beräknad med den slutgiltiga detektormodellen och den empiriska effektiviteten med en kalibreringslösning direkt på detektorns fönster. Skillnaden mellan empirisk och simulerad effektivitet är 1-6 %.



Figur 10. Effektivitet beräknad från empirisk mätning och från MCNP-simuleringar med detektormodellen, med kalibreringslösning direkt på detektorfönster.

När detektormodellens parametrar korrigerades för att stämma bra med vinkelmätningarna försämrades överensstämmelsen med mätningen med 5 ml-lösningen i närgeometri. Då syftet i studien är mätningar i närgeometri är det viktigaste att detektormodellen stämmer i just närgeometri. Mätningarna i vinklar från sidorna har dock betydelse vid exempelvis simuleringar för att bestämma detektorns synfält.



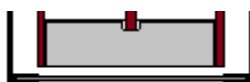
Figur 11. Effektivitet beräknad från empiriska mätningar och från MCNP-simuleringar med detektormodellen, med punktkällor i infallsvinklarna 0-90 °.

Figur 11 visar jämförelser mellan effektiviteter beräknade med den slutgiltiga detektormodellen och effektiviteter beräknade från empiriska mätningar med punktkällor i infallsvinklar 0-90 °. Mätupställningen gjordes så att när punktkällorna var i 90 ° vinkel var de i nivå med kristallens mittpunkt, se figur 2. Då kristallen är mycket tunn, hamnar punktkällan i vinkel 80 ° i synfältet för detektorns fönster. Det vill säga effektiviteten för de låga energierna i vinkel 80 påverkas väldigt mycket av detektorns främre dödlager, samt av

dödlagret på sidorna av kristallen. Det gjorde korrigeringar mer komplicerade, då effektiviteten vid låga energier i vinkel 80 ° påverkades mycket när effektiviteten vid låga energier i vinkel 0 förändrades. Effektiviteten i vinkel 90 ° var väldigt låg eller inte mätbar, vilket gjorde att sidodödlagret blev svårt att uppskatta. Då effektiviteten var låg resulterar en liten skillnad i effektivitet i en större procentuell avvikelse.

3.2 Verifiering

Figur 12 visar mätuppställningen med den kalibrerade ytkällan. Mätningen gjordes 1340 dagar efter referensdatum och mättiden var 88149 s. Korrektionsfaktorerna för de kända avvikelserna mellan empirisk effektivitet och den baserad på modellen var $k_{corrMC26,3}=0,9863$ vid 26,3 keV och $k_{corrMC59,5}=0,9462$ vid 59,5 keV. I tabell 7 nedan visas den beräknade effektiviteten från simuleringen med den slutgiltiga justerade detektormodellen samt nettoarean från den empiriska mätningen tillsammans med den beräknade aktiviteten vid referensdatum och hur mycket den avviker från aktiviteten på certifikatet. Aktiviteten utifrån certifikatet var $156,3 \pm 1,3$ Bq ($k=2$). Den beräknade aktiviteten stämmer överens, inom osäkerheterna, med aktiviteten på certifikatet.



Figur 12. Detektormodellen med ^{241}Am -ytkällan på aluminiumplattan.

Tabell 7. Beräknad effektivitet från simulering med slutgiltig detektormodell med ^{241}Am -ytkälla, nettoarean från empiriska mätningar, beräknad aktivitet vid referensdatum samt avvikelser från aktiviteten på certifikatet. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Energi (keV)	Effektivitet MCNP	Nettoarea	Beräknad aktivitet (Bq)	Avvikelse från certifikat (%)
26,3	0,0325198	11013 ± 479	170 ± 23	8,8
59,5	0,0415276	192117 ± 670	155 ± 7	-0,8

4 Slutsats

En GEM-S HPGe-detektor har karaktäriserats och kalibrerats för *in situ*-mätningar av lågenergetisk gammastrålning i närgeometri.

Effektiviteten, beräknad utifrån empiriska mätningar med en kalibreringslösning direkt på detektorns fönster, går från 0,0209 vid 14,4 keV, når ett maximum på 0,181 vid 59,5 keV och minskar till 0,137 vid 122,1 keV. Osäkerheten i effektiviteterna ligger mellan 2-8 % ($k=2$).

Effektiviteten, beräknad från empiriska mätningar med punktkällor i olika infallsvinklar, når ett maximum på $(3,43 \pm 0,11) \cdot 10^{-4}$ vid 46,5 keV vid 0°. Som förväntat fås en lägre effektivitet med högre infallsvinkel, på grund av att kristallen är tunn och på att partiklarna attenueras i det tjockare materialet, d.v.s. ytterhölje och hållare, som finns på sidorna av kristallen. Vid en infallsvinkel på 90° är effektiviteten inte mätbar för energier upp till 46,5 keV och mycket låg för högre energier.

Effektiviteten, beräknad med detektormodellen, stämmer inom 6 % med empiriska data med en kalibreringslösning direkt på detektorns fönster. Detektormodellen stämmer inom 5 % med effektiviteten beräknad från mätningarna med punktkällor för energier 46,5-122,1 keV vid infallsvinklar 0-70°.

Verifieringen gav en beräknad aktivitet på 155 ± 7 Bq vid 59,5 keV och 170 ± 23 Bq vid 26,3 keV ($k=2$), vilket båda stämmer, inom osäkerheterna, med aktiviteten på certifikatet som var $156,3 \pm 1,3$ Bq ($k=2$).

