



**FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY
UNIVERZITA KOMENSKÉHO
BRATISLAVA
KATEDRA JADROVEJ FYZIKY**

Modelovanie detekčnej účinnosti polovodičového HPGe
detektora metódou Monte Carlo.

Dizertačná práca.

Jaslovské Bohunice, 2003

RNDr. Tibor Rapant

OBSAH

ÚVOD.....	1
1. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	4
2. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	6
2.1. SYSTEM RADIACNEJ KONTROLY VÝPUSTÍ A OKOLIA JE JASLOVSKÉ BOHUNICE.....	6
2.2. POLOVODIČOVÉ DETEKTORY A GAMASPEKTROMETRIA.....	9
2.3. ÚČINNOSŤ DETEKČIE POLOVODIČOVÉHO DETEKTORA.....	13
2.3.1 <i>Experimentálne metódy</i>	13
2.3.2 <i>Poloempirické metódy</i>	15
2.3.3 <i>Výpočtové metódy Monte Carlo</i>	16
2.4. VPLYV SAMOABSORPCIE VO VZORKE NA ÚČINNOSŤ DETEKČIE.....	19
2.5. SUMAČNÉ EFEKTY PRI MERANÍ KASKÁDNYCH ŽIARIČOV.....	21
3. POUŽITÉ METÓDY RIEŠENIA.....	23
3.1. EXPERIMENTÁLNE ZARIADENIE.....	23
3.2. PRÍPRAVA MERACÍCH ETALÓNOV.....	27
3.3. EXPERIMENTÁLNE MERANIA.....	36
3.3.1 <i>Experimentálne merania etalónov z prvej skupiny</i>	37
3.3.2 <i>Experimentálne merania pripravených pracovných štandardov uvedených v druhej skupine</i>	37
3.4. MODELOVÉ VÝPOČTY.....	41
3.4.1 <i>Počítačový kód GEANT</i>	41
3.4.2 <i>Parametre modelových výpočtov</i>	42
4. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY, DISKUSIA.....	45
4.1. POROVNANIE EXPERIMENTÁLNE ZMERANÝCH A SIMULOVANÝCH SPEKTIER KALIBRAČNÝCH ETALÓNOV.....	45
4.1.1 <i>Grafické porovnanie</i>	46
4.1.2 <i>Numerické porovnanie</i>	48
4.2. SAMOABSORPČNÉ FAKTORY A ICH VYUŽITIE PRI KALIBRÁCII POLOVODIČOVÝCH DETEKTOROV.....	55
4.2.1 <i>Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od typu detektora, zloženia vzorky a energie fotónov</i>	56
4.2.2 <i>Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficientu zoslabenia</i>	61

4.2.3	<i>Využitie samoabsorpčných faktorov pri kalibrácii polovodičových detektorov.</i>	65
4.2.4	<i>Validácia kalibračnej metódy založenej na využití samoabsorpčných faktorov.</i>	68
ZÁVER.		75
ZOZNAM OBRÁZKOV V TEXTE DIZERTAČNEJ PRÁCE.		77
ZOZNAM TABULIEK V TEXTE DIZERTAČNEJ PRÁCE.		79
LITERATÚRA.		81
ABSTRAKT		85
POĎAKOVANIE		87
PRÍLOHY		89
	PRÍLOHA Č.1. TABUĽKY	91
	PRÍLOHA Č.2. SPEKTROMETRICKÉ LABORATÓRIUM ODDELENIA RADIAČNEJ OCHRANY ATÓMOVÝCH ELEKTRÁRNÍ JASLOVSKÉ BOHUNICE.	145
	PRÍLOHA Č.3. ROZPADOVÉ SCHÉMY POUŽITÝCH RÁDIONUKLIDOV.	147
	PRÍLOHA Č.4. REFERÁT - 25. DNI RADIAČNEJ OCHRANY, JÁCHYMOV 2002.	154
	PRÍLOHA Č.5. TEST MAAE - ZÁVEREČNÝ PROTOKOL.	159

ÚVOD.

Dejiny človeka, jeho poznávanie prírody a prírodných zákonov sú poznačené množstvom významných objavov. Medzi najvýraznejšie medzníky vedecko-technického pokroku možno zaradiť objav rádioaktivity. Rádioaktívne látky a žiarenie, ktoré vyžarujú, sú neoddeliteľnou súčasťou životného prostredia. Nachádzajú sa vo vzduchu i vo vode, sú súčasťou našej zeme a všetkých ďalších látok, ktoré nás obklopujú. Niektoré rádioaktívne prvky pochádzajú z obdobia vzniku slnečnej sústavy a Zeme (prírodné rozpadové rady a ostatné prírodné rádionuklidy), iné vznikajú pôsobením kozmického žiarenia na stabilné prvky (kozmogénne rádionuklidy) alebo vznikli pôsobením človeka (umelé tzv. antropogénne rádionuklidy) [kol.00].

V súčasnosti je táto fyzikálna vlastnosť niektorých prvkov využívaná v mnohých oblastiach vedeckého výskumu, energetiky, priemyslu, medicíny a pod. Okrem prirodzenej rádioaktivity sa prakticky do všetkých zložiek životného prostredia rozšírili umelé rádionuklidy, ktorých zdrojom sú skúšky jadrových zbraní, havárie (Černobyľ), malé úniky a kontrolované vypúšťanie z jadrových zariadení atď.

Prítomnosť rádioaktivity a žiarenia všade okolo nás, snaha o jej využitie a poznanie účinkov žiarenia na živé organizmy viedli k potrebe merať a monitorovať rádioaktivitu. S rastúcim významom rádioaktivity a jej využitia v praxi prebiehal vývoj stále novších a dokonalejších meracích prístrojov a rádioanalytických metód umožňujúcich určiť typ žiarenia, zistiť prítomnosť jednotlivých rádionuklidov, stanoviť hodnotu ich aktivity a pod.

Na území Slovenskej republiky je v súčasnosti prevádzkovaných šesť jadrových reaktorov (štyri v Jaslovských Bohuniciach a dva v Mochovciach) a jeden reaktor je v štádiu vyradovania a likvidácie (A-1 v Jaslovských Bohuniciach). Okrem hlavných výrobných blokov sú v areáloch obidvoch jadrových zariadení ďalšie objekty so zdrojmi ionizujúceho žiarenia – medzisklady vyhoreného paliva, úložiská nízkoaktívnych odpadov, bitumenačná linka a ďalšie zariadenia na skladovanie a spracovanie rádioaktívnych odpadov.

Napriek dôkladnému výskumu lokality a značnému počtu technických opatrení a bariér zaisťujúcich vysokú úroveň radiačnej ochrany sa počas normálnej prevádzky časť rádioaktívnych látok uvoľňuje alebo sa musí

kontrolovane vypúšťať do okolia jadrovej elektrárne. Rádioaktívne látky sa do životného prostredia dostávajú vo forme plyných exhalátov, aerosólov a vo forme nízkoaktívnych kvapalných výpustí do blízkeho vodného toku, čo sa však prejavuje iba nepatrným a ťažko merateľným zvýšením úrovne rádioaktivity v ich okolí [Sla87,Rap02]. Z tohoto dôvodu je prevádzkovateľ jadrového zariadenia nezávisle od ostatných organizácií povinný vykonávať radiačnú kontrolu okolia.

Radiačná kontrola okolia predstavuje súbor pravidelných meraní vzoriek prakticky všetkých zložiek životného prostredia, ktorých rozsah a kvalita sú stanovené v monitorovacom pláne schválenom dozornými orgánmi (Štátny zdravotný ústav a Úrad jadrového dozoru). V súčasnej dobe je v požiadavkách hygienických orgánov v oblasti radiačnej kontroly okolia kladený dôraz na stanovenie aktivity jednotlivých rádionuklidov vo vzorkách životného prostredia a vo výpustiach z jadrovej elektrárne [Pov01]. Požiadavka selektívnych meraní je úzko zviazaná s výrazným pokrokom vo vývoji a dostupnosti vysoko citlivých polovodičových detektorov. Výsledným efektom súčasných trendov je skutočnosť, že polovodičová gamaspektrometria objemových vzoriek sa stala jednou zo základných analytických metód v oblasti radiačnej kontroly životného prostredia [L'An98].

Ďalšia významná oblasť využitia gamaspektrometrických metód súvisí s rekonštrukciou a modernizáciou prevádzkovaných elektrární a likvidáciou odstavenej elektrárne v Jaslovských Bohuniciach. Modernizácia a likvidácia je spojená s rozsiahlymi stavebnými a technologickými úpravami, pri ktorých dochádza k produkcii značného množstva aktívnych a neaktívnych odpadov rôznorodého zloženia (stavebná suť, oleje a iné ropné látky, kaly a pod.). Nakladanie s týmito odpadmi závisí od výsledkov analýzy, ktorá pozostáva z merania dávkového príkonu a z gamaspektrometrickej analýzy odobratých vzoriek. Nakoľko výsledky uvedených analýz majú priamy vplyv na životné prostredie, sú na presnosť a spoľahlivosť gamaspektrometrických meracích prístrojov kladené vysoké nároky.

Polovodičová gamaspektrometria je relatívna meracia metóda, pri ktorej presnosť, spoľahlivosť a rýchlosť získania analytických výsledkov závisí od konkrétneho postupu stanovenia účinnosti detektora. Účinnosť detekcie pre píky úplnej absorpcie (tzv. píkova účinnosť) je pritom zložitou funkciou energie fotónov, geometrie merania, zloženia vzorky a viacerých parametrov použitého detektora a meranej vzorky. Metódy stanovenia detekčnej účinnosti môžeme rozdeliť do troch základných skupín :

- experimentálne metódy
- poloempirické metódy
- simulačné počítačové metódy (tzv. Monte Carlo metódy).

V oblasti monitorovania okolia jadrovoenergetických zariadení a pri analýzach vzoriek z prevádzky a likvidácie jadrovej elektrárne sú gamaspektrometricky merané vzorky veľmi rôznorodého zloženia, rôznej mernej hmotnosti, odlišného tvaru a objemu. Využitie experimentálnych metód sa v takom prípade stáva technicky, časovo a v neposlednej rade aj finančne veľmi náročné, predovšetkým z hľadiska prípravy vyhovujúcich vzorkopodobných objemových štandardov.

Pre využitie v reálnej praxi sú efektívnejšie poloempirické metódy, ktoré sú založené na kombinácii experimentálnych meraní pomocou štandardov a výpočtov pomocou vhodne zvoleného matematického modelu. Nevýhodou hlavne zjednodušených modelov je pomerne veľká nepresnosť výsledkov v oblasti nízkych energií fotónov a tiež pri veľkoobjemových vzorkách rôzneho tvaru. Uvedené nedostatky je však možné odstrániť použitím zložitejších matematických modelov [Sla91].

Vďaka výraznému pokroku vo vývoji výpočtovej techniky a zdokonaľovaniu dostupných softvérových nástrojov sú v súčasnej dobe stále častejšie využívané simulačné Monte Carlo metódy. Medzi programy, ktoré využívajú dnešnú úroveň znalosti procesov interakcie ionizujúceho žiarenia s hmotným prostredím, patrí aj počítačový kód GEANT. Tento program bol mnohonásobne použitý pri experimentoch v oblasti fyziky vysokých energií, ale tiež pri riešení niektorých problémov s gamaspektrometrickými systémami (napr. návrh tieniaceho krytu na základe simulácie pozadia polovodičového detektora [Voj94]).

Jedným zo stanovených cieľov tejto práce bolo zhodnotiť možnosť využitia programu GEANT na kalibráciu polovodičových detektorov a vypracovať kalibračný model pre veľkoobjemové vzorky založený na kombinácii experimentálnych a počítačových simulačných metód, ktorý by zjednodušil a zefektívnil polovodičovú gamaspektrometriu v oblasti radiačnej kontroly jadrovej elektrárne Jaslovské Bohunice.

1. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.

1. Zhodnotiť súčasný stav v problematike účinnostnej kalibrácie polovodičových detektorov, popísať výhody a nevýhody známych a dostupných metód a sformulovať požiadavky na kalibračnú metódu vhodnú pre veľkoobjemové vzorky odlišného zloženia.
2. Pomocou počítačového kódu GEANT vypracovať program na počítačovú simuláciu detekcie fotónov polovodičovým detektorom so záznamom detekovaného spektra a s možnosťou zmeny vstupných parametrov výpočtu (energia fotónov, rozmery a parametre detektora a meranej vzorky atď.).
3. Experimentálne zmerať spektrá kalibračných etalónov rôzneho tvaru a zloženia s rozdielnym zastúpením rádionuklidov na polovodičových detektoroch so známymi rozmermi a zložením polovodičového kryštálu a kryostatu. Počítačom nasimulovať zodpovedajúce spektrá s dodržaním rovnakých parametrov ako pri experimentálnych meraniach, porovnať experimentálne zmerané a počítačom simulované výsledky a zhodnotiť presnosť a vhodnosť Monte Carlo metód na priamu kalibráciu polovodičových detektorov.
4. Navrhnuť postup prípravy a pomocou kvapalného zmesného etalónu pripraviť pracovné etalóny rôzneho zloženia a mernej hmotnosti s vysokou homogenitou rozloženia aktivity rádionuklidov v etalóne a s dostatočným pokrytím energetického intervalu fotónov monitorovaných vo výpustiach z jadrovej elektrárne a vo vzorkách z okolitého životného prostredia (60 – 2000 keV). Pomocou pripravených pracovných etalónov získať súbor experimentálnych spektier vzoriek odlišného tvaru a objemu umiestnených v nádobách s rôznym zložením, zmeraných na niekoľkých polovodičových detektoroch rozdielných parametrov.

5. Počítačovým kódom GEANT nasimulovať spektrá zodpovedajúce experimentálne zmeraným spektrám so zachovaním všetkých parametrov experimentálnych meraní. Na základe výsledkov výpočtov zhodnotiť pre všetky geometrie merania vplyv samoabsorpcie vo vzorke na detekčnú účinnosť a zistiť závislosť samoabsorpčných faktorov od jednotlivých parametrov merania (energia fotónov, typ detektora, zloženie vzorky).
6. Na základe experimentálnych a počítačom simulovaných výsledkov navrhnúť a verifikovať metódu kalibrácie polovodičových detektorov pre meranie objemových vzoriek založenú na kombinácii jednoduchých experimentálnych meraní a počítačových simulácií metódou Monte Carlo.

2. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.

2.1. Systém radiačnej kontroly výpustí a okolia JE Jaslovské Bohunice.

Systémom radiačnej kontroly výpustí a okolia v jadrovej energetike sa označuje súbor zariadení, pracovných metodík a postupov a celková organizácia radiačnej kontroly pri všetkých prevádzkových režimoch zariadenia. Koncepcia radiačnej kontroly, jej hlavné zásady a požiadavky na rozsah kontroly sú formulované v medzinárodných doporučeníach [ICRP77,ICRP91] a na národnej úrovni sú zakotvené v príslušnej legislatíve [Zák94,Vyh00].

Výrazný pokrok vo vývoji vysoko citlivých gamaspektrometrických systémov a dostupnosť týchto prístrojov pre laboratória v jadrových zariadeniach spôsobili, že v súčasnosti je koncepcia radiačnej kontroly výpustí a okolia založená na monitorovaní aktivity jednotlivých rádionuklidov. Tento spôsob hodnotenia výpustí umožňuje pomocou vypracovaných počítačových modelov šírenia rádionuklidov v životnom prostredí a v potravinových reťazcoch človeka [Kus98] zhodnotiť radiačnú záťaž obyvateľstva v okolí jadrového zariadenia.

Z hľadiska účelu a využitia zariadení určených na monitorovanie výpustí môžeme tieto zariadenia rozdeliť na dve základné skupiny :

- zariadenia určené na on-line kontrolu rádioaktívnych výpustí – sú založené na meraní aktivity skupín rádionuklidov (celková beta alebo gama aktivita), nachádzajú sa v mieste vypúšťania (ventilačný komín, odpadové kanály) a výstup z monitorovania je privedený na kontrolnú miestnosť operatívneho personálu

- zariadenia určené na bilancovanie rádioaktívnych výpustí – sú založené na meraní aktivity jednotlivých rádionuklidov vo vzorkách z odberových zariadení (gama- a alfa-spektrometria, kvapalná scintilačná spektrometria), nachádzajú sa v spektrometrickom laboratóriu a namerané výsledky slúžia na stanovenie celkových výpustí porovnávaných so stanovenými limitami a zhodnotenie dávkovej záťaže obyvateľstva.

Spektrometrické laboratórium Oddelenia radiačnej ochrany v JE Jaslovské Bohunice disponuje napriek finančnej náročnosti najmodernejšími komerčne dostupnými spektrometrickými prístrojmi, ktorých parametre a vysoká citlivosť merania umožnili znížiť minimálne detekovateľné aktivity (MDA) rádionuklidov pod úroveň skutočných výpustí rádioaktívnych látok z JE, čo spôsobilo pokles výpustí niektorých rádioaktívnych látok o niekoľko rádov (MDA predchádzajúcich menej citlivých a málo selektívnych systémov v niektorých prípadoch niekoľkonásobne prevyšovala úroveň skutočných výpustí).

V rámci monitorovania výpustí sú v spektrometrickom laboratóriu merané nasledovné vzorky :

- kovové tlakové nádoby špeciálne upravené do tvaru Marinelliho geometrie používané na spektrometriu vzácných plynov
- aerosólové filtre rôzneho tvaru a objemu vyrobené z rôznych materiálov
- špeciálne kovové a plastové nádoby naplnené aktívnym uhlím na monitorovanie výpustí jódu
- kvapalné vzorky rôzneho objemu a vysušené odparky na monitorovanie kvapalných výpustí korózných a štiepných produktov.

Okrem monitorovania výpustí je spektrometrické laboratórium určené tiež na analýzu rôznych odpadov a materiálov vznikajúcich počas prevádzky jadrových zariadení v lokalite Jaslovské Bohunice. Predovšetkým počas generálnych opráv a rekonštrukcie a modernizácie hlavných výrobných blokov sú gamaspektrometrickej analýze podrobené nasledovné typy vzoriek :

- odpady vznikajúce pri stavebných rekonštrukčných prácach (betónová a stavebná suť, betónové kaly z rezania vodným lúčom, vzorky stavebných a izolačných materiálov a pod.)
- kaly rôzneho zloženia a mernej hmotnosti z technologických zariadení
- použité oleje z elektromotorov a čerpadiel a iné ropné a chemické látky
- kontaminované časti zariadení, pracovné náradie, časti odevu atď.

Na monitorovanie okolia lokality Jaslovské Bohunice sú v Trnave zriadené Laboratóriá radiačnej kontroly okolia. Zariadenie tvorí samostatný komplex rádiochemických a spektrometrických laboratórií s radiačným strediskom a ďalším zariadením. Prístrojové vybavenie laboratória spĺňa najvyššie nároky na spoľahlivosť a kvalitu a je systematicky modernizované, aby laboratórium mohlo samostatne plniť dva hlavné ciele :

- počas normálnej prevádzky nepretržite monitorovať určené zložky životného prostredia a potravinového reťazca v blízkom i širšom okolí Jaslovských Bohuníc
- pri mimoriadnej udalosti včas zistiť a zhodnotiť prípadný únik rádioaktívnych látok do okolia JE, stanoviť možnú dávkovú záťaž a stupeň nebezpečenstva ohrozenia obyvateľstva a navrhnúť bezpečnostné opatrenia vrátane evakuácie.

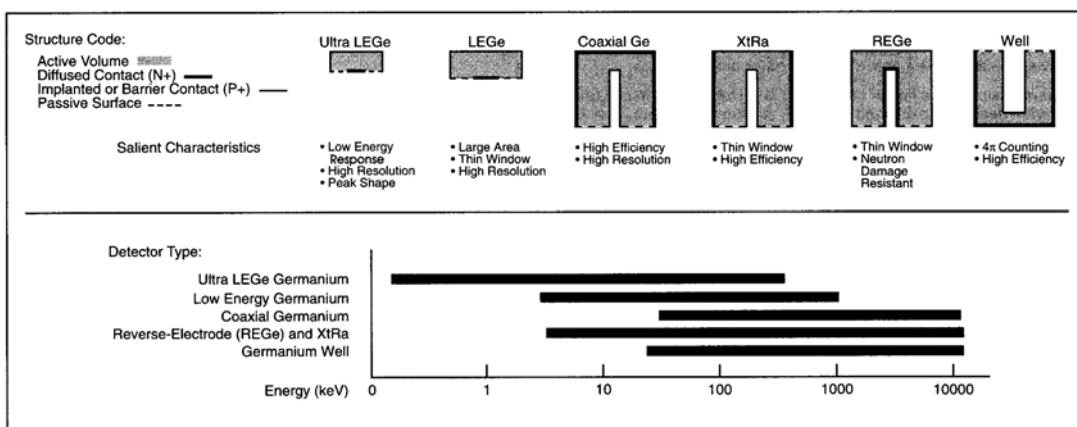
Medzi vykonávané analýzy a monitorované zložky životného prostredia patria – dávkový príkon žiarenia gama, rádioaktivita aerosólov a jódu na vybraných miestach, rádioaktivita spádov na vodnú plochu, rádioaktivita mlieka, spodných a povrchových vôd, rádioaktivita pôd a poľnohospodárskych produktov.

Vysoká citlivosť spektrometrických systémov a monitorovanie veľmi nízkych aktivít jednotlivých rádionuklidov v životnom prostredí umožňujú dokladovať minimálny, v porovnaní s prirodzenou rádioaktivitou zanedbateľný vplyv jadrových zariadení v lokalite Jaslovské Bohunice na okolie a okolité obyvateľstvo.

Presnosť, citlivosť a pohotovosť gamaspektrometrických prístrojov používaných v radiačnej kontrole výpustí a okolia je podmienená spoľahlivým a zároveň jednoduchým modelom účinnostnej kalibrácie polovodičových detektorov. Pri pravidelných analýzach vzoriek v rovnakej alebo podobnej geometrii (napr. vzorky v tvare valca rôznych rozmerov a rôznej mernej hmotnosti) možno za dostatočne pohotové a presné považovať experimentálne metódy alebo ich kombináciu s poloempirickými metódami [Sla91]. Avšak pre niektoré špeciálne geometrie merania a predovšetkým pre neplánované neperiodické analýzy vzoriek rôzneho zloženia a tvaru sa pri dnešnej úrovni výpočtovej techniky ukazujú časovo najvýhodnejšou a finančne najmenej náročnou alternatívou simulačné Monte Carlo metódy [Bro96,Kam96,Sim96b].

2.2. Polovodičové detektory a gamaspektrometria.

Germániový detektor je polovodičová dióda s p-i-n štruktúrou, kde vnútorná i-vrstva je citlivá na priamo ionizujúce žiarenie, röntgenové a gama žiarenie. Citlivá i-vrstva je vyrobená zo superčistého (HP – high purity) germánia, necitlivá n-vrstva germánia implementovaného lítiom s hrúbkou 0,5-1mm a veľmi tenká p-vrstva (približne 0,3 μ m) vytvárajú N a P kontakt detektora. Podľa tvaru polovodičového kryštálu a usporiadania citlivej a necitlivej vrstvy sa vyrábajú rôzne typy polovodičových detektorov so špeciálnymi vlastnosťami podľa použitia detektora (obr.2.1).

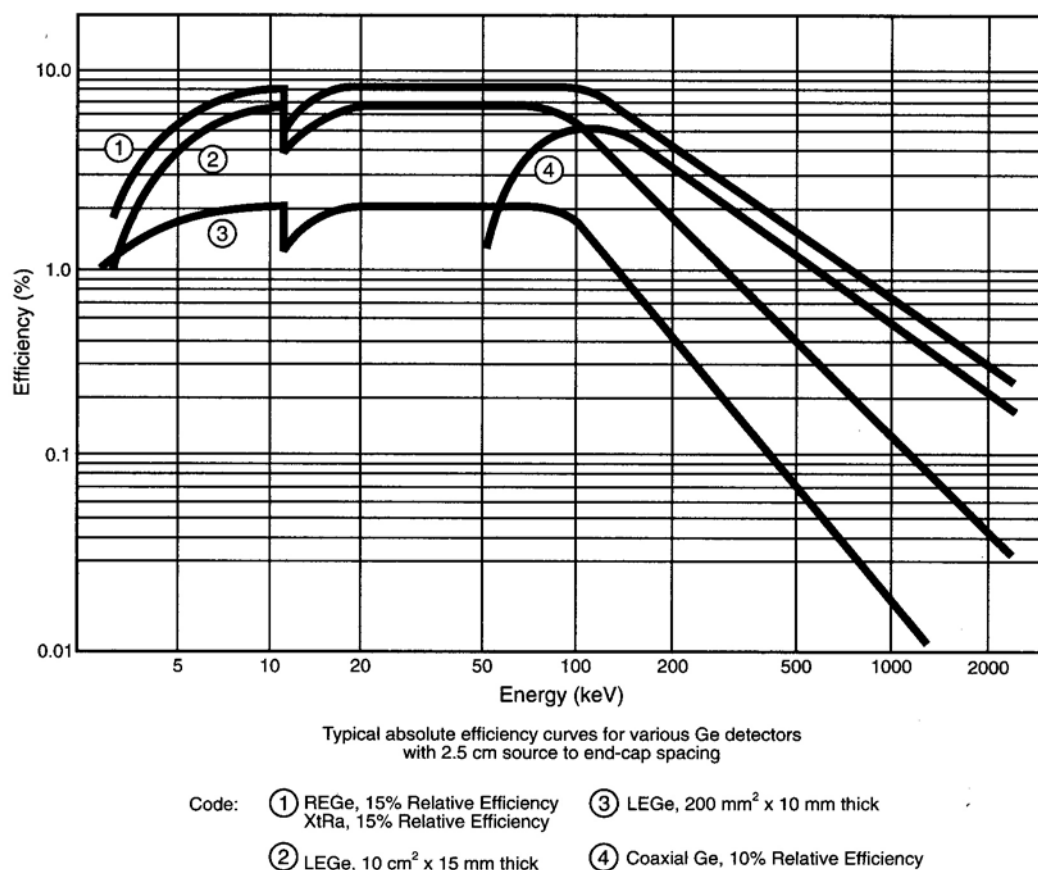


Obr.2.1 Štandardné typy polovodičových HPGe detektorov [Can98].

V oblasti radiačnej kontroly v jadrovej elektrárni sa najčastejšie využívajú koaxiálne detektory s uzavretým koncom, pri ktorých je najvýhodnejšia kombinácia parametrov detektora, najmä detekčnej účinnosti, a jeho ceny. Medzi parametre, na základe ktorých sa určuje kvalita polovodičového detektora, patria :

- účinnosť detekcie
- energetické rozlíšenie
- pomer pík/Compton.

Účinnosť detekcie v píkú úplnej absorpcie je vyjadrená ako pomer početnosti v píkú k celkovému počtu emitovaných gama kvánt – absolútna účinnosť. Pre porovnávanie detektorov sa častejšie uvádza relatívna účinnosť vyjadrená ako pomer píkovej účinnosti HPGe detektora k píkovej účinnosti scintilačného NaI(Tl) detektora tvaru valca s rozmermi $\Phi=75\text{mm}$, $h=75\text{mm}$ pre energiu 1332 keV a vzdialenosť zdroja 25cm od čela detektora umiestneného v osi detektora. V súčasnosti dostupné komerčne vyrábané detektory dosahujú relatívnu účinnosť nad 100%, maximálne hodnoty relatívnej účinnosti špičkových detekčných systémov na špeciálne účely sú na úrovni do 400%. Účinnosť detektora je závislá od energie registrovaných gama kvánt, pre jednotlivé typy polovodičových detektorov je zobrazená na obr.2.2.



Obr.2.2 Účinnosť detekcie polovodičových HPGe detektorov [Can98].

Energetické rozlíšenie detektora je dané predovšetkým štatistickými fluktuáciami v počte nosičov náboja vytvorených pri interakcii registrovanej častice v citlivom objeme detektora. V polovodičových materiáloch je energia potrebná na vytvorenie jedného páru elektrón – diera minimálna zo všetkých bežných materiálov používaných na výrobu detektorov (pre germánium približne 2,9 eV), vďaka čomu dosahujú polovodičové detektory najlepšie rozlíšenie. K ďalším parametrom výrazne ovplyvňujúcim energetické rozlíšenie patrí elektrický šum predzosilovača a zosilovača a fluktuácie záverného prúdu detektora. Moderné gamaspektrometrické systémy vrátane detektorov s relatívnou účinnosťou nad 50% dosahujú pre energiu 1332 keV energetické rozlíšenie do 2,0 keV.

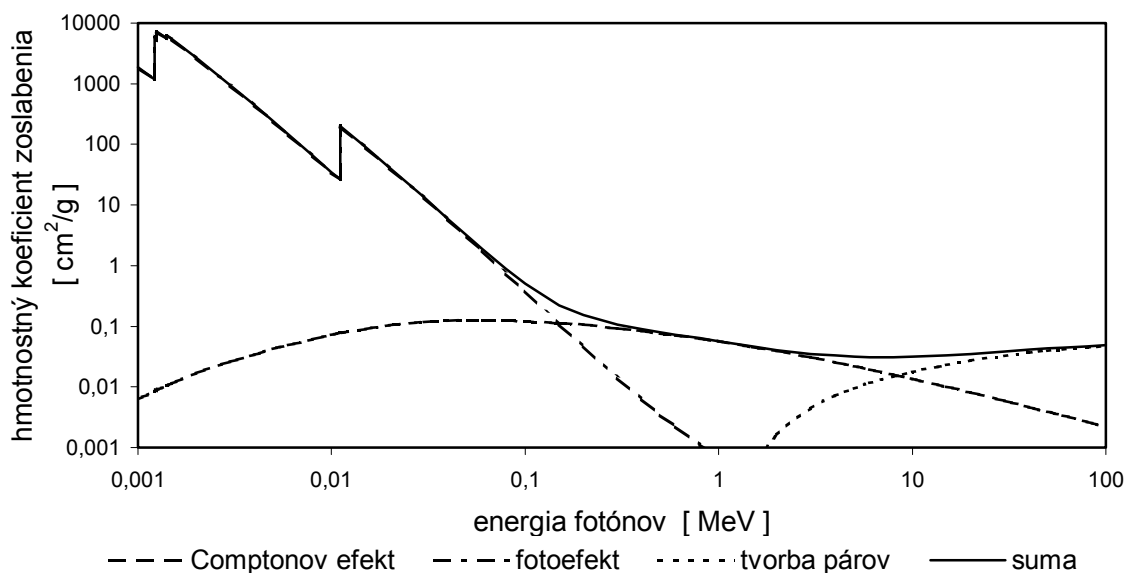
Pomer píq/Compton vyjadruje veľkosť Comptonovského kontinua v oblasti s nižšou energiou ako je energia píku úplnej absorpcie. Jeho hodnota závisí hlavne od veľkosti polovodičového kryštálu a v súčasnosti vyrábané detektory dosahujú pre energiu 1332 keV pomer väčší ako 50:1.

Rastúca kvalita a stále lepšie parametre vyrábaných polovodičových detektorov boli impulzom pre výrazný rozvoj polovodičovej gamaspektrometrie. Táto fyzikálna metóda umožňuje kvalitatívne a kvantitatívne meranie aktivity rádionuklidov emitujúcich gama žiarenie. Polovodičové detektory sa vyznačujú vysokým energetickým rozlíšením, čo umožňuje nedeštruktívne stanoviť aktivitu bohatej zmesi rádionuklidov vo vzorkách. Základnými prvkami gamaspektrometrickej aparatúry sú polovodičový HPGe detektor chladený počas merania v Dewarovej nádobe s kvapalným dusíkom (v súčasnej dobe je dostupný aj pomerne spoľahlivý systém elektrického chladenia bez potreby pravidelného dopĺňania chladiaceho média), predzosilovač, zdroj vysokého napätia, zosilovač, amplitúdovo digitálny prevodník a mnohokanálový analyzátor. Mnohokanálový analyzátor väčšinou predstavuje počítač s potrebným hardvérovým a softvérovým vybavením spojený s gamaspektrometrickou trasou prostredníctvom počítačovej siete. V prípade prenosných gamaspektrometrických systémov používaných napríklad pri IN-SITU meraniach môžu byť všetky elektronické a ovládacie prvky spektrometrickej trasy umiestnené v jednom zariadení, ktoré veľkosťou a tvarom zodpovedá počítačovému notebooku.

Pri prechode fotónu polovodičovým detektorom dochádza pri interakcii s materiálom detektora k energetickým stratám fotónu, pričom najvýznamnejšie sú tri základné procesy, pri ktorých môže fotón odovzdať celú alebo časť svojej energie :

- fotoelektrický efekt
- Comptonov rozptyl
- produkcia elektrón-pozitrónového páru.

Fotoelektrický efekt nastáva pri interakcii fotónu s viazaným elektrónom v polovodičovom kryštále, pri ktorej je absorbovaná celá energia fotónu. Tento typ interakcie je najvýznamnejší v oblasti nízkych energií (obr.2.3) a účinný prierez interakcie je priamo úmerný Z^5 materiálu detektora.



Obr.2.3 Energetická závislosť koeficientov zoslabenia.

Pri Comptonovom rozptyle dochádza k rozptylu fotónu na voľnom elektróne. Fotón stráca iba časť svojej energie v závislosti od uhla rozptylu. Dôsledkom tejto interakcie je spojité spektrum, ktoré sa označuje ako Comptonovské kontinuum. Horné ohraničenie kontinua sa nazýva Comptonova hrana a jej energia je daná vzorcom $E_{\text{Compt.}} = E/(1+511/2E)$, kde E je energia dopadajúceho nerozptýleného fotónu. Účinný prierez Comptonovho rozptylu je priamo úmerný Z materiálu detektora.

Prahovou energiou pre tvorbu elektrón-pozitrónových párov je hodnota 1,022 MeV. Pre fotóny s vyššou energiou sa tento typ interakcie stáva dominantným, pričom účinný prierez je priamo úmerný Z^2 materiálu detektora.

2.3. Účinnosť detekcie polovodičového detektora.

Základným predpokladom merania aktivity rádioaktívnych látok gamaspektrometrickými metódami je poznanie detekčnej účinnosti použitého spektrometra pre danú energiu fotónov a použitú geometriu. Detekčná účinnosť je definovaná ako pravdepodobnosť, že fotón dopadne do citlivého objemu detektora a zanechá v ňom aspoň časť svojej energie. Pre gamaspektrometrickú analýzu je podstatná píkova účinnosť detekcie, kedy fotón a ním generované častice zanechajú v citlivom objeme detektora celú svoju energiu.

Hodnota tejto pravdepodobnosti závisí od energie žiarenia, spektrometrického zariadenia, vzdialenosti detektor - žiarič (geometria merania), tvaru žiariča (geometria vzorky) a od absorpcie fotónov v necitlivých materiáloch nachádzajúcich sa medzi žiaričom a citlivým objemom detektora.

Na stanovenie píkovej účinnosti detekcie sa používa rad metód, ktoré je možné rozdeliť do troch základných skupín :

- experimentálne metódy
- poloempirické metódy
- výpočtové Monte Carlo metódy.

2.3.1 Experimentálne metódy.

Pri aplikácii experimentálnych metód kalibrácie detektora sa zisťuje odozva detektora na kalibračný etalón so známou aktivitou rádionuklidov. Stanovenie píkovej účinnosti detekcie sa uskutočňuje na základe experimentálnych meraní s použitím vzorca :

$$\varepsilon_p = \frac{N_p}{A \cdot n_\gamma} \quad (2.1)$$

, kde ε_p - píkova účinnosť detekcie

N_p - počet impulzov zaregistrovaných v píku úplnej absorpcie

A - aktivita použitého kalibračného štandardu (žiariča) ku dňu merania

n_γ - počet fotónov danej energie pripadajúcich na jeden rozpad.

Experimentálne metódy sú najčastejšie využívané pri kalibrácii pomocou bodových alebo malých objemových žiaričov v určitej vzdialenosti od detektora, kedy možno zanedbať samoabsorpciu vo vzorke a vplyv sumačných efektov pri použití kaskádnych žiaričov (napr. ^{152}Eu , ^{133}Ba , ^{226}Ra). Závislosť účinnosti detekcie od energie fotónov sa získa preložením diskretných experimentálnych hodnôt vhodným typom polynómu. Najčastejšie používaným typom je logaritmický polynóm:

$$\ln(\varepsilon_p) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot [\ln(E_\gamma)]^i \quad (2.2)$$

- , kde ε_p - píkova účinnosť detekcie
 a_i - koeficienty pri jednotlivých členoch polynómu
 E_γ - energia fotónu
 n - stupeň polynómu, celý energetický interval sa zvyčajne delí na dve oblasti : pre E_γ z intervalu 60 až 200keV sa používa $n = 3$ až 5, pre $E_\gamma > 200$ keV je $n = 1$ alebo 2).

Na kalibráciu gamaspektrometra používaného na meranie vzoriek zo životného prostredia sa najčastejšie používajú veľkoobjemové štandardy rôzneho zloženia a rôznej mernej hmotnosti (voda, silikónový kaučuk, rôzne sypké látky s mernými hmotnosťami 0,1 až 2 g.cm⁻³).

Veľkoobjemové kalibračné štandardy musia spĺňať nasledovné požiadavky :

- rádionuklidy prítomné v štandarde musia dostatočne husto pokryť skúmaný interval energií fotónov
- z hľadiska čo najmenšieho vplyvu sumácií pri malých vzdialenostiach detektor - vzorka by sa malo jednať o monoenergetické žiariče
- vyžaduje sa vysoká homogenita rozloženia rádionuklidov v štandarde a čo najväčšia vzorkopodobnosť použitých štandardov.

Počet a energetický interval monoenergetických žiaričov s vyhovujúcim polčasom rozpadu (napr. ^{137}Cs , ^{109}Cd , ^{54}Mn , ^{85}Sr , ^{113}Sn , ^{203}Hg , ^{241}Am) je výrazne obmedzený v porovnaní s kaskádnyimi žiaričmi používanými pri vzdialených geometriách, preto sa používajú tiež kaskádne žiariče s jednoduchou rozpadovou schémou (napr. ^{57}Co , ^{60}Co , ^{88}Y). Výrazný vplyv na presnosť experimentálnej kalibrácie má stupeň homogenity rozloženia aktivity v etalóne a podobnosť absorbných vlastností etalónu a vzorky.

Napriek uvedeným nedostatkom sú experimentálne kalibračné metódy hlavne pri vzdialených geometriách považované za najpresnejšie [Deb88], ale v oblasti radiačnej kontroly výpustí a okolia jadrovej elektrárne nie je reálne možné okalibrovať s dostatočnou presnosťou všetky geometrie merania iba pomocou čisto experimentálnych metód.

2.3.2 Poloempirické metódy.

Podstatou poloempirických metód je zvolenie vhodného zjednodušeného matematického modelu detektora alebo meranej vzorky. Parametre tohto modelu sa určia pomocou experimentálnych meraní definovaných kalibračných etalónov a v ďalšom postupe sa využívajú pre teoretický výpočet píkovej účinnosti detekcie pre používané vzorky a geometrie merania. Výslednú detekčnú účinnosť je možné z hľadiska výpočtov rozdeliť na tri faktory :

- energetický – vyjadruje pravdepodobnosť detekcie fotónu v citlivom objeme detektora
- geometrický – určuje závislosť fotónového toku dopadajúceho na detektor od veľkosti vzorky a detektora
- absorbčný – určuje vplyv absorpcie v materiáloch medzi žiaričom a citlivým objemom detektora vrátane samoabsorpcie vo vzorke.

Výhodou poloempirických metód je časová nenáročnosť a univerzálnosť pri samotných výpočtoch účinností detekcie. Presnosť dosiahnutých výsledkov pri zdokonalených modeloch sa s istými obmedzeniami pohybuje na úrovni do 5% pre vzorky malých rozmerov [Moe82,Wan99]. Problémy s presnosťou a spoľahlivosťou stanovených výsledkov sú najmä v oblasti nízkych energií do 200 keV a pri meraní veľkoobjemových vzoriek s výrazne odlišnými mernými hmotnosťami.

Poloempirická metóda kalibrácie polovodičových detektorov vyvinutá Výskumným ústavom jadrových elektrární a používaná v Laboratóriu radiačnej kontroly okolia v Trnave je založená na predpoklade konštantnosti pomeru píkovej a celkovej účinnosti detekcie pre valcovú geometriu vzorky [Sla91]. Parametre matematického modelu sa získavajú meraním bodových a kvapalných etalónov. Metóda sa používa na kalibráciu valcovej geometrie vzorky umiestnenej na čele detektora.

Poloempirické metódy boli odskúšané s dostatočnou presnosťou aj pri určovaní detekčnej účinnosti polovodičových detektorov pre meranie veľkoobjemových vzoriek vo valcovej a Marinelliho geometrii, ale použité postupy sú náročné na experimentálne merania nevyhnutné pre určenie

parametrov modelu [Jad87,Wan97]. Najväčším problémom z hľadiska presnosti dosiahnutých výsledkov je určenie presných rozmerov vnútorných častí kryostatu a hrúbky mŕtvej vrstvy germánia, pričom tieto údaje výrobcovia polovodičových detektorov zvyčajne neuvádzajú na sprievodných listoch s uvedenými parametrami detektora. Nepresné zadanie hrúbky mŕtvej vrstvy môže pre energie fotónov pod 200 keV spôsobiť chybu až niekoľko desiatok percent [Wan97].