5 Referenser

- Aaltonen H., Klemola S., Ugletveit F., 1994. *Validation of a method for computer calculation of germanium detector efficiencies*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 339(1-2), 87-91.
- Beck H., DeCampo J., Gogolak C., 1972. *In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry*. USAEC HASL-258.
- Boson J., Ågren G., Johansson L., 2008. *A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 587, 304-314.
- Budjáš D., Heisel M., Maneschg W., Simgen H., 2009. *Optimisation of the MC-model of a p-type Ge spectrometer for the purpose of efficiency determination*. Appl. Radiat. Isot. 67, 706-710.
- Çelik N., Çevik U., Küçükömeroğlu B., 2012. *Virtual point detector for HPGe detectors for 26.6-1332 keV photon energies by experiment and Monte Carlo simulation*. J. Radioanal. Nucl. Chem. 292, 1229-1235.
- DDEP (Decay Data Evaluation Project), Laboratoire National Henri Becquerel, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Am-241_tables.pdf
- Finck R. R., 1992. *High resolution field gamma spectrometry and its application to problems in environmental radiology*. Ph. D. Thesis, Lund University.
- Gasparro J., Hult M., Johnston P. N., Tagziria H., 2008. *Monte Carlo modelling of germanium crystals that are tilted and have rounded front edges*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 594(2), 196-201.
- Hedman A., Bahar Gogani J., Granström M., Johansson L., Andersson J. S., Ramebäck H., 2015. *Characterization of HPGe detectors using Computed Tomography*. Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A 785, 21-25.
- Helmer R. G., Hardy J. C., Jacob V. E., Sanchez-Vega M., Nielson R. G., Nelson J., 2003. *The use of Monte Carlo calculations in the determination of a Ge detector efficiency curve*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 511(3), 360-381.
- ICRU Report 53, 1994. *Gamma-ray Spectrometry in the Environment*. International Commission on Radiation Units and Measurements.
- Johnston P. N., Hult M., Gasparro J., 2006. *Cascade summing effects in close geometry gamma-ray spectrometry*. Appl. Radiat. Isot. 64, 1323-1328.
- Keyser R.M., Hensley W.K., 2004. *Efficiency of germanium detectors as a function of energy and incident geometry: Comparison of measurements and calculations*. J. Radioanal. Nucl. Chem. 264 (1), 259-264.
- Lepy M. C., Altzitzoglou T., Arnold D., Bronson F., Capote Noy R., Décombaz M., De Corte F., Edelmaier R., Herrera Peraza E., Klemola S., Korun M., Kralik M., Neder H., Plagnard J., Pommé S., de Sanoit J., Sima O., Ugletveit F., Van Velzen L., Vidmar T., 2001. *Intercomparison of efficiency transfer software for gamma-ray spectrometry*. Appl. Radiat. Isot. 55(4), 493-503.
- McNamara A.L., Heijnis H., Fierro D., Reinhard M.I., 2012. *The determination of the efficiency of a Compton suppressed HPGe detector using Monte Carlo simulations*. J. Environ. Radioact. 106, 1-7.
- Nir-El Y., Lavi N., Ne'eman E., Brenner S., Haquin G., 1999. *In situ gamma-ray spectrometric measurement of uranium in phosphate soils*. J. Environ. Radioact. 45, 185-190.

Peyres V., García-Toraño E., 2007. *Efficiency calibration of an extended-range Ge detector by detailed Monte Carlo simulation*. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 580, 296-298.

Vidmar, T., Vodenik, B., Nečemer, M, 2010. *Efficiency transfer between extended sources*. Appl. Radiat. Isot., 68, 2352-2354.

Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH
Gieselweg 1
38110 Braunschweig
Tel +49 5307 932-0
Fax +49 5307 932-293

akkreditiert durch die / accredited by the

Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-K-15203-01-00

als Kalibrierlaboratorium im / as calibration laboratory in the

Deutschen Kalibrierdienst



Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

031659
D-K- 15203-01-00
2017-11

Strahler Nr. / Source number AJ-7066

Gegenstand Object	Reference Solution
Hersteller Manufacturer	Eckert & Ziegler Nuclitec GmbH
Typ Type	QCYB40
Strahler-Nr. Source number	AJ-7066
Auftraggeber Customer	FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Cementvägen 20 901 82 Umeå Sweden
Auftragsnummer Order No.	CO00170854
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	2
Datum der Kalibrierung Date of calibration	1 July 2017

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Datum
Date

Leiter des Kalibrierlaboratoriums
Head of the calibration laboratory

Bearbeiter
Person in charge

15 November 2017

Dr. Heid

Schohl

Reference Solution

Solution no. AJ-7066
 Drawing VZ-1719-002
 Batch 17/2
 Mass of solution (2.047 ± 0.001) g
 Volume of solution approximately 2 ml
 Density of solution approximately 1.02 g/cm³
 Chem./phys. form The nuclides are as nitrate in 0.5 M nitric acid. The solution contains 20 µg/ml lead, cadmium and cobalt.

Nuclide	Gamma-ray energy [MeV]	Activity concentration [Bq * g ⁻¹]	Emission rate per mass [s ⁻¹ * g ⁻¹]	Uncertainty* of the activity [%]
Lead-210	0.047	9.96E03	4.22E02	4
Americium-241	0.060	1.92E03	6.89E02	4
Cadmium-109	0.088	9.86E03	3.61E02	5
Cobalt-57	0.122	1.02E03	8.73E02	2

Reference date 1 July 2017 at 12:00 UTC
 Contamination test Wipe test according to ISO 9978.
 Wipe test passed on 14 November 2017
 Measuring method The activity of the source was determined by weighing out calibrated single and/or mixed nuclide solutions. After production the source was verified with a high purity germanium detector with multi-channel analyzer.
 Temperature during the weighing: 21 °C ± 5 °C
 Radioactive impurities none
 Remark ---
 * please see HI001
 End of Certificate



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
 Nationales Metrologieinstitut

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 15.11.2017, Kalibrierzeichen: PTB-6.11-2008-2151

Page 2 of calibration certificate of 15.11.2017, calibration mark: PTB-6.11-2008-2151

Gegenstand:

Object

Aktivitätsnormal

Activity standard

Typ:

Type

Punktförmiges Präparat

Point source

Kenn-Nummer:

Serial number

2008-2151

Radionuklid:

Radionuclide

Americium-241

Americium-241

Abdeckfolie:

Backing

Polyethylen, beidseitig $(21,3 \pm 1,8) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$

Polyethylene, $(21.3 \pm 1.8) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ on both sides

Kalibrierverfahren:

Method of calibration

Das Präparat wurde durch Aufbringen einer radioaktiven Lösung auf die Präparatunterlage mit Hilfe einer Pipette hergestellt. Die spezifische Aktivität der verwendeten Lösung wurde durch Messung der Photonenstrahlung mit einer 4π -Ionisationskammer bestimmt. Die 4π -Ionisationskammer ist eine Sekundärnormal-Messeinrichtung, kalibriert mit Aktivitätsnormalen der PTB. Die Aktivität des Präparates ergibt sich aus der spezifischen Aktivität und der Masse der aufgetragenen Lösung, die durch Wägung der Pipette vor und nach dem Aufbringen ermittelt wurde.