Napriek uvedeným nedostatkom sú poloempirické metódy vhodnou a dostatočne spoľahlivou alternatívou kalibrácie polovodičových detektorov v oblastiach, kde využitie experimentálnych metód po technickej a finančnej stránke nie je reálne. V niektorých prípadoch, najmä pri nepravidelných atypických vzorkách alebo v prípade potreby urýchleného vykonania analýzy, sa ale jedinou reálnou možnosťou ukazuje využitie výpočtových metód Monte Carlo.

2.3.3 Výpočtové metódy Monte Carlo.

Tieto v súčasnosti rýchle sa rozvíjajúce metódy sú založené na počítačovom modelovaní interakcie fotónov s okolitým hmotným prostredím. Tento postup vyžaduje dokonalú znalosť fyzikálnych procesov prebiehajúcich vo vzorke a detektore pri interakcii so žiarením. Výrazný prienik týchto metód do oblasti experimentálnej jadrovej fyziky bol umožnený rozvojom rýchlych počítačových systémov, dôkladnou znalosťou procesov prebiehajúcich pri interakcii žiarenia s hmotou a dostupnosťou presných rozmerov jednotlivých častí súčasných polovodičových detektorov. Vo výskumných vedeckých inštitútoch a laboratóriách na celom svete bolo vypracovaných niekoľko počítačových kódov umožňujúcich i menej skúseným programátorom vykonávať počítačové simulácie v oblasti detekcie ionizujúceho žiarenia. Základný postup pri výpočtoch je u väčšiny používaných programov podobný a pozostáva z nasledujúcich krokov :

1. inicializácia programu – pridelenie dynamickej pamäte, inicializácia potrebných premenných veličín, zadanie počtu eventov a pod.
2. zadanie materiálových parametrov – vytvorenie databázy údajov o všetkých typoch materiálu, z ktorých sa skladá zariadenie a vzorka (merná hmotnosť, chemické zloženie, percentuálne alebo hmotnostné zastúpenie jednotlivých prvkov)

3. zadanie geometrických parametrov – vytvorenie databázy údajov s rozmermi a vzájomným usporiadaním všetkých geometrických útvarov, z ktorých sa skladá experimentálna zostava
4. inicializácia fyzikálnych parametrov – príprava údajov popisujúcich fyzikálne procesy z databázy obsiahnutej v programe (účinné prierezy, energetické straty a pod.)
5. generátor častíc – podprogram na generovanie typu častice, jej energie, miesta vzniku a smerového vektora hybnosti
6. simulácia eventu – modelovanie dráhy primárnej i prípadných sekundárnych častíc, ich interakcií a energetických strát až po zánik častice (dosiahnutie dolného energetického prahu) alebo opustenie sledovaného priestoru
7. ukončenie eventu – vyhodnotenie a záznam užívateľom definovaných údajov na konci každého eventu (napr. vznik a parametre niektorého typu častice, energia absorbovaná v určenej časti detektora atď.)
8. ukončenie programu – koniec výpočtov a výstup definovaných údajov v predvolenej forme (do súboru, na obrazovku alebo tlačiareň) s možnosťou automatického spustenia ďalšieho výpočtu.

Okrem základných programov riadiacich výpočet obsahujú kvalitné počítačové kódy ďalšie podprogramy umožňujúce kontrolu parametrov výpočtu, vstup a výstup dát počas výpočtu, grafické výstupy vrátane grafickej kontroly navrhutej geometrie alebo interaktívneho zobrazenia simulácie eventu atď.

Pre správnosť výpočtu a presnosť výsledkov je veľmi dôležitá presná znalosť geometrických rozmerov, predovšetkým jednotlivých častí detektora. Zatiaľ čo rozmery citlivého objemu a umiestnenie germániového kryštálu v kryostate sú uvedené na sprievodnom liste detektora, rozmery vnútorných častí kryostatu sú dostupné na výrobnom výkrese, ktorý si môže užívateľ vyžiadať u výrobcu. Jediný rozmer, ktorý nie je presne definovaný a jeho hodnota je uvedená približne, je hrúbka mŕtvej vrstvy germánia. Na sprievodných listoch súčasných komerčne vyrábaných detektorov je stanovená hodnota hrúbky mŕtvej vrstvy približne 0,5mm, v skutočnosti táto vrstva nemá konštantnú hrúbku na celom povrchu a priemerná hodnota je u jednotlivých detektorov v intervale 0,3 až 1 mm. Najnovšie výskumy navyše ukázali, že hrúbka mŕtvej vrstvy pre daný detektor môže byť za istých okolností premenlivá.

Pri dlhodobom zotrvaní detektora v nevychladenom stave pri izbovej teplote dochádza k nárastu hrúbky mŕtvej vrstvy približne o hodnotu 0,2 mm za rok [Bro03]. Takýto nárast hrúbky mŕtvej vrstvy germánia môže pri štandardnom koaxiálnom HPGe detektore spôsobiť až 10%-ný medziročný pokles účinnosti detekcie pre energie menšie ako 100 keV. Jedinou možnosťou, ako zabrániť zmenám hrúbky mŕtvej vrstvy, je uchovávať detektor permanentne vo vychladenom stave, kedy sú zmeny hrúbky mŕtvej vrstvy zanedbateľné. Výnimku z hľadiska dôležitosti hrúbky mŕtvej vrstvy tvoria REGe detektory, kde sa mŕtva vrstva germánia nachádza na vnútornej strane a vonkajšia elektróda má zanedbateľnú hrúbku niekoľko μm . Priemernú hodnotu hrúbky mŕtvej vrstvy germánia je možné stanoviť jednoduchým experimentálnym meraním pomocou nízkoenergetických žiaričov (napr. ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co), na druhej strane i relatívne veľká nepresnosť v stanovení tejto hodnoty sa výraznejšie prejaví iba pri fotónoch s energiou pod 200 keV [Rap95].

Efektívne využitie počítačového modelovania v oblasti detekcie ionizujúceho žiarenia umožňuje programový súbor GEANT [CERN93]. Tento súbor bol vypracovaný pre simulácie fyzikálnych procesov v oblasti fyziky vysokých energií. V oblasti polovodičovej gamaspektrometrie bol súbor GEANT použitý napríklad na modelovanie vplyvu vysokoenergetického kozmického žiarenia na pozadie polovodičového HPGe detektora umiestneného v kryte [Voj94,00] alebo na účinnostnú kalibráciu polovodičových a scintilačných detektorov [Lab00,Voj01] s veľmi dobrou zhodou simulovaných a experimentálne nameraných údajov na úrovni $\pm 5\%$.

Metóda Monte Carlo bola tiež použitá pri stanovení detekčnej účinnosti polovodičových Ge(Li) detektorov pre veľkoobjemové vzorky rôzneho zloženia a mernej hmotnosti [Nak83]. Autori použili na výpočty vlastný počítačový kód a pre dosiahnutie maximálnej presnosti modelových výpočtov boli citlivý objem a hrúbka mŕtvej vrstvy detektora určené pomocou kolimovaného zväzku nízkoenergetických fotónov (^{57}Co - 122 keV). V uvedenej práci sú odchýlky medzi experimentálne zmeranými a počítanými hodnotami detekčnej účinnosti v intervale $\pm 15\%$ pre energie fotónov do 300 keV a $\pm 10\%$ pre energie fotónov nad 300 keV.

Presnejšie výsledky boli dosiahnuté ďalším počítačovým kódom EFHP, ktorý využíva metódu Monte Carlo na kalibráciu polovodičového detektora [Sim96a,b]. Výpočty boli zamerané predovšetkým na zhodnotenie vplyvu samoabsorpcie fotónov vo vzorke a na určenie korekčných faktorov na koincidenčné sumácie kaskádnych fotónov. Vypočítané hodnoty pre vzorky rôznych rozmerov a zloženia súhlasili s experimentálnymi na úrovni $\pm 5\%$, v prípade zložitých rozpadových schém a viacnásobných koincencií na úrovni $\pm 10-15\%$.

Jedným z najznámejších počítačových kódov využívajúcich metódu Monte Carlo je MCNP [Bri93]. Možnosť využitia tohto Monte Carlo kódu na kalibráciu polovodičových detektorov bola odskúšaná v laboratóriách firmy Canberra Industries v USA. Experimentálnym meraním bola stanovená účinnosť pre rôzne geometrie merania a rôzne typy a zloženie vzoriek (bodové a plošné žiariče, Marinelliho geometria, sud s objemom 200 litrov). Z vyhodnotenia experimentov a porovnania experimentálne zmeraných a MCNP simulovaných hodnôt účinnosti detekcie vyplýva veľmi dobrá zhoda na úrovni $\pm 5\%$ pre jednoduché geometrie merania a $\pm 15\%$ pre zložitejšie komplexné geometrie a nízke energie fotónov [Bro96].

Na základe výsledkov dosiahnutých kódom MCNP bol vypracovaný kalibračný model ISOCS [Can96a]. Tento model je založený na databáze hodnôt účinnosti detekcie pre bodové geometrie v rôznych polohách a vzdialenostiach vzhľadom na detektor (je zmapovaný priestor v tvare gule s priemerom 50m okolo detektora) a pre energetickú škálu 50 keV až 7 MeV, ktoré sú nasimulované počítačom pomocou kódu MCNP. Samotný kalibračný softvér ISOXSW a LABSOXSW [Can96b] umožňuje užívateľovi zvoliť jeden z deviatich základných typov geometrie vzorky alebo vytvoriť vlastný geometrický tvar, zadať potrebné rozmery a určiť vzájomnú polohu detektor – vzorka. V závislosti od zložitosti geometrie trvá samotný výpočet kompletnej účinnostnej kalibračnej krivky niekoľko sekúnd až minút. Presnosť prezentovaných vypočítaných hodnôt v porovnaní s experimentom je na úrovni $\pm 10\%$, pre energie fotónov menšie ako 150 keV na úrovni $\pm 15\%$.

Napriek tomu, že komerčne dodávaný softvér ISOXSW a LABSOXSW nie je skutočným Monte Carlo kódom, ale iba využíva výsledky výpočtov pomocou MCNP, je príkladom prieniku počítačových simulačných metód aj do oblasti rutinných gamaspektrometrických analýz.

2.4. Vplyv samoabsorpcie vo vzorke na účinnosť detekcie.

Medzi rádioaktívnou vzorkou, v ktorej dochádza k emisii fotónov, a citlivým objemom detektora sa nachádza niekoľko hmotných prostredí, v ktorých sa pohltí časť emitovaných fotónov alebo sa interakciou s prostredím zmení ich energia. Prvým materiálom, s ktorým fotóny môžu interagovať, je samotná analyzovaná vzorka. Vplyv samoabsorpcie fotónov v materiále vzorky bol popísaný a ohodnotený vo viacerých prácach venovaných účinnostnej kalibrácii polovodičových detektorov [Moe82,Nak83,Sla91,Abb01].

Na základe výsledkov obsiahnutých v týchto publikáciách možno ukázať, že od určitej energie fotónov (približne 100 až 150 keV) pre vzorky menších rozmerov s dostatočnou presnosťou platí vzorec (2.3).

$$\varepsilon_r(E) = \varepsilon_0(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot X_{ef}) \quad (2.3)$$

, kde ε_r - účinnosť detekcie pre reálnu vzorku
 ε_0 - účinnosť detekcie pre nehmotnú vzorku (vákuum)
 μ - lineárny koeficient zoslabenia materiálu vzorky
 E - energia fotónov
 X_{ef} - efektívna hrúbka vzorky pre danú geometriu.

Pomer $\varepsilon_r/\varepsilon_0$ je v literatúre definovaný ako samoabsorpčný faktor s označením f_s [Nak83]:

$$f_s = \frac{\varepsilon_r(E)}{\varepsilon_0(E)} = \exp(-\mu(E) \cdot X_{ef}) \quad (2.4)$$

V uvedenej publikácii bola zostrojená závislosť samoabsorpčného faktora od lineárneho koeficientu oslabenia pre vzorku vo valcovej geometrii s rozmermi $\Phi=5\text{cm}$, $h=5\text{cm}$ pre tri rôzne zloženia vzorky s mernou hmotnosťou 1,0 až 2,5 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a energetickým intervalom fotónov 120 až 1300 keV, ktoré boli merané dvomi Ge(Li) detektormi s relatívnou účinnosťou 8% a 18%. Získané diskkrétne hodnoty vytvorili exponenciálnu krivku podľa vzorca (2.4), čím bola potvrdená konštantnosť hodnoty X_{ef} pre konkrétnu geometriu. Zovšeobecnenie tejto hypotézy na väčšej skupine údajov (viac vzoriek rôzneho tvaru a väčších rozmerov meraných na detektoroch rozdielnych parametrov) by umožnilo navrhnúť jednoduchú kalibračnú metódu založenú na kombinácii experimentálnych a simulačných Monte Carlo metód. Účinnosť detekcie pre reálnu vzorku by bola určená z účinnosti pre zvolený kalibračný etalón meraný v rovnakej geometrii pomocou korekčného faktora, ktorého závislosť od energie fotónov a zloženia a mernej hmotnosti vzorky by bola určená Monte Carlo simuláciami. Kalibračná metóda založená na podobnej filozofii je popísaná v publikácii [Bol96], kde je odvodený poloempirický vzorec pre korekčný faktor na základe experimentálnych meraní viacerých vzoriek s rôznou mernou hmotnosťou. Všeobecné využitie uvedenej metódy je však otázne, nakoľko merania boli uskutočnené iba v jednej geometrii valcového tvaru s jediným

polovodičovým HPGe detektorom. Na určenie korekčných faktorov sú z hľadiska efektívnosti oveľa vhodnejšie Monte Carlo metódy v porovnaní s experimentálnymi meraniami, pri ktorých je nutná príprava niekoľkých kalibračných etalónov odlišného zloženia a mernej hmotnosti.

2.5. Sumačné efekty pri meraní kaskádnych žiaričov.

Pri experimentálnych meraniach aktivity kaskádnych rádionuklidov dochádza predovšetkým pri blízkych geometriách k sumácii fotónov emitovaných v jednej kaskáde, čo spôsobuje pokles početnosti impulzov v pôvodných píkoch a vznik sumačného píku v spektre meraného rádionuklidu. Tento efekt je spôsobený tým, že doba medzi emisiou jednotlivých kaskádnych fotónov je oveľa menšia ako rozlišovacia doba spektrometrickej trasy. V prípade zložitých rozpadových schém a veľmi blízkej vzdialenosti detektor – vzorka, napr. bodový žiarič položený na čele kryostatu, môžu sumácie kaskádnych fotónov spôsobiť pokles početnosti v píkoch úplnej absorpcie o viac ako 30% [Deb79]. Zanedbanie tohto efektu predovšetkým v blízkych geometriách môže spôsobiť problémy pri definovaní účinnostnej kalibračnej krivky a následnú chybu pri stanovení aktivity meraných vzoriek.

Problematike sumácií pri gamaspektrometrických analýzach je dlhodobo venovaná značná pozornosť a vo vedeckých prácach je publikovaných niekoľko spôsobov určenia korekčných faktorov. Vzorce odvodené pre prípad veľkoobjemových vzoriek obsahujú objemové integrály píkových a celkových účinností detekcie a ich vzájomných súčinov. Objemovú závislosť píkovvej a celkovej účinnosti je možné určiť niekoľkonásobným experimentálnym meraním bodových žiaričov rozmiestnených s dostatočnou hustotou po celom objeme vzorky [Deb79], čo je časovo i technicky náročný proces. Jednoduchším spôsobom určenia korekcií na sumačné efekty je použitie poloempirických metód, ktoré vyžadujú oveľa menší počet experimentálnych meraní a dosiahnuté výsledky sa zhodujú s experimentom na úrovni niekoľkých percent [Moe82,Wan99,Abb00].

Efektívnou možnosťou pri výpočte sumačných korekčných faktorov sa ukazuje využitie simulačných Monte Carlo metód. Tieto metódy umožňujú pri dostatočnej znalosti rozpadovej schémy rádionuklidu simulovať jednoduché i zložitejšie kaskády fotónov. Porovnaním takto získaných hodnôt s výsledkami výpočtov generovaných pre jednotlivé fotóny je možné získať hľadané korekčné faktory. Publikované výsledky ukazujú, že pri súčasnej znalosti parametrov

vstupujúcich do výpočtov je možné Monte Carlo metódami stanoviť korekčné faktory s presnosťou na úrovni do 15%, pre jednoduché kaskády na úrovni 5% [Sim96a]. Na stanovenie sumačných efektov metódou Monte Carlo bol použitý tiež počítačový kód GEANT [Lab00]. Hodnoty korekčných faktorov stanovené pre plastickú vialku umiestnenú v studňovom HPGe detektore sa s experimentálnymi zhodovali v intervale $\pm 15\%$.

Publikované výsledky ukazujú, že v prípade analýzy objemových vzoriek sú Monte Carlo metódy jednoduchým a efektívnym nástrojom na stanovenie korekčných faktorov na sumácie vznikajúce pri meraní kaskádnych žiaričov s presnosťou porovnateľnou s inými používanými metódami.

3. POUŽITÉ METÓDY RIEŠENIA.

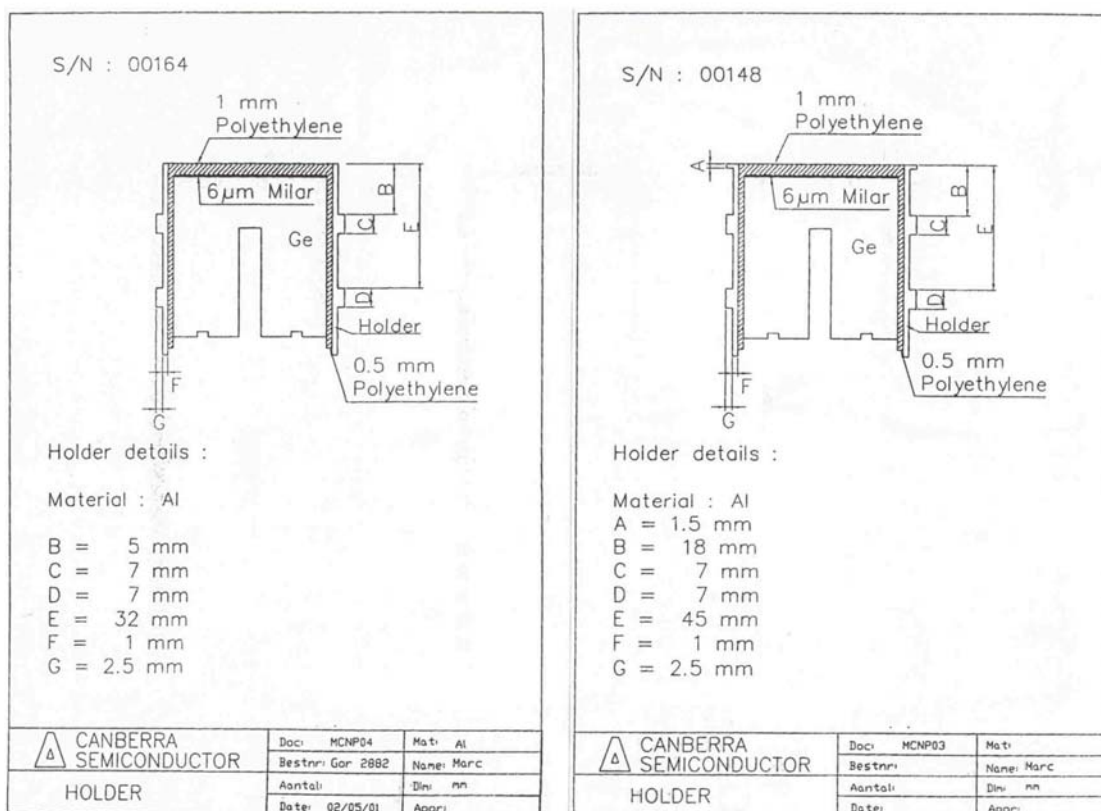
3.1. Experimentálne zariadenie.

Experimentálne merania sa uskutočnili na piatich polovodičových HPGe detektoroch v spektrometrickom laboratóriu Oddelenia radiačnej ochrany v Atómových elektrárnach Jaslovské Bohunice (Príloha č.2). Všetky detektory sú koaxiálne s uzavretým koncom a hliníkovým kryostatom. Pri experimentálnych meraniach boli umiestnené v olovených tieniacich krytoch valcového tvaru s hrúbkou steny 10cm, resp. 7,5cm, vnútorná strana olova bola prekrytá medeným plechom s hrúbkou 1mm, resp. 4mm. Základné parametre detektorov uvedené na sprievodných listoch alebo fyzicky zmerané sú uvedené v tab.3.1.

Na sprievodných listoch detektorov neboli uvedené žiadne informácie o vnútorných častiach kryostatu, jediným údajom popisujúcim vnútorné usporiadanie bola vzdialenosť čela germániového kryštálu od povrchu kryostatu (window distance), kde bola u všetkých detektorov uvedená rovnaká hodnota 5mm. Z tohoto dôvodu bola adresovaná požiadavka výrobcovi o zaslanie výrobných výkresov vnútorných častí kryostatu s ich presnými rozmermi a usporiadaním. Takýmto spôsobom boli získané výrobné výkresy dvoch novších detektorov č.1 a č.4 (obr.3.1), od ostatných detektorov sa uvedené údaje nepodarilo zistiť. Z tohoto dôvodu bola presnosť počítačových simulácií v závislosti od upresnenia rozmerov vnútorných častí detektora porovnávaná iba pre detektory č.1 a 4 , u ktorých rozmery vnútorných častí boli presne určené.

Tab.3.1 Základné parametre použitých HPGe detektorov.

PARAMETER	Detektor č.1	Detektor č.2	Detektor č.3	Detektor č.4	Detektor č.5
Typ detektora	Coaxial Ge	Coaxial Ge	REGe	Coaxial Ge	Coaxial Ge
Typové označenie detektora	GC6021	EGPC 20	GR1520	GC3520	GC1018
Sériové číslo	b 00148	5430	b 7528	b 00164	P175
Rok výroby	1999	1986	1996	2000	1997
Výrobca	Canberra	Enertec	Canberra	Canberra	Canberra
Kryostat	7500SL	SHF00	7500SL	7500SL	7500SL
Predzosilňovač	2002CSL	PSC 821	2002CSL	2002CSL	2002CSL
Pracovné napätie	+4500V	+3500V	-4000V	+5000V	+3000V
FWHM/FWTM (1332,5 keV)	1,99/3,84 keV	2,10/3,84 keV	1,90/3,61 keV	1,82/3,39 keV	1,70/3,11 keV
FWHM (122 keV)	0,957 keV	1,2 keV	0,857 keV	0,902 keV	0,803 keV
Pík/Compton (1332,5 keV)	72,5:1	44,0:1	43,0:1	66,1:1	41,1:1
Rel.det.účinnosť (1332,5 keV)	65,4%	20,0%	19,2%	36,0%	8,6%
Priemer kryštálu	7,0 cm	4,9 cm	5,1 cm	6,1 cm	4,35 cm
Výška kryštálu	6,7 cm	5,7 cm	4,8 cm	5,1 cm	4,3 cm
Objem kryštálu	258 cm ³	107 cm ³	98 cm ³	149 cm ³	63 cm ³
Priemer kryostatu	8,8 cm	8,0 cm	7,5 cm	7,5 cm	7,5 cm
Hrúbka mŕtvej vrstvy germánia	~0,5 mm	~1,0 mm	~0,5 mm	~0,5 mm	~0,5 mm
Objem vnútornej dutiny	2,8 cm ³	-	-	2,0 cm ³	-



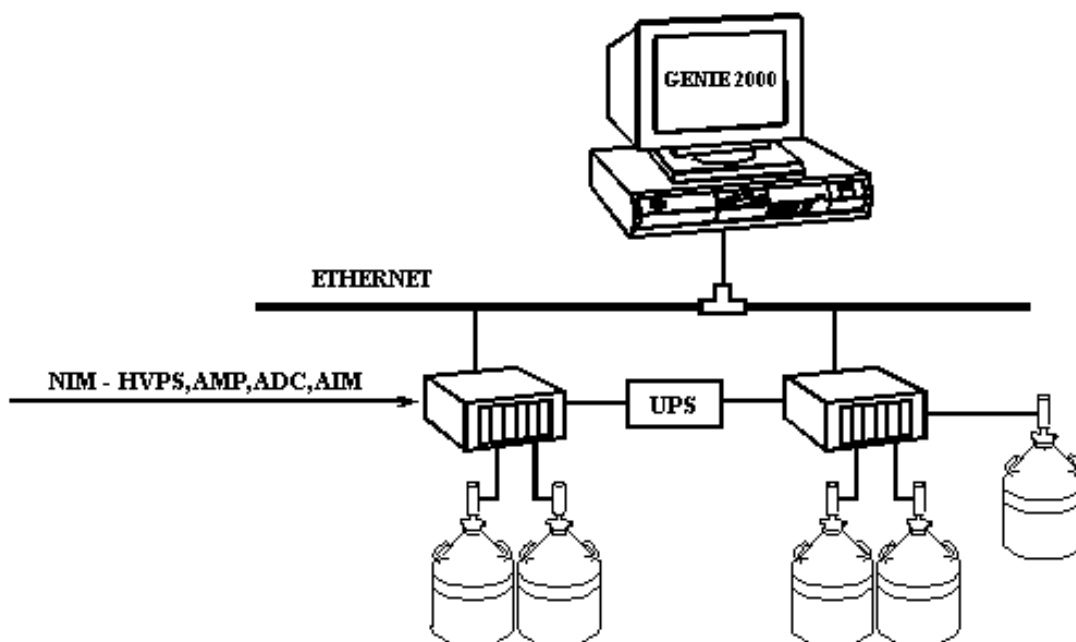
Obr.3.1 Výrobné výkresy vnútorných častí detektorov č.1 a 4.

Údaj o hrúbke mŕtvej vrstvy germánia uvedený na sprievodných listoch je iba približná hodnota udávaná výrobcom. Pre detektory č.1 a č.4 bol údaj o hrúbke mŕtvej vrstvy upresnený jednoduchými experimentálnymi meraniami pomocou bodových nízkoenergetických žiaričov (Am-241, Co-57), na základe ktorých boli zvolené priemerné hodnoty pre det.č.1 - 0,8mm a pre det.č.4 - 0,7mm. U ostatných detektorov bola nastavená približná hodnota uvedená výrobcom.

Na zber a spracovanie signálov z detektorov slúžila gamaspektrometrická elektronická trasa (obr.3.2), ktorá pozostávala z nasledovných elektronických modulov :

- UPS – (Uninterruptible Power Supply) zálohovací zdroj elektrického napätia, APC, model Smart SU700XL
- NIM – (Nuclear Instrument Modules Bin/Power Supply) napájací rám pre elektronické spektrometrické moduly, Canberra, model 2100, napäťový výstup ± 6 , ± 12 a ± 24 V, možnosť súčasného zapojenia 12 modulov

- HVPS – (High Voltage Power Supply) zdroj vysokého napätia pre polovodičové detektory, Canberra, model 9645 softvérovo ovládaný, výstup ± 30 až ± 6000 V
- AMP – (Amplifier) – softvérovo ovládaný spektrometrický zosilovač, Canberra, model 9615
- ADC – (Analog-to-Digital Converter) analógovo-digitálny prevodník, Canberra, model 9635 softvérovo ovládaný, počet kanálov 8000
- AIM – (Acquisition Interface Module) modul umožňujúci komunikáciu medzi počítačom a ostatnými elektronickými modulmi prostredníctvom počítačovej siete Ethernet, Canberra, model 556, možnosť súčasného pripojenia dvoch ADC
- PC – osobný počítač s operačným systémom Windows95 pripojený do siete Ethernet s nainštalovaným softvérom GENIE 2000, ver.1.1, 1996



Obr.3.2 Zapojenie detektorov v spektrometricke trase.

Genie-2000 je spektrometrický softvér vyvinutý firmou Canberra, ktorý obsahuje komplexný súbor nástrojov pre zber a analýzu spektier z mnohokanálových analyzátorov (MCA). Jeho základné funkcie umožňujú riadenie MCA, zobrazenie a spracovanie spektra, základnú spektrálnu analýzu

a výstup požadovaných údajov. Voliteľné funkcie zahŕňajú komplexnú spektrálnu analýzu pre alfa a gamaspektrometriu, kontrolu a hodnotenie kvality systémov, automatizáciu systému a ďalšie nástroje pre špecificky určené aplikácie [Can97].

3.2. Príprava meracích etalónov.

Na experimentálne merania boli použité rovnaké geometrie merania a tvar vzoriek, aké sa bežne používajú pri kalibrácii polovodičových detektorov alebo pri rutinných gamaspektrometrických analýzach v spektrometrickom laboratóriu EBO [Rap98].

Použité meracie štandardy je možné rozdeliť do dvoch skupín :

1. kalibračné etalóny vyrobené a dodané Českým metrologickým inštitútom (ČMI), ktoré pred meraním neboli žiadnym spôsobom upravované :
 - zmesný etalón typ CBSS2, silikónový kaučuk vo valcovej PE nádobe s objemom 500ml, výr.č.590-01 (obr.3.3)
 - etalón typ CBSS1, ^{152}Eu , silikónový kaučuk vo valcovej PE nádobe s objemom 500ml, výr.č.146-01 (obr.3.4)
 - etalón typ CBSS5, ^{226}Ra , silikónový kaučuk vo valcovej PE nádobe s objemom 500ml, výr.č.221-07 (obr.3.5)
2. pracovné etalóny pripravené z kvapalného zmesného etalónu vyrobeného ČMI typ ER X, výr.č.720-01 s platným certifikátom počas experimentálnych meraní (obr.3.6), ktorý bol rozdelený a pridaný do nasledovných látok :
 - voda
 - kremičitý piesok
 - drevené piliny
 - oceľové piliny.

CERTIFIKÁT

Certifikát č.: 931 - OL - 352/97 Typ: CBSS 2 Výrobní č.: 590-01

Technická norma:

Radionuklid	Poločas dny	Aktivita kBq	Standardní kombinovaná nejistota, %
241Am	1,578E5	4,011	1,1
109Cd	462,6	8,122	1,3
57Co	271,26	0,325	1,1
60Co	1925,4	1,589	1,4
137Cs	11019	1,163	1,1

Hmotnost: 490,0 g Měrná hmotnost: $0,98 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ Objem: $500,0 \pm 5,0 \text{ cm}^3$

Radioaktivní nečistoty: gama < 0,1 %

Referenční datum: 30.9.1997

Homogenita lepší než: 1 %

Popis:

Radioaktivní materiál je homogenně dispergován v silikonovém kaučuku.

Složení matrice: C - 0,324 H - 0,0816 O - 0,216 Si - 0,379 (hmotnostní zlomky)

Měřicí metoda:

Příprava vychází ze standardních roztoků typu ER(EB), jejichž aktivita je stanovena vhodnou metodou.

Kontrola je prováděna gama spektrometrií na HpGe detektoru.

Poznámka:

Jako kritérium homogenity je vzata nejistota typu A hodnoty aktivity elementu o objemu 1 cm^3 (pro $n=10$). Objem je vypočten z hmotnosti.

Datum vydání certifikátu: 18.9.1997

Platnost certifikátu: 6 měsíců

Zakazník: CHEMMEA s. r. o.
Vrakunská 29
821 06 Bratislava
Slovenská republika



RNDr. Pavel Dryák, CSc.
ředitel

Telefon: 02-67008497 Fax: 02-67008466

CERTIFIKÁT

Certifikát č.: 931 - OL - 348/97 Typ: CBSS 1 Výrobní č.: 146-01

Technická norma:

Poločas: 4858 dnů

Radionuklid: 152Eu

Aktivita: 3,913 kBq

Hmotnost: 490 g

Měrná hmotnost: $0,98 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$

Objem: $500 \pm 5,0 \text{ cm}^3$

Radioaktivní nečistoty: 154 Eu 1,0 %

Referenční datum: 30.9.1997

Kombinovaná standardní nejistota: 1,4 % Homogenita lepší než: 1 %

Popis:

Radioaktivní materiál je homogenně dispergován v silikonovém kaučuku.

Složení matrice: C - 0,324 H - 0,0816 O - 0,216 Si - 0,379 (hmotnostní zlomky)

Měřicí metoda:

Příprava vychází ze standardních roztoků typu ER(EB), jejichž aktivita je stanovena vhodnou metodou.

Kontrola je prováděna gama spektrometrií na HpGe detektoru.

Poznámka:

Jako kritérium homogenity je vzata nejistota typu A hodnoty aktivity elementu o objemu 1 cm^3 (pro $n=10$).

Objem je vypočten z hmotnosti.

Datum vydání certifikátu: 18.9.1997

Platnost certifikátu: 1 rok

Zakazník: CHEMMEA s. r. o.
Vrakunská 29
821 06 Bratislava
Slovenská republika



RNDr. Pavel Dryák, CSc.
ředitel

Telefon: 02-67008497 Fax: 02-67008466

Obr.3.3 Etalón - výrobné číslo 590-01. Obr.3.4 Etalón - výrobné číslo 146-01.

CERTIFIKÁT

Certifikát č.: 931 - OL - 347/97 Typ: CBSS 5 Výrobní č.: 221-07

Technická norma:

Poločas: 584300 dnů

Radionuklid: 226Ra

Aktivita: 3,263 kBq

Hmotnost: 490,0 g

Měrná hmotnost: $0,98 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$

Objem: $500,0 \pm 5,0 \text{ cm}^3$

Radioaktivní nečistoty: -

Referenční datum: 15.9.1997

Kombinovaná standardní nejistota: 1,1 % Homogenita lepší než: 1 %

Popis:

Radioaktivní materiál je homogenně dispergován v silikonovém kaučuku.

Složení matrice: C - 0,324 H - 0,0816 O - 0,216 Si - 0,379 (hmotnostní zlomky)

Měřicí metoda:

Příprava vychází ze standardních roztoků typu ER.

Kontrola je prováděna gama spektrometrií na HpGe detektoru.

Poznámka:

Jako kritérium homogenity je vzata nejistota typu A hodnoty aktivity elementu o objemu 1 cm^3 (pro $n=10$).

Objem je vypočten z hmotnosti.

$1 \text{ g } 226\text{Ra} = 3,658E10 \text{ Bq}$

Datum vydání certifikátu: 18.9.1997

Platnost certifikátu: 1 rok

Zakazník: CHEMMEA s. r. o.
Vrakunská 29
821 06 Bratislava
Slovenská republika



RNDr. Pavel Dryák, CSc.
ředitel

Kontrola
Ing. Petr Kovář

Telefon: 02-67008497 Fax: 02-67008466

CERTIFIKÁT

Certifikát č.: 931 - OL - 193/00 Typ: ER X Výrobní č.: 720-01

Radionuklid	Poločas dny	Měrná aktivita kBq/g	Kombinovaná standardní nejistota, %
241Am	157800	1,865	0,3
109Cd	462,6	3,261	2,1
139Ce	137,5	0,220	0,4
57Co	271,26	0,134	0,6
60Co	1925,4	0,744	0,3
137Cs	11019	0,622	0,6
203Hg	46,72	0,609	2,1
54Mn	312,22	0,490	1,7
113Sn	115,1	0,625	1,7
85Sr	64,78	0,810	1,1
88Y	106,6	1,326	0,5

Hmotnost: 5,1450 g

Radioaktivní nečistoty: gama < 0,1 %

Referenční datum: 1.6.2000

Měřicí metoda:

Etalony typu ER 2 a ER 25 jsou připravovány přímo ze standardních roztoků, jejichž aktivita byla stanovena absolutní metodou. Měrná aktivita etalónů ER 1, ER 3 a ER X je vypočtena z tečného poměru a měrné aktivity standardního roztoku.

Chemické složení:

20 mg/l každého z uvedených prvků v 4 M HCl (kromě Hg - 64 mg/l)

Poznámka:

Datum vydání certifikátu: 19.5.2000

Platnost certifikátu: 1 rok

Zakazník: BIO SPECTRUM PLUS
V záhradách 13
811 02 Bratislava
Slovenská republika



Kontrola: RNDr. R. Bludovský, CSc.
Ing. Petr Kovář

RNDr. Pavel Dryák, CSc.
ředitel

Telefon: 02-67008497 Fax: 02-67008466

Obr.3.5 Etalón - výrobné číslo 221-07. Obr.3.6 Etalón - výrobné číslo 720-01.

Prvá časť prípravy pracovných etalónov prebiehala v rádiochemickom laboratóriu Oddelenia chémie EBO, na váženie vzoriek boli použité digitálne analytické váhy Mettler Toledo s maximálnou meranou váhou 210 g a citlivosťou 0,1 mg. Kvapalným zmesovým etalón ER X 720-01 bol zriedený destilovanou vodou okyslenou HCl na celkovú hmotnosť 100 g. Takto zriedený etalón bol následne rozdelený na štyri časti s rovnakou hmotnosťou, z ktorých každá bola opäť zriedená na 100 g a kontrolne premeraná polovodičovým detektorom. Pripravené kvapalné roztoky boli použité na prípravu štyroch pracovných etalónov, ktorá prebiehala v rádiochemickej časti spektrometrického laboratória Oddelenia radiačnej ochrany EBO, kde merania hmotnosti prebiehali na presných laboratórnych váhach Axis A5000 s maximálnou meranou váhou 5000 g a citlivosťou 0,1 g.

Prvý kvapalným roztok s 25% aktivity etalónu bol použitý na prípravu pracovného etalónu, ktorým bol osiaty a prepraný kremičitý piesok s mernou hmotnosťou $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Postup prípravy pracovného štandardu bol nasledovný :

1. Špeciálny riečny kremičitý piesok používaný v EBO na mechanickú filtráciu vody sa preosial cez sitá s otvormi $\Phi=0,5 \text{ mm}$ a $\Phi=1,0 \text{ mm}$ tak, aby výsledná frakcia získaných zŕn bola 0,5-1,0mm. Takto upravený piesok bol trikrát prepraný v destilovanej vode a následne vysušený na laboratórnych miskách.
2. Potrebné množstvo piesku 4900 g (pre experimentálne merania bol potrebný objem vzorky 3 litre) bolo po presnom zväžení vysypané do laboratórnej misky s rozmermi 80x80 cm tak, aby vznikla rovnomerná vrstva hrúbky približne 0,5 cm.
3. Kvapalným roztok s rádionuklidmi bol zriedený destilovanou vodou okyslenou HCl na objem 2 litre.
4. Tretina zriedeného vodného roztoku bola pipetou rovnomerne nakvapkaná do pripraveného piesku na laboratórnej miske tak, aby bol piesok rovnomerne zmáčaný a aby žiadna časť roztoku nezostala voľne na povrchu a nenarušila sa tým rovnomernosť rozloženia aktivity. Po dokonalom samovoľnom vysušení bola vrstva piesku premiešaná, pričom bola použitá metóda kvartovania - piesok sa rozdelil na šesťnásť rovnakých častí s rozmerom 20x20 cm, ktoré sa postupne preniesli na druhú laboratórnu misku rovnakých rozmerov spôsobom, že každá časť sa rozhrnula na celú plochu misky. Následne sa podobným spôsobom piesok preniesol späť na pôvodnú misku.
5. Postup opísaný v bode 4. sa opakoval trikrát, čím bol do piesku nakvapkaný všetok pripravený vodný roztok s rádionuklidmi. Po poslednom dávkovaní vodného roztoku bol piesok dokonale vysušený a

bola vykonaná homogenizácia piesku metódou kvartovania, ktorá bola opakovaná päť krát.

6. Kontrola homogenity rozloženia aktivity v pripravenom pracovnom etalóne bola uskutočnená meraním desiatich vzoriek s hmotnosťou 250 g odobratých z desiatich rôznych častí misky. Vzorky boli merané v rovnakej geometrii (sklenená nádoba s objemom 250ml) detektorom č.1 a s rovnakou dobou merania 7200 sek. Kontrolné merania preukázali vysokú homogenitu rozloženia aktivity rádionuklidov v pripravenom pracovnom štandarde, odchýlky hodnôt početnosti v porovnávaných píkoch úplnej absorpcie (bolo sledovaných trinásť energií fotónov) od priemerných hodnôt boli v 120 prípadoch z celkového počtu 130 menšie ako 5%. Zostávajúcich 10 prípadov, v ktorých sa odchýlka od priemernej hodnoty početnosti pohybuje v intervale 5 až 8%, pripadá na energie fotónov z intervalu 88 až 514 keV, kde je štandardná neistota početnosti s intervalom spoľahlivosti $P=95\%$ (2σ) na úrovni približne 5% (tab.3.2 a 3.3).
7. Po ukončení kontrolných meraní bol piesok prenesený do uzavierateľnej sklenenej nádoby s objemom 3 litre. Všetky laboratórne pomôcky použité pri príprave etalónu vrátane misiek boli podrobené dlhodobej gamaspektrometrickej analýze, pri ktorej nebola zistená takmer žiadna kontaminácia a aktivita niektorých identifikovaných rádionuklidov bola na úrovni MDA s vysokou štatistickou neistotou.

Tab.3.2 Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – piesok.