The source was prepared by dispensing a radioactive solution to the source backing by means of a pipette. The specific activity (activity divided by mass of solution) of the solution used was determined by measuring the photon radiation with a 4π ionization chamber. The 4π ionization chamber is a secondary-standard measuring system calibrated by means of activity standards of PTB. The activity of the source follows from the specific activity and the mass of the dispensed solution, which was determined by weighing the pipette prior to and after dispensing the solution.

Aktivität:

Activity

$A = (33,3 \pm 0,4) \text{ kBq}$

Bezugszeitpunkt:

Reference date

1. November 2017, 00:00 Uhr MEZ

00:00 CET on 1 November 2017





Seite 2 zum Kalibrierschein vom 15.11.2017, Kalibrierzeichen: PTB-6.11-2017-1400

Page 2 of calibration certificate of 15.11.2017, calibration mark: PTB-6.11-2017-1400

Gegenstand:

Object

Aktivitätsnormal

Activity standard

Typ:

Type

Punktförmiges Präparat

Point source

Kenn-Nummer:

Serial number

2017-1400

Radionuklid:

Radionuclide

Cadmium-109

Cadmium-109

Abdeckfolie:

Backing

Polyester, beidseitig ($2,20 \pm 0,07$) $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$

Polyester, (2.20 ± 0.07) $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ on both sides

Kalibrierverfahren:

Method of calibration

Das Präparat wurde durch Aufbringen einer radioaktiven Lösung auf die Präparatunterlage mit Hilfe einer Pipette hergestellt. Die spezifische Aktivität der verwendeten Lösung wurde durch Messung der Photonenstrahlung mit einer 4π -Ionisationskammer bestimmt. Die 4π -Ionisationskammer ist eine Sekundärnormal-Messeinrichtung, kalibriert mit Aktivitätsnormalen der PTB. Die Aktivität des Präparates ergibt sich aus der spezifischen Aktivität und der Masse der aufgetragenen Lösung, die durch Wägung der Pipette vor und nach dem Aufbringen ermittelt wurde.

The source was prepared by dispensing a radioactive solution to the source backing by means of a pipette. The specific activity (activity divided by mass of solution) of the used solution was determined by measuring the photon radiation with a 4π ionization chamber. The 4π ionization chamber is a secondary-standard measuring system calibrated by means of activity standards of PTB. The activity of the source follows from the specific activity and the mass of the dispensed solution, which was determined by weighing the pipette prior to and after dispensing the solution.

Aktivität:

Activity

$A = (87,5 \pm 1,5) \text{ kBq}$

Bezugszeitpunkt:

Reference date

1. November 2017, 00:00 Uhr MEZ

00:00 CET on 1 November 2017





Seite 2 zum Kalibrierschein vom 15.11.2017, Kalibrierzeichen: PTB-6.11-2017-1070
Page 2 of calibration certificate of 15.11.2017, calibration mark: PTB-6.11-2017-1070

Gegenstand:
Object

Aktivitätsnormal
Activity standard

Typ:
Type

Punktförmiges Präparat
Point source

Kenn-Nummer:
Serial number

2017-1070

Radionuklid:
Radionuclide

Cobalt-57
Cobalt-57

Abdeckfolie:
Backing

Polyester, beidseitig $(2,20 \pm 0,07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$
Polyester, $(2.20 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ on both sides

Kalibrierverfahren:
Method of calibration

Das Präparat wurde durch Aufbringen einer radioaktiven Lösung auf die Präparatunterlage mit Hilfe einer Pipette hergestellt. Die spezifische Aktivität der verwendeten Lösung wurde durch Messung der Photonenstrahlung mit einer 4π -Ionisationskammer bestimmt. Die 4π -Ionisationskammer ist eine Sekundärnormal-Messeinrichtung, kalibriert mit Aktivitätsnormalen der PTB. Die Aktivität des Präparates ergibt sich aus der spezifischen Aktivität und der Masse der aufgetragenen Lösung, die durch Wägung der Pipette vor und nach dem Aufbringen ermittelt wurde.

The source was prepared by dispensing a radioactive solution to the source backing by means of a pipette. The specific activity (activity divided by mass of solution) of the used solution was determined by measuring the photon radiation with a 4π ionization chamber. The 4π ionization chamber is a secondary-standard measuring system calibrated by means of activity standards of PTB. The activity of the source follows from the specific activity and the mass of the dispensed solution, which was determined by weighing the pipette prior to and after dispensing the solution.

Aktivität:
Activity

$A = (30,7 \pm 0,3) \text{ kBq}$

Bezugszeitpunkt:
Reference date

1. November 2017, 00:00 Uhr MEZ
00:00 CET on 1 November 2017





Seite 2 zum Kalibrierschein vom 23.11.2017, Kalibrierzeichen: PTB-6.11-2017-1597
Page 2 of calibration certificate of 23.11.2017, calibration mark: PTB-6.11-2017-1597

Gegenstand:
Object

Aktivitätsnormal
Activity standard

Typ:
Type

Punktförmiges Präparat
Point source

Kenn-Nummer:
Serial number

2017-1597

Radionuklid:
Radionuclide

Blei-210
Lead-210

Abdeckfolie:
Backing

Polyester, beidseitig $(2,20 \pm 0,07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$
Polyester, $(2.20 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ on both sides

Kalibrierverfahren:
Method of calibration

Das Präparat wurde durch Aufbringen einer radioaktiven Lösung auf die Präparatunterlage mit Hilfe einer Pipette hergestellt. Die spezifische Aktivität der verwendeten Lösung wurde mit Flüssigszintillations-Spektrometern nach der CIEMAT/NIST- und der Triple-to-Double Coincidence Ratio (TDCR) Methode bestimmt. Die Messverfahren wurden in Metrologia 44 (2007), S36-S52 beschrieben. Die Aktivität des Präparates ergibt sich aus der spezifischen Aktivität und der Masse der aufgetragenen Lösung, die durch Wägung der Pipette vor und nach dem Aufbringen ermittelt wurde.

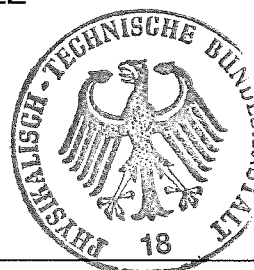
The source was prepared by dispensing a radioactive solution to the source backing by means of a pipette. The specific activity (activity divided by mass of solution) of the solution used was determined by means of liquid scintillation spectrometers by the CIEMAT/NIST- and the Triple-to-Double Coincidence Ratio (TDCR) method. The measurement procedures were described in Metrologia 44 (2007), S36-S52. The activity of the source follows from the specific activity and the mass of the dispensed solution, which was determined by weighing the pipette prior to and after dispensing the solution.

Aktivität:
Activity

$A = (20,7 \pm 0,5) \text{ kBq}$

Bezugszeitpunkt:
Reference date

1. November 2017, 00:00 Uhr MEZ
00:00 CET on 1 November 2017





Kalibrierschein

Calibration Certificate

Gegenstand: <i>Object:</i>	Aktivitätsnormal <i>Activity standard</i>
Hersteller: <i>Manufacturer:</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt Fachbereich 6.1
Typ: <i>Type:</i>	Punktförmiges Präparat <i>Point source</i>
Kenn-Nummer: <i>Serial No.:</i>	2014-1297
Auftraggeber: <i>Applicant:</i>	FOI Swedish Defence Research Agency Cementvägen 20 90182 UMEÅ Sweden
Anzahl der Seiten: <i>Number of pages:</i>	5
Geschäftszeichen: <i>Reference No.:</i>	PTB-6.11-272/10.2014
Kalibrierzeichen: <i>Calibration mark:</i>	PTB-6.11-2014-1297
Datum der Kalibrierung: <i>Date of calibration:</i>	26.05.2014

Im Auftrag
On behalf of PTB

Braunschweig, 26.05.2014

Im Auftrag
On behalf of PTB



Dr. K. Kossert

Siegel
Seal



M. Ehlers

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.
Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

Gegenstand:
Object

Aktivitätsnormal
Activity standard

Typ:
Type

Punktförmiges Präparat
Point source

Kenn-Nummer:
Serial number

2014-1297

Radionuklid:
Radionuclide

Barium-133
Barium-133

Abdeckfolie:
Backing

Polyester, beidseitig $(2,20 \pm 0,07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$
Polyester, $(2.20 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ on both sides

Kalibrierverfahren:
Method of calibration

Das Präparat wurde durch Aufbringen einer radioaktiven Lösung auf die Präparatunterlage mit Hilfe einer Pipette hergestellt. Die spezifische Aktivität der verwendeten Lösung wurde durch Messung der Photonenstrahlung mit einer 4π -Ionisationskammer bestimmt. Die 4π -Ionisationskammer ist eine Sekundärnormal-Messeinrichtung, kalibriert mit Aktivitätsnormalen der PTB. Die Aktivität des Präparates ergibt sich aus der spezifischen Aktivität und der Masse der aufgetragenen Lösung, die durch Wägung der Pipette vor und nach dem Aufbringen ermittelt wurde.

The source was prepared by dispensing a radioactive solution to the source backing by means of a pipette. The specific activity (activity divided by mass of solution) of the used solution was determined by measuring the photon radiation with a 4π ionization chamber. The 4π ionization chamber is a secondary-standard measuring system calibrated by means of activity standards of PTB. The activity of the source follows from the specific activity and the mass of the dispensed solution, which was determined by weighing the pipette prior to and after dispensing the solution.

Aktivität:
Activity

$A = (371 \pm 4) \text{ kBq}$

Bezugszeitpunkt:
Reference date

1. Mai 2014, 00:00 Uhr MEZ
00:00 CET on 1 May 2014



Radioaktive Verunreinigungen: *Radioactive impurities*

Die zur Herstellung des Präparats benutzte Lösung wurde mit einem kalibrierten Halbleiterspektrometer auf gammastrahlende radioaktive Verunreinigungen geprüft. Dabei wurde Co-60 mit folgendem Aktivitätsanteil nachgewiesen:

$$A(\text{Co-60})/A(\text{Ba-133}) = (5,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-6}$$

am Bezugszeitpunkt.

Die oben angegebene Aktivität bezieht sich allein auf Ba-133.

The solution used for the preparation of the source was checked for gamma-emitting radioactive impurities using a calibrated semiconductor spectrometer. The following activity portion of Co-60 was detected:

$$A(\text{Co-60})/A(\text{Ba-133}) = (5.8 \pm 1.4) \cdot 10^{-6}$$

on the reference date.

The activity stated above refers to Ba-133 only.

Messunsicherheit: *Uncertainty of measurement*

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt dann im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Überdeckungsintervall.

The uncertainty stated is the expanded measurement uncertainty obtained by multiplying the standard measurement uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)". The value of the measurand then normally lies, with a probability of approximately 95 %, within the attributed coverage interval.



ISO-Klassifikation:
ISO classification

ISO/12/C11111 gemäß DIN 25426-1 und ISO 2919.
ISO/12/C11111 in compliance with DIN 25426-1 and ISO 2919.

Dichtheitsprüfung
Leakage test

ausgeführt am:
Date of test

26. Mai 2014
26 May 2014

Prüfverfahren:
Method of test

Wischprüfung gemäß DIN 25426-3.
Wipe test in compliance with DIN 25426-3.

Ergebnis:
Result of test

Die Aktivität der Wischprobe war zum Zeitpunkt der Probenahme kleiner als 4 Bq.