Energia [keV]	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie.				
	vzorka č.1	vzorka č.2	vzorka č.3	vzorka č.4	vzorka č.5
59,54	7758,20 ± 2,0%	7802,07 ± 2,0%	8040,94 ± 1,9%	8027,44 ± 2,0%	8285,68 ± 1,9%
88,03	1994,60 ± 4,5%	1905,39 ± 4,7%	2026,33 ± 4,5%	2084,49 ± 4,4%	2080,94 ± 4,4%
122,06	1897,28 ± 4,6%	1812,95 ± 4,7%	1752,14 ± 4,7%	1811,12 ± 4,8%	1935,19 ± 4,5%
165,85	1768,09 ± 4,7%	1875,47 ± 4,5%	1843,41 ± 4,6%	1812,91 ± 4,6%	1791,17 ± 4,5%
279,19	735,01 ± 8,0%	775,44 ± 7,8%	757,23 ± 7,8%	746,23 ± 8,0%	829,12 ± 7,3%
391,69	2173,35 ± 4,0%	2188,17 ± 4,0%	2097,19 ± 4,2%	2032,68 ± 4,3%	2096,56 ± 4,2%
513,99	1699,31 ± 4,9%	1636,55 ± 5,0%	1651,29 ± 5,0%	1545,51 ± 5,2%	1676,38 ± 4,8%
661,65	5099,37 ± 2,6%	5146,16 ± 2,7%	5024,52 ± 2,7%	5199,15 ± 2,6%	5190,97 ± 2,6%
834,83	2877,81 ± 3,6%	2896,79 ± 3,7%	2901,71 ± 3,6%	2955,88 ± 3,6%	2944,71 ± 3,5%
898,02	3318,33 ± 3,4%	3423,50 ± 3,3%	3377,84 ± 3,4%	3271,61 ± 3,4%	3294,57 ± 3,4%
1173,20	4288,80 ± 3,0%	4258,26 ± 3,0%	4229,99 ± 3,0%	4308,07 ± 3,0%	4404,49 ± 2,9%
1332,50	3716,78 ± 3,2%	3903,02 ± 3,2%	3841,48 ± 3,2%	4001,38 ± 3,1%	4023,74 ± 3,1%
1836,00	2129,22 ± 4,3%	2061,23 ± 4,4%	2095,09 ± 4,4%	2124,70 ± 4,3%	2132,67 ± 4,3%
	vzorka č.6	vzorka č.7	vzorka č.8	vzorka č.9	vzorka č.10
59,54	7986,10 ± 1,9%	7940,90 ± 2,0%	8136,96 ± 2,0%	8056,48 ± 2,0%	7745,64 ± 2,0%
88,03	1977,75 ± 4,6%	1930,54 ± 4,7%	2036,72 ± 4,5%	2159,14 ± 4,4%	1955,33 ± 4,5%
122,06	1781,36 ± 4,6%	1797,27 ± 4,7%	1895,75 ± 4,6%	2004,82 ± 4,3%	1905,84 ± 4,5%
165,85	1804,57 ± 4,7%	1717,17 ± 4,8%	1773,93 ± 4,7%	1733,41 ± 4,8%	1797,36 ± 4,6%
279,19	798,22 ± 7,3%	757,33 ± 7,6%	752,04 ± 7,9%	809,57 ± 7,5%	744,75 ± 8,2%
391,69	2151,84 ± 4,1%	2158,08 ± 4,1%	1988,49 ± 4,3%	2095,91 ± 4,2%	2231,85 ± 3,9%
513,99	1661,13 ± 5,0%	1605,60 ± 5,0%	1703,99 ± 4,8%	1541,44 ± 5,2%	1513,40 ± 5,1%
661,65	5258,02 ± 2,6%	5016,80 ± 2,7%	5175,73 ± 2,6%	5200,09 ± 2,6%	5326,47 ± 2,6%
834,83	2998,45 ± 3,5%	3015,97 ± 3,5%	3048,26 ± 3,5%	2876,17 ± 3,7%	2970,98 ± 3,5%
898,02	3322,79 ± 3,4%	3271,76 ± 3,4%	3390,28 ± 3,4%	3278,85 ± 3,4%	3165,10 ± 3,5%
1173,20	4271,10 ± 3,0%	4308,62 ± 3,0%	4317,21 ± 3,0%	4443,03 ± 2,9%	4145,11 ± 3,0%
1332,50	3889,28 ± 3,2%	3865,61 ± 3,1%	3896,76 ± 3,2%	3947,40 ± 3,2%	3868,00 ± 3,1%
1836,00	2209,85 ± 4,2%	2155,54 ± 4,2%	2120,92 ± 4,4%	2090,41 ± 4,4%	2029,09 ± 4,4%

Tab.3.3 Porovnanie početností v píkoch úplnej absorpcie s ich aritmetickým priemerom – piesok.

Energia [keV]	Priemerná početnosť impulzov	Relatívne odchýlky hodnôt početnosti impulzov v píkoch úplnej absorpcie od vypočítaného aritmetického priemeru [%].									
		vz.č.1	vz.č.2	vz.č.3	vz.č.4	vz.č.5	vz.č.6	vz.č.7	vz.č.8	vz.č.9	vz.č.10
59,54	7978,04 ± 1,5%	-2,76	-2,21	0,79	0,62	3,86	0,10	-0,47	1,99	0,98	-2,91
88,03	2015,12 ± 2,8%	-1,02	-5,45	0,56	3,44	3,27	-1,85	-4,20	1,07	7,15	-2,97
122,06	1859,37 ± 3,1%	2,04	-2,50	-5,77	-2,59	4,08	-4,20	-3,34	1,96	7,82	2,50
165,85	1791,75 ± 2,2%	-1,32	4,67	2,88	1,18	-0,03	0,72	-4,16	-0,99	-3,26	0,31
279,19	770,49 ± 3,6%	-4,61	0,64	-1,72	-3,15	7,61	3,60	-1,71	-2,39	5,07	-3,34
391,69	2121,41 ± 2,6%	2,45	3,15	-1,14	-4,18	-1,17	1,43	1,73	-6,27	-1,20	5,21
513,99	1623,46 ± 3,1%	4,67	0,81	1,71	-4,80	3,26	2,32	-1,10	4,96	-5,05	-6,78
661,65	5163,73 ± 1,4%	-1,25	-0,34	-2,70	0,69	0,53	1,83	-2,85	0,23	0,70	3,15
834,83	2948,67 ± 1,7%	-2,40	-1,76	-1,59	0,24	-0,13	1,69	2,28	3,38	-2,46	0,76
898,02	3311,46 ± 1,8%	0,21	3,38	2,00	-1,20	-0,51	0,34	-1,20	2,38	-0,99	-4,42
1173,20	4297,47 ± 1,6%	-0,20	-0,91	-1,57	0,25	2,49	-0,61	0,26	0,46	3,39	-3,55
1332,50	3895,35 ± 1,7%	-4,58	0,20	-1,38	2,72	3,30	-0,16	-0,76	0,04	1,34	-0,70
1836,00	2114,87 ± 2,0%	0,68	-2,54	-0,94	0,46	0,84	4,49	1,92	0,29	-1,16	-4,06

Na prípravu druhého pracovného etalónu boli použité drevené piliny zo smrekového dreva, z ktorých bola presievaním cez sitá oddelená frakcia 0,5-3,0mm. Piliny boli tri krát oprané v destilovanej vode a po dokonalom vysušení bola stanovená ich merná hmotnosť $0,13 \text{ g.cm}^{-3}$. Bolo odvážené potrebné množstvo pilín 400 g, ktoré bolo ďalej upravované podobným spôsobom ako piesok s nasledovnými rozdielmi :

1. Zriedený kvapalný roztok s rádionuklidmi s objemom 2 litre bol do drevených pilín nakvapkaný na dva krát, nakoľko piliny absorbovali jednorázovo väčšie množstvo vody ako piesok.
2. Na kontrolu homogenity bolo použitých desať vzoriek s hmotnosťou 25 g, ostatné parametre merania zostali nezmenené. Odchýlky hodnôt početnosti v porovnávaných píkoch z nameraných spektier od priemerných hodnôt boli v 122 prípadoch z celkového počtu 130 menšie ako 5%. Väčšina zo zostávajúcich 8 prípadov, v ktorých sa odchýlka od priemernej hodnoty početnosti pohybuje v intervale 5 až 7%, pripadá na energie fotónov z intervalu 88 až 514 keV, kde je štandardná neistota početnosti s intervalom spoľahlivosti $P=95\%$ (2σ) na úrovni približne 5% (tab.3.4 a 3.5).

Tab.3.4 Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – drevené piliny.

Energia [keV]	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie.				
	vzorka č.1	vzorka č.2	vzorka č.3	vzorka č.4	vzorka č.5
59,54	18558,09 ± 1,5%	18737,81 ± 1,5%	18988,68 ± 1,5%	19032,39 ± 1,5%	18170,33 ± 1,5%
88,03	4038,71 ± 3,4%	3960,21 ± 3,5%	4035,61 ± 3,4%	4126,22 ± 3,4%	4108,25 ± 3,4%
122,06	3444,98 ± 3,7%	3406,65 ± 3,7%	3554,01 ± 3,6%	3467,18 ± 3,7%	3300,74 ± 3,8%
165,85	2886,67 ± 4,1%	2967,81 ± 4,0%	3017,17 ± 4,0%	2973,21 ± 4,1%	2886,56 ± 4,1%
279,19	1105,01 ± 7,1%	1186,76 ± 6,8%	1128,57 ± 7,0%	1078,68 ± 7,3%	1165,96 ± 6,7%
391,69	3077,07 ± 3,8%	3333,31 ± 3,6%	3214,61 ± 3,7%	2993,93 ± 3,8%	3305,37 ± 3,6%
513,99	2454,31 ± 4,2%	2368,75 ± 4,4%	2293,99 ± 4,5%	2474,88 ± 4,2%	2387,75 ± 4,3%
661,65	7644,98 ± 2,3%	8043,03 ± 2,2%	7716,46 ± 2,3%	7893,86 ± 2,3%	7565,34 ± 2,3%
834,83	4185,03 ± 3,1%	4327,27 ± 3,0%	4331,45 ± 3,0%	4373,65 ± 3,1%	4130,75 ± 3,1%
898,02	4579,17 ± 3,0%	4584,74 ± 3,0%	4671,08 ± 2,9%	4728,86 ± 2,9%	4413,95 ± 3,0%
1173,20	6159,76 ± 2,5%	6235,78 ± 2,5%	6294,57 ± 2,5%	6421,62 ± 2,5%	6212,92 ± 2,5%
1332,50	5684,07 ± 2,6%	5671,86 ± 2,6%	5793,46 ± 2,6%	5854,83 ± 2,6%	5511,31 ± 2,7%
1836,00	2815,85 ± 3,7%	2771,45 ± 3,7%	2897,83 ± 3,7%	2895,94 ± 3,7%	2737,63 ± 3,7%
	vzorka č.6	vzorka č.7	vzorka č.8	vzorka č.9	Vzorka č.10
59,54	18020,64 ± 1,5%	19159,40 ± 1,4%	18774,87 ± 1,5%	19174,28 ± 1,5%	19704,69 ± 1,5%
88,03	3906,84 ± 3,4%	4140,51 ± 3,2%	4061,18 ± 3,3%	4084,65 ± 3,4%	4050,65 ± 3,5%
122,06	3160,90 ± 3,9%	3447,84 ± 3,6%	3395,49 ± 3,7%	3390,13 ± 3,8%	3432,08 ± 3,8%
165,85	2787,53 ± 4,2%	2969,02 ± 3,9%	2879,42 ± 4,0%	2924,61 ± 4,1%	3051,08 ± 4,0%
279,19	1076,87 ± 7,2%	1127,52 ± 6,8%	1093,28 ± 7,0%	1059,85 ± 7,3%	1083,94 ± 7,4%
391,69	3284,08 ± 3,7%	3195,07 ± 3,6%	3247,35 ± 3,6%	3246,21 ± 3,7%	3134,45 ± 3,8%
513,99	2307,47 ± 4,4%	2496,31 ± 4,1%	2393,11 ± 4,2%	2237,97 ± 4,6%	2366,12 ± 4,5%
661,65	7532,33 ± 2,3%	7978,20 ± 2,2%	7808,11 ± 2,2%	7956,58 ± 2,3%	8240,96 ± 2,2%
834,83	4005,06 ± 3,2%	4314,98 ± 3,0%	4253,97 ± 3,0%	4483,18 ± 3,0%	4472,99 ± 3,0%
898,02	4524,08 ± 3,0%	4645,84 ± 2,9%	4611,42 ± 2,9%	4564,64 ± 3,0%	4762,31 ± 2,9%
1173,20	6159,81 ± 2,5%	6399,56 ± 2,4%	6261,04 ± 2,5%	6624,89 ± 2,4%	6551,60 ± 2,5%
1332,50	5670,46 ± 2,6%	5793,14 ± 2,5%	5674,26 ± 2,6%	5857,52 ± 2,6%	6060,50 ± 2,6%
1836,00	2726,53 ± 3,8%	2892,99 ± 3,6%	2793,92 ± 3,7%	2848,31 ± 3,7%	2958,90 ± 3,7%

Tab.3.5 Porovnanie početností v píkoch úplnej absorpcie s ich aritmetickým priemerom – drevené piliny.

Energia [keV]	Priemerná početnosť impulzov	Relatívne odchýlky hodnôt početností impulzov v píkoch úplnej absorpcie od vypočítaného aritmetického priemeru [%].									
		vz.č.1	vz.č.2	vz.č.3	vz.č.4	vz.č.5	vz.č.6	vz.č.7	vz.č.8	vz.č.9	vz.č.10
59,54	18832,12 ± 2,0%	-1,46	-0,50	0,83	1,06	-3,51	-4,31	1,74	-0,30	1,82	4,63
88,03	4051,28 ± 2,7%	-0,31	-2,25	-0,39	1,85	1,41	-3,57	2,20	0,24	0,82	-0,02
122,06	3400,00 ± 3,3%	1,32	0,20	4,53	1,98	-2,92	-7,03	1,41	-0,13	-0,29	0,94
165,85	2934,31 ± 3,4%	-1,62	1,14	2,82	1,33	-1,63	-5,00	1,18	-1,87	-0,33	3,98
279,19	1110,64 ± 5,6%	-0,51	6,85	1,61	-2,88	4,98	-3,04	1,52	-1,56	-4,57	-2,40
391,69	3203,14 ± 3,4%	-3,94	4,06	0,36	-6,53	3,19	2,53	-0,25	1,38	1,34	-2,14
513,99	2378,07 ± 3,8%	3,21	-0,39	-3,54	4,07	0,41	-2,97	4,97	0,63	-5,89	-0,50
661,65	7837,98 ± 2,5%	-2,46	2,62	-1,55	0,71	-3,48	-3,90	1,79	-0,38	1,51	5,14
834,83	4287,83 ± 3,1%	-2,40	0,92	1,02	2,00	-3,66	-6,59	0,63	-0,79	4,56	4,32
898,02	4608,61 ± 2,6%	-0,64	-0,52	1,36	2,61	-4,22	-1,83	0,81	0,06	-0,95	3,34
1173,20	6332,15 ± 2,4%	-2,72	-1,52	-0,59	1,41	-1,88	-2,72	1,06	-1,12	4,62	3,47
1332,50	5757,14 ± 2,5%	-1,27	-1,48	0,63	1,70	-4,27	-1,51	0,63	-1,44	1,74	5,27
1836,00	2833,93 ± 3,2%	-0,64	-2,20	2,25	2,19	-3,40	-3,79	2,08	-1,41	0,51	4,41

Na prípravu tretieho pracovného etalónu boli použité kovové oceľové piliny špeciálne pripravené na tento účel, z ktorých bola presievaním cez sitá oddelená frakcia 0,5-3,0 mm. Piliny neboli čistené ani upravované iným spôsobom, ich merná hmotnosť bola $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$. Bolo odvážené potrebné množstvo pilín 3630 g, ktoré bolo ďalej upravované podobným spôsobom ako piesok s nasledovnými rozdielmi :

1. Zriedený kvapalný roztok s rádionuklidmi s objemom 2 litre bol do kovových pilín nakvapkaný až na štyri krát, nakoľko piliny absorbovali menšie množstvo vody ako piesok.
2. Už po prvom nakvapkaní roztoku piliny skorodovali, čím sa pôvodne sypký materiál zmenil na celistvú zlepenú hmotu, ktorú bolo po vysušení nutné upraveným nerezovým plechom opäť rozdrobiť a následne premiešať metódou kvartovania. Tento krok bolo nutné opakovať po každom nakvapkaní roztoku.
3. Po ukončení dávkovania roztoku a dôkladnom vysušení boli kovové piliny prenesené do uzavierateľnej sklenenej nádoby, pričom bolo zistené, že objem pilín sa prakticky nezmenil, ale ich hmotnosť sa zvýšila na 4080 g. Nárast hmotnosti mohlo spôsobiť iba naviazanie atómov kyslíka na atómy železa pri korózii oceľových pilín počas dávkovania rádioaktívneho roztoku. Pri homogenizácii pilín zároveň dochádzalo k rozpadu väčších pilín na menšie, čo malo pravdepodobne za následok zachovanie rovnakého objemu napriek nárastu hmotnosti. Merná hmotnosť výsledného pracovného etalónu sa tak zmenila na $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$.
4. Na kontrolu homogenity rozloženia aktivity v etalóne bolo použitých desať vzoriek s hmotnosťou 230 g, ostatné parametre merania zostali nezmenené. Odchýlky hodnôt početnosti v porovnávaných píkoch z nameraných spektier od priemerných hodnôt boli v 112 prípadoch z celkového počtu 130 menšie ako 5%. Zo zostávajúcich 18 prípadov, v ktorých sa odchýlka od priemernej hodnoty početnosti pohybuje v intervale 5 až 10%, je 16 prípadov z energetického intervalu 88 až 514 keV, kde je štandardná neistota početnosti s intervalom spoľahlivosti $P=95\%$ (2σ) na úrovni viac ako 5% (tab.3.6 a 3.7).

Tab.3.6 Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – oceľové piliny.

Energia [keV]	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie.				
	vzorka č.1	vzorka č.2	vzorka č.3	vzorka č.4	vzorka č.5
59,54	3030,31 ± 3,8%	2689,33 ± 4,2%	2820,33 ± 4,2%	3023,11 ± 3,9%	3033,71 ± 3,9%
88,03	1329,04 ± 6,4%	1278,23 ± 6,7%	1267,93 ± 6,9%	1320,38 ± 6,7%	1211,05 ± 7,1%
122,06	1551,35 ± 6,0%	1512,34 ± 6,1%	1495,82 ± 6,3%	1581,70 ± 6,0%	1607,61 ± 5,8%
165,85	1545,17 ± 5,9%	1392,66 ± 6,4%	1514,15 ± 6,3%	1649,75 ± 5,8%	1538,31 ± 6,0%
279,19	539,77 ± 11,4%	494,24 ± 12,2%	446,76 ± 13,5%	484,27 ± 12,6%	506,78 ± 12,1%
391,69	1964,32 ± 4,7%	1768,91 ± 5,0%	1805,54 ± 5,1%	1840,80 ± 5,0%	1791,57 ± 5,0%
513,99	1382,71 ± 5,6%	1335,19 ± 5,8%	1304,34 ± 6,1%	1410,57 ± 5,7%	1383,83 ± 5,6%
661,65	5702,46 ± 2,5%	5318,33 ± 2,7%	5373,42 ± 2,7%	5652,47 ± 2,6%	5625,88 ± 2,5%
834,83	3027,53 ± 3,5%	2783,43 ± 3,7%	2927,90 ± 3,7%	3030,13 ± 3,5%	3007,31 ± 3,5%
898,02	2975,62 ± 3,5%	2786,93 ± 3,7%	2786,99 ± 3,8%	3008,18 ± 3,6%	2918,28 ± 3,5%
1173,20	4819,34 ± 2,7%	4411,86 ± 2,8%	4521,75 ± 2,9%	4662,27 ± 2,8%	4676,17 ± 2,7%
1332,50	4341,25 ± 2,8%	4051,72 ± 2,9%	4045,81 ± 3,0%	4253,34 ± 2,9%	4369,49 ± 2,8%
1836,00	1968,74 ± 4,0%	1798,84 ± 4,3%	1846,17 ± 4,4%	1979,07 ± 4,1%	1897,08 ± 4,1%
	vzorka č.6	vzorka č.7	vzorka č.8	vzorka č.9	vzorka č.10
59,54	2911,65 ± 4,0%	2987,46 ± 3,9%	2969,11 ± 4,0%	2928,68 ± 4,1%	2884,86 ± 4,1%
88,03	1291,13 ± 6,8%	1195,82 ± 7,1%	1281,94 ± 7,0%	1388,43 ± 6,6%	1199,33 ± 7,2%
122,06	1558,60 ± 6,0%	1638,64 ± 5,7%	1599,16 ± 6,0%	1543,47 ± 6,1%	1590,26 ± 6,0%
165,85	1507,27 ± 6,1%	1523,73 ± 5,9%	1516,72 ± 6,3%	1508,85 ± 6,3%	1378,53 ± 6,7%
279,19	482,70 ± 12,5%	510,84 ± 11,9%	540,49 ± 11,7%	473,58 ± 13,3%	443,34 ± 13,4%
391,69	1754,55 ± 5,1%	1858,35 ± 4,8%	1819,71 ± 5,1%	1870,27 ± 5,1%	1813,24 ± 5,1%
513,99	1339,17 ± 5,8%	1448,78 ± 5,4%	1257,71 ± 6,4%	1457,12 ± 5,7%	1354,85 ± 6,0%
661,65	5366,34 ± 2,7%	5709,54 ± 2,5%	5531,57 ± 2,7%	5737,07 ± 2,6%	5543,76 ± 2,7%
834,83	2804,67 ± 3,7%	2852,87 ± 3,6%	2855,18 ± 3,7%	2962,71 ± 3,6%	2810,13 ± 3,8%
898,02	2812,10 ± 3,7%	2804,51 ± 3,6%	2858,54 ± 3,7%	2864,37 ± 3,7%	2846,06 ± 3,7%
1173,20	4492,13 ± 2,8%	4727,11 ± 2,7%	4622,87 ± 2,8%	4805,21 ± 2,8%	4475,46 ± 2,9%
1332,50	4089,83 ± 2,9%	4277,05 ± 2,8%	4212,61 ± 2,9%	4281,02 ± 2,9%	4075,35 ± 3,0%
1836,00	1813,17 ± 4,3%	1835,63 ± 4,2%	1843,26 ± 4,3%	1853,02 ± 4,3%	1831,56 ± 4,3%

Tab.3.7 Porovnanie početností v píkoch úplnej absorpcie s ich aritmetickým priemerom – oceľové piliny.

Energia [keV]	Priemerná početnosť impulzov	Relatívne odchýlky hodnôt početnosti impulzov v píkoch úplnej absorpcie od vypočítaného aritmetického priemeru [%].									
		vz.č.1	vz.č.2	vz.č.3	vz.č.4	vz.č.5	vz.č.6	vz.č.7	vz.č.8	vz.č.9	vz.č.10
59,54	2927,85 ± 3,7%	3,50	-8,15	-3,67	3,25	3,62	-0,55	2,04	1,41	0,03	-1,47
88,03	1276,33 ± 5,8%	4,13	0,15	-0,66	3,45	-5,11	1,16	-6,31	0,44	8,78	-6,03
122,06	1567,89 ± 4,7%	-1,06	-3,54	-4,60	0,88	2,53	-0,59	4,51	1,99	-1,56	1,43
165,85	1507,51 ± 5,5%	2,50	-7,62	0,44	9,44	2,04	-0,02	1,08	0,61	0,09	-8,56
279,19	492,28 ± 10,0%	9,65	0,40	-9,25	-1,63	2,95	-1,94	3,77	9,79	-3,80	-9,94
391,69	1828,73 ± 4,2%	7,41	-3,27	-1,27	0,66	-2,03	-4,06	1,62	-0,49	2,27	-0,85
513,99	1367,43 ± 5,1%	1,12	-2,36	-4,61	3,15	1,20	-2,07	5,95	-8,02	6,56	-0,92
661,65	5556,08 ± 2,6%	2,63	-4,28	-3,29	1,73	1,26	-3,42	2,76	-0,44	3,26	-0,22
834,83	2906,19 ± 3,4%	4,18	-4,22	0,75	4,26	3,48	-3,49	-1,83	-1,76	1,94	-3,31
898,02	2866,16 ± 3,2%	3,82	-2,76	-2,76	4,96	1,82	-1,89	-2,15	-0,27	-0,06	-0,70
1173,20	4621,42 ± 2,8%	4,28	-4,53	-2,16	0,88	1,18	-2,80	2,29	0,03	3,98	-3,16
1332,50	4199,75 ± 2,8%	3,37	-3,52	-3,67	1,28	4,04	-2,62	1,84	0,31	1,94	-2,96
1836,00	1866,65 ± 3,7%	5,47	-3,63	-1,10	6,02	1,63	-2,87	-1,66	-1,25	-0,73	-1,88

Kontrolné gamaspektrometrické analýzy použitého laboratórneho materiálu a pomôcok vykonané po skončení prípravy každého pracovného etalónu preukázali minimálnu, takmer nemerateľnú kontamináciu niektorými z použitých rádionuklidov, z čoho vyplýva prakticky 100% záchyt rádionuklidov v pracovných etalónoch. Z tohoto dôvodu nebola potrebná žiadna korekcia aktivity rádionuklidov dávkaných do pracovných etalónov.

3.3. Experimentálne merania.

Všetky vykonané experimentálne merania je možné rozdeliť do troch základných skupín :

1. pomocné merania – kontrolné merania pri spracovaní rádioaktívnych etalónov a príprave meracích štandardov, merania homogenity rozloženia aktivity v etalónoch, kontrolné merania použitých laboratórnych pomôcok a pod. Uvedené merania slúžili na kontrolu správnosti a presnosti jednotlivých krokov a činností pri príprave zariadení a materiálov vstupujúcich do vykonávaných experimentov a v predloženej práci nie sú podrobne popísané.
2. experimentálne merania etalónov z prvej skupiny – boli vykonané na detektoroch so znalosťou presných rozmerov vnútorných častí (det.č.1 a č.4) a slúžili na zhodnotenie možnosti priamej kalibrácie polovodičového detektora pomocou programu GEANT a porovnanie experimentálneho a počítačom simulovaného spektra.
3. experimentálne merania pripravených pracovných štandardov uvedených v druhej skupine – prebiehali na všetkých detektoroch, ich cieľom bolo odskúšať navrhovaný model kalibrácie polovodičového detektora pre meranie veľkoobjemových vzoriek založený na kombinácii jednoduchých experimentálnych meraní a počítačových simulácií a následnom určení korekčných faktorov pre vzorky s rôznou mernou hmotnosťou .

3.3.1 Experimentálne merania etalónov z prvej skupiny.

Na detektoroch č.1 a 4 boli zmerané tri experimentálne spektrá etalónov uvedených v prvej skupine. Usporiadanie a parametre jednotlivých experimentálnych meraní boli nasledovné :

- spektrum č.1 – Det.č.1, zmesný etalón typ CBSS2, silikónový kaučuk vo valcovej PE nádobe s objemom 500ml - výr.č.590-01, etalón umiestnený na čele kryostatu v osi detektora, čas merania 2000 sekúnd.
- spektrum č.2 – Det.č.1, etalón typ CBSS1, ^{152}Eu , silikónový kaučuk vo valcovej PE nádobe s objemom 500ml - výr.č.146-01, etalón umiestnený na čele kryostatu v osi detektora, čas merania 1000 sekúnd
- spektrum č.3 – Det.č.4, etalón typ CBSS5, ^{226}Ra , silikónový kaučuk vo valcovej PE nádobe s objemom 500ml - výr.č.221-07, etalón umiestnený na čele kryostatu v osi detektora, čas merania 2500 sekúnd.

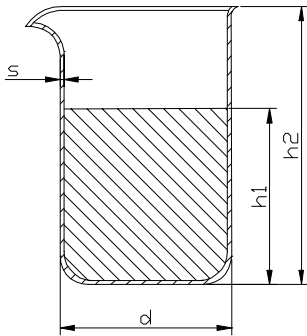
Po skončení merania bolo od každého nameraného spektra odrátané pozadie tak, že od početnosti impulzov v jednotlivých kanáloch spektra bola odrátaná početnosť pozadia zodpovedajúca príslušnej dobe merania spektra. Namerané spektrá pozostávali z 8000 kanálov pokrývajúcich energetický interval 0 až 2000 keV, čo zodpovedá pomeru približne 0,25 keV na jeden kanál. Pred spracovaním spektier a porovnávaním s výsledkami počítačových simulácií boli spektrá prekonvertovaná na 4000 kanálov tak, že boli zrátané početnosti v dvoch po sebe nasledujúcich kanáloch. Na jeden kanál v upravenom spektre tak pripadala energia približne 0,5 keV.

3.3.2 Experimentálne merania pripravených pracovných štandardov uvedených v druhej skupine.

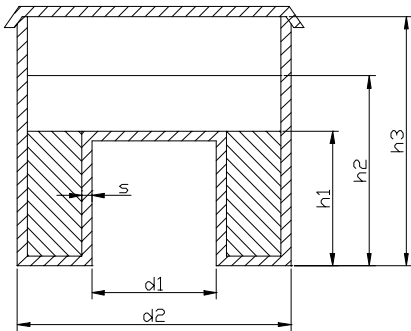
Pri podrobných a časovo náročných experimentálnych meraniach pripravených pracovných štandardov boli zachované rovnaké parametre a nastavenia detektorov a elektroniky ako pri predchádzajúcich meraniach kalibračných etalónov. Pred pridaním aktivity do pripravených materiálov (kremičitý piesok, drevené piliny, oceľové piliny a voda) boli zmerané pozadové spektrá na všetkých detektoroch pre všetky geometrie vzorky.

Po pridaní aktivity boli pripravené štyri pracovné štandardy merané na piatich detektoroch v jedenástich rôznych geometriách (obr.3.7) :

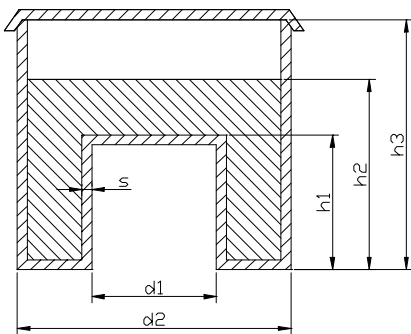
- V250 - valcová geometria - sklenená nádoba s objemom 250 ml
- V500 - valcová geometria - sklenená nádoba s objemom 500 ml
- V1000 - valcová geometria - sklenená nádoba s objemom 1000 ml
- V2000 - valcová geometria - sklenená nádoba s objemom 2000 ml
- V3000 - valcová geometria - sklenená nádoba s objemom 3000 ml
- P500 - prstencová geometria - plastová Marinelliho nádoba s objemom 500 ml so vzorkou iba v spodnej časti nádoby (objem vzorky \cong 320 ml)
- P1000 - prstencová geometria - plastová Marinelliho nádoba s objemom 1000 ml so vzorkou iba v spodnej časti nádoby (objem vzorky \cong 600 ml)
- P3000 - prstencová geometria - nerezová Marinelliho nádoba s objemom 3000 ml so vzorkou iba v spodnej časti nádoby (objem vzorky \cong 1600 ml)
- M500 - Marinelliho geometria - plastová Marinelliho nádoba s objemom 500 ml so vzorkou v spodnej i hornej časti nádoby
- M1000 - Marinelliho geometria - plastová Marinelliho nádoba s objemom 1000 ml so vzorkou v spodnej i hornej časti nádoby
- M3000 - Marinelliho geometria - nerezová Marinelliho nádoba s objemom 3000 ml so vzorkou v spodnej i hornej časti nádoby



Geom.	Rozmery [mm]			
	d	h1	h2	S
V250	60	95	120	1,5
V500	80	110	150	1,0
V1000	95	153	180	1,0
V2000	120	185	240	1,0
V3000	135	230	280	1,0



Rozmery [mm]	Geometria		
	P500	P1000	P3000
d1	86	86	98
d2	124	146	190
h1	66	66	81
h3	100	108	180
s	2	2	1



Rozmery [mm]	Geometria		
	M500	M1000	M3000
d1	86	86	98
d2	124	146	190
h1	66	66	81
h2	82	90	131
h3	100	108	180
s	2	2	1

Obr.3.7 Geometrické parametre vzoriek a nádob použitých na meranie.

Celkovo bolo zmeraných 204 experimentálnych spektier pracovných štandardov. Geometrie v Marinelliho nádobách s objemom 500 a 1000 ml neboli merané detektorom č.1, nakoľko priemer kryostatu tohto detektora bol väčší ako vnútorný priemer otvoru v Marinelliho nádobe. Vzorky boli počas merania umiestnené v uzavretých olovených tieneniach. Pri meraní najväčších geometrií (sklenená nádoba s objemom 2000 a 3000 ml) bolo nutné niektoré tienenia provizórne upraviť. Namerané spektrá boli rozdelené do 8000 kanálov, ktoré pokryli energetický interval 0 až 2000 keV. Doba merania jednotlivých spektier bola rôzna v závislosti od aktivity vzorky, geometrie merania a použitého detektora s cieľom dosiahnuť štatistickú neistotu početnosti impulzov vo všetkých píkoch úplnej absorpcie menšiu ako 5% pri kritériu 2σ . Toto sa podarilo takmer pre všetky energie fotónov a geometrie merania okrem energie 279 keV emitovanej rádionuklidom Hg-203, kde krátky polčas rozpadu a časovo náročné experimentálne merania neumožnili dosiahnuť potrebnú početnosť impulzov, a energie 59 keV pri kovových pilinách, kde sa prejavila výrazná samoabsorpcia fotónov v materiále vzorky. Po experimentálnom zmeraní spektra bolo odrátané príslušné pozadové spektrum a následne vyhodnotená početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie. Na tento krok boli použité štandardné softvérové nástroje obsiahnuté v programe Genie2000, pričom vypočítané hodnoty početnosti boli náhodne porovnávané s manuálne určenými hodnotami. Namerané početnosti impulzov v píkoch úplnej absorpcie slúžili na výpočet experimentálnych hodnôt účinnosti detekcie.

Po čiastočnom vyhodnotení zmeraných a nasimulovaných dát boli vykonané ešte doplňujúce merania s ďalším pracovným štandardom, ktorý bol pripravený zmiešaním olovených guľôčok s priemerom 5mm s kvapalným etalónom obsahujúcim rádionuklidy ^{137}Cs a ^{60}Co . Týmto spôsobom bol pripravený pracovný merací štandard s objemom 1 liter a mernou hmotnosťou $7,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Zmerané boli geometrie V500, V1000, P500, M500, P1000, M1000 na detektoroch č.1, č.3 a č.4 (na det.č.1 boli zmerané iba geometrie V500 a V1000). Doplňujúce merania boli potrebné pre posúdenie vplyvu mernej hmotnosti materiálu vzorky na zmeny hodnoty efektívnej hrúbky vzorky.

3.4. Modelové výpočty.

3.4.1 Počítačový kód GEANT.

Využitie počítačových simulačných výpočtov je v dnešnej dobe neodmysliteľnou súčasťou experimentálnej jadrovej fyziky. Na simuláciu detekcie fotónov polovodičovým detektorom, ktorej výsledky sú prezentované v tejto práci, bol použitý počítačový kód GEANT vyvinutý v CERN-e a dostupný v počítačovej sieti Katedry jadrovej fyziky FMFI UK v Bratislave, kde prebiehali všetky výpočty. GEANT je súbor podprogramov napísaných v programovacom jazyku FORTRAN, ktoré užívateľ musí zahrnúť do ním vytvoreného hlavného programu. Tieto podprogramy sú rozdelené do desiatich sekcií a tvoria základnú štruktúru kódu, ktorý umožňuje :

- jednoduchú konštrukciu experimentálneho zariadenia, ktoré je reprezentované ako štruktúra geometrických útvarov so zadanými rozmermi a vzájomnou polohou a so zadanými parametrami materiálu výplne
- generovanie zvoleného počtu eventov štandardnou metódou Monte Carlo s možnosťou výberu typu, počtu a primárnych parametrov generovaných častíc
- simuláciu prechodu generovaných častíc jednotlivými časťami experimentálneho zariadenia až po dosiahnutie energetického prahu nastaveného pre danú časticu, pričom berie do úvahy všetky relevantné interakcie častíc s hmotným prostredím
- zobrazenie experimentálneho zariadenia a dráhy a interakcií simulovaných častíc
- záznam jednotlivých úsekov dráhy častice, miest interakcií a energetických strát vrátane energie absorbovanej v jednotlivých častiach zariadenia.

V procese simulácie detekcie fotónov z energetického intervalu 60 keV až 2000 keV polovodičovým HPGe detektorom sa môžu vyskytnúť tri typy častíc – fotón, elektrón a pozitron. Všetky uvedené častice mali pri výpočtoch nastavený minimálny možný energetický prah 10 keV. Po poklese energie

častice pod túto hranicu častica zaniká v danom mieste. GEANT neobsahuje žiadny podprogram s automatickým generovaním rozpadovej schémy rádionuklidov, preto musí užívateľ vytvoriť vlastný program s generovaním fotónov podľa rozpadových schém požadovaných rádionuklidov. Výstupom programu môže byť absorbovaná energia v sledovanej časti experimentálneho zariadenia, početnosť častíc, fotónové toky, energetické spektrum detekovaných častíc rozdelené do ľubovoľného počtu kanálov a pod. Výstupné informácie získané zo simulácie môže užívateľ ďalej spracovávať pomocou štandardných matematických a štatistických funkcií obsiahnutých v jazyku FORTRAN.

3.4.2 Parametre modelových výpočtov.

Program umožňujúci modelové výpočty vytvorený pomocou programového balíka GEANT umožňoval viacnásobné opakované spúšťanie simulácií so zmenami vstupných parametrov, medzi ktoré patrí geometria vzorky a merania, rozmery a parametre detektora a kryostatu, energie vznikajúcich fotónov, počet generovaných eventov a pod.

Namodelovaný geometrický setup zahŕňal okrem detektora, kryostatu a nádoby so vzorkou aj presný model oloveného tienenia s vnútornými vrstvami medi, resp. kadmia.

Pre každú geometriu a meraný štandard na všetkých detektoroch boli modelované spektrá pre energie fotónov emitovaných rádionuklidmi obsiahnutými v štandardoch. V prípade kaskádnych žiaričov (^{57}Co , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{152}Eu , ^{226}Ra) boli programovo modelované kaskády fotónov podľa rozpadových schém (Príloha č.3). Zastúpenie jednotlivých energií pri generovaní fotónov bolo určené na základe aktivity rádionuklidov ku dňu zodpovedajúceho experimentálneho merania a na základe pravdepodobnosti jednotlivých energetických hladín [Fir96, Erd79].

Pre objemové meracie štandardy bolo z dôvodu zarátania samoabsorpcie fotónov v materiále vzorky potrebné zadať zloženie matrice, v ktorej bol homogénne rozložený rádioaktívny materiál. Programový súbor GEANT umožňuje zadať zloženie hmotných prostredí dvomi spôsobmi :

- a) Je zadané percentuálne zastúpenie počtu atómov jednotlivých prvkov v molekule zloženej látky. Tento spôsob bol využitý pre zadanie zloženia vody – H_2O a kremičitého piesku - SiO_2 . Prítomnosť zlomkového množstva

ďalších prvkov v kremičitom piesku je možné z hľadiska samoabsorpcie zanedbať [Rap95].

- b) Sú zadané percentuálne hmotnostné zlomky jednotlivých prvkov, z ktorých sa látka skladá. Tento spôsob bol použitý pre zadanie chemického zloženia matrice silikónového kaučuku – C-32,4%, H-8,1%, O-21,6%, Si-37,9% [ČMI97], drevených pilín – C-49,5%, H-6,3%, O-44,2% [Fen89,Bla75], kovových pilín po skorodovaní – FE-89%, O-11%, zmesi olovených guľôčok a vody – Pb-94,6%, H-0,6%, O-4,8%.

Okrem výpočtov s reálnym zložením vzoriek boli uskutočnené aj výpočty, pri ktorých bola reálna vzorka nahradená vákuom. Hodnoty účinnosti detekcie vypočítané pri týchto simuláciách boli použité na výpočet samoabsorpčných faktorov pre jednotlivé geometrie merania a typy vzoriek.

Na konci každého eventu bola zaznamenaná energia E absorbovaná citlivým objemom polovodičového HPGe detektora. Pred započítaním impulzu do modelovaného spektra bol zarátaný vplyv nedokonalého zberu náboja v citlivom objeme detektora a ďalších fluktuácií pri elektronickom spracovaní impulzov pri experimentálnych meraniach, čo má za následok Gaussovo normálne rozloženie impulzov v reálnom spektre. Tento efekt bol pri počítačovom modelovaní riešený tak, že pôvodná hodnota energie E bola nahradená novou hodnotou E' , ktorá bola určená na základe hustoty pravdepodobnosti Gaussovho rozloženia (3.1).

$$f(E', E, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(E' - E)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

Hodnoty rozptylu σ pre jednotlivé energie boli určené podľa vzorca (3.2).

$$\sigma = \frac{FWHM}{2.1,18} \quad (3.2)$$

Hodnota FWHM je závislá od energie podľa vzorca (3.3), kde konštanty a_0 , a_1 boli určené z príslušného experimentálne zmeraného spektra.

$$FWHM = a_0 + a_1\sqrt{E} \quad (3.3)$$

Poradové číslo kanálu K v modelovanom spektre, do ktorého bol následne pripočítaný jeden impulz, bolo určené na základe energetickej kalibrácie (3.4), kde konštanty b_0 , b_1 boli určené z energetickej kalibrácie príslušného experimentálne zmeraného spektra.

$$E' = b_0 + b_1 K, \text{ resp. } K = \frac{(E' - b_0)}{b_1} \quad (3.4)$$

Výsledky výpočtu sa ukladali vo forme dátových súborov obsahujúcich simulované spektrum rozdelené do 4000 kanálov, ktoré pri pomere 0,5 keV na jeden kanál predstavovalo energetický interval 0 až 2000 keV. Počet eventov v troch spektrách porovnávaných s experimentálnymi spektrami etalónov sa rovnal desaťnásobku reálneho počtu rádioaktívnych rozpadov počas experimentálneho merania. Po ukončení simulácie týchto spektier bola početnosť impulzov v jednotlivých kanáloch predelená desiatimi. Početnosť v píkoch úplnej absorpcie bola určená ako rozdiel celkovej početnosti vo vybraných kanáloch a Comptonovského pozadia pod píkom. Počet simulovaných eventov v ostatných spektrách sa pohyboval v intervale $1 \cdot 10^6$ až $2 \cdot 10^8$, aby početnosť impulzov ani v najslabších píkoch úplnej absorpcie nebola menšia ako 10000. Z týchto hodnôt boli vypočítané modelované hodnoty účinnosti detekcie, ktoré slúžili na odskúšanie a verifikáciu metódy účinnostnej kalibrácie polovodičových detektorov založenej na počítačovom určení samoabsorpčných faktorov v kombinácii s jednoduchými experimentálnymi meraniami.

4. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY, DISKUSIA.

4.1. Porovnanie experimentálne zmeraných a simulovaných spektier kalibračných etalónov.

Pomocou pripravených meracích štandardov boli uskutočnené dve experimentálne gamaspektrometrické merania na detektore č.1 a jedno meranie na detektore č.4, ku ktorým boli výrobcami dodané výrobné výkresy a boli známe rozmery vnútorných častí kryostatu.

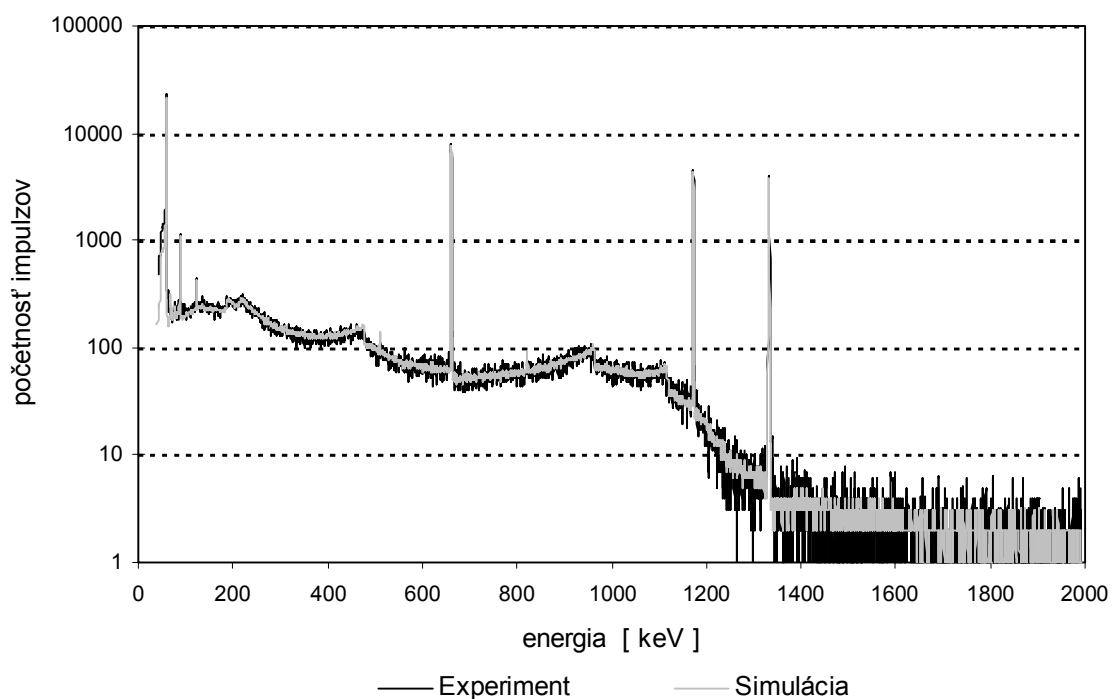
Použité boli tri kalibračné etalóny valcovej geometrie s objemom 500 ml položené na čele detektora, kde rádioaktívny materiál bol rovnomerne rozložený v matrici zo silikónového kaučuku. Výsledkom meraní boli tri reálne spektrá polovodičového HPGe detektora. Spektrá boli spracované spektrometrickým softvérom Genie 2000, ktorý umožňuje okrem vyhodnotenia spektier a určenia početnosti v píkoch úplnej absorpcie tiež výpis početnosti impulzov v jednotlivých kanáloch zmeraného spektra vo forme dátového súboru.

Pomocou pripraveného programu s využitím programového súboru GEANT boli uskutočnené tri modelové výpočty s rovnakými geometrickými rozmermi a parametrami ako pri reálnych meraniach. V prípade kaskádnych žiaričov boli generátorom fotónov generované celé kaskády podľa rozpadovej schémy, aby boli vo výpočte zahrnuté aj sumačné efekty. Počet simulácií bol desaťnásobkom počtu rádioaktívnych rozpadov, ktoré nastali počas reálneho experimentálneho merania spektra. Po ukončení poslednej simulácie bola početnosť impulzov v jednotlivých kanáloch simulovaného spektra predelená desiatimi. Výsledkom výpočtov sú namodelované spektrá polovodičových detektorov vo forme dátových súborov s početnosťami v jednotlivých kanáloch.

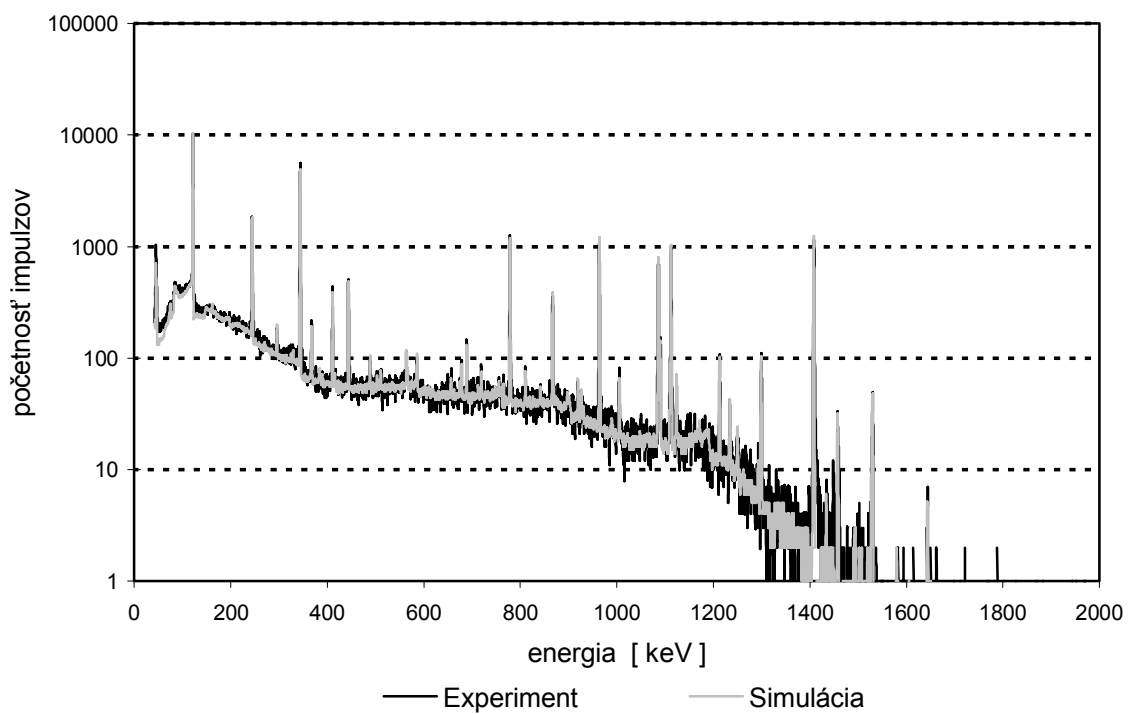
Experimentálne zmerané a počítačom simulované spektrá boli porovnané graficky (tvar spektra) a numericky (celková početnosť impulzov v spektre, početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie fotónov emitovaných rádionuklidmi obsiahnutými v kalibračných etalónoch).

4.1.1 Grafické porovnanie.

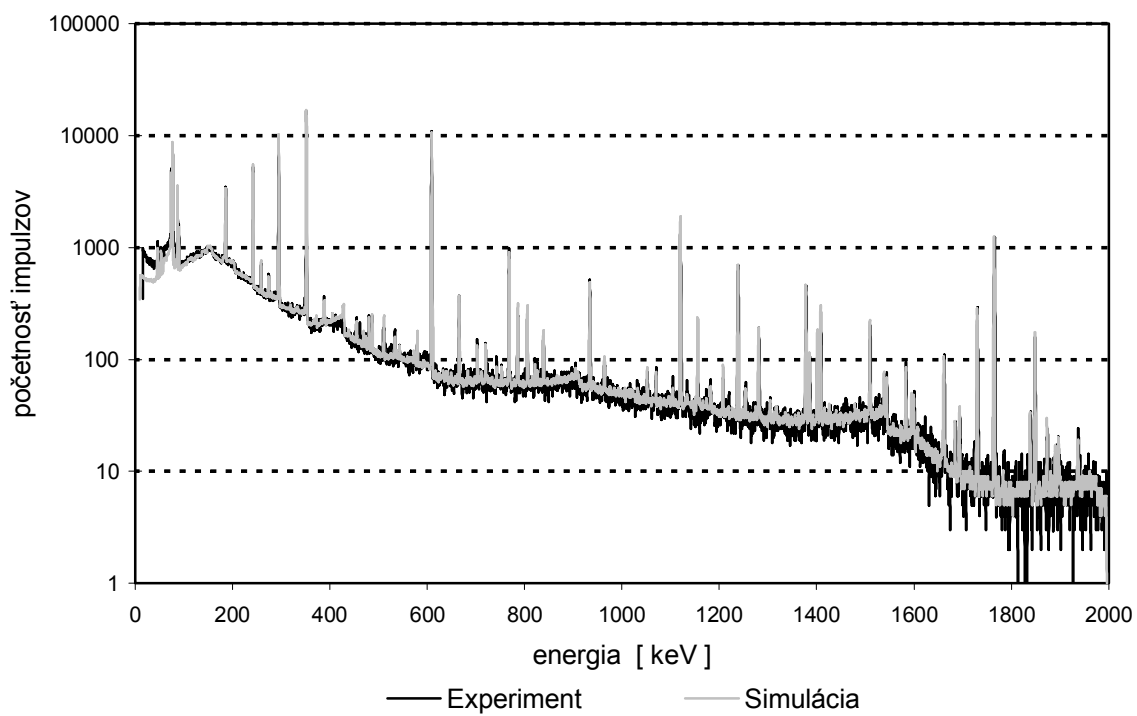
Na porovnanie tvaru spektier boli zostrojené grafy, kde sú súčasne zobrazené experimentálne zmerané i počítačom simulované spektrá – obr.4.1 až 4.3.



Obr.4.1 Spektrum č.1 – det.č.1, zmesný etalón ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs .



Obr.4.2 Spektrum č.2 – det.č.1, etalón ^{152}Eu .



Obr.4.3 Spektrum č.3 – det.č.4, etalón ^{226}Ra .

Po porovnaní spektier na jednotlivých grafoch možno konštatovať :

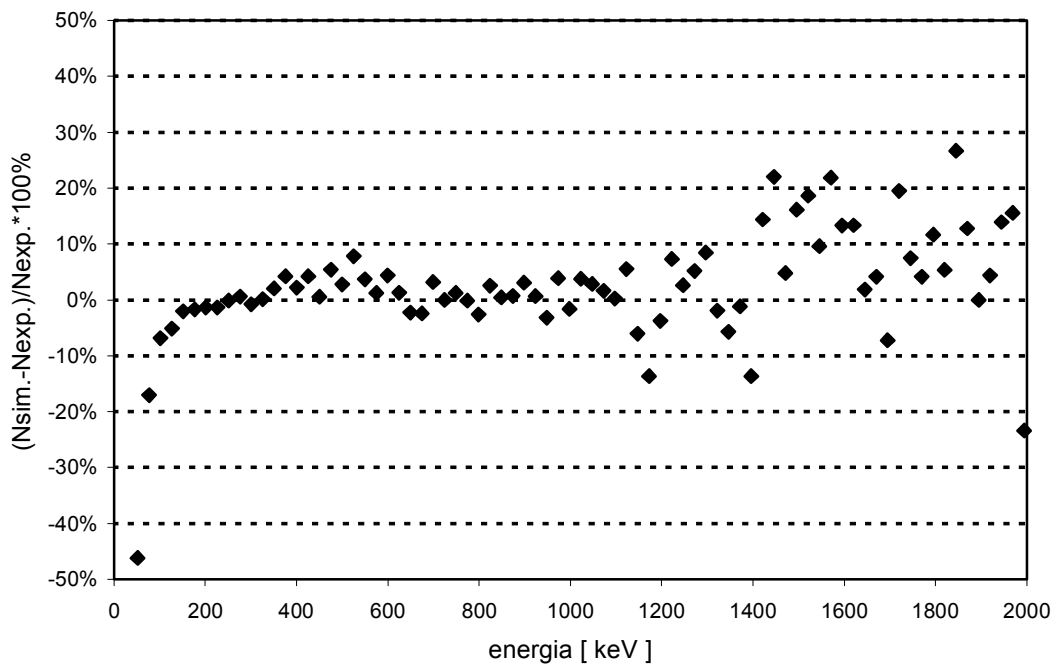
- V energetickej oblasti do 100 keV je početnosť v simulovaných spektrách vo všetkých prípadoch nižšia ako početnosť v experimentálne zmeraných spektrách.
- Comptonova hrana, píky spätného rozptylu a pre energie fotónov nad 1022 keV píky prvého a druhého úniku sú v modelovaných spektrách ostrejšie a výraznejšie ako v experimentálne zmeraných (obr.4.1). Tento rozdiel môže byť spôsobený skreslením napätových impulzov z polovodičového detektora pri elektronickom spracovaní spektrometrickou aparátúrou a tiež skutočnosťou, že v programe GEANT použitom na modelové výpočty je spodný energetický prah pre fotóny a elektróny 10 keV [CERN93].
- V experimentálnych spektrách je u niektorých píkov úplnej absorpcie s energiou nad 1 MeV viditeľné mierne rozšírenie v spodnej časti píku, čo nepozorujeme v simulovaných spektrách. Toto mierne rozšírenie mohlo byť spôsobené nie úplne dokonalým nastavením všetkých parametrov jednotlivých častí spektrometrickej aparátúry, predovšetkým zosilňovača, pri experimentálnych meraniach.

4.1.2 Numerické porovnanie.

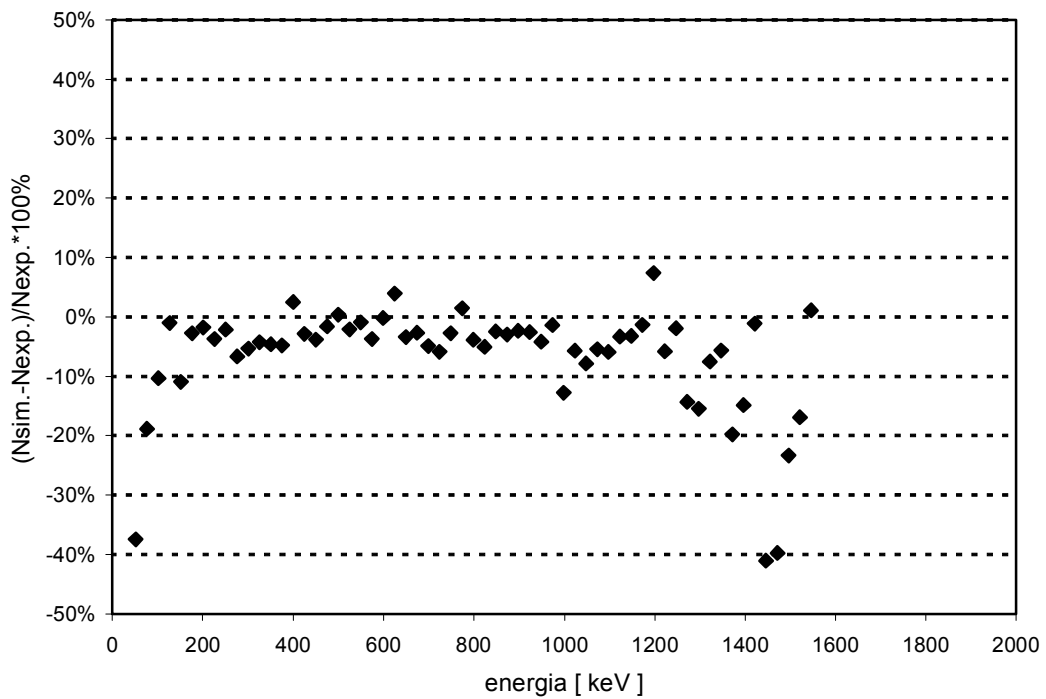
Početnosť impulzov v experimentálne zmeraných a simulovaných spektrách bola porovnávaná tromi spôsobmi :

- početnosť impulzov v päťdesiatich po sebe nasledujúcich kanáloch
- početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie
- celková početnosť impulzov v spektre a početnosť v energetickej oblasti nad 100 keV.

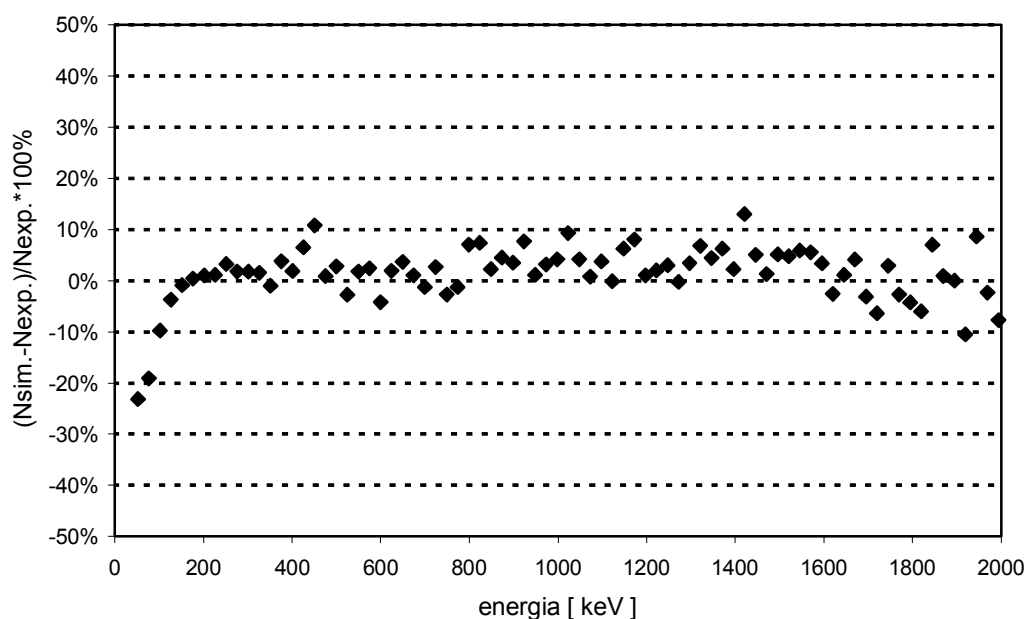
Na obr. 4.4 až 4.6 je porovnaná početnosť v päťdesiatich po sebe nasledujúcich kanáloch spektier nasledovným spôsobom – spektrá boli rozdelené na 80 intervalov po 50 kanálov (približne 25 keV na jeden interval), bola zrátaná početnosť impulzov v jednotlivých intervaloch N_{sim} a N_{exp} a v grafoch je zobrazený percentuálny rozdiel týchto početností $(N_{sim}-N_{exp})/N_{exp} * 100\%$. Na všetkých grafoch je viditeľná menšia početnosť impulzov v simulovaných spektrách v oblasti pod 100 keV.



Obr.4.4 Porovnanie počtostí v energetických intervaloch - spektrum č.1.



Obr.4.5 Porovnanie počtostí v energetických intervaloch - spektrum č.2.



Obr.4.6 Porovnanie početností v energetických intervaloch - spektrum č.3.

Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie a celková početnosť impulzov v modelovaných a experimentálne zmeraných spektrách je porovnaná v tabuľkách č.4.1 až 4.3. Každá tabuľka zodpovedá jednému spektru. V prvej časti tabuľky je zoznam rádionuklidov obsiahnutých v príslušnom meracom štandarde a energie nimi emitovaných fotónov (sú vybrané iba energie s väčšou pravdepodobnosťou emisie fotónu a dostatočnou početnosťou impulzov v píku úplnej absorpcie). Ku každej energii je uvedená početnosť impulzov v píku úplnej absorpcie po odrátaní Comptonovského kontinua v experimentálnom i simulovanom spektre. V poslednom stĺpci každej tabuľky je uvedený rozdiel experimentálne zmeraných a počítačom simulovaných početností vzťahnutý percentuálne k experimentálnemu údaju. V druhej časti tabuľky je uvedená celková početnosť v spektre (interval 0 až 2000 keV) a celková početnosť v spektre pre energie nad 100 keV (interval 100 až 2000 keV).

Tab.4.1 Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – spektrum č.1.

Nuklid	Energia [keV]	Početnosť impulzov		Rozdiel [%]
		exp. údaje	poč. údaje	
Am-241	59,54	51284	47910	-6,58
Cd-109	88,03	2170	2208	1,75
Co-57	122,06	497	519	4,43
Cs-137	661,66	25343	25222	-0,48
Co-60	1173,24	17434	17077	-2,05
Co-60	1332,50	15958	15643	-1,97
energetický interval 0 až 2000 keV		409246	385986	-5,68
energetický interval 100 až 2000 keV		293937	292729	-0,41

Tab.4.2 Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – spektrum č.2.

Nuklid	Energia [keV]	Početnosť impulzov		Rozdiel [%]
		exp. údaje	poč. údaje	
Eu-152	121,78	24099	24547	1,86
	244,70	4596	4967	8,07
	344,28	15325	15104	-1,44
	411,12	1064	1104	3,76
	443,98	1445	1337	-7,47
	778,90	4236	4106	-3,07
	867,39	1232	1227	-0,41
	964,13	4184	4435	6,00
	1085,91	2912	2807	-3,61
	1112,12	3577	3572	-0,14
	1408,01	4919	5112	3,92
energetický interval 0 až 2000 keV		286354	271446	-5,21
energetický interval 100 až 2000 keV		250324	241772	-3,42

Tab.4.3 Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – spektrum č.3.

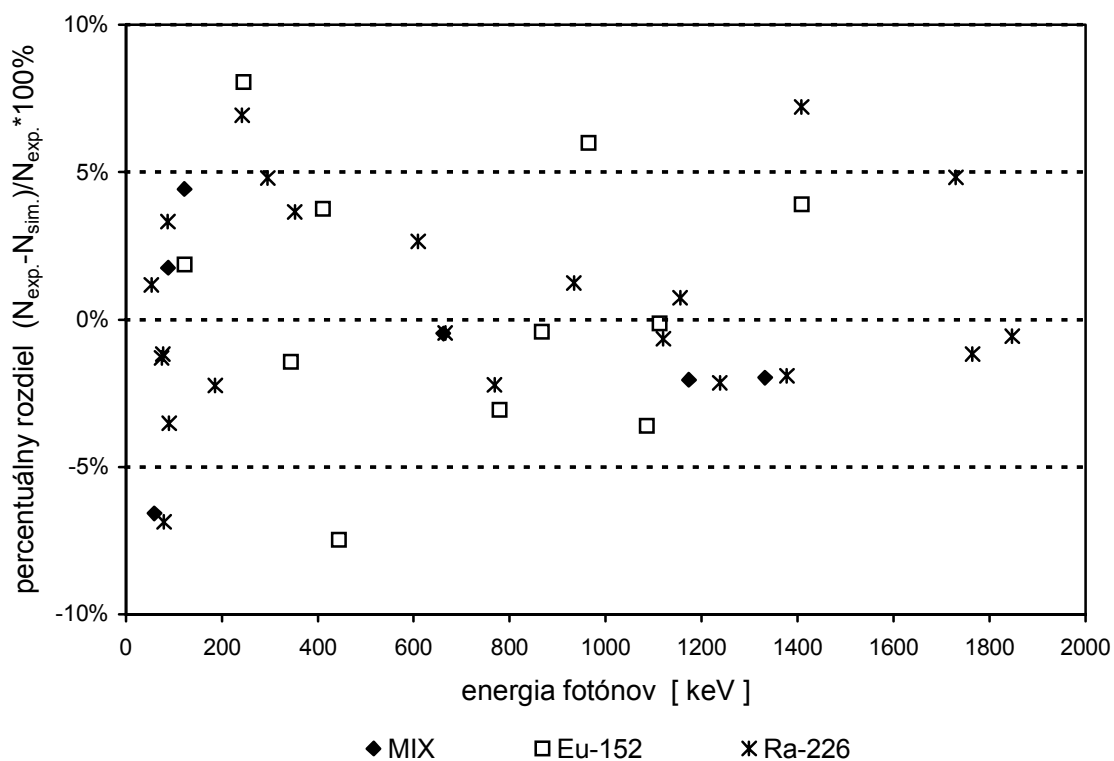
Nuklid	Energia [keV]	Početnosť impulzov		Rozdiel [%]
		exp. údaje	poč. údaje	
Ra-226	53,23	676	684	1,18
	74,82	7989	7885	-1,30
	77,11	13697	13536	-1,18
	79,29	655	610	-6,87
	87,30	5307	5483	3,32
	89,80	2096	2022	-3,53
	186,21	5968	5834	-2,25
	241,98	10157	10862	6,94
	295,21	22734	23827	4,81
	351,92	38364	39766	3,65
	609,31	29866	30660	2,66
	665,45	857	853	-0,47
	768,36	2606	2548	-2,23
	934,06	1448	1466	1,24
	1120,30	6366	6324	-0,66
	1155,20	682	687	0,73
	1238,10	2375	2324	-2,15
	1377,70	1628	1597	-1,90
	1408,00	873	936	7,22
	1729,60	1057	1108	4,82
1764,50	5053	4994	-1,17	
1847,40	701	697	-0,57	
energetický interval 0 až 2000 keV		771136	754383	-2,17
energetický interval 100 až 2000 keV		598883	608021	1,53

Z porovnania experimentálnych a simulovaných údajov vyplýva :

- V simulovaných spektrách je v energetickej oblasti 0 až 100 keV početnosť Comptonovského kontinua nižšia od experimentálnej o 10 až 40 %. Toto však neplatí pre početnosť v píkoch úplnej absorpcie fotónov s energiou nižšou ako 100 keV, kde sa experimentálna a simulovaná početnosť zhoduje na rovnakej úrovni ako pri vyšších energiách fotónov. Tieto vlastnosti simulovaného spektra pravdepodobne spôsobila prítomnosťou významne zastúpených röntgenových čiar s energiou menšou ako 50 keV v spektre meraných rádionuklidov, ktoré neboli zahrnuté do modelových výpočtov a tiež menšia presnosť výpočtov programom GEANT v oblasti nízkych energií blízky energetickým prahom simulovaných častíc. Veľmi dobrá zhoda výsledkov v prípade píkov úplnej absorpcie v nízkoenergetickej oblasti dokazuje, že znalosť

rozmerov vnútorných častí kryostatu detektora vo veľkej miere eliminuje vplyv nepresností v hrúbke jednotlivých materiálov medzi meranou vzorkou a citlivým objemom detektora. Zdrojom nepresností stále zostáva mŕtva vrstva germánia na povrchu kryštálu (platí pre P-typ polovodičového HPGe detektora), ktorej hrúbka nie je na všetkých miestach povrchu germániového kryštálu rovnaká a výrobca udáva iba jej približnú hodnotu.

- V energetickej oblasti nad 100 keV je možné pozorovať veľmi dobrú zhodu experimentálnej a simulovanej početnosti v intervaloch, na ktoré boli spektrá rozdelené. Odchýlka početností vzťahovaná percentuálne k experimentálnym hodnotám neprevyšuje úroveň 10%. Vyššie odchýlky v oblasti vysokých energií sú spôsobené malým počtom impulzov (menej ako 5 impulzov na kanál, čo je na úrovni variácií prirodzeného pozadia), z čoho vyplýva veľká štatistická neistota hodnôt.
- Z údajov o celkovej početnosti impulzov v spektre vyplýva, že rozdiel medzi celkovou početnosťou (energetický interval 0 až 2000 keV) v experimentálnych a modelovaných spektrách nepresiahol ani v jednom prípade hodnotu $\pm 10\%$. Početnosť v spektre pre energie väčšie ako 100 keV (energetický interval 100 až 2000 keV) sa v experimentálnych a modelovaných spektrách zhoduje v rámci intervalu $\pm 5\%$. Minimálne nadhodnotenie alebo podhodnotenie celkovej početnosti v simulovaných spektrách bolo spôsobené malými rozdielmi niektorých rozmerov skutočného a modelového setupu. Najväčší vplyv malo určenie hrúbky mŕtvej vrstvy germánia, príspevkom k nepresnostiam boli tiež PE nádoby s rádioaktívnymi štandardmi, ktoré mali iba približne valcový tvar s premenlivou hrúbkou steny, ale modelované boli ako dokonalý valec s konštantnou hrúbkou steny.
- Vo všetkých spektrách spolu bola porovnaná početnosť impulzov v 39 píkoch úplnej absorpcie fotónov emitovaných prítomnými rádionuklidmi. V siedmich prípadoch bol rozdiel experimentálnej a modelovanej početnosti v rozmedzí 5 až 8%, pri ostatných píkoch bol rozdiel početností menší ako 5% (obr.4.7).



Obr.4.7 Porovnanie experimentálnej a simulovanej početnosti impulzov v píkoch úplnej absorpcie.

Dosiahnuté výsledky ukazujú veľmi dobrú zhodu počítačom simulovaných a experimentálne zmeraných spektier. Jedinou oblasťou, kde sa prejavili viditeľné rozdiely, je početnosť impulzov v Comptonovskom pozadí v energetickej oblasti pod 100 keV. Ukázalo sa, že znalosť parametrov vnútorných častí kryostatu detektora umožňuje pri kalibrácii metódou Monte Carlo počítačovým kódom Geant získať výsledky porovnateľné s najpresnejšími metódami popísanými v literatúre v celom energetickom spektre vrátane nízkych energií [Abb01,Wan97].

4.2. Samoabsorpčné faktory a ich využitie pri kalibrácii polovodičových detektorov.

Úspešnosť priamej kalibrácie polovodičového detektora pomocou metódy Monte Carlo je hlavne v oblasti nízkych energií fotónov podmienená dobrou znalosťou geometrických parametrov experimentálneho zariadenia vrátane vnútorných rozmerov kryostatu detektora. Najmä u starších detektorov je zistenie všetkých potrebných parametrov problematické, preto ďalším cieľom dizertačnej práce bolo navrhnúť a verifikovať kalibračnú metódu eliminujúcu potrebu znalosti týchto rozmerov. Na kalibráciu polovodičových detektorov pre meranie vzoriek s rôznou mernou hmotnosťou v rovnakej geometrii by bola veľmi efektívna metóda využívajúca výsledky jednoduchých experimentálnych meraní a korekčné samoabsorpčné faktory f_s simulované počítačom. Na všeobecné použitie tejto metódy však bolo nutné zistiť závislosť efektívnej hrúbky vzorky X_{ef} pre rôzne geometrie vzorky od všetkých meniacich sa parametrov – typ a parametre detektora, zloženie a merná hmotnosť materiálu vzorky a energia detekovaných fotónov.

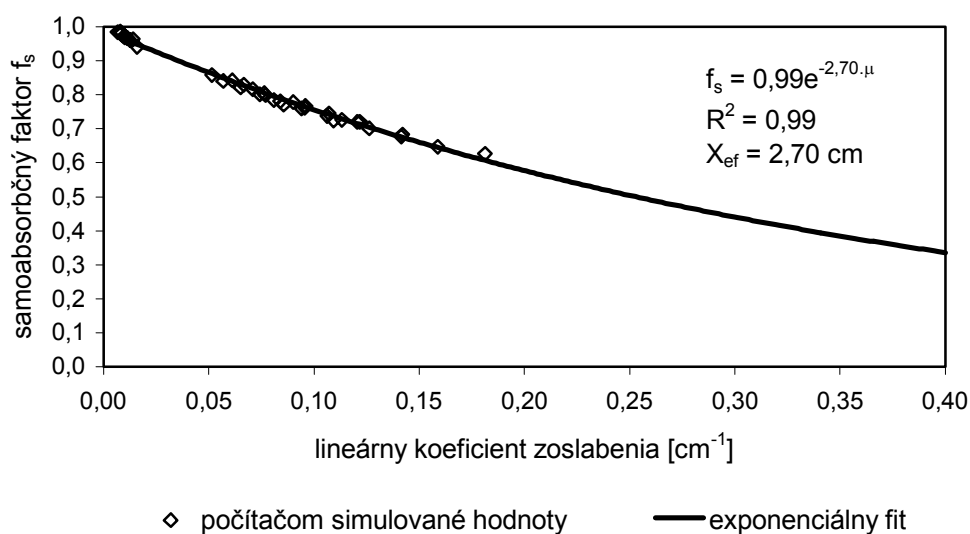
Závislosť samoabsorpčných faktorov od niektorých parametrov bola čiastočne popísaná v literatúre, avšak teoretické výpočty i porovnávacie experimentálne merania boli vykonané iba na jednom, resp. dvoch polovodičových detektoroch a pre geometrie relatívne malých rozmerov, kde sa vplyv samoabsorpcie vo vzorke prejaví výrazne iba v oblasti nízkych energií fotónov [Nak83 – valcová geometria $V=90\text{ml}$, Ge(Li) detektory s rel. účinnosťou 8% a 18% ; Sim90 – Marinelliho geometria $V=450\text{ml}$, HPGe detektor s rel. účinnosťou 14%]. Na základe malého súboru publikovaných údajov je problematické posúdiť energetickú (ne)závislosť samoabsorpčných faktorov, resp. vplyv ďalších parametrov.

Za účelom reprezentatívnosti získaných dát boli teoretické výpočty aj experimentálne merania vykonané na piatich polovodičových detektoroch s rel. účinnosťou v rozsahu 10% až 65% vrátane jedného ReGe detektora. Boli pripravené štyri pracovné etalóny s rôznym zložením a rôznou mernou hmotnosťou obsahujúce 11 rádionuklidov emitujúcich 13 dostatočne zastúpených a merateľných energií fotónov. Po čiastočnom vyhodnotení získaných dát bol pripravený ďalší pracovný etalón kombináciou olovených guľôčok a rádioaktívneho roztoku s obsahom dvoch rádionuklidov. Pripravené etalóny boli zmerané v jedenástich geometriách (valcová, prstencová a Marinelliho) s objemom vzorky 250ml až 3000ml. Nádoby, v ktorých boli

vzorky merané, boli vyrobené z rôznych materiálov – sklo, polyetylén, nehrdzavejúca oceľ. Uvedený rozsah získaných údajov a výrazná variabilita vstupných parametrov by mali byť dostatočnou zárukou pre správnu interpretáciu získaných výsledkov a pre verifikáciu navrhovaných kalibračných postupov a metód.

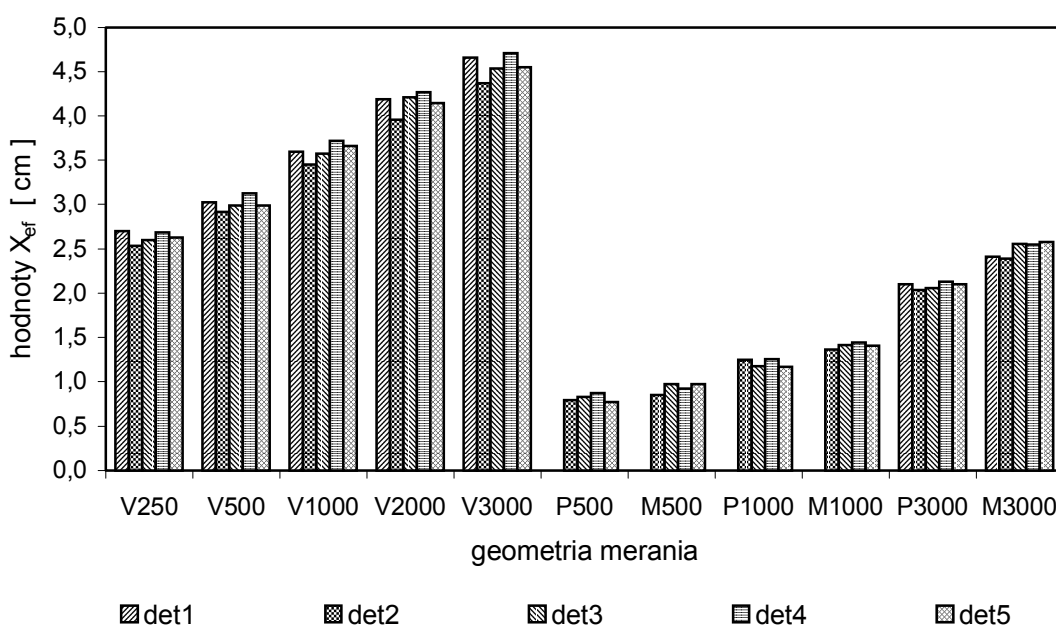
4.2.1 Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od typu detektora, zloženia vzorky a energie fotónov.

Základným predpokladom využitia samoabsorpčných faktorov v procese kalibrácie polovodičového detektora je znalosť závislosti hodnoty X_{ef} od všetkých vstupujúcich parametrov – energia fotónov, parametre detektora, zloženie vzorky. Aby tieto závislosti boli ohodnotené, boli vykonané počítačové simulácie všetkých experimentálnych meraní pripravených pracovných etalónov. Okrem toho boli počítačom simulované merania, kde vzorka bola nahradená vákuom, čo umožnilo z nasimulovaných dát získať hodnoty samoabsorpčných faktorov. Exponenciálnymi fitmi metódou najmenších štvorcov získaných závislostí $f_s(\mu)$ boli určené hodnoty X_{ef} pre rôzne detektory, zloženia vzorky a energie fotónov (príklad fitu je na obr.4.8). Po ukončení všetkých počítačových simulácií a vypočítaní potrebných hodnôt X_{ef} z exponenciálnych fitov bolo možné pozorovať závislosť X_{ef} od jednotlivých vstupných parametrov.



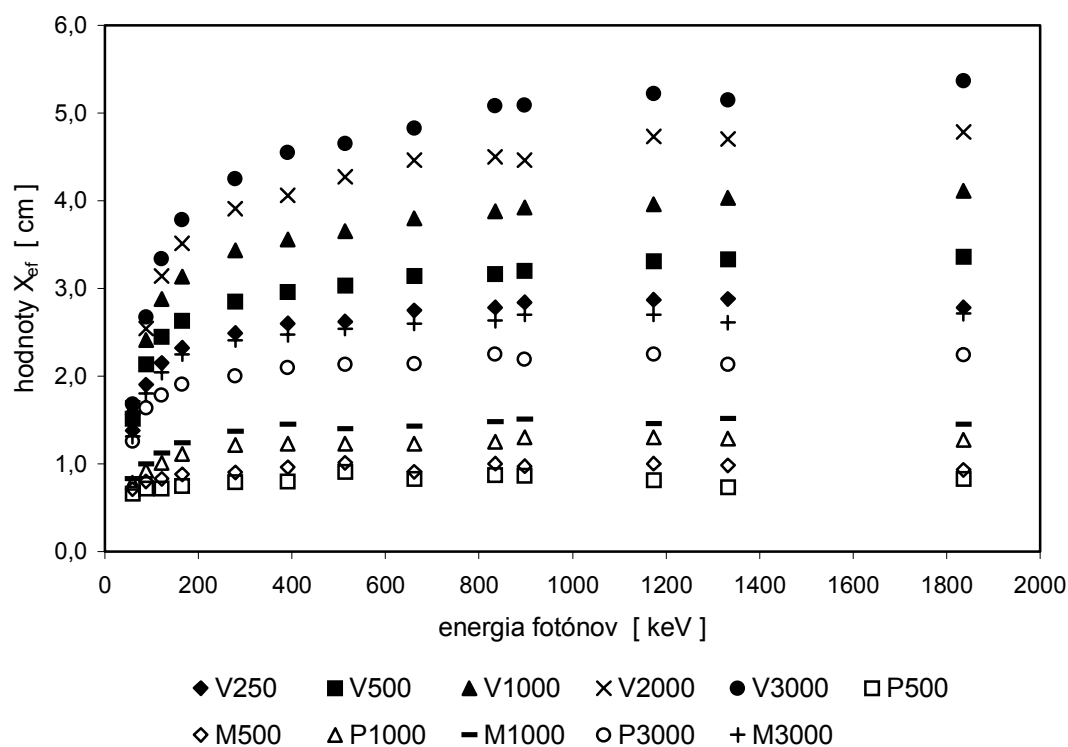
Obr.4.8 Závislosť $f_s(\mu)$ – detektor č.1, geometria V025, všetky zloženia vzorky a energie fotónov.