The activity of the wipe sample was less than 4 Bq at the time of sampling.

Die Umhüllung des Präparates ist dicht und kontaminationsfrei.

The cover of the source is leakproof and free of radioactive contamination.



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das nationale Metrologieinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen. Die PTB gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Die Kalibrierscheine der PTB dokumentieren eine auf nationale Normale rückgeführte Kalibrierung.

Dieser Ergebnisbericht ist in Übereinstimmung mit den Kalibrier- und Messmöglichkeiten (CMCs), wie sie im Anhang C des gegenseitigen Abkommens (MRA) des Internationalen Komitees für Maße und Gewichte enthalten sind. Im Rahmen des MRA wird die Gültigkeit der Ergebnisberichte von allen teilnehmenden Instituten für die im Anhang C spezifizierten Messgrößen, Messbereiche und Messunsicherheiten gegenseitig anerkannt (nähere Informationen unter <http://www.bipm.org>).



The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig and Berlin is the National Metrology Institute and the supreme technical authority of the Federal Republic of Germany for metrology. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Energy. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in DIN EN ISO/IEC 17025.

The central task of PTB is to realize, to maintain and to disseminate the legal units in compliance with the International System of Units (SI). PTB thus is at the top of the metrological hierarchy in Germany. The calibration certificates issued by PTB document a calibration traceable to national measurement standards.

This certificate is consistent with the Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) that are included in Appendix C of the Mutual Recognition Arrangement (MRA) drawn up by the International Committee for Weights and Measures (CIPM). Under the MRA, all participating institutes recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details, see <http://www.bipm.org>).

Empfohlene Radionukliddaten

Stand: 01.01.2005

Radionuklid: Ba-133

Halbwertszeit: $T_{1/2} = 3848(6)$ Tage [10,535(17) Jahre]

Photonen-Energien E und –Emissionswahrscheinlichkeiten p :

Strahlungs- typ	E in keV	p	Kommentar
Cs-L	4,53	0,145(13)	
Cs-K $_{\alpha_2}$	30,63	0,346(10)	
Cs-K $_{\alpha_1}$	30,97	0,634(18)	
Cs-K $_{\beta_1}$	35,0	0,187(5)	
Cs-K $_{\beta_2}$	35,8	0,0431(14)	
γ	53,16	0,02199(22)	
γ	79,62	0,0262(6)	
γ	81,00	0,3406(27)	
γ	160,61	0,00645(8)	
γ	223,25	0,00450(4)	
γ	276,40	0,07164(22)	
γ	302,85	0,1833(6)	
γ	356,02	0,6205(19)	
γ	383,85	0,0894(3)	

Messunsicherheiten:

Die Ziffern in Klammern hinter dem Zahlenwert einer Messgröße geben die Messunsicherheit in der(n) letzten Stelle(n) des Zahlenwertes an. Die Messunsicherheiten entsprechen der einfachen Standardabweichung.

Literatur:

Schötzig, U. und Schrader, H.:

Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden, 5. erweiterte und korrigierte Auflage; PTB-Bericht PTB-Ra-16/5, Braunschweig, Mai 2000, ISBN 3-89701-279-0

ACTIVITY STANDARD

POINT SOURCE WITH LOW-ENERGY PHOTON RADIATION

Description, information

The present activity standard – a point source with low-energy photon radiation – is provided for the calibration of measuring devices employing semiconductor detectors down to about 5 keV.

When the source was produced, as small a degree of absorption and scattering of the radiation as possible was provided for. The radioactive substance is a very thin layer on a circular area less than 5 mm in diameter in the middle between two circular polyester foils with a mass per unit area of $(2,20 \pm 0,07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ each. Heating under pressure serves to tightly weld the two foils over their whole area.

As the mechanical stress building up during normal use is small, the source can be considered to be a sealed radioactive substance within the meaning of the German Radiation Protection Ordinance. It must, however, be ensured that it is not exposed to strong solvents or temperatures higher than 100°C. Prior to delivery, the sources are subjected to a wipe test to make sure that they are tight and free from contamination; they will be released only if the activity of the wipe sample does not exceed 20 Bq.

The activity A stated in the certificate was determined either from the mass and the specific activity of the dispensed radioactive solution or from comparison with a similar activity standard using a suitable secondary measuring device.

The emission rate B for photons, i.e. the number of photons produced per unit time is obtained from $B = p \cdot A$, p being the photon emission probability.

Part of the low-energy photons emitted are absorbed or scattered when passing through the radioactive substance and the source foils. The smaller the energy, the greater absorption and scattering. The photon flux ϕ , i.e. the number of photons emerging per unit time from the source thus is smaller than the emission rate and dependent on the direction of transmission. In the direction vertical to the source area, the influence of the radioactive substance and the source foils is smallest and can be estimated.

For activity standards of the nuclides Cr-51, Mn-54, Fe-55, Co-57, Zn-65, Sr-85 and Nb-93m, the characteristics stated for the sources are not only the activity but also the photon flux density (fluence rate) $d\phi/d\Omega$ of the KX-radiation emerging at a small solid angle vertical to the source area. The two quantities are linked with each other and with B according to

$$A = \frac{B}{\rho} = 4\pi \cdot K_S \cdot K_F \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (1)$$

the factors K_S and K_F taking into account the attenuation of the radiation in the radioactive substance and foil, respectively, and ρ being the emission probability of KX-radiation.

For a given mass per unit area the correction factors for the attenuation in the foil can be calculated with the aid of the mass attenuation coefficients [1]. In the energy range $4 \text{ keV} \leq E \leq 14 \text{ keV}$, the correction factor K_F for radiation emerging vertical to the source area can be taken from the figure. Moreover, the table states the correction factors for some selected radionuclides and energies.

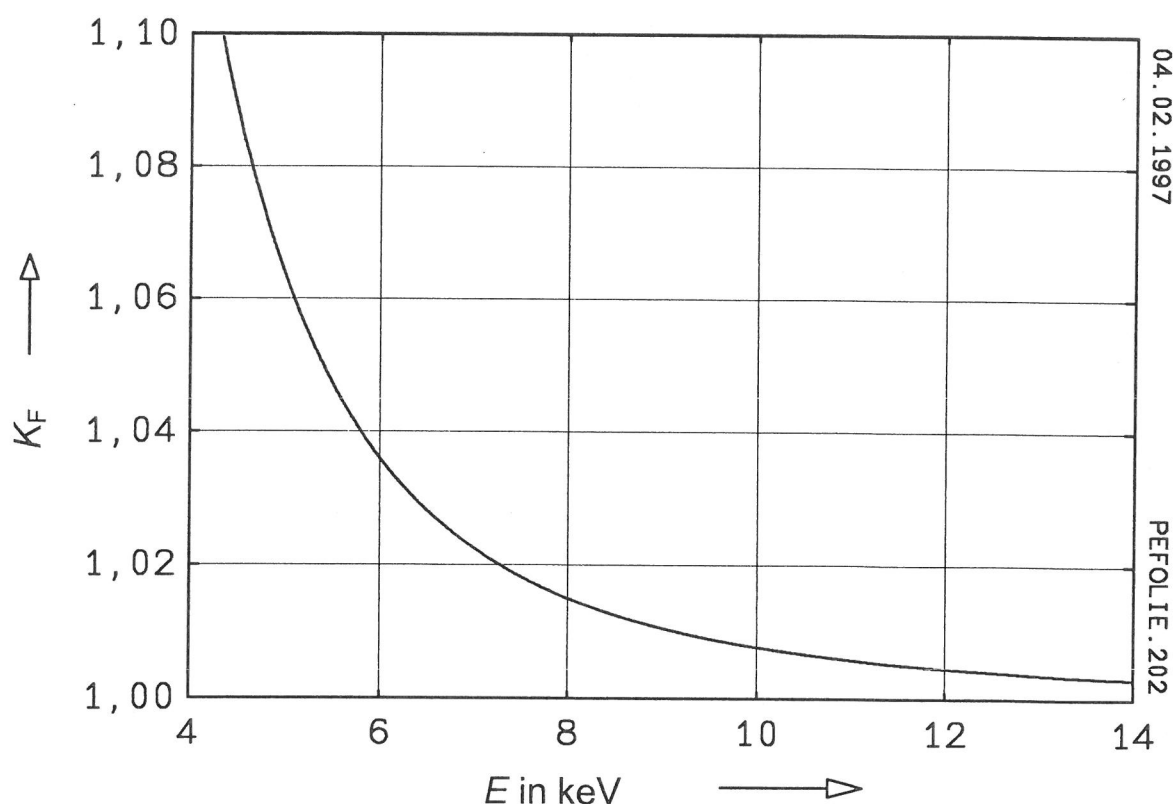


Figure: Correction factor K_F for attenuation of the radiation in the foil, calculated for photon radiation emerging vertical to a polyester foil with a surface mass density of $(2,20 \pm 0,07) \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, as a function of photon energy E . The mass attenuation coefficients were taken from [1].

Table: Correction factors K_F for attenuation of the radiation in the foil

Radio-nuclide	Type of radiation	Energy in keV	K_F
Cr-51	V- K_α	4,95	1,065
	V- K_β	5,43	1,049
Mn-54	Cr- K_α	5,41	1,050
	Cr- K_β	5,95	1,037
Fe-55	Mn- K_α	5,89	1,038
	Mn- K_β	6,49	1,028
Co-57	Fe- K_α	6,40	1,030
	Fe- K_β	7,06	1,022
Zn-65	Cu- K_α	8,04	1,015
	Cu- K_β	8,91	1,011
Sr-85	Rb- K_α	13,37	1,003
	Rb- K_β	15,0	1,003
Nb-93m	Nb- K_α	16,58	1,002
	Nb- K_β	18,7	<1,002
		17,0	<1,002
		24,0	<1,001

The correction factors for the attenuation in the radioactive substance are hard to estimate. As a result of comparisons between sources of the kind described and sources without attenuation [2], it can be assumed that in the fabrication processes applied, K_S for the X-radiation lies between 1,00 and 1,02.

The data sheet annexed compiles the emission probabilities for the practice-relevant photons of the respective nuclide. They were either measured at the PTB or evaluated from published data or taken from the most recent data works [3].

Important remark

The durability of this source is limited. Experience has shown that Am-241 sources (alpha emitters) with activities greater than 50 kBq are concerned in particular. After about six months the film has embrittled in the area of the radioactive substance; if not handled appropriately, this part may even drop out. It should therefore always be checked by visual inspection – chiefly during use - whether the source is still intact.

Literatur

- [1] P. D. Higgins, F. H. Attix, J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, M. J. Berger, C. H. Sibata; *Mass Energy-Transfer and Mass Energy-Absorption Coefficients, Including In-Flight Positron Annihilation for Photon Energies 1 keV to 100 MeV*. National Institute of Standards and Technology, NISTIR 4812, Gaithersburg, USA, 1992

Cf. also:

J. H. Hubbell; *Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV*. Int. J. Appl. Radiat. Isot. 33(1982)1269-1290

E. B. Saloman, J. H. Hubbell and J. H. Scofield; *X-Ray Attenuation Cross Sections for Energies 100 eV to 100 keV and Elements $Z = 1$ to $Z = 92$* . Atomic Data and Nuclear Data Tables 38(1988)1-197

- [2] K. Debertin, J. C. Furnari and K. F. Walz; *Standard Sources for the Efficiency Calibration of Photon Detectors in the Energy Range from 5 to 40 keV*. Int. J. Appl. Radiat. Isot. 36(1985)977-980
- [3] U. Schötzig und H. Schrader; *Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden*. PTB-Bericht, PTB-RA-16/5, Braunschweig, May 2000



Czech Metrology Institute

Okružní 31, 638 00 Brno

Phone: +420 545 555 111, Fax: +420 545 222 728, www.cmi.cz

Bilaga 3, FOI-R--4729--SE

Workplace: Regional Branch Prague, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10, Czech Republic
Ionizing Radiation Building, Radiová 1288/1a
Phone: +420 266 020 497, Fax: +420 266 020 466

CERTIFICATE

Certificate No.: 1035 - SE - 40730-14 Type: EZ 2 Serial No.: 200314-1132068
Radionuclide: Am-241 Half life: 157800 days
Activity: 156,3 Bq Square activity: 0,947 Bq/cm²
Surface emission: 77,30 /s
Active area: 165 cm² Reference date: 1.11.2014
Number of active points: 8526 Square weight of protective layer: < 0,1 mg/cm²
Radionuclide impurities: gamma < 0,1 %
Combined standard uncertainty of activity: 0,4 %
Combined standard uncertainty of surface emission: 0,8 %

Description:

Radioactive solution is uniformly dropped on duraluminium plate. After evaporation surface of the standard is coated by layer of protective lacquer and conductive layer of aluminium deposited in vacuum.