Na obr.4.9 sú zobrazené hodnoty X_{ef} pre jednotlivé geometrie merania v závislosti od typu a parametrov použitého polovodičového detektora. Do výpočtu hodnôt X_{ef} pre jednotlivé detektory boli zahrnuté samoabsorpčné faktory určené pre všetky energie fotónov a pre všetky zloženia vzoriek. Pri porovnávaní hodnôt X_{ef} na obr.4.9 je možné pre valcové geometrie pozorovať isté systematické rozdiely v závislosti od typu detektora, avšak tieto rozdiely sa pohybujú len na úrovni niekoľkých percent. V prípade prstencových a Marinelliho geometrií sú rozdiely ešte menšie, bez systematického usporiadania a pravdepodobne sú dôsledkom štatistických neistôt hodnôt vstupujúcich do exponenciálnych fitov.



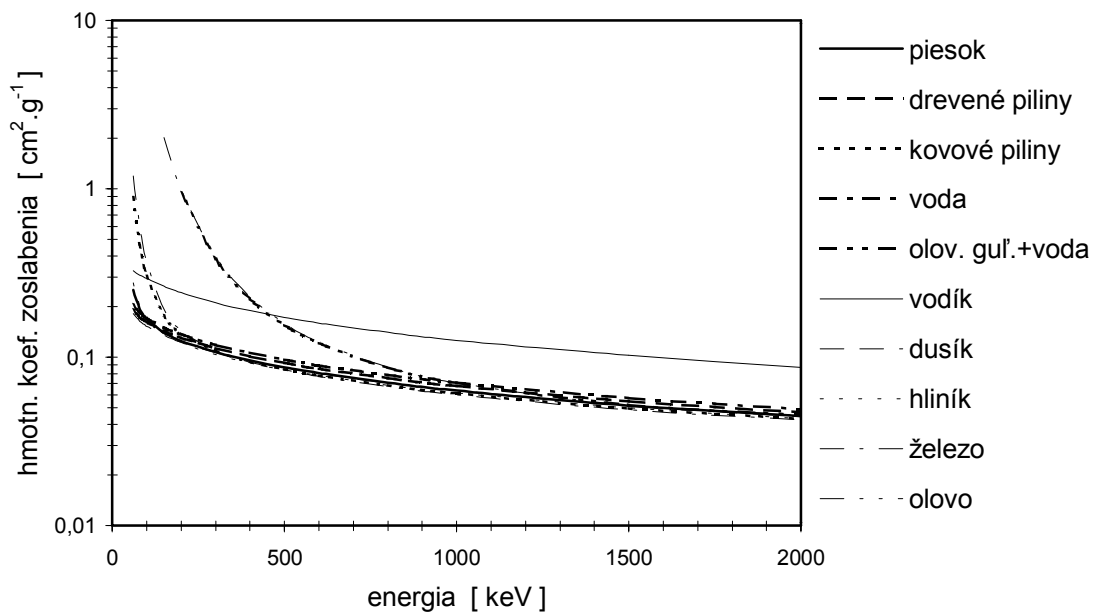
Obr.4.9 Závislosť hodnoty X_{ef} od parametrov detektora.

Závislosť hodnôt X_{ef} od energie fotónov je zobrazená na obr.4.10. Do výpočtov pre jednotlivé energie boli zahrnuté samoabsorpčné faktory pre všetky detektory a zloženia vzoriek. Pre geometrie menších rozmerov, predovšetkým prstencové a Marinelliho, je viditeľná iba veľmi malá závislosť pre nízke energie fotónov a takmer stabilná hodnota X_{ef} pre energie väčšie ako 200 keV. S rastúcimi rozmermi sa však zvyrazňuje energetická závislosť hodnoty X_{ef} a pre najväčšie geometrie je viditeľný nárast hodnoty v celom energetickom spektre až po energiu 1836 keV. Z uvedeného vyplýva, že vo všeobecnosti nie je možné konštatovať energetickú nezávislosť hodnoty X_{ef} a ani určiť energetickú hranicu, od ktorej možno hodnotu X_{ef} považovať za konštantnú.

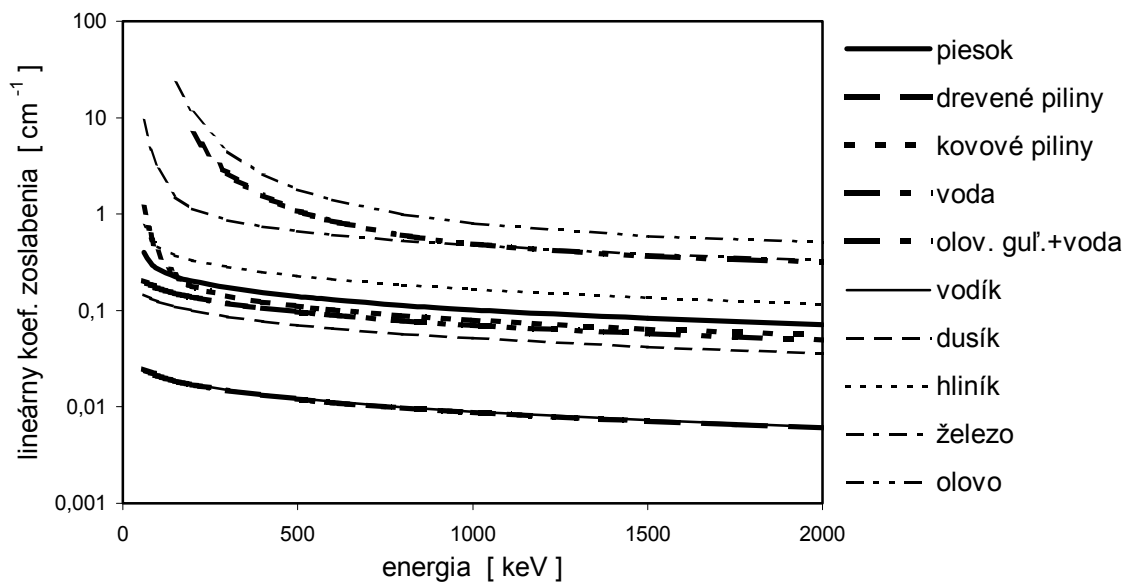


Obr.4.10 Závislosť hodnoty X_{ef} od energie fotónov.

Posledným parametrom, ktorý môže ovplyvniť hodnotu X_{ef} pre danú geometriu merania, sú vlastnosti materiálu vzorky. Z hľadiska samoabsorpcie fotónov v materiále vzorky sú dôležité hmotnostné zastúpenie jednotlivých prvkov v materiále vzorky a výsledná merná hmotnosť vzorky. Po porovnaní závislosti hmotnostného koeficientu zoslabenia od energie fotónov pre materiály pracovných etalónov a ďalšie prvky (obr.4.11) [Nem75] je zrejmé, že pre štandardne monitorované vzorky neobsahujúce vysoké množstvo vodíka alebo ťažkých kovov je zastúpenie jednotlivých prvkov dôležité iba v oblasti nízkych energií. Dôležitejšia je presná znalosť mernej hmotnosti materiálu vzorky, ktorá ovplyvňuje hodnotu lineárneho koeficientu zoslabenia (obr.4.12). Z uvedených dôvodov boli pracovné etalóny pripravené z materiálov pokrývajúcich čo najväčší interval mernej hmotnosti od 0,13 do 7,0 g.cm⁻³.

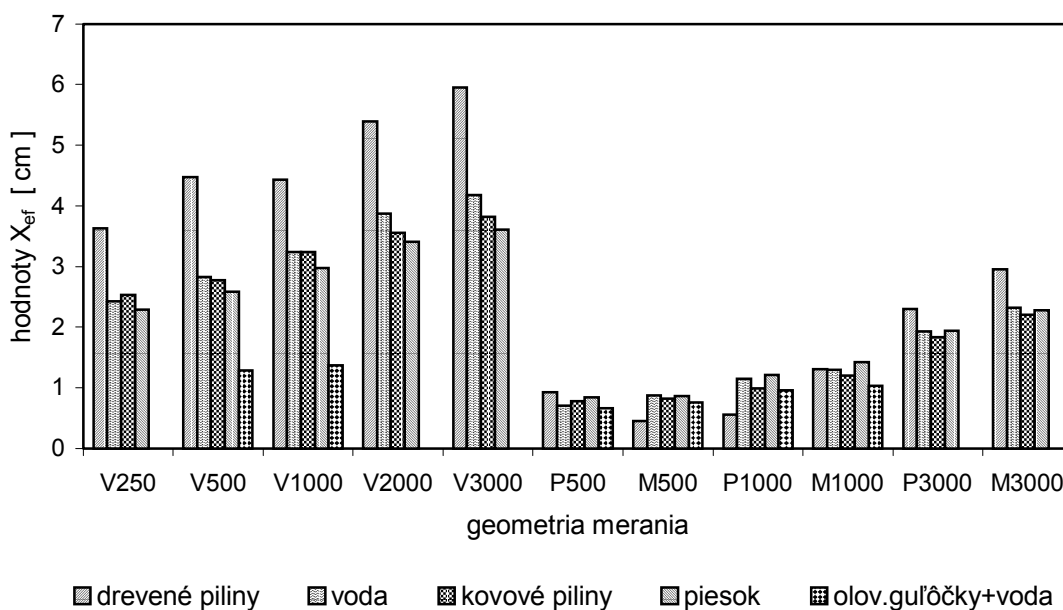


Obr.4.11 Závislosť hmotnostného koeficientu zoslabenia použitých materiálov a ďalších prvkov od energie fotónov.



Obr.4.12 Závislosť lineárneho koeficientu zoslabenia použitých materiálov a ďalších prvkov od energie fotónov.

Závislosť hodnoty X_{ef} od mernej hmotnosti materiálu vzorky je zobrazená na obr.4.13. Do výpočtov pre jednotlivé zloženia vzorky boli zahrnuté samoabsorpčné faktory pre všetky detektory a energie fotónov. Pre každú geometriu sú materiály na grafe zobrazené podľa mernej hmotnosti od najmenej po najväčšiu. Údaje pre zmes olovených guľôčok s vodou boli zmerané a dopočítané až dodatočne pre potvrdenie závislosti hodnoty X_{ef} od mernej hmotnosti materiálu vzorky. Hodnoty prezentované v grafe ukazujú jednoznačnú závislosť hodnoty X_{ef} od mernej hmotnosti vzoriek, čo sa najvýraznejšie prejavilo v prípade drevených pilín a zmesi olovených guľôčok s vodou. S rastúcou hodnotou mernej hmotnosti materiálu vzorky dochádza k poklesu hodnoty X_{ef} , najvýraznejší rozdiel bol viac ako trojnásobný. V prípade prstencovej a Marinelliho geometrie s objemom 500ml a 1000ml (P500, P1000, M500, M1000) je uvedená závislosť prekrytá štatistickými neistotami hodnôt vstupujúcich do exponenciálnych fitov.



Obr.4.13 Závislosť hodnoty X_{ef} od materiálu vzorky.

($\rho_{drev.piliny}=0,13g.cm^{-3}$, $\rho_{voda}=1,0g.cm^{-3}$, $\rho_{kov.piliny}=1,3g.cm^{-3}$, $\rho_{piesok}=1,6g.cm^{-3}$, $\rho_{olov.gul.}=7,0g.cm^{-3}$)

Po vyhodnotení všetkých prezentovaných údajov je možné konštatovať, že hodnota efektívnej hrúbky vzorky X_{ef} je prakticky nezávislá od typu a parametrov polovodičového detektora, ale potvrdila sa jej závislosť od energie fotónov a tiež od mernej hmotnosti materiálu vzorky. Napriek tomu pri zadaní požadovanej presnosti je pre konkrétnu geometriu merania možné vymedziť

intervaly pre energiu fotónov a mernú hmotnosť vzorky, v ktorých je možné stanoviť a používať konštantnú hodnotu X_{ef} . Na všeobecné využitie samoabsorpčných faktorov pri kalibrácii polovodičových detektorov je však nevyhnuté popísať závislosť hodnoty X_{ef} pre jednotlivé geometrie a nepoužívať konštantnú hodnotu bez akéhokoľvek obmedzenia.

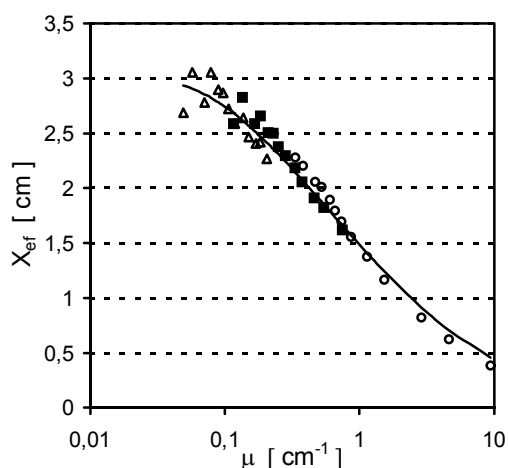
4.2.2 Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficientu zoslabenia.

V predchádzajúcej kapitole bolo ukázané, že hodnota efektívnej hrúbky vzorky X_{ef} je závislá od energie fotónov a zloženia a mernej hmotnosti meranej vzorky. Túto závislosť je možné popísať dvojparametrickým fitom metódou najmenších štvorcov, ale jednoduchším spôsobom je nájsť iný parameter, ktorý by v sebe spájal závislosť od energie fotónov a zloženia vzorky. Takýmto parametrom by mohol byť lineárny koeficient zoslabenia μ , ktorý vyjadruje absorpčné a zoslabovacie vlastnosti hmotných prostredí a jeho hodnota je rovnako ako hodnota X_{ef} závislá od energie fotónov a zloženia meranej vzorky.

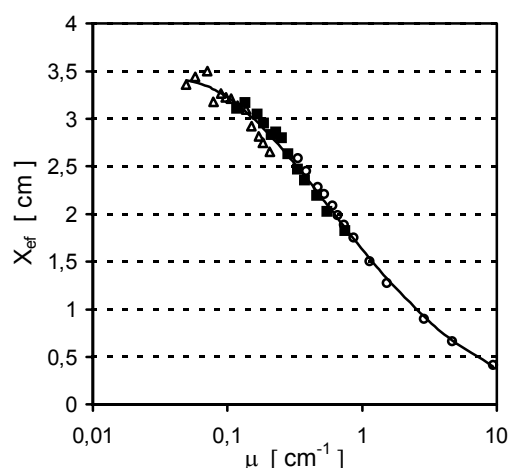
Na posúdenie možnosti nahradiť závislosť hodnoty X_{ef} od energie fotónov a mernej hmotnosti vzorky závislosťou od lineárneho koeficientu zoslabenia bolo vykonaných 572 počítačových simulácií, kde bola sledovaná účinnosť detekcie fotónov polovodičovým detektorom. Výpočty prebiehali pre jeden reálny HPGe detektor (detektor č.4), pretože sa ukázalo, že hodnota X_{ef} je takmer nezávislá od parametrov detektora. Pri jednotlivých výpočtoch sa menili nasledovné parametre :

- energia fotónov (13 tabelizovaných hodnôt 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000 keV)
- geometria merania (11 geometrií - obr.3.7)
- zloženie vzorky (vákuum, voda, hliník, železo).

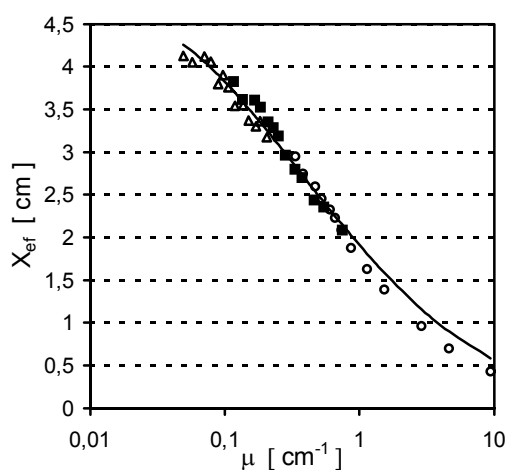
Zloženie vzoriek pri počítačových simuláciách bolo zvolené tak, aby bola čo najpresnejšie popísaná oblasť hodnôt μ materiálov, ktoré boli použité pri reálnych experimentálnych meraniach. Voľba tabelizovaných hodnôt energie umožnila pri hľadaní závislostí používať priamo tabuľkové hodnoty μ bez nutnosti ďalších interpolácií. Hodnoty X_{ef} boli vypočítané podľa vzorca (2.3), následne boli zostrojené závislosti $X_{ef}(\mu)$ pre jednotlivé geometrie merania (obr.4.14).



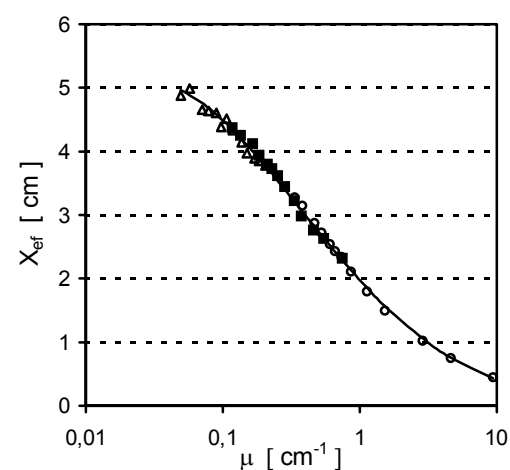
a) geometria V250



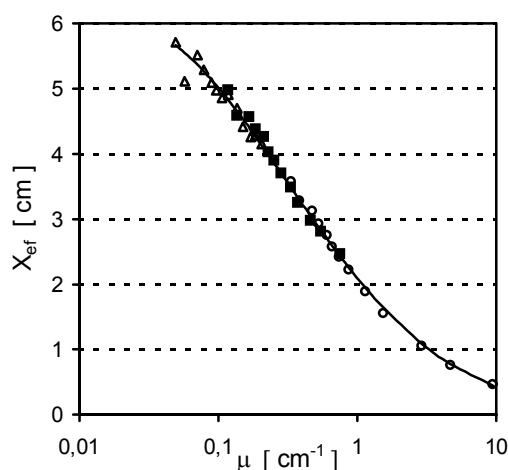
b) geometria V500



c) geometria V1000

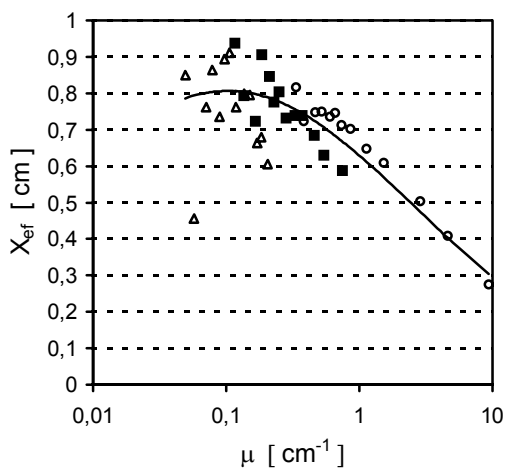


d) geometria V2000

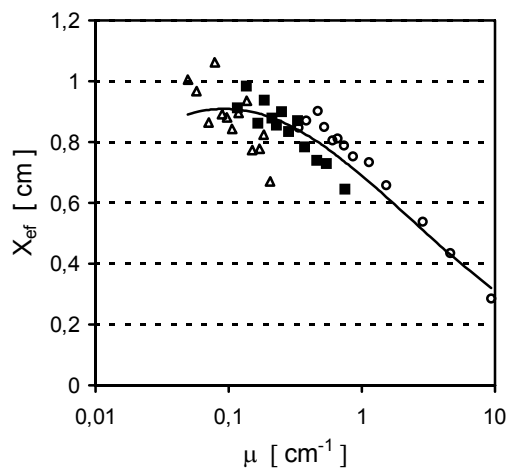


e) geometria V3000

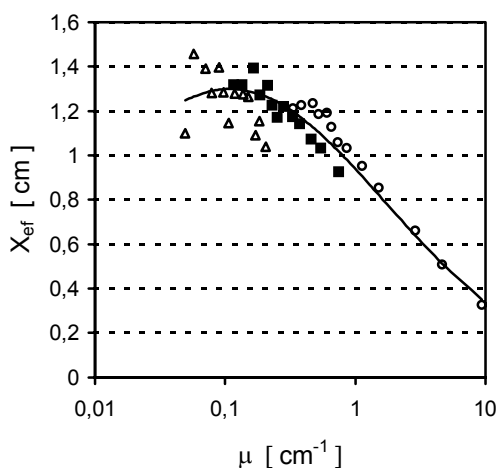
Obr.4.14 Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficientu zoslabenia (Δ - voda, \blacksquare - hliník, o - železo, — - logaritmický fit).



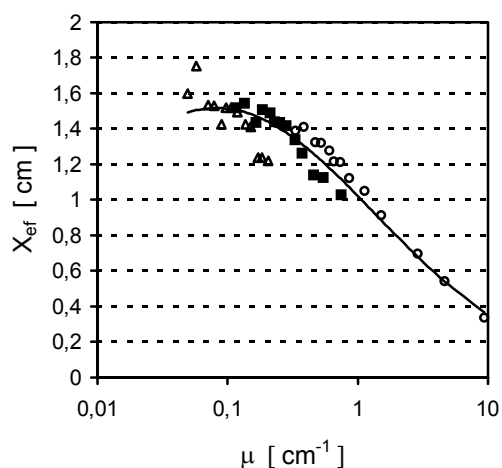
f) geometria P500



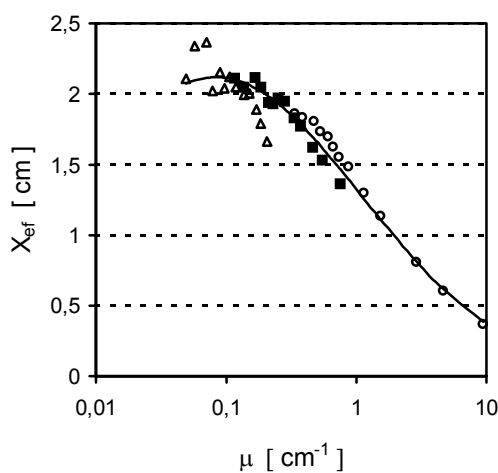
g) geometria M500



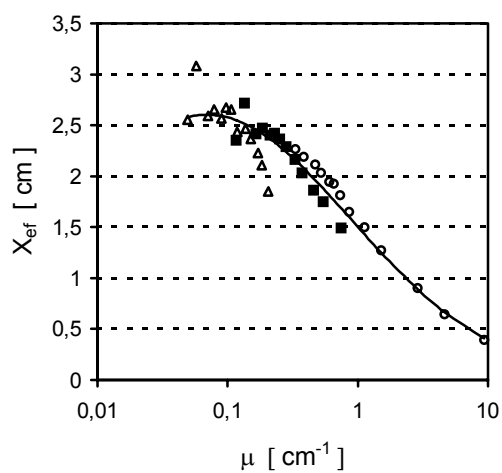
h) geometria P1000



i) geometria M1000



j) geometria P3000



k) geometria M3000

pokračovanie

Obr.4.14 Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficientu zoslabenia (Δ - voda, \blacksquare - hliník, \circ - železo, — - logaritmický fit).

Zo zostrojených grafov vidno, že závislosť efektívnej hrúbky vzorky X_{ef} od lineárneho koeficientu zoslabenia μ pre danú geometriu je možné popísať jedným vzorcom pre rôzne zloženia vzorky a energie fotónov. Z vyskúšaných matematických fitov bol ako najvhodnejší zvolený logaritmický polynóm druhého stupňa :

$$\ln(X_{ef}) = a_0 + a_1 \cdot \ln(\mu) + a_2 \cdot (\ln(\mu))^2 \quad (4.1)$$

Koeficienty fitu a_0 , a_1 , a_2 zo vzorca (4.1) pre jednotlivé geometrie sú uvedené v tabuľke 4.4.

Tab.4.4 Koeficienty logaritmického fitu závislosti $X_{ef}(\mu)$.

Geometria	a_2	a_1	a_0
V250	-0,05677229	-0,39737869	+0,39514773
V500	-0,07267996	-0,46292613	+0,48991231
V1000	-0,04942762	-0,41582165	+0,64568973
V2000	-0,07063387	-0,51784467	+0,68312378
V3000	-0,06860348	-0,53701812	+0,73954405
P500	-0,04778214	-0,21780744	-0,46292137
M500	-0,04902105	-0,23275118	-0,37107452
P1000	-0,06561824	-0,29170939	-0,06270966
M1000	-0,06342901	-0,31670261	+0,02112185
P3000	-0,07629485	-0,37880849	+0,28094703
M3000	-0,07732234	-0,41206077	+0,40791476

4.2.3 Využitie samoabsorpčných faktorov pri kalibrácii polovodičových detektorov.

Určenie závislosti $X_{ef}(\mu)$ umožnilo zostrojiť grafy potrebné k využitiu samoabsorpcie a samoabsorpčných faktorov pri kalibrácii polovodičových detektorov na merania veľkoobjemových vzoriek rôzneho tvaru (obr.4.15). Na týchto grafoch sú zobrazené hodnoty samoabsorpčného faktora f_s v závislosti od lineárneho koeficienta oslabenia μ (vzorec 2.4) simulované počítačom pre rovnaké podmienky ako pri reálnych experimentálnych meraniach (parametre detektorov, energie fotónov, geometria a zloženie vzorky). Spolu s diskretnými hodnotami sú na grafoch zobrazené aj krivky zostrojené pomocou hodnôt X_{ef} zo závislostí $X_{ef}(\mu)$.

Na všetkých grafoch je viditeľná veľmi dobrá zhoda výsledkov vrátane oblasti nízkych energií fotónov pod 100 keV a tiež pre zloženie vzorky olovené guľôčky s vodou.

Zo vzorcov (2.4) a (4.1) vyplýva, že závislosť $f_s(\mu)$ je možné napísať v tvare :

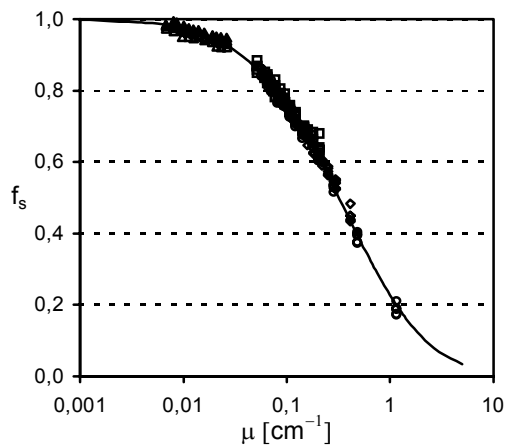
$$f_s = \exp \left\{ - \mu \cdot \exp \left[a_0 + a_1 \cdot \ln(\mu) + a_2 \cdot (\ln(\mu))^2 \right] \right\} \quad (4.2)$$

Hodnoty a_0 , a_1 , a_2 vo vzorci (4.2) sú pre danú geometriu konštantné a nezávislé od parametrov detektora, energie fotónov a tiež vlastností a zloženia meranej vzorky.

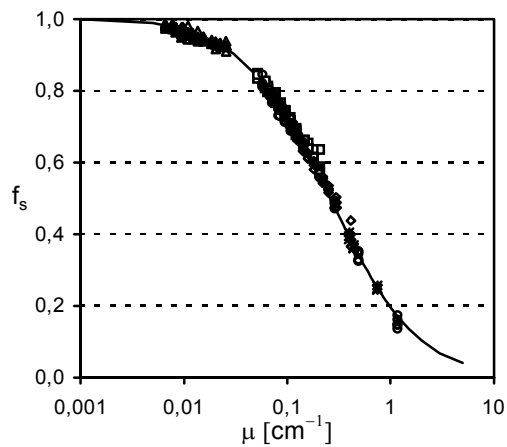
Hodnoty f_s vypočítané podľa vzorca (4.2) je možné využiť pre účinnosťnú kalibráciu polovodičových detektorov pre geometrie rôzneho tvaru a vzorky rôzneho zloženia. Nevyhnutná je znalosť koeficientov a_0 , a_1 , a_2 pre zvolenú geometriu a účinnosťná krivka pre daný detektor a zloženie vzorky vákuum. Výpočet účinnosťnej krivky pre vákuum je možný viacerými spôsobmi :

- počítačovou simuláciou v prípade dobrej znalosti parametrov vnútorných častí polovodičového detektora
- využitím vhodnej poloempirickej metódy
- experimentálnym zmeraním jednej reálnej vzorky na zvolenom detektore (napr. vodný roztok) a následným prepočtom pre vákuum.

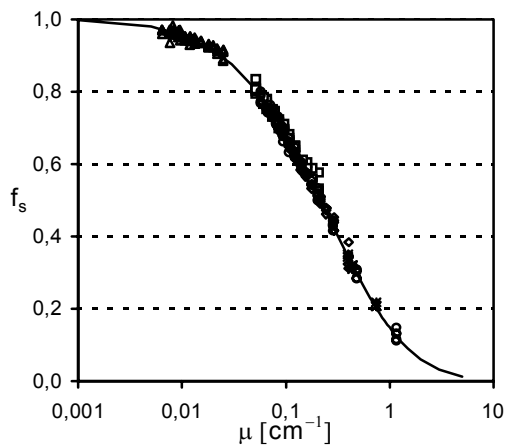
Po určení požadovaných vstupných údajov je možné v danej geometrii vykonávať analýzu vzoriek rôzneho zloženia, pričom dôležitejšia ako presné zastúpenie jednotlivých rádionuklidov vo vzorke je merná hmotnosť analyzovanej vzorky.



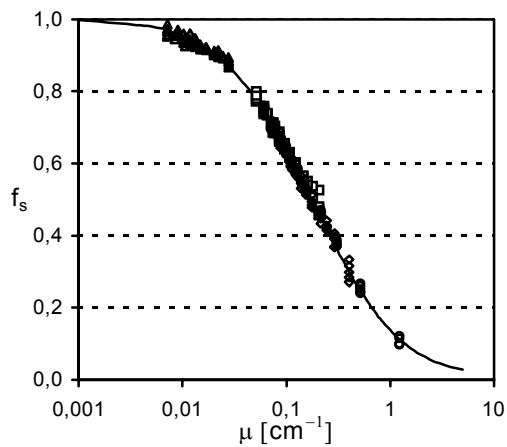
a) geometria V250



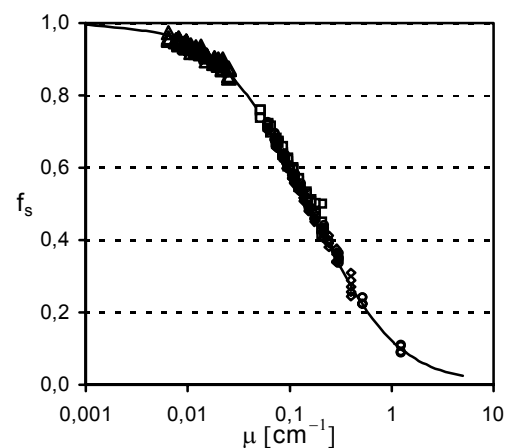
b) geometria V500



c) geometria V1000

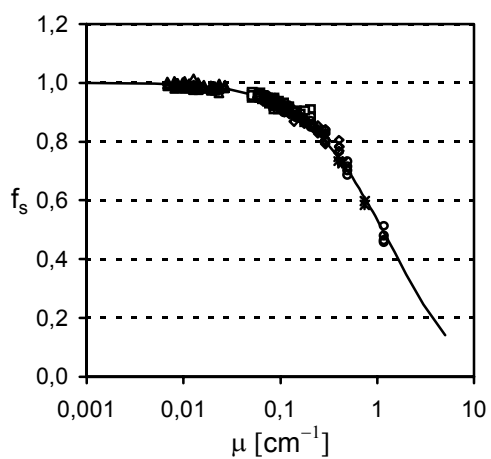


d) geometria V2000

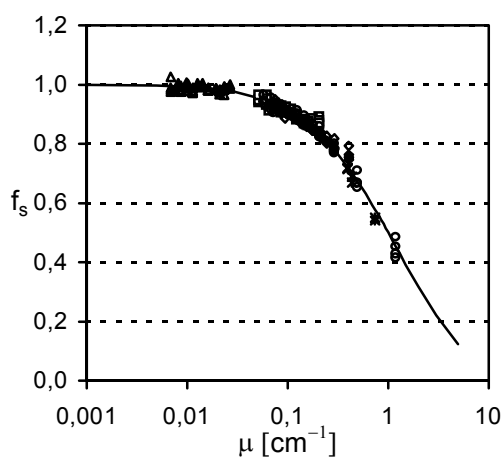


e) geometria V3000

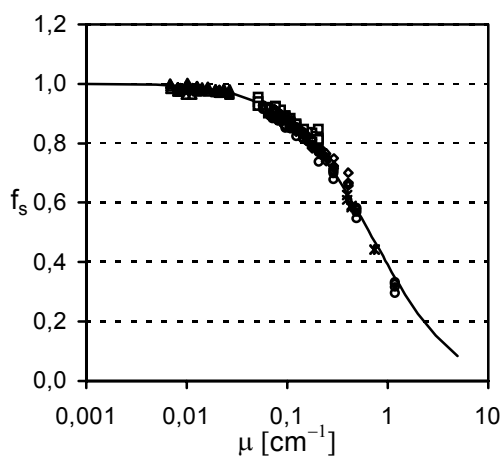
Obr.4.15 Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficienta zoslabenia (Δ - drevené piliny, \square - voda, o - oceľové piliny, \diamond - piesok, $*$ - olovené guľôčky, — - hodnoty vypočítané pomocou X_{ef} z log. fitov).



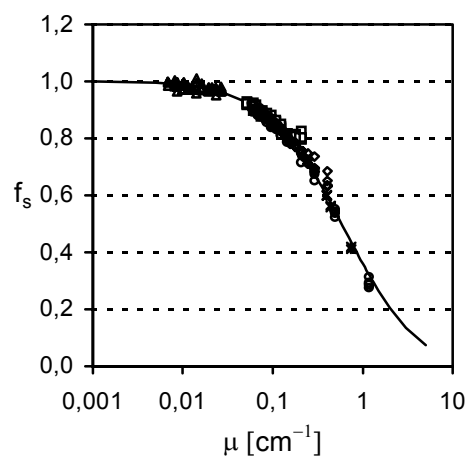
a) geometria P500



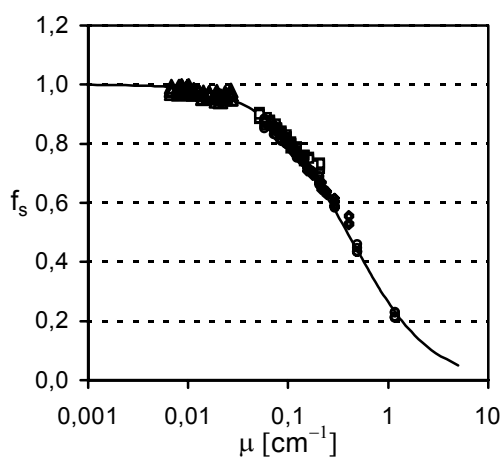
b) geometria M500



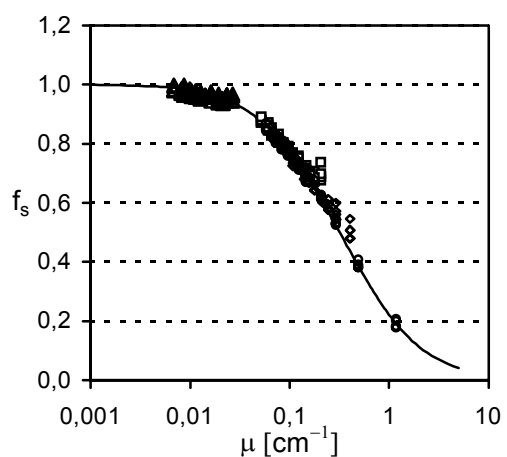
c) geometria P1000



d) geometria M1000



e) geometria P3000



e) geometria M3000

pokračovanie

Obr.4.15 Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficienta zoslabenia (Δ - drevené piliny, \square - voda, \circ - oceľové piliny, \diamond - piesok, $*$ - olovené guľôčky, — - hodnoty vypočítané pomocou X_{ef} z log. fitov).

4.2.4 Validácia kalibračnej metódy založenej na využití samoabsorpčných faktorov.

Na validáciu kalibračnej metódy navrhutej v kapitole 4.2.3 bol zvolený nasledovný postup :

1. experimentálne zmeranie piatich rôznych vzoriek (voda, kremičitý piesok, drevené piliny, oceľové piliny, olovené guľôčky s vodou) s obsahom jedenástich rádionuklidov v jedenástich geometriách rôzneho tvaru a veľkosti na piatich polovodičových detektoroch, určenie hodnôt účinnosti detekcie
2. určenie koeficientov a_0 , a_1 , a_2 zo vzorca (4.2) počítačovou simuláciou
3. výpočet hodnôt účinnosti detekcie pre vákuum pomocou experimentálnych účinností zmeraných pre vodu
4. výpočet účinností detekcie pomocou popísanej kalibračnej metódy pre ďalšie štyri zloženia vzorky – kremičitý piesok, drevené piliny, oceľové piliny, olovené guľôčky s vodou
5. porovnanie experimentálne zmeraných a vypočítaných hodnôt účinnosti detekcie.

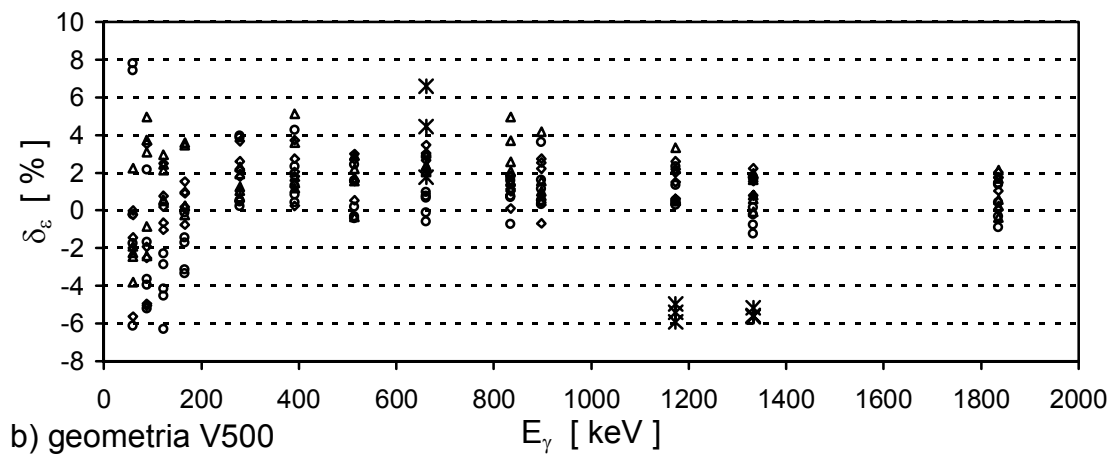
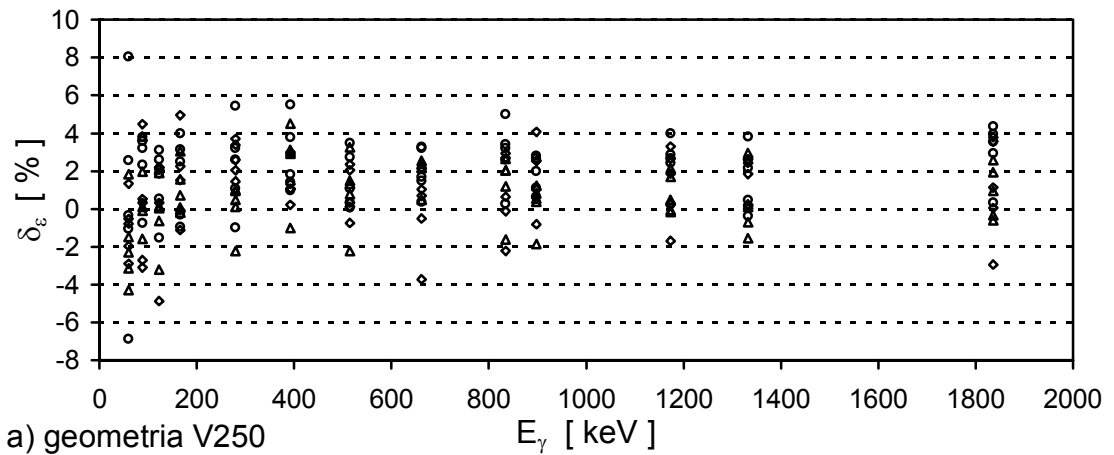
Celkovo bolo porovnávaných 2031 zmeraných a vypočítaných hodnôt detekčnej účinnosti pre energie fotónov z intervalu 60 keV až 1836 keV, pre HPGe detektory s rel. účinnosťou 9% až 65% a pre vzorky rôzneho zloženia s mernou hmotnosťou $0,13 \text{ g.cm}^{-3}$ až $7,0 \text{ g.cm}^{-3}$ merané v jedenástich rôznych geometriách. Postup výpočtu účinností bol taký, že najprv boli z experimentálne zmeraných účinností pre vzorku vody vypočítané účinnosti pre vákuum podľa vzorca (2.3) a následne boli podľa toho istého vzorca pomocou účinností pre vákuum rátané účinnosti pre pripravené pracovné štandardy.

Získaný súbor dát úplne pokrýva oblasť gamaspektrometrických analýz veľkoobjemových vzoriek realizovaných v spektrometrickom laboratóriu Oddelenia radiačnej ochrany a v laboratóriách Oddelenia radiačnej kontroly okolia v Atómových elektrárnach Jaslovské Bohunice.