Dimensions: 200 x 140 x 1,5 mm (length x width x thickness), active area 150 x 110 mm.

Measuring method:

The activity is calculated from specific activity and mass of the standard solution, surface emission rate is measured with windowless proportional counter.

Note:

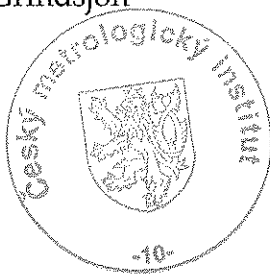
Don't touch active surface, protect it against dust, abrasion and corrosive atmosphere.

Date of the certificate issue: 10.10.2014

Certificate validity: 5 years

Customer:

Swedish Defence Research Agency Grindsjon
Olof Arrhenius vag 31
137 94 Norra Sorunda
SWEDEN



Ing. Jiří Šuráň, MBA
Deputy Director of RB Prague

Control: Ing. Vlasta Zdychová

Appendix

Uncertainty of declared quantity is processed in accordance with recommendation ISO 1993 „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“.

Uncertainty of the result, described by a combined standard uncertainty on confidence level $P = 68,3 \%$, is expressed as a square root of the sum of the second power of type A and type B standard uncertainties.

Type A standard uncertainty is experimental standard deviation of the mean $s_{\bar{x}}$ of a set of values of measured quantity influencing immediately to the activity (number of counts, ionizing current etc.)

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

n - number of repeated measurements

x_i – measured values

$\bar{x}$ - average of measured values

Type B standard uncertainty is usually determined by methods another than statistical ones. It is evaluated as a square root of sum of second power of standard uncertainties of quantity values which influence results of measurements, e.g. uncertainties of half-live, weight, dead time of the device, geometrical factor, higher standard etc. Standard uncertainties are in the most cases determined by a qualified estimation (for instance on a basic of a long time observation, from a description of used measuring devices etc.).