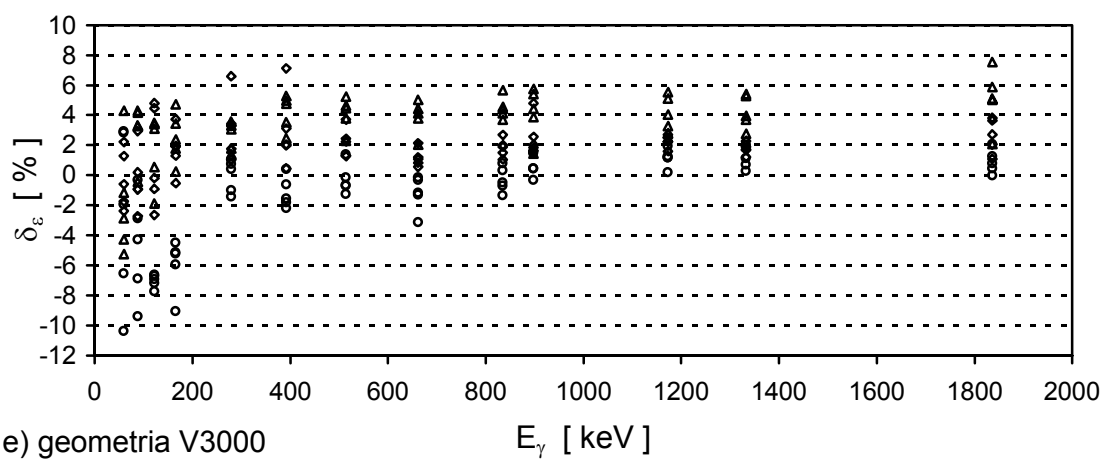
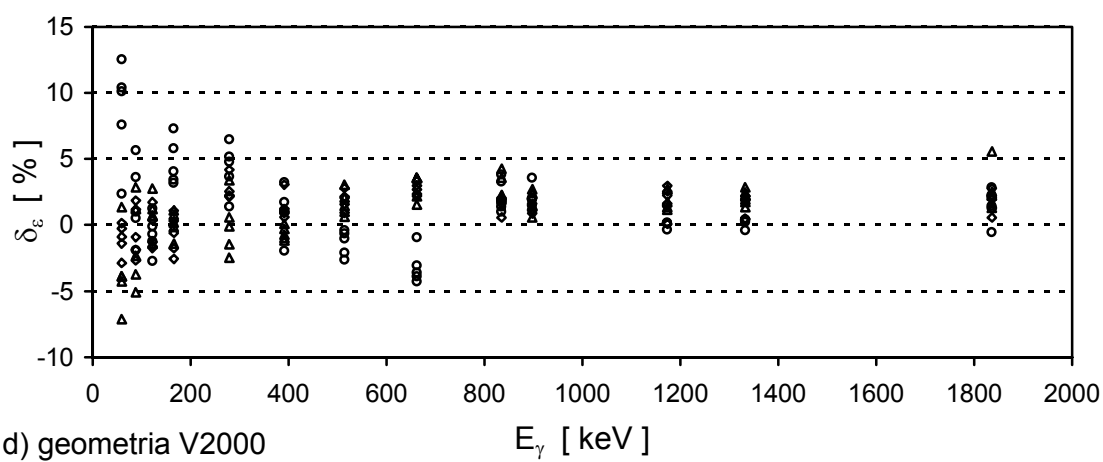
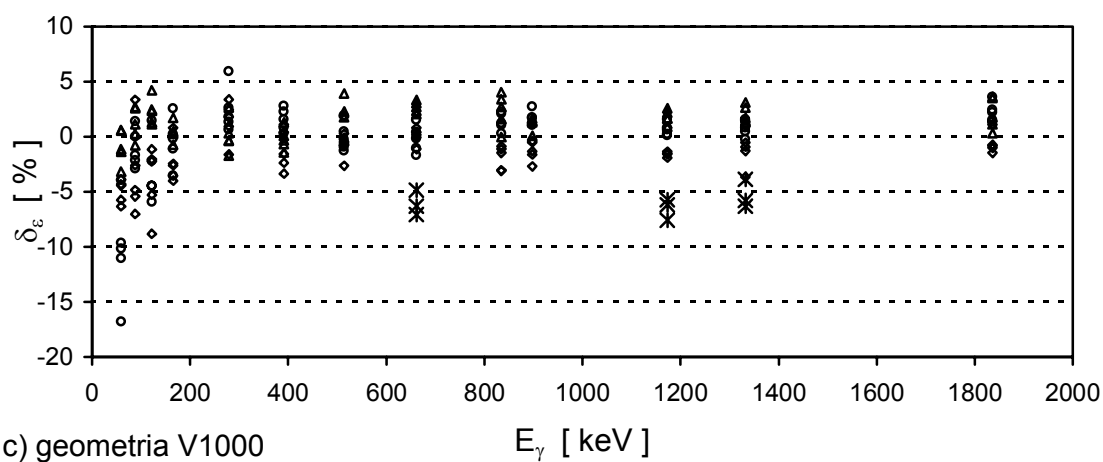
Číselné hodnoty zmeraných a simulovaných účinností detekcie sú uvedené v Prílohe č.1 - Tabuľky. Vzhľadom na veľký počet údajov nie je grafické porovnanie zrealizované pre každý detektor a zloženie vzorky samostatne. Všetky údaje sú rozdelené do jedenástich grafov, z ktorých každý reprezentuje jednu geometriu merania a v rámci nej zahŕňa všetky energie fotónov, detektory a zloženia vzoriek (obr.4.16).

V uvedených grafoch je zobrazený percentuálny rozdiel δ_ε experimentálne zmeranej účinnosti detekcie ε_{exp} a účinnosti detekcie vypočítanej pomocou samoabsorpčného faktora ε_{vyp} - vzorec (4.3).

$$\delta_\varepsilon = \frac{(\varepsilon_{\text{vyp}} - \varepsilon_{\text{exp}})}{\varepsilon_{\text{exp}}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

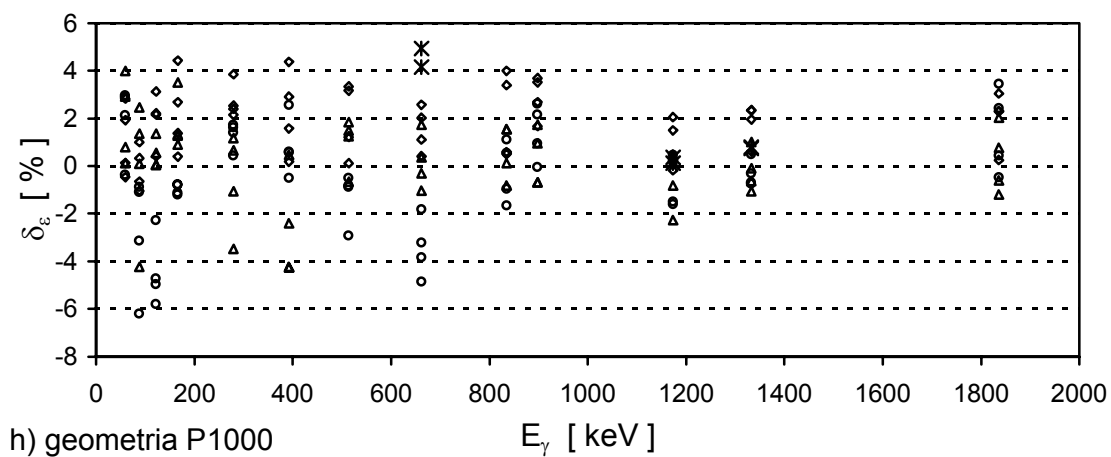
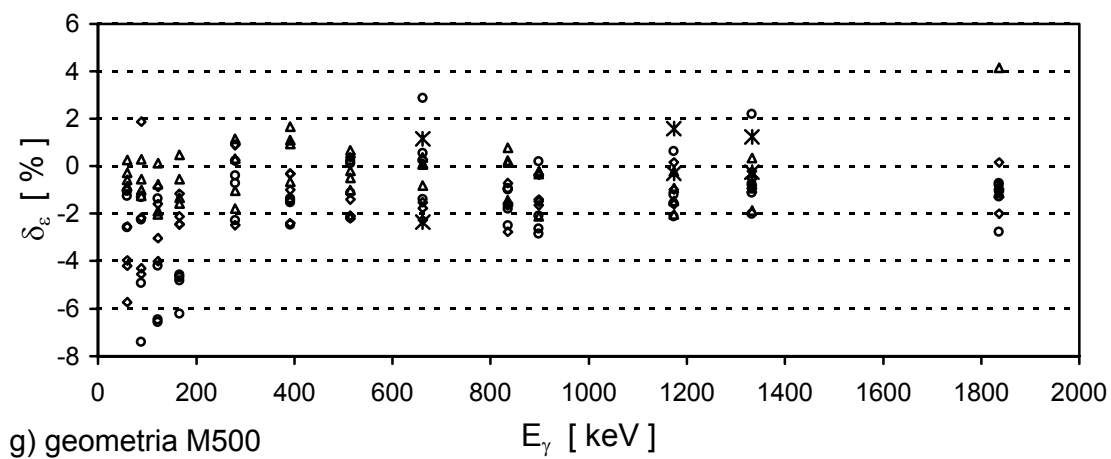
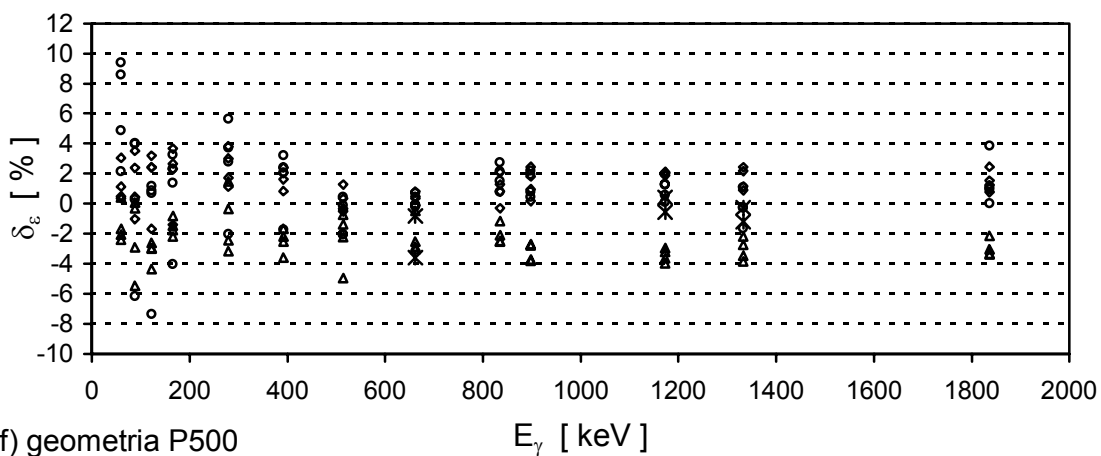


Obr.4.16 Porovnanie experimentálne zmeraných a vypočítaných hodnôt účinností (Δ - drevené piliny, o - oceľové piliny, \diamond - piesok, * - olovené guľôčky).



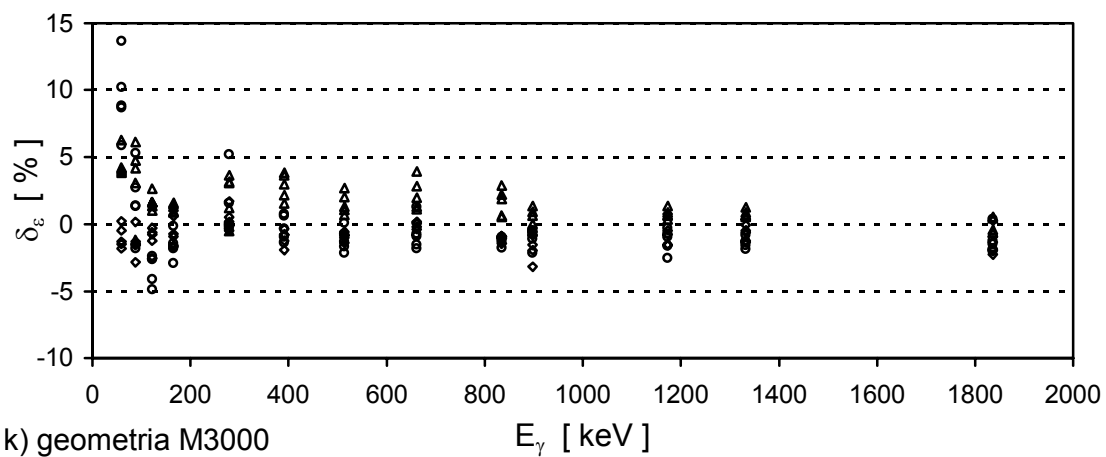
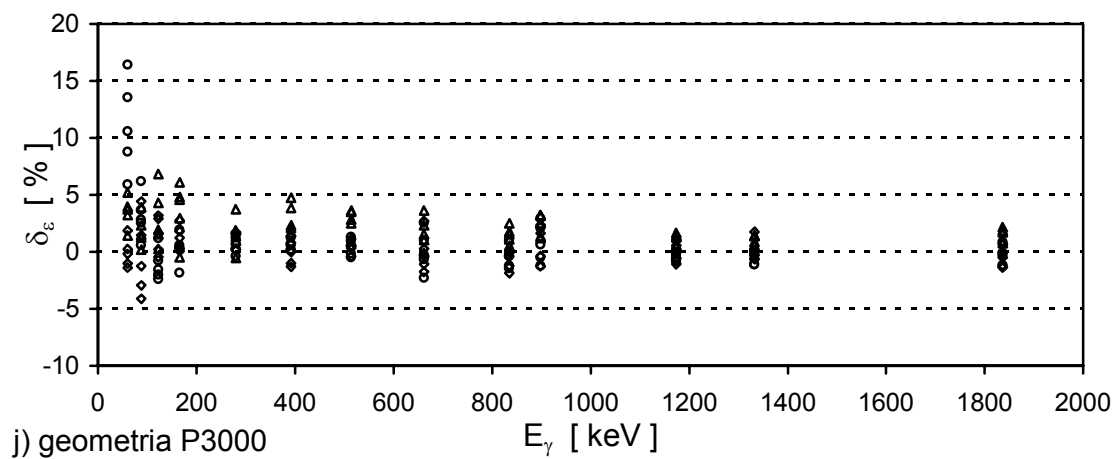
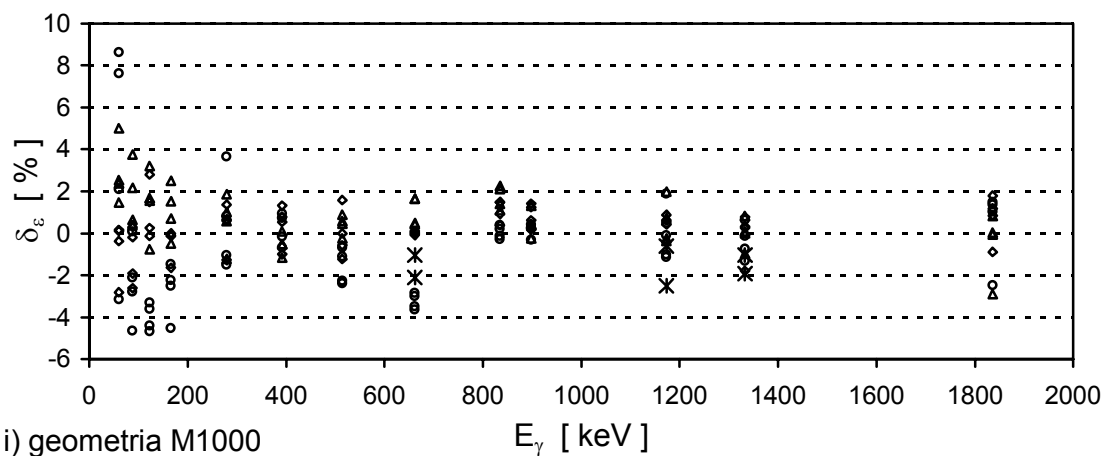
pokračovanie

Obr.4.16 Porovnanie experimentálne zmeraných a vypočítaných hodnôt účinností (Δ - drevené piliny, o - ocel'ové piliny, \diamond - piesok, * - olovené guľôčky).



pokračovanie

Obr.4.16 Porovnanie experimentálne zmeraných a vypočítaných hodnôt účinností (Δ - drevené piliny, o - oceľové piliny, \diamond - piesok, * - olovené guľôčky).



pokračovanie

Obr.4.16 Porovnanie experimentálne zmeraných a vypočítaných hodnôt účinností (Δ - drevené piliny, o - ocel'ové piliny, \diamond - piesok, * - olovené guľôčky).

Podrobné preštudovanie grafov zobrazených na obr.4.16 umožňuje konštatovať veľmi dobrú zhodu experimentálnych meraní a výpočtov. Rozdiel medzi experimentálne zmeranými a vypočítanými hodnotami účinnosti detekcie sa v prípade energií fotónov do 100 keV pohybuje v intervale $\pm 10\%$ s výnimkou niekoľkých bodov prislúchajúcich oceľovým pilinám a energii fotónov 60 keV, pre energie nad 100 keV sa výsledky zhodujú na úrovni $\pm 5\%$, pri niektorých geometriách je rozdiel medzi hodnotami ešte menší. Väčšiu zhodu pri daných podmienkach nebolo možné dosiahnuť, nakoľko rozdiely medzi hodnotami na úrovni do 5% sú porovnateľné s neistotami experimentálne zmeraných hodnôt účinností detekcie.

Napriek veľmi dobrej zhode väčšiny údajov je možné v grafoch pozorovať aj nasledovné anomálie :

a) Výraznejšie rozdiely medzi hodnotami v oblasti nízkych energií.

Na všetkých grafoch z obr.4.16 sú najväčšie rozdiely medzi experimentálnymi a vypočítanými hodnotami v oblasti nízkych energií do 100 keV, s rastúcou energiou rozdiely klesajú pod úroveň $\pm 5\%$. Okrem väčšej štatistickej neistoty nameraných početností impulzov pre nízke energie je príčinou takéhoto stavu aj ďalšia skutočnosť. Na výpočet hodnôt efektívnej hrúbky vzorky X_{ef} bol použitý jednotný vzorec pre všetky energie fotónov a zloženia vzoriek. Ak sa zoberie do úvahy fakt, že medzi hodnotami X_{ef} pre rôzne zloženie vzoriek môžu existovať isté rozdiely, tieto sa najvýraznejšie prejavujú v prípade vysokej hodnoty lineárneho koeficienta zoslabenia μ . Takáto situácia nastáva pri nízkych energiách fotónov alebo pri vzorkách s vysokou mernou hmotnosťou predovšetkým pri geometriách s veľkým objemom vzorky. V zobrazených grafoch sa tento efekt prejavil posunom bodov v oblasti nízkych energií smerom nadol najmä pri valcových geometriách s väčšími hodnotami X_{ef} . Podobne posunuté sú pri valcových geometriách aj hodnoty prislúchajúce vzorke olovených guľôčok s vodou, kde je vysoký koeficient zoslabenia spôsobený veľkou mernou hmotnosťou vzorky. Pri prstencových a Marinelliho geometriách sú tieto efekty menej výrazné z dôvodu menších zmien hodnoty X_{ef} s rastúcim μ .

b) Rozdiel medzi hodnotami prislúchajúcimi vzorke oceľových pilín a energii fotónov 60 keV.

Pre niektoré geometrie vzorky bol zaznamenaný rozdiel na úrovni 10 až 15% medzi experimentálne zmeranými a vypočítanými hodnotami detekčnej účinnosti pre materiál oceľové piliny a energiu fotónov 60 keV. Vypočítané hodnoty boli pre všetky detektory nižšie (geometria V1000) alebo vyššie

(geometrie V2000, P3000, M3000) ako experimentálne zmerané hodnoty. Okrem faktorov spomenutých v predchádzajúcom odseku sa v prípade ocelových pilín pravdepodobne prejavil vplyv menších nehomogenít aktivity rádionuklidov. Pri príprave pracovného etalónu z ocelových pilín došlo ku skorodovaniu a „zlepeniu“ pilín. Tieto boli následne mechanicky rozdrobené, ale pri tomto procese vznikli drobné prachové častice, ktoré mohli pri nasýpaní vzorky najmä v prípade väčších geometrií spôsobiť malé lokálne nehomogenity aktivity. Pri fotónoch s vyššou energiou je vplyv takýchto lokálnych nehomogenít minimálny, ale výrazne sa môže prejsť pre najnižšie energie, kde je dôležitá oblasť vzorky najbližšie k detektoru. Toto tvrdenie je podporené faktom, že približne rovnaký posun nastal u všetkých detektorov, pričom bola na nich meraná tá istá vzorka. U ostatných materiálov, kde pri príprave pracovných štandardov nenastali spomenuté problémy, takéto výrazné rozdiely pre energiu fotónov 60 keV neboli pozorované.

c) Systematická odchýlka všetkých bodov jedným smerom.

Na grafoch prislúchajúcich geometriám V500, V2000, V3000, čiastočne V250 a M500 je viditeľný posun všetkých bodov v oblasti stredných a vyšších hodnôt energie fotónov nad alebo pod úroveň $\delta_{\epsilon}=0\%$. Tento posun znamená, že vypočítané hodnoty pre danú geometriu, pre všetky detektory a zloženia vzoriek, sú mierne nadhodnotené alebo podhodnotené oproti experimentálne zmeraným hodnotám. Tento posun je u jednotlivých geometrií rôzny a pohybuje sa na úrovni 1 až 2%. Nakoľko u ostatných geometrií nebol takýto efekt pozorovaný, príčina pravdepodobne nebude v spôsobe výpočtu účinností pomocou samoabsorpčných faktorov, ale v experimentálnom stanovení účinnosti detekcie pre vzorku vody, ktorá vstupuje do výpočtu účinnosti detekcie pre všetky ostatné zloženia vzorky. Odchýlka na úrovni do 2% mohla byť spôsobená napríklad miernym posunutím vzorky mimo os detektora. Podobný mierny posun hodnôt pre všetky energie fotónov na rovnakej úrovni je viditeľný aj pri niektorých ďalších vzorkách uvedených v Prílohe č.1.

Na podrobné preskúmanie, prípadne odstránenie spomenutých problémov by bolo potrebné vykonať experimentálne merania s vyššou presnosťou a lepšou štatistikou impulzov, ako bolo možné dosiahnuť v podmienkach, pri ktorých boli realizované experimenty popísané v tejto práci. Napriek týmto nedostatkom je dosiahnutá presnosť na úrovni najlepších výsledkov publikovaných v literatúre v oblasti kalibrácie polovodičových detektorov na meranie veľkoobjemových vzoriek [Moe82, Bro96, Kam96, Abb01].

ZÁVER.

Cieľom tejto dizertačnej práce bolo navrhnúť metódu kalibrácie polovodičových detektorov pre gamaspektrometrické analýzy veľkoobjemových vzoriek rôzneho tvaru a zloženia založenú na počítačových simulačných metódach Monte Carlo. Dosiahnuté výsledky verifikované v spektrometrickom laboratóriu Oddelenia radiačnej ochrany Atómových elektrární Bohunice ukázali, že navrhnutá metóda umožňuje pri znalosti parametrov detektora dosiahnuť presnosť na úrovni 10% pre nízke energie a 5% pre ostatné energie fotónov bez potreby predchádzajúcich experimentálnych meraní. Aj v prípade úplne neznámych parametrov detektora je pre danú geometriu nutné iba jedno experimentálne meranie kvapalného alebo iného etalónu s obsahom rádionuklidov pokrývajúci požadovaný energetický interval. Prezentovaná kalibračná metóda sa tak stáva oveľa jednoduchšou a finančne menej náročnou ako exaktné experimentálne alebo poloempirické metódy kalibrácie a je použiteľná pre všetky tvary a zloženia vzorky. Dosiahnuté výsledky sú zároveň dôkazom vysokej presnosti súčasných počítačových Monte Carlo kódov a možnosti ich úspešného využitia v štandardných gamaspektrometrických laboratóriách.

Získané poznatky sú prínosom v oblasti polovodičovej gamaspektrometrie veľkoobjemových vzoriek a v súčasnosti sú už aplikované v praxi pri gamaspektrometrických analýzach v spektrometrickom laboratóriu Oddelenia radiačnej ochrany Atómových elektrární Bohunice. Okrem štandardných meraní je popísaná kalibračná metóda využívaná aj pri organizovaných porovnávacích testoch. Jedným z prvých prípadov jej úspešného použitia bolo meranie aktivity a zloženia vzorky organického popola zaslanej v rámci medzinárodného porovnávacieho testu organizovaného MAAE (Príloha č.5).

Zoznam obrázkov v texte dizertačnej práce.

Obr.2.1	Štandardné typy polovodičových HPGe detektorov [Can98].....	9
Obr.2.2	Účinnosť detekcie polovodičových HPGe detektorov [Can98].	10
Obr.2.3	Energetická závislosť koeficientov zoslabenia.	12
Obr.3.1	Výrobné výkresy vnútorných častí detektorov č.1 a 4.	25
Obr.3.2	Zapojenie detektorov v spektrometricke trase.	26
Obr.3.3	Etalón - výrobné číslo 590-01.....	28
Obr.3.4	Etalón - výrobné číslo 146-01.....	28
Obr.3.5	Etalón - výrobné číslo 221-07.....	28
Obr.3.6	Etalón - výrobné číslo 720-01.....	28
Obr.3.7	Geometrické parametre vzoriek a nádob použitých na meranie.	39
Obr.4.1	Spektrum č.1 – det.č.1, zmesný etalón ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs	46
Obr.4.2	Spektrum č.2 – det.č.1, etalón ^{152}Eu	47
Obr.4.3	Spektrum č.3 – det.č.4, etalón ^{226}Ra	47
Obr.4.4	Porovnanie početností v energetických intervaloch - spektrum č.1....	49
Obr.4.5	Porovnanie početností v energetických intervaloch - spektrum č.2....	49
Obr.4.6	Porovnanie početností v energetických intervaloch - spektrum č.3....	50
Obr.4.7	Porovnanie experimentálnej a simulovanej početnosti impulzov v píkoch úplnej absorpcie.	54
Obr.4.8	Závislosť $f_s(\mu)$ – detektor č.1, geometria V025, všetky zloženia vzorky a energie fotónov.....	56
Obr.4.9	Závislosť hodnoty X_{ef} od parametrov detektora.....	57
Obr.4.10	Závislosť hodnoty X_{ef} od energie fotónov.	58
Obr.4.11	Závislosť hmotnostného koeficientu zoslabenia použitých materiálov a ďalších prvkov od energie fotónov.	59

Obr.4.12	Závislosť lineárneho koeficientu zoslabenia použitých materiálov a ďalších prvkov od energie fotónov.....	59
Obr.4.13	Závislosť hodnoty X_{ef} od materiálu vzorky.....	60
Obr.4.14	Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficientu zoslabenia (Δ - voda, \blacksquare - hliník, o - železo, — - logaritmický fit).	62
Obr.4.15	Závislosť efektívnej hrúbky vzorky od lineárneho koeficienta zoslabenia (Δ - drevené piliny, \square - voda, o - oceľové piliny, \diamond - piesok, * - olovené guľôčky, — - hodnoty vypočítané pomocou X_{ef} z log. fitov)......	66
Obr.4.16	Porovnanie experimentálne zmeraných a vypočítaných hodnôt účinností (Δ - drevené piliny, o - oceľové piliny, \diamond - piesok, * - olovené guľôčky).	69

Zoznam tabuliek v texte dizertačnej práce.

Tab.3.1	Základné parametre použitých HPGe detektorov.	24
Tab.3.2	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – piesok.	31
Tab.3.3	Porovnanie početností v píkoch úplnej absorpcie s ich aritmetickým priemerom – piesok.	31
Tab.3.4	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – drevené piliny.	33
Tab.3.5	Porovnanie početností v píkoch úplnej absorpcie s ich aritmetickým priemerom – drevené piliny.	33
Tab.3.6	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – oceľové piliny.	35
Tab.3.7	Porovnanie početností v píkoch úplnej absorpcie s ich aritmetickým priemerom – oceľové piliny.	35
Tab.4.1	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – spektrum č.1.	51
Tab.4.2	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – spektrum č.2.	51
Tab.4.3	Početnosť impulzov v píkoch úplnej absorpcie – spektrum č.3.	52
Tab.4.4	Koeficienty logaritmickeho fitu závislosti $X_{ef}(\mu)$	64

LITERATÚRA

- [Abb01] M. I. Abbas, HPGe Detector Photopeak Efficiency Calculation Including Self-absorption and Coincidence Corrections for Marinelli Beaker Sources Using Compact Analytical Expressions, Applied Radiation and Isotopes 54 (2001) 761-768.
- [Bla75] A. Blažej a kol., Chémia dreva, Alfa Bratislava (1975) 224.
- [Bol96] J. P. Bolivar, R. García-Tenorio, M. García-León, A Method for the Determination of Counting Efficiencies in γ -spectrometric Measurements with HPGe Detectors, Nuclear Instr. And Methods in Physics Research A382 (1996) 495-502.
- [Bri93] J. F. Breisemeister (ed.), MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A, Report LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory (1993).
- [Bro96] F. L. Bronson, L. Wang, Validation of the MCNP Monte Carlo Code for Germanium Detector Gamma Efficiency Calibrations, Proceedings of Waste Management '96, Tuscon AZ USA (1996).
- [Bro03] F. L. Bronson, B. Russ, The Effect of Deadlayer Growth in Ge-detectors, Canberra - 6th Genie User Meeting, Lelystad, Holandsko (2003).
- [Can96a] Canberra Industries Inc., Application Note - In Situ Gamma Spectroscopy with ISOCS, an In Situ Object Counting System, Meriden USA (1996)
- [Can96b] Canberra Industries Inc., Model ISOXSW, ISOCS Calibration Software, Meriden USA (1996)
- [Can97] Canberra Industries Inc., Genie 2000 Spectroscopy System – Operations V1.1, Meriden USA (1997)
- [Can98] Canberra Industries Inc., Product Catalog and Reference Guide – Edition 11, CD-ROM, Meriden USA (1998)

- [CERN93] GEANT Detector Description and Simulation Tool, User's Guide, CERN Program Library Office, CERN, Geneva, Switzerland (1993)
- [ČMI97] ČMI IIZ, Certifikát rádioaktívneho etalónu č. 931-OL-352/97, Praha (1997)
- [Deb79] K. Debertin, U. Schötzig, Coincidence Summing Corrections in Ge(Li) Spectrometry at Low Source-to-Detector Distances, Nuclear Instr. And Methods 158 (1979) 471-477.
- [Deb88] K. Debertin, R. G. Helmer, Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, North-Holland, Amsterdam (1988).
- [Erd79] G. Erdtmann, W. Soyka, The Gamma Rays of the Radionuclides : Tables for Applied Gamma Ray Spectrometry, Verlag Chemie, New York (1979).
- [Fen89] D. Fengel, G. Wegener, Wood - Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin; New York, Walter de Gruyter (1989) 613.
- [Fir96] R. B. Firestone, F. S. Y. Chu, V. S. Shirley, C. M. Baglin, J. Zipkin, Table of Isotopes CD-ROM 8th Edition, Version 1.0, Wiley-Interscience, New York (1996).
- [ICRP77] ICRP Publication 26 : Recommendations of the ICRP. Annals of the ICRP, Pergamon Press Oxford (1977)
- [ICRP91] ICRP Publication 60 : Recommendations of the ICRP. Annals of the ICRP, Pergamon Press Oxford (1991)
- [Jad87] K. Jadroň, Píková účinnosť koaxiálneho HPGe detektora pre veľkoobjemové vzorky životného prostredia, Diplomová práca, MFF UK Bratislava (1987).
- [Kam96] S. Kamboj, B. Kahn, Evaluation of Monte Carlo Simulation of Photon Counting Efficiency for Germanium Detectors, Health Physics 70 (1996) 512-519.
- [kol00] Kolektív autorů, Principy a praxe radiační ochrany, Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Azin CZ Praha (2000)
- [Kus98] Z. Kusovská, T. Ďúranová, Výpočtový program RDEBO na ocenenie rádiologických následkov normálnej prevádzky JEZ EBO, VÚJE Trnava (1998).

- [Lab00] J. M. Laborie, G. Le Petit, D. Abt, M. Girard, Monte Carlo Calculation of the Efficiency Calibration Curve and Coincidence-summing Corrections in Low-level Gamma-ray Spectrometry Using Well-type HPGe Detectors, *Applied Radiation and Isotopes* 53 (2000) 57-62.
- [L'An98] M. F. L'Annunziata et al., *Handbook of Radioactivity Analysis*, Academic Press, San Diego, California USA (1998).
- [Moe82] L. Moens et al., Calculation of the Peak Efficiency of Ge and Ge(Li) Detectors for Different Counting Geometries, *Journal of Radioanalytical Chemistry* 70 (1982) 539-550.
- [Nak83] T. Nakamura, T. Suzuki, Monte Carlo Calculation of Peak Efficiencies of Ge(Li) and Pure Ge Detectors to Voluminal Sources and Comparison with Environmental Radioactivity Measurement, *Nuclear Instr. and Methods* 205 (1983) 211-218.
- [Nem75] O. F. Nemeč, J. V. Gofman, *Spravočnik po jadernoj fizike*, Naukova Dumka, Kiev (1975).
- [Pov01] Povolenie Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky – Hlavného hygienika SR na vykonávanie činnosti vedúcej k ožiareniu zo 7. decembra 2001.
- [Rap95] T. Rapant, Modelovanie detekčnej účinnosti polovodičových HPGe detektorov pre meranie veľkoobjemových vzoriek v Marinelliho nádobe metódou Monte Carlo s využitím súboru Geant, Diplomová práca, MFF UK Bratislava (1995).
- [Rap98] T. Rapant, Monitorovanie výpustí ra-látok z JE Jaslovské Bohunice, Záverečná odborná práca, VÚJE Trnava (1998).
- [Rap02] T. Rapant, Súhrnná správa - Radiačná bezpečnosť v SE EBO a vplyv areálu SE EBO na okolie, Jaslovské Bohunice (1996 - 2002).
- [Sim90] O. Sima, Monte Carlo Simulation versus Semiempirical Calculation of Autoabsorption Factors for Semiconductor Detector Calibration in Complex Geometries, *Progress in Nuclear Energy* 24 (1990) 327-336.
- [Sim96a] O. Sima, D. Arnold, Self-attenuation and Coincidence-summing Corrections Calculated by Monte Carlo Simulations for Gamma-spectrometric Measurements with Well-type Germanium Detectors, *Applied Radiation and Isotopes* 47 (1996) 889-893.

- [Sim96b] O. Sima, Applications of Monte Carlo Calculations to Gamma-spectrometric Measurement of Environmental Samples, Applied Radiation and Isotopes 47 (1996) 919-923.
- [Sla87] O. Slávik, Radiačná kontrola okolia JE, VÚJE Trnava (1987).
- [Sla91] O. Slávik, Využitie polovodičovej gamaspektrometrie v systéme radiačnej kontroly okolia jadrových elektrární, Kandidátska dizertačná práca, MFF UK Bratislava (1991).
- [Voj94] P. Vojtyla, J. Beer, P. Šťavina, Experimental and Simulated Cosmic Muon Induced Background of a Ge Spectrometer Equipped with a Top Side Anticoincidence Proportional Chamber, Nuclear Instr. and Methods in Physics Research B 86 (1994) 380-386.
- [Voj00] P. Vojtyla, P. P. Povinec, A Monte Carlo Simulation of Background Characteristics of Low-level HPGe Detectors, Applied Radiation and Isotopes 53 (2000) 185-190.
- [Voj01] P. Vojtyla, Calibration of Monitors Used for Surveillance of Radioactivity in Effluent Water from CERN's Accelerator Installations, Applied Radiation and Isotopes 55 (2001) 81-88
- [Vyh00] Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky z 13.decembra 2000 o požiadavkách na zabezpečenie radiačnej ochrany č. 12/2000 Z.z.
- [Wan95] T. K. Wang, W. Y. Mar, T. H. Ying, Ch. H. Liao and Ch. L. Tseng, HPGe Detector Absolute-peak-efficiency Calibration by Using the ESOLAN Program, Applied Radiation and Isotopes 46 (1995) 933-944.
- [Wan97] T. K. Wang, W. Y. Mar, T. H. Ying, Ch. L. Tseng, Ch. H. Liao and M. Y. Wang, HPGe Detector Efficiency Calibration for Extended Cylinder and Marinelli-beaker Sources Using the ESOLAN Program, Applied Radiation and Isotopes 48 (1997) 83-95.
- [Wan99] T. K. Wang, I. M. Hou, Ch. L. Tseng, Well-type HPGe Detector Absolute-peak-efficiency Calibration and True-coincidence Correction, Nuclear Instr. and Methods in Physics Research A 425 (1999) 504-515.
- [Zák94] Zákon Národnej rady Slovenskej republiky z 24.augusta 1994 o ochrane zdravia ľudí č. 272/1994 Z.z. v znení noviel – 222/1996, 290/1996, 470/2000 Z.z.

ABSTRAKT

Počas posledných desiatich rokov po postupnom prijatí nových legislatívnych noriem v oblasti ochrany pred ionizujúcim žiarením došlo k výraznému prieniku gamaspektrometrie medzi štandardné rádioanalytické metódy. V podmienkach atómovej elektrárne sa gamaspektrometria ukázala ako najefektívnejšia metóda stanovenia aktivity jednotlivých rádionuklidov a spektrometrické laboratóriá boli postupne vybavené najmodernejším technickým zariadením. Napriek tomu z dôvodu používania finančne i časovo náročných experimentálnych kalibračných metód boli možnosti gamaspektrometrie čiastočne obmedzené najmä koncom 90-tych rokov počas výrazných rekonštrukčných a modernizačných prác. Z tohoto dôvodu bolo v spektrometrickom laboratóriu Atómových elektrární Jaslovské Bohunice v spolupráci s Katedrou jadrovej fyziky FMFI UK v Bratislave vyvinutých a odskúšaných niekoľko kalibračných postupov založených na počítačových simuláciách s využitím programu GEANT. V predloženej dizertačnej práci je popísaná kalibračná metóda pre meranie veľkoobjemových vzoriek založená na využití samoabsorpčných faktorov. Presnosť navrhovanej metódy je minimálne porovnateľná s ostatnými používanými metódami, avšak výrazne ich predčí z hľadiska efektívnosti a finančnej a časovej nenáročnosti. Popísaná metóda je už takmer dva roky úspešne používaná v spektrometrickom laboratóriu Oddelenia radiačnej ochrany Atómových elektrární Jaslovské Bohunice, o čom svedčia výsledky medzinárodných porovnávacích meraní i opakované overovacie merania vykonávané Slovenským metrologickým ústavom v Bratislave.

POĎAKOVANIE

Ďakujem Prof. RNDr. Jozefovi Masarikovi, DrSc. za pomoc pri riešení a prekonávaní problémov pri experimentálnych meraniach a simulačných výpočtoch a za cenné rady počas vyhodnocovania výsledkov a písania dizertačnej práce. Zároveň mu chcem ako externý študent poďakovať za trpezlivosť a ústretovosť, s akou sa ujal vedenia mojej dizertačnej práce.

Ďakujem ostatným pedagógom a priateľom z Fakulty matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského, bez ktorých pomoci by nebolo možné realizovať predovšetkým simulačné výpočty.

Ďakujem vedúcemu Oddelenia radiačnej ochrany Ing. Svetozárovi Mockovi za všetko, čo pre mňa urobil.

Ďakujem kolegom zo spektrometrického laboratória Ing. Anne Tomáškovej a p. Augustínovi Bokorovi za pomoc pri príprave pracovných etalónov a pri experimentálnych meraniach.

Ďakujem kolegom z rádiochemického laboratória Oddelenia chémie za spoluprácu pri príprave pracovných etalónov.

Ďakujem mojej manželke Andree, mojim rodičom, príbuzným a priateľom za podporu počas celého postgraduálneho štúdia.

PRÍLOHY

Príloha č.1. Tabuľky

Tabuľková príloha obsahuje 51 tabuliek s experimentálne zmeranými a vypočítanými hodnotami detekčných účinností pre zloženia vzoriek piesok, drevené piliny, oceľové piliny a olovené guľôčky s vodou. Hodnoty účinnosti detekcie pre uvedené zloženie vzorky označené v tabuľkách ako $\varepsilon_{vyp.}$ boli vypočítané podľa vzorca :

$$\varepsilon_{vyp.} = \varepsilon_{exp.(voda)} \cdot e^{(\mu_{voda} \cdot X_{ef(voda)} - \mu_{vzorka} \cdot X_{ef(vzorka)})}$$

Hodnoty $X_{ef(voda)}$ a $X_{ef(vzorka)}$ boli vypočítané podľa vzorca (4.1), μ_{voda} a μ_{vzorka} sú lineárne koeficienty zoslabenia, $\varepsilon_{exp(voda)}$ je experimentálne zmeraná účinnosť detekcie pre vzorku vody v rovnakej geometrii a na rovnakom detektore.

Ako neistota vypočítanej účinnosti detekcie $\varepsilon_{vyp.}$ je uvádzaná neistota experimentálne zmeranej účinnosti detekcie pre vzorku vody $\varepsilon_{exp(voda)}$.

Percentuálny rozdiel δ_ε účinností ε_{exp} a ε_{vyp} bol vypočítaný podľa vzorca (4.3).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V250 - valcová geometria 250ml, detektor č.1)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{\text{exp.}}$	$\varepsilon_{\text{vyp.}}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,01569 ± 0,57 %	0,01557 ± 0,38 %	-0,78
	88,03	0,02944 ± 2,41 %	0,02853 ± 2,18 %	-3,09
	122,06	0,03399 ± 1,25 %	0,03411 ± 0,83 %	0,33
	165,85	0,03063 ± 1,21 %	0,03029 ± 0,75 %	-1,11
	279,19	0,02263 ± 2,83 %	0,02340 ± 2,50 %	3,39
	391,69	0,01861 ± 1,94 %	0,01886 ± 1,79 %	1,32
	513,99	0,01605 ± 1,52 %	0,01607 ± 1,30 %	0,11
	661,65	0,01381 ± 0,81 %	0,01391 ± 0,67 %	0,70
	834,83	0,01225 ± 1,85 %	0,01223 ± 1,75 %	-0,12
	898,02	0,01058 ± 0,85 %	0,01085 ± 0,65 %	2,53
	1173,20	0,00883 ± 0,65 %	0,00912 ± 0,43 %	3,29
	1332,50	0,00810 ± 0,68 %	0,00830 ± 0,44 %	2,44
1836,00	0,00677 ± 0,96 %	0,00677 ± 0,70 %	0,05	
drevené piliny	59,54	0,03462 ± 0,38 %	0,03314 ± 0,38 %	-4,27
	88,03	0,05226 ± 2,18 %	0,05143 ± 2,18 %	-1,59
	122,06	0,05740 ± 0,85 %	0,05704 ± 0,83 %	-0,63
	165,85	0,04841 ± 0,78 %	0,04831 ± 0,75 %	-0,20
	279,19	0,03581 ± 2,42 %	0,03501 ± 2,50 %	-2,23
	391,69	0,02741 ± 1,80 %	0,02713 ± 1,79 %	-1,02
	513,99	0,02290 ± 1,31 %	0,02239 ± 1,30 %	-2,21
	661,65	0,01874 ± 0,69 %	0,01883 ± 0,67 %	0,47
	834,83	0,01582 ± 1,77 %	0,01614 ± 1,75 %	2,04
	898,02	0,01447 ± 0,68 %	0,01420 ± 0,65 %	-1,84
	1173,20	0,01163 ± 0,48 %	0,01161 ± 0,43 %	-0,17
	1332,50	0,01059 ± 0,49 %	0,01043 ± 0,44 %	-1,53
1836,00	0,00831 ± 0,75 %	0,00826 ± 0,70 %	-0,59	
oceľové piliny	59,54	0,00590 ± 0,60 %	0,00588 ± 0,38 %	-0,32
	88,03	0,01912 ± 2,39 %	0,01973 ± 2,18 %	3,21
	122,06	0,02973 ± 0,99 %	0,03066 ± 0,83 %	3,14
	165,85	0,03075 ± 0,88 %	0,03066 ± 0,75 %	-0,28
	279,19	0,02399 ± 2,94 %	0,02530 ± 2,50 %	5,45
	391,69	0,02021 ± 1,81 %	0,02049 ± 1,79 %	1,42
	513,99	0,01740 ± 1,33 %	0,01741 ± 1,30 %	0,06
	661,65	0,01495 ± 0,69 %	0,01501 ± 0,67 %	0,38
	834,83	0,01311 ± 1,76 %	0,01315 ± 1,75 %	0,28
	898,02	0,01157 ± 0,67 %	0,01164 ± 0,65 %	0,65
	1173,20	0,00970 ± 0,45 %	0,00973 ± 0,43 %	0,25
	1332,50	0,00885 ± 0,47 %	0,00882 ± 0,44 %	-0,37
1836,00	0,00711 ± 0,72 %	0,00713 ± 0,70 %	0,33	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V250 - valcová geometria 250ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00160 ± 0,95 %	0,00157 ± 0,48 %	-1,96
	88,03	0,00788 ± 2,88 %	0,00790 ± 2,17 %	0,32
	122,06	0,01277 ± 1,14 %	0,01305 ± 0,75 %	2,19
	165,85	0,01277 ± 1,02 %	0,01340 ± 0,61 %	4,96
	279,19	0,00963 ± 2,65 %	0,00977 ± 2,36 %	1,45
	391,69	0,00738 ± 1,88 %	0,00746 ± 1,75 %	1,05
	513,99	0,00592 ± 1,45 %	0,00604 ± 1,24 %	2,05
	661,65	0,00488 ± 0,77 %	0,00493 ± 0,64 %	1,03
	834,83	0,00408 ± 1,82 %	0,00419 ± 1,73 %	2,69
	898,02	0,00377 ± 0,79 %	0,00387 ± 0,60 %	2,55
	1173,20	0,00304 ± 0,60 %	0,00312 ± 0,39 %	2,65
	1332,50	0,00279 ± 0,61 %	0,00284 ± 0,40 %	1,84
1836,00	0,00212 ± 0,91 %	0,00220 ± 0,64 %	3,58	
drevené piliny	59,54	0,00345 ± 0,75 %	0,00334 ± 0,48 %	-3,14
	88,03	0,01423 ± 2,32 %	0,01425 ± 2,17 %	0,11
	122,06	0,02179 ± 1,02 %	0,02182 ± 0,75 %	0,16
	165,85	0,02104 ± 0,93 %	0,02137 ± 0,61 %	1,57
	279,19	0,01461 ± 2,67 %	0,01462 ± 2,36 %	0,10
	391,69	0,01042 ± 1,89 %	0,01073 ± 1,75 %	3,01
	513,99	0,00836 ± 1,50 %	0,00842 ± 1,24 %	0,79
	661,65	0,00653 ± 0,78 %	0,00667 ± 0,64 %	2,19
	834,83	0,00546 ± 1,84 %	0,00552 ± 1,73 %	1,18
	898,02	0,00504 ± 0,84 %	0,00506 ± 0,60 %	0,54
	1173,20	0,00389 ± 0,63 %	0,00398 ± 0,39 %	2,15
	1332,50	0,00347 ± 0,65 %	0,00357 ± 0,40 %	2,95
1836,00	0,00266 ± 0,98 %	0,00268 ± 0,64 %	0,97	
oceľové piliny	59,54	0,00058 ± 2,23 %	0,00059 ± 0,48 %	2,57
	88,03	0,00551 ± 2,93 %	0,00547 ± 2,17 %	-0,75
	122,06	0,01166 ± 1,43 %	0,01173 ± 0,75 %	0,57
	165,85	0,01323 ± 1,29 %	0,01356 ± 0,61 %	2,53
	279,19	0,01024 ± 3,30 %	0,01057 ± 2,36 %	3,23
	391,69	0,00768 ± 2,02 %	0,00811 ± 1,75 %	5,54
	513,99	0,00638 ± 1,77 %	0,00655 ± 1,24 %	2,75
	661,65	0,00523 ± 0,84 %	0,00532 ± 0,64 %	1,69
	834,83	0,00436 ± 1,90 %	0,00450 ± 1,73 %	3,23
	898,02	0,00404 ± 0,98 %	0,00415 ± 0,60 %	2,68
	1173,20	0,00320 ± 0,72 %	0,00333 ± 0,39 %	4,02
	1332,50	0,00291 ± 0,75 %	0,00302 ± 0,40 %	3,84
1836,00	0,00222 ± 1,17 %	0,00232 ± 0,64 %	4,37	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V250 - valcová geometria 250ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,01925 ± 0,36 %	0,01870 ± 0,31 %	-2,89
	88,03	0,02222 ± 2,38 %	0,02234 ± 2,11 %	0,53
	122,06	0,02312 ± 0,84 %	0,02363 ± 0,65 %	2,21
	165,85	0,01939 ± 0,75 %	0,01938 ± 0,50 %	-0,07
	279,19	0,01244 ± 2,42 %	0,01290 ± 2,22 %	3,70
	391,69	0,00931 ± 1,81 %	0,00941 ± 1,73 %	1,07
	513,99	0,00739 ± 1,32 %	0,00741 ± 1,18 %	0,34
	661,65	0,00594 ± 0,71 %	0,00591 ± 0,63 %	-0,51
	834,83	0,00485 ± 1,78 %	0,00489 ± 1,72 %	0,64
	898,02	0,00438 ± 0,70 %	0,00443 ± 0,57 %	1,04
	1173,20	0,00351 ± 0,50 %	0,00351 ± 0,37 %	0,24
	1332,50	0,00314 ± 0,52 %	0,00315 ± 0,37 %	0,22
	1836,00	0,00235 ± 0,78 %	0,00238 ± 0,62 %	1,13
drevené piliny	59,54	0,03909 ± 0,36 %	0,03981 ± 0,31 %	1,85
	88,03	0,03878 ± 2,22 %	0,04027 ± 2,11 %	3,84
	122,06	0,03879 ± 0,87 %	0,03953 ± 0,65 %	1,91
	165,85	0,02999 ± 0,84 %	0,03090 ± 0,50 %	3,05
	279,19	0,01910 ± 2,58 %	0,01930 ± 2,22 %	1,02
	391,69	0,01296 ± 1,87 %	0,01354 ± 1,73 %	4,51
	513,99	0,01020 ± 1,47 %	0,01033 ± 1,18 %	1,33
	661,65	0,00780 ± 0,80 %	0,00800 ± 0,63 %	2,54
	834,83	0,00632 ± 1,83 %	0,00645 ± 1,72 %	2,05
	898,02	0,00575 ± 0,83 %	0,00580 ± 0,57 %	0,82
	1173,20	0,00448 ± 0,61 %	0,00448 ± 0,37 %	-0,07
	1332,50	0,00396 ± 0,64 %	0,00396 ± 0,37 %	0,10
	1836,00	0,00291 ± 0,98 %	0,00290 ± 0,62 %	-0,34
oceľové piliny	59,54	0,00758 ± 0,53 %	0,00706 ± 0,31 %	-6,85
	88,03	0,01510 ± 2,37 %	0,01545 ± 2,11 %	2,33
	122,06	0,02085 ± 1,06 %	0,02125 ± 0,65 %	1,88
	165,85	0,01980 ± 1,01 %	0,01961 ± 0,50 %	-0,94
	279,19	0,01408 ± 2,87 %	0,01395 ± 2,22 %	-0,96
	391,69	0,01004 ± 1,92 %	0,01023 ± 1,73 %	1,85
	513,99	0,00801 ± 1,61 %	0,00803 ± 1,18 %	0,33
	661,65	0,00618 ± 0,81 %	0,00638 ± 0,63 %	3,23
	834,83	0,00512 ± 1,86 %	0,00525 ± 1,72 %	2,62
	898,02	0,00470 ± 0,91 %	0,00475 ± 0,57 %	1,14
	1173,20	0,00365 ± 0,67 %	0,00375 ± 0,37 %	2,68
	1332,50	0,00326 ± 0,71 %	0,00335 ± 0,37 %	2,60
	1836,00	0,00242 ± 1,11 %	0,00251 ± 0,62 %	3,55

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V250 - valcová geometria 250ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,01013 ± 0,47 %	0,01007 ± 0,37 %	-0,52
	88,03	0,02003 ± 2,30 %	0,02093 ± 2,16 %	4,48
	122,06	0,02484 ± 0,98 %	0,02536 ± 0,79 %	2,08
	165,85	0,02278 ± 0,89 %	0,02329 ± 0,69 %	2,25
	279,19	0,01650 ± 2,49 %	0,01693 ± 2,44 %	2,59
	391,69	0,01275 ± 1,83 %	0,01313 ± 1,78 %	3,01
	513,99	0,01068 ± 1,35 %	0,01093 ± 1,29 %	2,35
	661,65	0,00890 ± 0,73 %	0,00909 ± 0,67 %	2,14
	834,83	0,00754 ± 1,79 %	0,00776 ± 1,75 %	2,95
	898,02	0,00673 ± 0,73 %	0,00701 ± 0,65 %	4,08
	1173,20	0,00556 ± 0,53 %	0,00567 ± 0,44 %	1,86
	1332,50	0,00506 ± 0,55 %	0,00519 ± 0,45 %	2,62
1836,00	0,00400 ± 0,81 %	0,00415 ± 0,72 %	3,79	
drevené piliny	59,54	0,02195 ± 0,40 %	0,02145 ± 0,37 %	-2,30
	88,03	0,03699 ± 2,19 %	0,03772 ± 2,16 %	1,98
	122,06	0,04239 ± 0,85 %	0,04241 ± 0,79 %	0,05
	165,85	0,03711 ± 0,77 %	0,03714 ± 0,69 %	0,09
	279,19	0,02521 ± 2,46 %	0,02533 ± 2,44 %	0,49
	391,69	0,01832 ± 1,83 %	0,01889 ± 1,78 %	3,13
	513,99	0,01500 ± 1,35 %	0,01523 ± 1,29 %	1,51
	661,65	0,01202 ± 0,72 %	0,01231 ± 0,67 %	2,38
	834,83	0,00997 ± 1,79 %	0,01024 ± 1,75 %	2,65
	898,02	0,00914 ± 0,73 %	0,00917 ± 0,65 %	0,37
	1173,20	0,00709 ± 0,53 %	0,00721 ± 0,44 %	1,72
	1332,50	0,00651 ± 0,54 %	0,00653 ± 0,45 %	0,26
1836,00	0,00496 ± 0,84 %	0,00506 ± 0,72 %	1,94	
oceľové piliny	59,54	0,00384 ± 0,95 %	0,00380 ± 0,37 %	-1,04
	88,03	0,01394 ± 2,70 %	0,01447 ± 2,16 %	3,80
	122,06	0,02315 ± 1,35 %	0,02280 ± 0,79 %	-1,51
	165,85	0,02266 ± 1,34 %	0,02357 ± 0,69 %	4,01
	279,19	0,01784 ± 3,26 %	0,01830 ± 2,44 %	2,61
	391,69	0,01374 ± 2,03 %	0,01427 ± 1,78 %	3,81
	513,99	0,01144 ± 1,78 %	0,01184 ± 1,29 %	3,49
	661,65	0,00950 ± 0,87 %	0,00981 ± 0,67 %	3,31
	834,83	0,00806 ± 1,92 %	0,00834 ± 1,75 %	3,41
	898,02	0,00731 ± 1,02 %	0,00752 ± 0,65 %	2,81
	1173,20	0,00587 ± 0,76 %	0,00604 ± 0,44 %	2,87
	1332,50	0,00540 ± 0,78 %	0,00552 ± 0,45 %	2,18
1836,00	0,00425 ± 1,22 %	0,00437 ± 0,72 %	2,95	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V250 - valcová geometria 250ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00171 ± 1,19 %	0,00173 ± 0,46 %	1,33
	88,03	0,00731 ± 2,54 %	0,00711 ± 2,18 %	-2,70
	122,06	0,01093 ± 1,98 %	0,01040 ± 0,82 %	-4,87
	165,85	0,00979 ± 1,85 %	0,00994 ± 0,71 %	1,53
	279,19	0,00610 ± 3,59 %	0,00623 ± 2,58 %	2,05
	391,69	0,00439 ± 2,00 %	0,00439 ± 1,79 %	0,22
	513,99	0,00346 ± 1,72 %	0,00343 ± 1,34 %	-0,74
	661,65	0,00278 ± 2,63 %	0,00268 ± 0,72 %	-3,72
	834,83	0,00222 ± 1,83 %	0,00217 ± 1,76 %	-2,21
	898,02	0,00204 ± 0,82 %	0,00202 ± 0,68 %	-0,80
	1173,20	0,00158 ± 2,08 %	0,00156 ± 0,48 %	-1,69
	1332,50	0,00139 ± 2,09 %	0,00139 ± 0,50 %	0,18
1836,00	0,00108 ± 0,86 %	0,00105 ± 0,78 %	-2,94	
drevené piliny	59,54	0,00375 ± 0,64 %	0,00369 ± 0,46 %	-1,47
	88,03	0,01283 ± 3,18 %	0,01282 ± 2,18 %	-0,10
	122,06	0,01797 ± 1,31 %	0,01739 ± 0,82 %	-3,21
	165,85	0,01574 ± 1,25 %	0,01585 ± 0,71 %	0,73
	279,19	0,00923 ± 3,25 %	0,00932 ± 2,58 %	0,94
	391,69	0,00614 ± 1,92 %	0,00632 ± 1,79 %	2,91
	513,99	0,00464 ± 1,58 %	0,00479 ± 1,34 %	3,26
	661,65	0,00355 ± 1,02 %	0,00362 ± 0,72 %	2,19
	834,83	0,00291 ± 1,82 %	0,00286 ± 1,76 %	-1,63
	898,02	0,00261 ± 0,82 %	0,00264 ± 0,68 %	1,24
	1173,20	0,00197 ± 0,78 %	0,00198 ± 0,48 %	0,48
	1332,50	0,00176 ± 0,78 %	0,00175 ± 0,50 %	-0,71
1836,00	0,00125 ± 1,04 %	0,00128 ± 0,78 %	2,57	
oceľové piliny	59,54	0,00061 ± 2,69 %	0,00065 ± 0,46 %	8,05
	88,03	0,00475 ± 3,73 %	0,00492 ± 2,18 %	3,59
	122,06	0,00911 ± 2,29 %	0,00935 ± 0,82 %	2,62
	165,85	0,00975 ± 1,99 %	0,01006 ± 0,71 %	3,14
	279,19	0,00666 ± 5,03 %	0,00673 ± 2,58 %	1,11
	391,69	0,00473 ± 2,09 %	0,00478 ± 1,79 %	0,99
	513,99	0,00368 ± 1,93 %	0,00372 ± 1,34 %	1,10
	661,65	0,00285 ± 1,50 %	0,00289 ± 0,72 %	1,49
	834,83	0,00222 ± 2,08 %	0,00233 ± 1,76 %	5,03
	898,02	0,00212 ± 0,99 %	0,00217 ± 0,68 %	2,01
	1173,20	0,00162 ± 1,13 %	0,00166 ± 0,48 %	2,44
	1332,50	0,00147 ± 1,07 %	0,00148 ± 0,50 %	0,48
1836,00	0,00106 ± 1,14 %	0,00111 ± 0,78 %	3,96	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V500 - valcová geometria 500ml, detektor č.1)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00942 ± 0,46 %	0,00939 ± 0,38 %	-0,24
	88,03	0,01825 ± 2,28 %	0,01733 ± 2,18 %	-5,05
	122,06	0,02164 ± 0,99 %	0,02169 ± 0,84 %	0,20
	165,85	0,01995 ± 0,89 %	0,01980 ± 0,78 %	-0,75
	279,19	0,01558 ± 2,48 %	0,01591 ± 2,59 %	2,13
	391,69	0,01280 ± 1,81 %	0,01306 ± 1,79 %	2,04
	513,99	0,01118 ± 1,30 %	0,01136 ± 1,30 %	1,57
	661,65	0,00959 ± 0,70 %	0,00988 ± 0,66 %	3,02
	834,83	0,00865 ± 1,76 %	0,00874 ± 1,74 %	1,02
	898,02	0,00777 ± 0,66 %	0,00797 ± 0,64 %	2,53
	1173,20	0,00656 ± 0,47 %	0,00669 ± 0,41 %	2,02
	1332,50	0,00609 ± 0,48 %	0,00619 ± 0,42 %	1,67
1836,00	0,00502 ± 0,72 %	0,00507 ± 0,68 %	1,05	
drevené piliny	59,54	0,02296 ± 0,35 %	0,02252 ± 0,38 %	-1,91
	88,03	0,03543 ± 2,14 %	0,03457 ± 2,18 %	-2,43
	122,06	0,03953 ± 0,74 %	0,03976 ± 0,84 %	0,58
	165,85	0,03431 ± 0,62 %	0,03439 ± 0,78 %	0,22
	279,19	0,02510 ± 2,27 %	0,02568 ± 2,59 %	2,32
	391,69	0,01984 ± 1,75 %	0,02012 ± 1,79 %	1,44
	513,99	0,01692 ± 1,20 %	0,01686 ± 1,30 %	-0,36
	661,65	0,01388 ± 0,65 %	0,01417 ± 0,66 %	2,10
	834,83	0,01191 ± 1,73 %	0,01216 ± 1,74 %	2,08
	898,02	0,01092 ± 0,59 %	0,01098 ± 0,64 %	0,52
	1173,20	0,00887 ± 0,39 %	0,00892 ± 0,41 %	0,60
	1332,50	0,00806 ± 0,40 %	0,00813 ± 0,42 %	0,82
1836,00	0,00645 ± 0,62 %	0,00642 ± 0,68 %	-0,37	
oceľové piliny	59,54	0,00348 ± 0,60 %	0,00347 ± 0,38 %	-0,20
	88,03	0,01191 ± 2,31 %	0,01148 ± 2,18 %	-3,65
	122,06	0,01998 ± 0,96 %	0,01908 ± 0,84 %	-4,53
	165,85	0,02063 ± 0,86 %	0,01995 ± 0,78 %	-3,33
	279,19	0,01725 ± 2,69 %	0,01734 ± 2,59 %	0,53
	391,69	0,01426 ± 1,79 %	0,01433 ± 1,79 %	0,45
	513,99	0,01248 ± 1,29 %	0,01243 ± 1,30 %	-0,41
	661,65	0,01069 ± 0,67 %	0,01077 ± 0,66 %	0,77
	834,83	0,00942 ± 1,75 %	0,00948 ± 1,74 %	0,71
	898,02	0,00859 ± 0,64 %	0,00863 ± 0,64 %	0,52
	1173,20	0,00718 ± 0,43 %	0,00720 ± 0,41 %	0,31
	1332,50	0,00669 ± 0,43 %	0,00664 ± 0,42 %	-0,75
1836,00	0,00544 ± 0,68 %	0,00539 ± 0,68 %	-0,90	
olovené guľ.+voda	661,65	0,00364 ± 1,18 %	0,00371 ± 0,66 %	1,77
	1173,20	0,00359 ± 0,40 %	0,00340 ± 0,41 %	-5,42
	1332,50	0,00348 ± 0,41 %	0,00328 ± 0,42 %	-5,59

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V500 - valcová geometria 500ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00080 ± 0,90 %	0,00080 ± 0,59 %	0,00
	88,03	0,00459 ± 2,35 %	0,00437 ± 2,23 %	-4,96
	122,06	0,00762 ± 1,01 %	0,00768 ± 0,84 %	0,77
	165,85	0,00805 ± 0,86 %	0,00806 ± 0,72 %	0,19
	279,19	0,00624 ± 2,47 %	0,00647 ± 2,53 %	3,68
	391,69	0,00477 ± 1,81 %	0,00495 ± 1,77 %	3,73
	513,99	0,00391 ± 1,33 %	0,00402 ± 1,30 %	3,00
	661,65	0,00325 ± 0,70 %	0,00335 ± 0,65 %	2,95
	834,83	0,00280 ± 1,77 %	0,00283 ± 1,74 %	1,15
	898,02	0,00263 ± 0,68 %	0,00264 ± 0,63 %	0,42
	1173,20	0,00215 ± 0,48 %	0,00218 ± 0,41 %	1,50
	1332,50	0,00196 ± 0,49 %	0,00199 ± 0,42 %	1,55
	1836,00	0,00154 ± 0,75 %	0,00156 ± 0,68 %	1,76
drevené piliny	59,54	0,00197 ± 0,85 %	0,00192 ± 0,59 %	-2,45
	88,03	0,00830 ± 2,41 %	0,00871 ± 2,23 %	4,97
	122,06	0,01379 ± 1,10 %	0,01408 ± 0,84 %	2,13
	165,85	0,01404 ± 0,98 %	0,01400 ± 0,72 %	-0,23
	279,19	0,01025 ± 2,72 %	0,01045 ± 2,53 %	1,95
	391,69	0,00736 ± 1,90 %	0,00763 ± 1,77 %	3,62
	513,99	0,00587 ± 1,52 %	0,00598 ± 1,30 %	1,75
	661,65	0,00466 ± 0,79 %	0,00480 ± 0,65 %	3,03
	834,83	0,00384 ± 1,84 %	0,00394 ± 1,74 %	2,58
	898,02	0,00361 ± 0,84 %	0,00364 ± 0,63 %	0,78
	1173,20	0,00289 ± 0,62 %	0,00290 ± 0,41 %	0,54
	1332,50	0,00260 ± 0,64 %	0,00262 ± 0,42 %	0,59
	1836,00	0,00198 ± 0,96 %	0,00198 ± 0,68 %	0,24
oceľové piliny	59,54	0,00028 ± 2,63 %	0,00030 ± 0,59 %	7,82
	88,03	0,00283 ± 3,12 %	0,00289 ± 2,23 %	2,16
	122,06	0,00695 ± 1,40 %	0,00676 ± 0,84 %	-2,85
	165,85	0,00813 ± 1,22 %	0,00812 ± 0,72 %	-0,10
	279,19	0,00679 ± 3,07 %	0,00705 ± 2,53 %	3,96
	391,69	0,00531 ± 1,92 %	0,00543 ± 1,77 %	2,34
	513,99	0,00440 ± 1,58 %	0,00441 ± 1,30 %	0,22
	661,65	0,00361 ± 0,77 %	0,00365 ± 0,65 %	0,99
	834,83	0,00305 ± 1,83 %	0,00307 ± 1,74 %	0,79
	898,02	0,00283 ± 0,83 %	0,00286 ± 0,63 %	1,17
	1173,20	0,00233 ± 0,58 %	0,00234 ± 0,41 %	0,54
	1332,50	0,00213 ± 0,60 %	0,00214 ± 0,42 %	0,18
	1836,00	0,00165 ± 0,92 %	0,00166 ± 0,68 %	0,43

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V500 - valcová geometria 500ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,01084 ± 0,43 %	0,01023 ± 0,32 %	-5,64
	88,03	0,01308 ± 2,29 %	0,01275 ± 2,13 %	-2,53
	122,06	0,01402 ± 1,07 %	0,01392 ± 0,71 %	-0,66
	165,85	0,01200 ± 1,03 %	0,01210 ± 0,60 %	0,90
	279,19	0,00805 ± 2,69 %	0,00823 ± 2,37 %	2,20
	391,69	0,00581 ± 1,93 %	0,00596 ± 1,76 %	2,74
	513,99	0,00473 ± 1,53 %	0,00486 ± 1,24 %	2,71
	661,65	0,00377 ± 0,83 %	0,00387 ± 0,65 %	2,66
	834,83	0,00323 ± 1,87 %	0,00324 ± 1,73 %	0,11
	898,02	0,00292 ± 0,88 %	0,00301 ± 0,61 %	2,75
	1173,20	0,00234 ± 0,69 %	0,00240 ± 0,39 %	2,61
	1332,50	0,00211 ± 0,72 %	0,00215 ± 0,40 %	1,73
1836,00	0,00161 ± 1,05 %	0,00164 ± 0,66 %	1,73	
drevené piliny	59,54	0,02399 ± 0,35 %	0,02453 ± 0,32 %	2,23
	88,03	0,02452 ± 2,17 %	0,02544 ± 2,13 %	3,74
	122,06	0,02492 ± 0,81 %	0,02553 ± 0,71 %	2,45
	165,85	0,02030 ± 0,73 %	0,02103 ± 0,60 %	3,59
	279,19	0,01319 ± 2,41 %	0,01328 ± 2,37 %	0,71
	391,69	0,00908 ± 1,81 %	0,00919 ± 1,76 %	1,20
	513,99	0,00701 ± 1,35 %	0,00721 ± 1,24 %	2,91
	661,65	0,00543 ± 0,72 %	0,00556 ± 0,65 %	2,34
	834,83	0,00434 ± 1,79 %	0,00451 ± 1,73 %	3,70
	898,02	0,00410 ± 0,72 %	0,00414 ± 0,61 %	1,03
	1173,20	0,00313 ± 0,53 %	0,00320 ± 0,39 %	2,19
	1332,50	0,00278 ± 0,54 %	0,00283 ± 0,40 %	1,63
1836,00	0,00203 ± 0,84 %	0,00208 ± 0,66 %	2,14	
oceľové piliny	59,54	0,00403 ± 0,66 %	0,00378 ± 0,32 %	-6,12
	88,03	0,00880 ± 2,59 %	0,00845 ± 2,13 %	-3,96
	122,06	0,01308 ± 1,25 %	0,01225 ± 0,71 %	-6,30
	165,85	0,01259 ± 1,22 %	0,01219 ± 0,60 %	-3,14
	279,19	0,00895 ± 3,20 %	0,00897 ± 2,37 %	0,24
	391,69	0,00649 ± 2,02 %	0,00654 ± 1,76 %	0,86
	513,99	0,00523 ± 1,79 %	0,00532 ± 1,24 %	1,61
	661,65	0,00423 ± 0,86 %	0,00422 ± 0,65 %	-0,09
	834,83	0,00345 ± 1,92 %	0,00352 ± 1,73 %	1,78
	898,02	0,00314 ± 1,03 %	0,00326 ± 0,61 %	3,63
	1173,20	0,00255 ± 0,75 %	0,00258 ± 0,39 %	1,36
	1332,50	0,00234 ± 0,78 %	0,00231 ± 0,40 %	-1,22
1836,00	0,00172 ± 1,25 %	0,00174 ± 0,66 %	1,46	
olovené guľ.+voda	661,65	0,00139 ± 1,22 %	0,00145 ± 0,65 %	4,45
	1173,20	0,00128 ± 0,47 %	0,00122 ± 0,39 %	-4,98
	1332,50	0,00121 ± 0,47 %	0,00114 ± 0,40 %	-5,64

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V500 - valcová geometria 500ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00597 ± 0,42 %	0,00588 ± 0,38 %	-1,43
	88,03	0,01212 ± 2,23 %	0,01255 ± 2,17 %	3,52
	122,06	0,01592 ± 0,86 %	0,01632 ± 0,80 %	2,50
	165,85	0,01508 ± 0,74 %	0,01522 ± 0,72 %	0,97
	279,19	0,01118 ± 2,34 %	0,01138 ± 2,53 %	1,80
	391,69	0,00885 ± 1,78 %	0,00901 ± 1,78 %	1,81
	513,99	0,00737 ± 1,25 %	0,00749 ± 1,31 %	1,58
	661,65	0,00614 ± 0,67 %	0,00632 ± 0,66 %	2,85
	834,83	0,00540 ± 1,75 %	0,00550 ± 1,75 %	1,85
	898,02	0,00494 ± 0,63 %	0,00505 ± 0,65 %	2,21
	1173,20	0,00405 ± 0,44 %	0,00414 ± 0,43 %	2,17
	1332,50	0,00373 ± 0,45 %	0,00381 ± 0,44 %	2,23
	1836,00	0,00297 ± 0,68 %	0,00303 ± 0,71 %	2,03
drevené piliny	59,54	0,01443 ± 0,41 %	0,01410 ± 0,38 %	-2,24
	88,03	0,02525 ± 2,20 %	0,02503 ± 2,17 %	-0,86
	122,06	0,02906 ± 0,88 %	0,02992 ± 0,80 %	2,95
	165,85	0,02638 ± 0,80 %	0,02644 ± 0,72 %	0,24
	279,19	0,01814 ± 2,48 %	0,01837 ± 2,53 %	1,25
	391,69	0,01364 ± 1,82 %	0,01388 ± 1,78 %	1,81
	513,99	0,01095 ± 1,37 %	0,01112 ± 1,31 %	1,58
	661,65	0,00888 ± 0,72 %	0,00906 ± 0,66 %	2,03
	834,83	0,00753 ± 1,79 %	0,00765 ± 1,75 %	1,54
	898,02	0,00685 ± 0,73 %	0,00696 ± 0,65 %	1,57
	1173,20	0,00549 ± 0,53 %	0,00552 ± 0,43 %	0,49
	1332,50	0,00501 ± 0,54 %	0,00500 ± 0,44 %	-0,06
	1836,00	0,00382 ± 0,84 %	0,00384 ± 0,71 %	0,56
oceľové piliny	59,54	0,00221 ± 0,72 %	0,00218 ± 0,38 %	-1,75
	88,03	0,00877 ± 2,38 %	0,00831 ± 2,17 %	-5,22
	122,06	0,01469 ± 1,03 %	0,01436 ± 0,80 %	-2,30
	165,85	0,01556 ± 0,92 %	0,01534 ± 0,72 %	-1,42
	279,19	0,01194 ± 2,69 %	0,01240 ± 2,53 %	3,88
	391,69	0,00975 ± 1,85 %	0,00988 ± 1,78 %	1,33
	513,99	0,00822 ± 1,45 %	0,00820 ± 1,31 %	-0,30
	661,65	0,00693 ± 0,73 %	0,00689 ± 0,66 %	-0,58
	834,83	0,00587 ± 1,80 %	0,00597 ± 1,75 %	1,61
	898,02	0,00538 ± 0,78 %	0,00547 ± 0,65 %	1,62
	1173,20	0,00444 ± 0,55 %	0,00446 ± 0,43 %	0,48
	1332,50	0,00409 ± 0,56 %	0,00409 ± 0,44 %	-0,22
	1836,00	0,00323 ± 0,89 %	0,00322 ± 0,71 %	-0,32
olovené guľ.+voda	661,65	0,00222 ± 1,24 %	0,00237 ± 0,66 %	6,60
	1173,20	0,00224 ± 0,51 %	0,00210 ± 0,43 %	-5,92
	1332,50	0,00213 ± 0,52 %	0,00202 ± 0,44 %	-5,17

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V500 - valcová geometria 500ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00094 ± 0,95 %	0,00092 ± 0,50 %	-1,98
	88,03	0,00408 ± 2,62 %	0,00400 ± 2,29 %	-1,93
	122,06	0,00641 ± 1,51 %	0,00635 ± 0,88 %	-1,03
	165,85	0,00627 ± 1,29 %	0,00637 ± 0,76 %	1,53
	279,19	0,00415 ± 2,81 %	0,00426 ± 2,70 %	2,61
	391,69	0,00296 ± 1,87 %	0,00296 ± 1,80 %	0,24
	513,99	0,00229 ± 1,44 %	0,00230 ± 1,36 %	0,53
	661,65	0,00178 ± 1,69 %	0,00184 ± 0,69 %	3,47
	834,83	0,00151 ± 1,79 %	0,00153 ± 1,76 %	1,38
	898,02	0,00142 ± 0,73 %	0,00141 ± 0,68 %	-0,69
	1173,20	0,00110 ± 1,27 %	0,00111 ± 0,45 %	0,61
	1332,50	0,00098 ± 1,29 %	0,00099 ± 0,47 %	0,80
1836,00	0,00076 ± 0,82 %	0,00076 ± 0,76 %	0,03	
drevené piliny	59,54	0,00228 ± 0,80 %	0,00220 ± 0,50 %	-3,80
	88,03	0,00774 ± 3,10 %	0,00798 ± 2,29 %	3,09
	122,06	0,01158 ± 1,50 %	0,01164 ± 0,88 %	0,52
	165,85	0,01069 ± 1,41 %	0,01106 ± 0,76 %	3,47
	279,19	0,00680 ± 3,44 %	0,00688 ± 2,70 %	1,07
	391,69	0,00434 ± 2,01 %	0,00457 ± 1,80 %	5,13
	513,99	0,00334 ± 1,73 %	0,00341 ± 1,36 %	2,22
	661,65	0,00258 ± 1,00 %	0,00264 ± 0,69 %	2,37
	834,83	0,00203 ± 1,90 %	0,00213 ± 1,76 %	4,97
	898,02	0,00187 ± 0,95 %	0,00195 ± 0,68 %	4,19
	1173,20	0,00143 ± 0,83 %	0,00148 ± 0,45 %	3,34
	1332,50	0,00128 ± 0,85 %	0,00130 ± 0,47 %	1,96
1836,00	0,00094 ± 1,06 %	0,00096 ± 0,76 %	1,71	
oceľové piliny	59,54	0,00032 ± 3,59 %	0,00034 ± 0,50 %	7,45
	88,03	0,00269 ± 4,30 %	0,00265 ± 2,29 %	-1,68
	122,06	0,00583 ± 2,44 %	0,00558 ± 0,88 %	-4,14
	165,85	0,00652 ± 2,07 %	0,00641 ± 0,76 %	-1,69
	279,19	0,00462 ± 4,91 %	0,00464 ± 2,70 %	0,47
	391,69	0,00312 ± 2,12 %	0,00325 ± 1,80 %	4,26
	513,99	0,00246 ± 1,99 %	0,00252 ± 1,36 %	2,45
	661,65	0,00199 ± 1,88 %	0,00201 ± 0,69 %	0,67
	834,83	0,00167 ± 2,16 %	0,00166 ± 1,76 %	-0,73
	898,02	0,00152 ± 0,97 %	0,00153 ± 0,68 %	0,35
	1173,20	0,00117 ± 1,31 %	0,00120 ± 0,45 %	2,34
	1332,50	0,00105 ± 1,29 %	0,00106 ± 0,47 %	1,81
1836,00	0,00079 ± 1,10 %	0,00081 ± 0,76 %	1,40	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V1000 - valcová geometria 1000ml, detektor č.1)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00621 ± 0,44 %	0,00585 ± 0,38 %	-5,73
	88,03	0,01209 ± 2,27 %	0,01143 ± 2,19 %	-5,43
	122,06	0,01448 ± 0,97 %	0,01431 ± 0,85 %	-1,14
	165,85	0,01380 ± 0,85 %	0,01331 ± 0,79 %	-3,54
	279,19	0,01058 ± 2,50 %	0,01094 ± 2,82 %	3,39
	391,69	0,00899 ± 1,79 %	0,00902 ± 1,78 %	0,40
	513,99	0,00802 ± 1,26 %	0,00804 ± 1,29 %	0,28
	661,65	0,00691 ± 0,68 %	0,00692 ± 0,65 %	0,15
	834,83	0,00626 ± 1,75 %	0,00619 ± 1,74 %	-1,11
	898,02	0,00568 ± 0,63 %	0,00566 ± 0,63 %	-0,40
	1173,20	0,00479 ± 0,44 %	0,00483 ± 0,40 %	0,82
	1332,50	0,00445 ± 0,44 %	0,00449 ± 0,40 %	1,00
	1836,00	0,00371 ± 0,66 %	0,00376 ± 0,66 %	1,10
drevené piliny	59,54	0,01557 ± 0,36 %	0,01536 ± 0,38 %	-1,35
	88,03	0,02436 ± 2,16 %	0,02443 ± 2,19 %	0,27
	122,06	0,02720 ± 0,77 %	0,02788 ± 0,85 %	2,49
	165,85	0,02436 ± 0,65 %	0,02444 ± 0,79 %	0,35
	279,19	0,01809 ± 2,30 %	0,01856 ± 2,82 %	2,63
	391,69	0,01439 ± 1,76 %	0,01457 ± 1,78 %	1,29
	513,99	0,01202 ± 1,22 %	0,01249 ± 1,29 %	3,90
	661,65	0,01006 ± 0,65 %	0,01037 ± 0,65 %	3,05
	834,83	0,00868 ± 1,74 %	0,00898 ± 1,74 %	3,41
	898,02	0,00801 ± 0,60 %	0,00812 ± 0,63 %	1,33
	1173,20	0,00658 ± 0,40 %	0,00669 ± 0,40 %	1,63
	1332,50	0,00597 ± 0,41 %	0,00612 ± 0,40 %	2,63
	1836,00	0,00476 ± 0,64 %	0,00493 ± 0,66 %	3,54
oceľové piliny	59,54	0,00189 ± 0,73 %	0,00169 ± 0,38 %	-10,12
	88,03	0,00727 ± 2,43 %	0,00706 ± 2,19 %	-2,85
	122,06	0,01213 ± 1,08 %	0,01230 ± 0,85 %	1,45
	165,85	0,01329 ± 0,96 %	0,01332 ± 0,79 %	0,23
	279,19	0,01127 ± 2,90 %	0,01194 ± 2,82 %	5,95
	391,69	0,00970 ± 1,81 %	0,00992 ± 1,78 %	2,30
	513,99	0,00866 ± 1,33 %	0,00883 ± 1,29 %	1,96
	661,65	0,00754 ± 0,68 %	0,00757 ± 0,65 %	0,41
	834,83	0,00659 ± 1,76 %	0,00674 ± 1,74 %	2,26
	898,02	0,00598 ± 0,66 %	0,00615 ± 0,63 %	2,77
	1173,20	0,00513 ± 0,44 %	0,00521 ± 0,40 %	1,61
	1332,50	0,00475 ± 0,45 %	0,00483 ± 0,40 %	1,61
	1836,00	0,00386 ± 0,71 %	0,00400 ± 0,66 %	3,61
olovené guľ.+voda	661,65	0,00244 ± 1,41 %	0,00226 ± 0,65 %	-7,08
	1173,20	0,00241 ± 0,78 %	0,00227 ± 0,40 %	-5,72
	1332,50	0,00231 ± 0,79 %	0,00222 ± 0,40 %	-3,88