Bilaga 4 - Empiriska effektiviteter för olika energier och infallsvinklar

Tabell 4.1. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 0 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	20512	9304 ± 121	$(2,12 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	26,3	110933	25980 ± 229	$(3,05 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
²¹⁰ Pb	46,5	169056	50886 ± 312	$(3,43 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	53,2	1849	4158 ± 74	$(3,38 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	59,5	110933	437039 ± 693	$(3,30 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	79,6	1849	4969 ± 85	$(3,29 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	1849	63376 ± 256	$(3,31 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	159925	152957 ± 517	$(3,23 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	20512	111218 ± 355	$(2,72 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	20512	12642 ± 163	$(2,47 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	1849	3283 ± 61	$(8,02 \pm 0,17) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	1849	7112 ± 87	$(6,76 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	1849	17889 ± 135	$(5,02 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	1849	2334 ± 51	$(4,55 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.2. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 10 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	189394	86548 ± 372	$(2,10 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	26,3	189394	44300 ± 305	$(3,04 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
²¹⁰ Pb	46,5	87907	25559 ± 223	$(3,32 \pm 0,09) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	53,2	2007	4443 ± 77	$(3,33 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	59,5	189394	736161 ± 901	$(3,25 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	79,6	2007	5512 ± 88	$(3,36 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	2007	68904 ± 267	$(3,32 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	87907	86402 ± 384	$(3,28 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	189394	1057628 ± 1096	$(2,75 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	189394	116197 ± 495	$(2,41 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	2007	3436 ± 63	$(7,73 \pm 0,16) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	2007	7739 ± 90	$(6,78 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	2007	19771 ± 142	$(5,11 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	2007	2429 ± 52	$(4,48 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.3. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 20 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	183726	75571 ± 363	$(1,99 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	26,3	183726	39898 ± 295	$(2,82 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
²¹⁰ Pb	46,5	241070	65866 ± 363	$(3,12 \pm 0,08) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	53,2	2178	4665 ± 80	$(3,22 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	59,5	183726	680272 ± 868	$(3,10 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	79,6	2178	5614 ± 90	$(3,16 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	2178	71459 ± 272	$(3,17 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	241070	224004 ± 624	$(3,15 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	183726	929937 ± 1033	$(2,63 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	183726	101434 ± 473	$(2,29 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	2178	3748 ± 66	$(7,77 \pm 0,16) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	2178	8113 ± 93	$(6,55 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	2178	21147 ± 147	$(5,04 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	2178	2598 ± 54	$(4,30 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.4. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 30 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	61865	22192 ± 202	$(1,75 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	26,3	61865	12489 ± 169	$(2,63 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
²¹⁰ Pb	46,5	87329	21683 ± 214	$(2,84 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	53,2	2005	3776 ± 73	$(2,83 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	59,5	61865	210544 ± 485	$(2,85 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	79,6	2005	4742 ± 83	$(2,90 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	2005	60771 ± 251	$(2,93 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	87329	72633 ± 366	$(2,88 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	61865	289991 ± 579	$(2,45 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	61865	32644 ± 273	$(2,20 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	2005	3325 ± 62	$(7,49 \pm 0,16) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	2005	7411 ± 89	$(6,50 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	2005	19078 ± 139	$(4,94 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	2005	2388 ± 51	$(4,29 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.5. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 40 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	67762	20504 ± 203	$(1,47 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	26,3	67762	11305 ± 169	$(2,17 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
²¹⁰ Pb	46,5	96863	21458 ± 222	$(2,53 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	53,2	2003	3365 ± 70	$(2,53 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	59,5	67762	200071 ± 476	$(2,47 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	79,6	2003	4235 ± 80	$(2,59 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	2003	53152 ± 235	$(2,57 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	96863	71638 ± 374	$(2,56 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	67762	289129 ± 583	$(2,23 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	67762	31796 ± 277	$(1,96 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	2003	3264 ± 66	$(7,36 \pm 0,17) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	2003	7014 ± 86	$(6,16 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	2003	18322 ± 137	$(4,75 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	2003	2339 ± 51	$(4,21 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.6. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 50 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	79234	17962 ± 205	$(1,11 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	26,3	79234	11166 ± 179	$(1,83 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
²¹⁰ Pb	46,5	72832	13320 ± 182	$(2,09 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	53,2	2102	2988 ± 67	$(2,14 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	59,5	79234	193333 ± 473	$(2,04 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	79,6	2102	3689 ± 77	$(2,15 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	2102	46869 ± 222	$(2,16 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	72832	44219 ± 307	$(2,15 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	79234	291459 ± 593	$(1,93 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	79234	32996 ± 295	$(1,74 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	2102	3238 ± 62	$(6,96 \pm 0,15) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	2102	6894 ± 86	$(5,77 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	2102	18186 ± 136	$(4,49 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	2102	2241 ± 50	$(3,84 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.7. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 60 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	37252	5197 ± 128	$(6,83 \pm 0,18) \cdot 10^{-5}$
²⁴¹ Am	26,3	37252	3671 ± 115	$(1,28 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
²¹⁰ Pb	46,5	159367	21552 ± 256	$(1,55 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	53,2	2006	1953 ± 57	$(1,46 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
²⁴¹ Am	59,5	37252	67165 ± 286	$(1,51 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	79,6	2006	2739 ± 69	$(1,67 \pm 0,05) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	2006	34408 ± 191	$(1,66 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	159367	73745 ± 427	$(1,65 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	37252	110764 ± 372	$(1,56 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	37252	13114 ± 195	$(1,48 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	2006	2675 ± 57	$(6,02 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	2006	6065 ± 81	$(5,32 \pm 0,09) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	2006	15684 ± 127	$(4,06 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	2006	2009 ± 48	$(3,61 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.8. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 70 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	52717	3158 ± 137	$(2,94 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$
²⁴¹ Am	26,3	52717	2895 ± 131	$(7,14 \pm 0,33) \cdot 10^{-5}$
²¹⁰ Pb	46,5	179929	15324 ± 255	$(9,75 \pm 0,29) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	53,2	2019	1231 ± 43	$(9,17 \pm 0,34) \cdot 10^{-5}$
²⁴¹ Am	59,5	52717	59519 ± 282	$(9,44 \pm 0,12) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	79,6	2019	1924 ± 52	$(1,17 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	81,0	2019	23272 ± 155	$(1,11 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	179929	57465 ± 424	$(1,14 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122,1	52717	115900 ± 394	$(1,16 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136,5	52717	13662 ± 219	$(1,09 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
¹³³ Ba	276,4	2019	2340 ± 50	$(5,23 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	2019	4940 ± 72	$(4,30 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	2019	13461 ± 117	$(3,46 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	2019	1722 ± 42	$(3,07 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.9. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 80 grader. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
⁵⁷ Co	14,4	82109	580 ± 163	$(3,47 \pm 0,98) \cdot 10^{-6}$
²⁴¹ Am	26,3	82109	922 ± 141	$(1,46 \pm 0,22) \cdot 10^{-5}$
²¹⁰ Pb	46,5	227334	7184 ± 264	$(3,62 \pm 0,16) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	53,2	4350	1095 ± 62	$(3,79 \pm 0,22) \cdot 10^{-5}$
²⁴¹ Am	59,5	82109	35275 ± 258	$(3,59 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	79,6	4350	2103 ± 79	$(5,92 \pm 0,23) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	81,0	4350	25374 ± 172	$(5,64 \pm 0,07) \cdot 10^{-5}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	227334	38710 ± 446	$(6,14 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$
⁵⁷ Co	122,1	82109	116115 ± 421	$(7,46 \pm 0,08) \cdot 10^{-5}$
⁵⁷ Co	136,5	82109	14072 ± 259	$(7,21 \pm 0,15) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	276,4	4350	3801 ± 71	$(3,95 \pm 0,09) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	4350	8575 ± 98	$(3,47 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	4350	23623 ± 156	$(2,82 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	4350	3121 ± 60	$(2,58 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$

Tabell 4.10. Empiriska effektiviteter för olika energier med infallsvinkel 90 grader. Ej mätbar för energi 14,4 – 53,2 keV. Osäkerheten har angivits med en täckningsfaktor $k=2$, vilket motsvarar ett ungefärligt konfidensintervall på 95 %.

Nuklid	Energi (keV)	Mättid	Netarea	Effektivitet
²⁴¹ Am	59,5	201668	7385 ± 298	$(3,06 \pm 0,13) \cdot 10^{-6}$
¹³³ Ba	79,6	69383	12952 ± 276	$(2,29 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	81,0	69383	142965 ± 454	$(1,99 \pm 0,02) \cdot 10^{-5}$
¹⁰⁹ Cd	88,0	168921	12823 ± 378	$(2,74 \pm 0,09) \cdot 10^{-5}$
⁵⁷ Co	122,1	201668	175462 ± 571	$(4,65 \pm 0,05) \cdot 10^{-5}$
⁵⁷ Co	136,5	201668	23172 ± 396	$(4,90 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	276,4	69383	50565 ± 268	$(3,29 \pm 0,04) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	302,9	69383	114396 ± 362	$(2,90 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	356,0	69383	318774 ± 574	$(2,38 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$
¹³³ Ba	383,9	69383	41890 ± 223	$(2,17 \pm 0,03) \cdot 10^{-5}$

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se