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V1000 - valcová geometria 1000ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00047 ± 1,14 %	0,00045 ± 0,70 %	-4,33
	88,03	0,00270 ± 2,69 %	0,00279 ± 2,29 %	3,35
	122,06	0,00506 ± 1,14 %	0,00495 ± 0,91 %	-2,23
	165,85	0,00536 ± 0,98 %	0,00540 ± 0,79 %	0,81
	279,19	0,00413 ± 2,58 %	0,00417 ± 2,73 %	0,94
	391,69	0,00337 ± 1,83 %	0,00326 ± 1,80 %	-3,36
	513,99	0,00278 ± 1,36 %	0,00276 ± 1,34 %	-0,77
	661,65	0,00231 ± 0,72 %	0,00231 ± 0,66 %	-0,05
	834,83	0,00200 ± 1,78 %	0,00198 ± 1,75 %	-0,87
	898,02	0,00186 ± 0,70 %	0,00185 ± 0,65 %	-0,50
	1173,20	0,00155 ± 0,51 %	0,00153 ± 0,42 %	-1,49
	1332,50	0,00142 ± 0,52 %	0,00141 ± 0,43 %	-0,54
1836,00	0,00113 ± 0,77 %	0,00112 ± 0,70 %	-1,49	
drevené piliny	59,54	0,00120 ± 0,77 %	0,00119 ± 0,70 %	-1,15
	88,03	0,00590 ± 2,38 %	0,00597 ± 2,29 %	1,13
	122,06	0,00924 ± 0,98 %	0,00963 ± 0,91 %	4,23
	165,85	0,00975 ± 0,84 %	0,00992 ± 0,79 %	1,70
	279,19	0,00710 ± 2,55 %	0,00707 ± 2,73 %	-0,36
	391,69	0,00534 ± 1,82 %	0,00526 ± 1,80 %	-1,44
	513,99	0,00418 ± 1,38 %	0,00428 ± 1,34 %	2,30
	661,65	0,00337 ± 0,72 %	0,00346 ± 0,66 %	2,68
	834,83	0,00276 ± 1,79 %	0,00287 ± 1,75 %	4,04
	898,02	0,00262 ± 0,72 %	0,00266 ± 0,65 %	1,42
	1173,20	0,00207 ± 0,52 %	0,00212 ± 0,42 %	2,56
	1332,50	0,00187 ± 0,53 %	0,00193 ± 0,43 %	3,12
1836,00	0,00142 ± 0,82 %	0,00147 ± 0,70 %	3,63	
oceľové piliny	59,54	0,00014 ± 2,64 %	0,00013 ± 0,70 %	-9,63
	88,03	0,00170 ± 3,56 %	0,00172 ± 2,29 %	1,43
	122,06	0,00435 ± 1,25 %	0,00425 ± 0,91 %	-2,17
	165,85	0,00541 ± 1,05 %	0,00540 ± 0,79 %	-0,18
	279,19	0,00452 ± 2,91 %	0,00455 ± 2,73 %	0,67
	391,69	0,00355 ± 1,88 %	0,00358 ± 1,80 %	0,85
	513,99	0,00305 ± 1,48 %	0,00302 ± 1,34 %	-0,88
	661,65	0,00253 ± 0,74 %	0,00252 ± 0,66 %	-0,16
	834,83	0,00215 ± 1,80 %	0,00216 ± 1,75 %	0,32
	898,02	0,00199 ± 0,78 %	0,00202 ± 0,65 %	1,26
	1173,20	0,00164 ± 0,55 %	0,00165 ± 0,42 %	0,83
	1332,50	0,00150 ± 0,56 %	0,00152 ± 0,43 %	1,50
1836,00	0,00117 ± 0,89 %	0,00119 ± 0,70 %	1,56	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V1000 - valcová geometria 1000ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00668 ± 0,38 %	0,00643 ± 0,33 %	-3,88
	88,03	0,00880 ± 2,53 %	0,00837 ± 2,17 %	-4,84
	122,06	0,00966 ± 0,89 %	0,00915 ± 0,74 %	-5,28
	165,85	0,00822 ± 0,81 %	0,00802 ± 0,63 %	-2,46
	279,19	0,00552 ± 2,44 %	0,00562 ± 2,44 %	1,77
	391,69	0,00420 ± 1,80 %	0,00410 ± 1,76 %	-2,37
	513,99	0,00339 ± 1,31 %	0,00330 ± 1,26 %	-2,64
	661,65	0,00271 ± 0,70 %	0,00268 ± 0,65 %	-1,11
	834,83	0,00230 ± 1,77 %	0,00223 ± 1,74 %	-3,09
	898,02	0,00215 ± 0,67 %	0,00209 ± 0,62 %	-2,69
	1173,20	0,00171 ± 0,48 %	0,00169 ± 0,40 %	-1,37
	1332,50	0,00154 ± 0,49 %	0,00152 ± 0,40 %	-1,30
	1836,00	0,00119 ± 0,75 %	0,00118 ± 0,67 %	-0,99
drevené piliny	59,54	0,01676 ± 0,34 %	0,01687 ± 0,33 %	0,62
	88,03	0,01743 ± 2,19 %	0,01789 ± 2,17 %	2,61
	122,06	0,01762 ± 0,80 %	0,01782 ± 0,74 %	1,10
	165,85	0,01469 ± 0,71 %	0,01472 ± 0,63 %	0,27
	279,19	0,00969 ± 2,40 %	0,00953 ± 2,44 %	-1,71
	391,69	0,00665 ± 1,79 %	0,00663 ± 1,76 %	-0,33
	513,99	0,00514 ± 1,31 %	0,00512 ± 1,26 %	-0,40
	661,65	0,00393 ± 0,70 %	0,00401 ± 0,65 %	2,06
	834,83	0,00323 ± 1,77 %	0,00323 ± 1,74 %	-0,03
	898,02	0,00300 ± 0,69 %	0,00300 ± 0,62 %	0,10
	1173,20	0,00229 ± 0,49 %	0,00234 ± 0,40 %	2,16
	1332,50	0,00205 ± 0,50 %	0,00208 ± 0,40 %	1,48
	1836,00	0,00154 ± 0,78 %	0,00154 ± 0,67 %	0,33
oceľové piliny	59,54	0,00224 ± 0,52 %	0,00186 ± 0,33 %	-16,78
	88,03	0,00528 ± 2,73 %	0,00517 ± 2,17 %	-2,14
	122,06	0,00823 ± 0,99 %	0,00786 ± 0,74 %	-4,48
	165,85	0,00831 ± 0,88 %	0,00802 ± 0,63 %	-3,51
	279,19	0,00605 ± 2,69 %	0,00613 ± 2,44 %	1,37
	391,69	0,00439 ± 1,84 %	0,00452 ± 1,76 %	2,79
	513,99	0,00366 ± 1,42 %	0,00362 ± 1,26 %	-1,23
	661,65	0,00298 ± 0,71 %	0,00293 ± 0,65 %	-1,67
	834,83	0,00240 ± 1,79 %	0,00243 ± 1,74 %	1,23
	898,02	0,00223 ± 0,74 %	0,00227 ± 0,62 %	1,79
	1173,20	0,00181 ± 0,52 %	0,00182 ± 0,40 %	0,68
	1332,50	0,00164 ± 0,53 %	0,00164 ± 0,40 %	-0,18
	1836,00	0,00122 ± 0,86 %	0,00125 ± 0,67 %	2,47
olovené guľ.+voda	661,65	0,00092 ± 1,22 %	0,00088 ± 0,65 %	-4,83
	1173,20	0,00085 ± 0,47 %	0,00079 ± 0,40 %	-6,18
	1332,50	0,00081 ± 0,47 %	0,00076 ± 0,40 %	-6,32

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V1000 - valcová geometria 1000ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00380 ± 0,49 %	0,00356 ± 0,36 %	-6,31
	88,03	0,00818 ± 2,38 %	0,00796 ± 2,16 %	-2,62
	122,06	0,01065 ± 1,03 %	0,01043 ± 0,77 %	-2,06
	165,85	0,01036 ± 0,91 %	0,00994 ± 0,66 %	-3,99
	279,19	0,00773 ± 2,52 %	0,00760 ± 2,47 %	-1,60
	391,69	0,00620 ± 1,82 %	0,00610 ± 1,76 %	-1,55
	513,99	0,00520 ± 1,34 %	0,00517 ± 1,26 %	-0,60
	661,65	0,00437 ± 0,71 %	0,00438 ± 0,64 %	0,40
	834,83	0,00386 ± 1,78 %	0,00380 ± 1,73 %	-1,47
	898,02	0,00359 ± 0,69 %	0,00354 ± 0,61 %	-1,61
	1173,20	0,00298 ± 0,49 %	0,00293 ± 0,39 %	-1,59
	1332,50	0,00272 ± 0,51 %	0,00270 ± 0,40 %	-0,92
1836,00	0,00219 ± 0,76 %	0,00218 ± 0,65 %	-0,74	
drevené piliny	59,54	0,00965 ± 0,37 %	0,00934 ± 0,36 %	-3,20
	88,03	0,01715 ± 2,16 %	0,01701 ± 2,16 %	-0,81
	122,06	0,02006 ± 0,77 %	0,02031 ± 0,77 %	1,27
	165,85	0,01817 ± 0,65 %	0,01826 ± 0,66 %	0,50
	279,19	0,01294 ± 2,31 %	0,01290 ± 2,47 %	-0,30
	391,69	0,00985 ± 1,76 %	0,00985 ± 1,76 %	0,09
	513,99	0,00789 ± 1,24 %	0,00803 ± 1,26 %	1,79
	661,65	0,00641 ± 0,66 %	0,00656 ± 0,64 %	2,37
	834,83	0,00543 ± 1,74 %	0,00552 ± 1,73 %	1,57
	898,02	0,00499 ± 0,63 %	0,00508 ± 0,61 %	1,68
	1173,20	0,00399 ± 0,43 %	0,00406 ± 0,39 %	1,65
	1332,50	0,00363 ± 0,44 %	0,00368 ± 0,40 %	1,32
1836,00	0,00283 ± 0,69 %	0,00286 ± 0,65 %	1,10	
oceľové piliny	59,54	0,00116 ± 0,87 %	0,00103 ± 0,36 %	-11,03
	88,03	0,00492 ± 2,49 %	0,00492 ± 2,16 %	0,01
	122,06	0,00938 ± 1,12 %	0,00896 ± 0,77 %	-4,43
	165,85	0,01005 ± 1,01 %	0,00995 ± 0,66 %	-1,07
	279,19	0,00808 ± 2,79 %	0,00830 ± 2,47 %	2,63
	391,69	0,00660 ± 1,85 %	0,00671 ± 1,76 %	1,61
	513,99	0,00569 ± 1,41 %	0,00568 ± 1,26 %	-0,22
	661,65	0,00484 ± 0,71 %	0,00479 ± 0,64 %	-1,01
	834,83	0,00410 ± 1,78 %	0,00414 ± 1,73 %	1,06
	898,02	0,00378 ± 0,73 %	0,00384 ± 0,61 %	1,72
	1173,20	0,00316 ± 0,51 %	0,00316 ± 0,39 %	0,12
	1332,50	0,00289 ± 0,52 %	0,00290 ± 0,40 %	0,47
1836,00	0,00229 ± 0,81 %	0,00232 ± 0,65 %	1,38	
olovené guľ.+voda	661,65	0,00153 ± 1,20 %	0,00143 ± 0,64 %	-6,30
	1173,20	0,00149 ± 0,44 %	0,00138 ± 0,39 %	-7,56
	1332,50	0,00142 ± 0,45 %	0,00134 ± 0,40 %	-5,79

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V1000 - valcová geometria 1000ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00056 ± 1,26 %	0,00053 ± 0,61 %	-4,43
	88,03	0,00301 ± 2,78 %	0,00280 ± 2,27 %	-7,02
	122,06	0,00449 ± 1,68 %	0,00409 ± 1,03 %	-8,81
	165,85	0,00417 ± 1,53 %	0,00406 ± 0,93 %	-2,61
	279,19	0,00274 ± 3,36 %	0,00281 ± 3,06 %	2,42
	391,69	0,00198 ± 1,98 %	0,00200 ± 1,83 %	1,08
	513,99	0,00155 ± 1,64 %	0,00158 ± 1,45 %	1,80
	661,65	0,00126 ± 1,47 %	0,00127 ± 0,86 %	0,81
	834,83	0,00107 ± 1,86 %	0,00104 ± 1,77 %	-3,03
	898,02	0,00099 ± 0,86 %	0,00097 ± 0,72 %	-1,34
	1173,20	0,00078 ± 1,05 %	0,00077 ± 0,55 %	-1,91
	1332,50	0,00072 ± 1,02 %	0,00069 ± 0,55 %	-3,66
1836,00	0,00054 ± 0,99 %	0,00054 ± 0,80 %	-0,83	
drevené piliny	59,54	0,00139 ± 0,86 %	0,00139 ± 0,61 %	0,54
	88,03	0,00583 ± 2,77 %	0,00598 ± 2,27 %	2,70
	122,06	0,00779 ± 1,46 %	0,00797 ± 1,03 %	2,32
	165,85	0,00752 ± 1,31 %	0,00746 ± 0,93 %	-0,71
	279,19	0,00475 ± 3,31 %	0,00477 ± 3,06 %	0,29
	391,69	0,00325 ± 1,96 %	0,00323 ± 1,83 %	-0,69
	513,99	0,00245 ± 1,65 %	0,00245 ± 1,45 %	-0,10
	661,65	0,00184 ± 0,91 %	0,00191 ± 0,86 %	3,34
	834,83	0,00147 ± 1,88 %	0,00151 ± 1,77 %	2,72
	898,02	0,00138 ± 0,92 %	0,00140 ± 0,72 %	1,43
	1173,20	0,00105 ± 0,74 %	0,00106 ± 0,55 %	0,91
	1332,50	0,00093 ± 0,76 %	0,00095 ± 0,55 %	1,71
1836,00	0,00069 ± 1,11 %	0,00070 ± 0,80 %	1,76	
oceľové piliny	59,54	0,000160 ± 4,26 %	0,000154 ± 0,61 %	-3,93
	88,03	0,00176 ± 3,98 %	0,00173 ± 2,27 %	-1,66
	122,06	0,00374 ± 2,28 %	0,00352 ± 1,03 %	-5,92
	165,85	0,00396 ± 1,93 %	0,00407 ± 0,93 %	2,56
	279,19	0,00301 ± 4,24 %	0,00307 ± 3,06 %	1,83
	391,69	0,00219 ± 2,02 %	0,00220 ± 1,83 %	0,32
	513,99	0,00172 ± 1,78 %	0,00173 ± 1,45 %	0,47
	661,65	0,00137 ± 1,59 %	0,00139 ± 0,86 %	1,54
	834,83	0,00111 ± 1,87 %	0,00113 ± 1,77 %	2,09
	898,02	0,00105 ± 0,90 %	0,00106 ± 0,72 %	1,05
	1173,20	0,00083 ± 1,13 %	0,00083 ± 0,55 %	0,28
	1332,50	0,00074 ± 1,12 %	0,00075 ± 0,55 %	0,85
1836,00	0,00056 ± 1,03 %	0,00057 ± 0,80 %	2,25	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V2000 - valcová geometria 2000ml, detektor č.1)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00397 ± 0,40 %	0,00393 ± 0,42 %	-0,89
	88,03	0,00809 ± 2,23 %	0,00794 ± 2,26 %	-1,88
	122,06	0,00997 ± 0,88 %	0,01014 ± 0,97 %	1,71
	165,85	0,00991 ± 0,75 %	0,00966 ± 0,93 %	-2,56
	279,19	0,00784 ± 2,45 %	0,00801 ± 2,91 %	2,14
	391,69	0,00652 ± 1,76 %	0,00672 ± 1,81 %	3,05
	513,99	0,00577 ± 1,22 %	0,00589 ± 1,38 %	2,13
	661,65	0,00503 ± 0,64 %	0,00515 ± 0,67 %	2,37
	834,83	0,00454 ± 1,73 %	0,00461 ± 1,75 %	1,59
	898,02	0,00421 ± 0,58 %	0,00430 ± 0,67 %	2,05
	1173,20	0,00358 ± 0,38 %	0,00366 ± 0,43 %	2,22
	1332,50	0,00336 ± 0,38 %	0,00343 ± 0,43 %	1,97
1836,00	0,00283 ± 0,60 %	0,00289 ± 0,70 %	2,07	
drevené piliny	59,54	0,01186 ± 0,34 %	0,01140 ± 0,42 %	-3,87
	88,03	0,01909 ± 2,14 %	0,01865 ± 2,26 %	-2,33
	122,06	0,02147 ± 0,74 %	0,02163 ± 0,97 %	0,74
	165,85	0,01931 ± 0,62 %	0,01935 ± 0,93 %	0,21
	279,19	0,01465 ± 2,30 %	0,01473 ± 2,91 %	0,59
	391,69	0,01185 ± 1,74 %	0,01172 ± 1,81 %	-1,15
	513,99	0,00977 ± 1,20 %	0,00983 ± 1,38 %	0,62
	661,65	0,00808 ± 0,64 %	0,00825 ± 0,67 %	2,16
	834,83	0,00698 ± 1,73 %	0,00713 ± 1,75 %	2,05
	898,02	0,00647 ± 0,58 %	0,00656 ± 0,67 %	1,49
	1173,20	0,00528 ± 0,38 %	0,00537 ± 0,43 %	1,72
	1332,50	0,00485 ± 0,38 %	0,00494 ± 0,43 %	1,72
1836,00	0,00389 ± 0,62 %	0,00398 ± 0,70 %	2,20	
oceľové piliny	59,54	0,00126 ± 0,95 %	0,00138 ± 0,42 %	10,13
	88,03	0,00487 ± 2,74 %	0,00515 ± 2,26 %	5,66
	122,06	0,00890 ± 1,34 %	0,00901 ± 0,97 %	1,27
	165,85	0,00947 ± 1,27 %	0,01002 ± 0,93 %	5,80
	279,19	0,00868 ± 3,13 %	0,00909 ± 2,91 %	4,77
	391,69	0,00762 ± 2,03 %	0,00769 ± 1,81 %	0,95
	513,99	0,00690 ± 1,47 %	0,00672 ± 1,38 %	-2,61
	661,65	0,00606 ± 0,72 %	0,00584 ± 0,67 %	-3,58
	834,83	0,00513 ± 1,79 %	0,00520 ± 1,75 %	1,39
	898,02	0,00476 ± 0,74 %	0,00484 ± 0,67 %	1,51
	1173,20	0,00408 ± 0,50 %	0,00409 ± 0,43 %	0,14
	1332,50	0,00379 ± 0,51 %	0,00380 ± 0,43 %	0,39
1836,00	0,00309 ± 0,80 %	0,00316 ± 0,70 %	2,28	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V2000 - valcová geometria 2000ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00031 ± 0,95 %	0,00031 ± 0,89 %	-0,27
	88,03	0,00191 ± 2,58 %	0,00186 ± 2,45 %	-2,67
	122,06	0,00354 ± 1,00 %	0,00349 ± 1,08 %	-1,29
	165,85	0,00384 ± 0,84 %	0,00385 ± 0,98 %	0,30
	279,19	0,00302 ± 2,55 %	0,00308 ± 3,14 %	2,22
	391,69	0,00244 ± 1,79 %	0,00246 ± 1,85 %	1,03
	513,99	0,00198 ± 1,30 %	0,00203 ± 1,48 %	2,78
	661,65	0,00167 ± 0,67 %	0,00173 ± 0,69 %	3,31
	834,83	0,00145 ± 1,75 %	0,00148 ± 1,77 %	2,04
	898,02	0,00137 ± 0,63 %	0,00139 ± 0,73 %	1,60
	1173,20	0,00112 ± 0,42 %	0,00116 ± 0,47 %	2,96
	1332,50	0,00104 ± 0,43 %	0,00106 ± 0,48 %	2,18
1836,00	0,00083 ± 0,67 %	0,00085 ± 0,79 %	1,95	
drevené piliny	59,54	0,00098 ± 0,60 %	0,00091 ± 0,89 %	-7,15
	88,03	0,00461 ± 2,26 %	0,00437 ± 2,45 %	-5,09
	122,06	0,00756 ± 0,84 %	0,00745 ± 1,08 %	-1,43
	165,85	0,00773 ± 0,72 %	0,00772 ± 0,98 %	-0,13
	279,19	0,00582 ± 2,46 %	0,00567 ± 3,14 %	-2,50
	391,69	0,00429 ± 1,79 %	0,00429 ± 1,85 %	0,07
	513,99	0,00334 ± 1,34 %	0,00339 ± 1,48 %	1,45
	661,65	0,00267 ± 0,69 %	0,00277 ± 0,69 %	3,58
	834,83	0,00223 ± 1,77 %	0,00228 ± 1,77 %	2,27
	898,02	0,00207 ± 0,70 %	0,00213 ± 0,73 %	2,69
	1173,20	0,00165 ± 0,48 %	0,00170 ± 0,47 %	2,73
	1332,50	0,00150 ± 0,49 %	0,00153 ± 0,48 %	1,91
1836,00	0,00114 ± 0,80 %	0,00117 ± 0,79 %	2,51	
oceľové piliny	59,54	0,00010 ± 3,16 %	0,00011 ± 0,89 %	12,55
	88,03	0,00119 ± 3,17 %	0,00121 ± 2,45 %	1,02
	122,06	0,00319 ± 1,34 %	0,00310 ± 1,08 %	-2,70
	165,85	0,00373 ± 1,18 %	0,00400 ± 0,98 %	7,31
	279,19	0,00329 ± 3,14 %	0,00350 ± 3,14 %	6,47
	391,69	0,00277 ± 1,87 %	0,00282 ± 1,85 %	1,71
	513,99	0,00234 ± 1,49 %	0,00232 ± 1,48 %	-1,00
	661,65	0,00204 ± 0,71 %	0,00196 ± 0,69 %	-3,89
	834,83	0,00165 ± 1,79 %	0,00167 ± 1,77 %	1,03
	898,02	0,00154 ± 0,75 %	0,00157 ± 0,73 %	1,95
	1173,20	0,00129 ± 0,50 %	0,00129 ± 0,47 %	0,15
	1332,50	0,00118 ± 0,52 %	0,00118 ± 0,48 %	0,41
1836,00	0,00093 ± 0,82 %	0,00093 ± 0,79 %	-0,56	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V2000 - valcová geometria 2000ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00483 ± 0,36 %	0,00469 ± 0,33 %	-2,87
	88,03	0,00612 ± 2,24 %	0,00606 ± 2,22 %	-0,91
	122,06	0,00674 ± 0,86 %	0,00663 ± 0,79 %	-1,64
	165,85	0,00588 ± 0,76 %	0,00585 ± 0,70 %	-0,59
	279,19	0,00405 ± 2,46 %	0,00422 ± 2,57 %	4,16
	391,69	0,00302 ± 1,79 %	0,00305 ± 1,78 %	0,89
	513,99	0,00247 ± 1,31 %	0,00250 ± 1,32 %	0,92
	661,65	0,00195 ± 0,69 %	0,00201 ± 0,66 %	2,99
	834,83	0,00166 ± 1,76 %	0,00169 ± 1,75 %	1,81
	898,02	0,00155 ± 0,67 %	0,00157 ± 0,65 %	1,11
	1173,20	0,00124 ± 0,47 %	0,00127 ± 0,42 %	2,54
	1332,50	0,00114 ± 0,48 %	0,00116 ± 0,43 %	1,85
1836,00	0,00088 ± 0,76 %	0,00089 ± 0,71 %	1,25	
drevené piliny	59,54	0,01342 ± 0,33 %	0,01360 ± 0,33 %	1,33
	88,03	0,01408 ± 2,15 %	0,01425 ± 2,22 %	1,22
	122,06	0,01404 ± 0,75 %	0,01414 ± 0,79 %	0,65
	165,85	0,01159 ± 0,65 %	0,01172 ± 0,70 %	1,09
	279,19	0,00752 ± 2,37 %	0,00777 ± 2,57 %	3,37
	391,69	0,00537 ± 1,78 %	0,00531 ± 1,78 %	-0,99
	513,99	0,00404 ± 1,29 %	0,00417 ± 1,32 %	3,04
	661,65	0,00311 ± 0,68 %	0,00322 ± 0,66 %	3,54
	834,83	0,00253 ± 1,76 %	0,00262 ± 1,75 %	3,58
	898,02	0,00236 ± 0,67 %	0,00240 ± 0,65 %	1,41
	1173,20	0,00184 ± 0,47 %	0,00187 ± 0,42 %	1,33
	1332,50	0,00162 ± 0,48 %	0,00167 ± 0,43 %	2,86
1836,00	0,00121 ± 0,78 %	0,00123 ± 0,71 %	1,64	
oceľové piliny	59,54	0,00161 ± 0,52 %	0,00165 ± 0,33 %	2,39
	88,03	0,00401 ± 2,58 %	0,00393 ± 2,22 %	-1,88
	122,06	0,00596 ± 1,00 %	0,00589 ± 0,79 %	-1,20
	165,85	0,00588 ± 0,93 %	0,00607 ± 0,70 %	3,18
	279,19	0,00473 ± 2,71 %	0,00480 ± 2,57 %	1,39
	391,69	0,00356 ± 1,83 %	0,00349 ± 1,78 %	-1,96
	513,99	0,00291 ± 1,42 %	0,00285 ± 1,32 %	-2,11
	661,65	0,00235 ± 0,71 %	0,00228 ± 0,66 %	-3,08
	834,83	0,00185 ± 1,79 %	0,00191 ± 1,75 %	3,28
	898,02	0,00173 ± 0,75 %	0,00177 ± 0,65 %	1,99
	1173,20	0,00140 ± 0,52 %	0,00142 ± 0,42 %	1,49
	1332,50	0,00128 ± 0,53 %	0,00128 ± 0,43 %	0,23
1836,00	0,00096 ± 0,86 %	0,00097 ± 0,71 %	1,45	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V2000 - valcová geometria 2000ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00240 ± 0,46 %	0,00240 ± 0,39 %	0,14
	88,03	0,00533 ± 2,29 %	0,00539 ± 2,19 %	1,17
	122,06	0,00740 ± 0,94 %	0,00743 ± 0,84 %	0,37
	165,85	0,00714 ± 0,83 %	0,00721 ± 0,75 %	1,08
	279,19	0,00547 ± 2,49 %	0,00561 ± 2,62 %	2,54
	391,69	0,00447 ± 1,79 %	0,00452 ± 1,78 %	1,22
	513,99	0,00377 ± 1,28 %	0,00385 ± 1,31 %	2,06
	661,65	0,00319 ± 0,67 %	0,00327 ± 0,66 %	2,70
	834,83	0,00281 ± 1,75 %	0,00287 ± 1,74 %	1,95
	898,02	0,00260 ± 0,64 %	0,00265 ± 0,64 %	1,98
	1173,20	0,00219 ± 0,43 %	0,00222 ± 0,41 %	1,60
	1332,50	0,00201 ± 0,44 %	0,00205 ± 0,42 %	1,93
1836,00	0,00163 ± 0,68 %	0,00168 ± 0,69 %	2,77	
drevené piliny	59,54	0,00727 ± 0,40 %	0,00696 ± 0,39 %	-4,25
	88,03	0,01316 ± 2,19 %	0,01267 ± 2,19 %	-3,73
	122,06	0,01565 ± 0,85 %	0,01584 ± 0,84 %	1,19
	165,85	0,01466 ± 0,75 %	0,01445 ± 0,75 %	-1,42
	279,19	0,01048 ± 2,50 %	0,01033 ± 2,62 %	-1,47
	391,69	0,00794 ± 1,82 %	0,00788 ± 1,78 %	-0,73
	513,99	0,00637 ± 1,37 %	0,00643 ± 1,31 %	0,99
	661,65	0,00517 ± 0,71 %	0,00525 ± 0,66 %	1,54
	834,83	0,00433 ± 1,79 %	0,00443 ± 1,74 %	2,23
	898,02	0,00403 ± 0,74 %	0,00405 ± 0,64 %	0,55
	1173,20	0,00322 ± 0,52 %	0,00326 ± 0,41 %	1,13
	1332,50	0,00291 ± 0,54 %	0,00295 ± 0,42 %	1,37
1836,00	0,00228 ± 0,85 %	0,00231 ± 0,69 %	1,30	
oceľové piliny	59,54	0,00076 ± 0,79 %	0,00084 ± 0,39 %	10,40
	88,03	0,00337 ± 2,46 %	0,00350 ± 2,19 %	3,61
	122,06	0,00660 ± 1,03 %	0,00660 ± 0,84 %	-0,09
	165,85	0,00719 ± 0,91 %	0,00748 ± 0,75 %	4,06
	279,19	0,00615 ± 2,67 %	0,00637 ± 2,62 %	3,67
	391,69	0,00501 ± 1,82 %	0,00517 ± 1,78 %	3,23
	513,99	0,00442 ± 1,38 %	0,00439 ± 1,31 %	-0,65
	661,65	0,00388 ± 0,69 %	0,00371 ± 0,66 %	-4,27
	834,83	0,00317 ± 1,77 %	0,00323 ± 1,74 %	1,84
	898,02	0,00293 ± 0,72 %	0,00299 ± 0,64 %	1,97
	1173,20	0,00247 ± 0,49 %	0,00248 ± 0,41 %	0,20
	1332,50	0,00228 ± 0,50 %	0,00228 ± 0,42 %	-0,39
1836,00	0,00180 ± 0,79 %	0,00184 ± 0,69 %	2,15	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V2000 - valcová geometria 2000ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00036 ± 1,32 %	0,00036 ± 0,64 %	-1,40
	88,03	0,00182 ± 2,93 %	0,00186 ± 2,31 %	1,85
	122,06	0,00301 ± 1,77 %	0,00295 ± 1,06 %	-1,74
	165,85	0,00297 ± 1,58 %	0,00291 ± 0,98 %	-1,77
	279,19	0,00200 ± 3,79 %	0,00205 ± 3,25 %	2,18
	391,69	0,00146 ± 1,98 %	0,00147 ± 1,83 %	0,59
	513,99	0,00114 ± 1,70 %	0,00116 ± 1,45 %	1,57
	661,65	0,00092 ± 1,16 %	0,00094 ± 0,94 %	2,20
	834,83	0,00077 ± 1,85 %	0,00078 ± 1,76 %	0,55
	898,02	0,00072 ± 0,86 %	0,00073 ± 0,70 %	0,87
	1173,20	0,00058 ± 0,82 %	0,00058 ± 0,56 %	0,07
	1332,50	0,00052 ± 0,82 %	0,00053 ± 0,56 %	0,47
1836,00	0,00040 ± 0,96 %	0,00041 ± 0,77 %	0,57	
drevené piliny	59,54	0,00107 ± 0,56 %	0,00103 ± 0,64 %	-3,87
	88,03	0,00425 ± 2,38 %	0,00437 ± 2,31 %	2,83
	122,06	0,00613 ± 0,97 %	0,00630 ± 1,06 %	2,75
	165,85	0,00579 ± 0,86 %	0,00584 ± 0,98 %	0,75
	279,19	0,00377 ± 2,71 %	0,00377 ± 3,25 %	-0,13
	391,69	0,00257 ± 1,82 %	0,00256 ± 1,83 %	-0,31
	513,99	0,00189 ± 1,40 %	0,00193 ± 1,45 %	2,07
	661,65	0,00145 ± 0,74 %	0,00150 ± 0,94 %	3,57
	834,83	0,00115 ± 1,78 %	0,00120 ± 1,76 %	4,27
	898,02	0,00108 ± 0,73 %	0,00111 ± 0,70 %	2,41
	1173,20	0,00083 ± 0,53 %	0,00085 ± 0,56 %	2,69
	1332,50	0,00074 ± 0,54 %	0,00076 ± 0,56 %	2,47
1836,00	0,00053 ± 0,85 %	0,00056 ± 0,77 %	5,56	
oceľové piliny	59,54	0,000116 ± 2,72 %	0,000125 ± 0,64 %	7,62
	88,03	0,00120 ± 2,91 %	0,00120 ± 2,31 %	0,54
	122,06	0,00264 ± 1,63 %	0,00262 ± 1,06 %	-0,67
	165,85	0,00292 ± 1,40 %	0,00302 ± 0,98 %	3,45
	279,19	0,00221 ± 3,59 %	0,00233 ± 3,25 %	5,18
	391,69	0,00166 ± 1,90 %	0,00168 ± 1,83 %	1,09
	513,99	0,00132 ± 1,57 %	0,00132 ± 1,45 %	-0,39
	661,65	0,00107 ± 1,15 %	0,00106 ± 0,94 %	-0,91
	834,83	0,00084 ± 1,87 %	0,00088 ± 1,76 %	3,82
	898,02	0,00079 ± 0,80 %	0,00082 ± 0,70 %	3,60
	1173,20	0,00065 ± 0,79 %	0,00065 ± 0,56 %	-0,34
	1332,50	0,00058 ± 0,80 %	0,00058 ± 0,56 %	0,32
1836,00	0,00043 ± 0,90 %	0,00044 ± 0,77 %	2,85	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V3000 - valcová geometria 3000ml, detektor č.1)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00255 ± 0,41 %	0,00253 ± 0,41 %	-0,59
	88,03	0,00525 ± 2,26 %	0,00526 ± 2,26 %	0,20
	122,06	0,00672 ± 0,88 %	0,00654 ± 0,99 %	-2,64
	165,85	0,00637 ± 0,72 %	0,00646 ± 0,94 %	1,30
	279,19	0,00525 ± 2,29 %	0,00543 ± 3,02 %	3,44
	391,69	0,00461 ± 1,75 %	0,00464 ± 1,81 %	0,46
	513,99	0,00409 ± 1,20 %	0,00414 ± 1,36 %	1,29
	661,65	0,00361 ± 0,65 %	0,00364 ± 0,66 %	0,83
	834,83	0,00325 ± 1,73 %	0,00330 ± 1,74 %	1,49
	898,02	0,00300 ± 0,59 %	0,00305 ± 0,65 %	1,84
	1173,20	0,00260 ± 0,40 %	0,00267 ± 0,41 %	2,72
	1332,50	0,00245 ± 0,41 %	0,00249 ± 0,41 %	1,72
1836,00	0,00206 ± 0,63 %	0,00210 ± 0,68 %	2,05	
drevené piliny	59,54	0,00806 ± 0,33 %	0,00797 ± 0,41 %	-1,18
	88,03	0,01288 ± 2,13 %	0,01331 ± 2,26 %	3,31
	122,06	0,01523 ± 0,68 %	0,01494 ± 0,99 %	-1,90
	165,85	0,01378 ± 0,53 %	0,01381 ± 0,94 %	0,24
	279,19	0,01048 ± 2,19 %	0,01062 ± 3,02 %	1,40
	391,69	0,00836 ± 1,72 %	0,00856 ± 1,81 %	2,45
	513,99	0,00714 ± 1,15 %	0,00730 ± 1,36 %	2,30
	661,65	0,00591 ± 0,62 %	0,00613 ± 0,66 %	3,78
	834,83	0,00512 ± 1,71 %	0,00535 ± 1,74 %	4,43
	898,02	0,00482 ± 0,54 %	0,00489 ± 0,65 %	1,44
	1173,20	0,00398 ± 0,32 %	0,00409 ± 0,41 %	2,79
	1332,50	0,00365 ± 0,35 %	0,00375 ± 0,41 %	2,78
1836,00	0,00294 ± 0,55 %	0,00301 ± 0,68 %	2,07	
oceľové piliny	59,54	0,000791 ± 0,58 %	0,000776 ± 0,41 %	-1,93
	88,03	0,00319 ± 2,31 %	0,00305 ± 2,26 %	-4,26
	122,06	0,00572 ± 0,90 %	0,00534 ± 0,99 %	-6,62
	165,85	0,00661 ± 0,76 %	0,00628 ± 0,94 %	-5,11
	279,19	0,00584 ± 2,69 %	0,00589 ± 3,02 %	0,77
	391,69	0,00519 ± 1,75 %	0,00510 ± 1,81 %	-1,82
	513,99	0,00461 ± 1,22 %	0,00455 ± 1,36 %	-1,23
	661,65	0,00399 ± 0,63 %	0,00399 ± 0,66 %	-0,12
	834,83	0,00358 ± 1,72 %	0,00361 ± 1,74 %	0,82
	898,02	0,00329 ± 0,58 %	0,00334 ± 0,65 %	1,48
	1173,20	0,00284 ± 0,36 %	0,00290 ± 0,41 %	1,97
	1332,50	0,00264 ± 0,36 %	0,00270 ± 0,41 %	2,01
1836,00	0,00222 ± 0,60 %	0,00225 ± 0,68 %	1,27	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V3000 - valcová geometria 3000ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00021 ± 1,61 %	0,00020 ± 0,74 %	-2,39
	88,03	0,00128 ± 2,96 %	0,00131 ± 2,35 %	2,95
	122,06	0,00229 ± 1,51 %	0,00239 ± 0,94 %	4,46
	165,85	0,00263 ± 1,23 %	0,00268 ± 0,82 %	1,95
	279,19	0,00214 ± 2,77 %	0,00217 ± 2,93 %	1,76
	391,69	0,00167 ± 1,90 %	0,00173 ± 1,80 %	3,12
	513,99	0,00143 ± 1,45 %	0,00145 ± 1,37 %	1,27
	661,65	0,00120 ± 0,77 %	0,00121 ± 0,66 %	0,56
	834,83	0,00103 ± 1,82 %	0,00105 ± 1,74 %	2,00
	898,02	0,00097 ± 0,77 %	0,00100 ± 0,65 %	2,56
	1173,20	0,00082 ± 0,57 %	0,00084 ± 0,41 %	1,61
	1332,50	0,00076 ± 0,58 %	0,00077 ± 0,41 %	2,28
1836,00	0,00060 ± 0,84 %	0,00062 ± 0,70 %	2,71	
drevené piliny	59,54	0,00067 ± 0,93 %	0,00063 ± 0,74 %	-5,27
	88,03	0,00319 ± 2,44 %	0,00332 ± 2,35 %	4,17
	122,06	0,00530 ± 1,11 %	0,00546 ± 0,94 %	3,09
	165,85	0,00553 ± 0,98 %	0,00572 ± 0,82 %	3,45
	279,19	0,00418 ± 2,65 %	0,00425 ± 2,93 %	1,79
	391,69	0,00303 ± 1,88 %	0,00319 ± 1,80 %	5,26
	513,99	0,00244 ± 1,48 %	0,00255 ± 1,37 %	4,64
	661,65	0,00195 ± 0,77 %	0,00204 ± 0,66 %	4,41
	834,83	0,00164 ± 1,83 %	0,00170 ± 1,74 %	4,12
	898,02	0,00154 ± 0,81 %	0,00160 ± 0,65 %	3,89
	1173,20	0,00123 ± 0,60 %	0,00128 ± 0,41 %	4,06
	1332,50	0,00111 ± 0,62 %	0,00116 ± 0,41 %	5,39
1836,00	0,00084 ± 0,94 %	0,00088 ± 0,70 %	5,03	
oceľové piliny	59,54	0,00006 ± 3,21 %	0,00006 ± 0,74 %	2,92
	88,03	0,00082 ± 2,99 %	0,00076 ± 2,35 %	-6,89
	122,06	0,00210 ± 1,27 %	0,00195 ± 0,94 %	-6,93
	165,85	0,00277 ± 1,04 %	0,00260 ± 0,82 %	-5,95
	279,19	0,00238 ± 3,00 %	0,00236 ± 2,93 %	-1,01
	391,69	0,00193 ± 1,84 %	0,00190 ± 1,80 %	-1,55
	513,99	0,00157 ± 1,45 %	0,00159 ± 1,37 %	1,40
	661,65	0,00134 ± 0,69 %	0,00133 ± 0,66 %	-1,29
	834,83	0,00116 ± 1,77 %	0,00115 ± 1,74 %	-0,70
	898,02	0,00108 ± 0,70 %	0,00109 ± 0,65 %	0,48
	1173,20	0,00090 ± 0,46 %	0,00091 ± 0,41 %	1,20
	1332,50	0,00083 ± 0,47 %	0,00084 ± 0,41 %	1,15
1836,00	0,00066 ± 0,76 %	0,00066 ± 0,70 %	-0,01	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V3000 - valcová geometria 3000ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00307 ± 0,47 %	0,00301 ± 0,35 %	-1,75
	88,03	0,00399 ± 2,49 %	0,00395 ± 2,23 %	-0,94
	122,06	0,00425 ± 1,30 %	0,00446 ± 0,86 %	4,80
	165,85	0,00396 ± 1,19 %	0,00404 ± 0,81 %	1,92
	279,19	0,00279 ± 2,82 %	0,00288 ± 2,90 %	3,28
	391,69	0,00206 ± 1,96 %	0,00210 ± 1,82 %	1,97
	513,99	0,00169 ± 1,57 %	0,00173 ± 1,43 %	2,24
	661,65	0,00139 ± 0,84 %	0,00140 ± 0,69 %	1,19
	834,83	0,00116 ± 1,88 %	0,00119 ± 1,76 %	2,69
	898,02	0,00110 ± 0,89 %	0,00112 ± 0,71 %	1,65
	1173,20	0,00090 ± 0,69 %	0,00092 ± 0,45 %	2,24
	1332,50	0,00082 ± 0,72 %	0,00083 ± 0,47 %	1,22
1836,00	0,00064 ± 1,04 %	0,00065 ± 0,78 %	1,09	
drevené piliny	59,54	0,00908 ± 0,33 %	0,00947 ± 0,35 %	4,28
	88,03	0,00958 ± 2,16 %	0,00999 ± 2,23 %	4,30
	122,06	0,00985 ± 0,75 %	0,01018 ± 0,86 %	3,39
	165,85	0,00825 ± 0,63 %	0,00864 ± 0,81 %	4,74
	279,19	0,00543 ± 2,28 %	0,00563 ± 2,90 %	3,59
	391,69	0,00371 ± 1,77 %	0,00388 ± 1,82 %	4,77
	513,99	0,00290 ± 1,25 %	0,00305 ± 1,43 %	5,22
	661,65	0,00225 ± 0,68 %	0,00237 ± 0,69 %	5,02
	834,83	0,00183 ± 1,75 %	0,00193 ± 1,76 %	5,67
	898,02	0,00170 ± 0,64 %	0,00180 ± 0,71 %	5,73
	1173,20	0,00134 ± 0,45 %	0,00141 ± 0,45 %	5,10
	1332,50	0,00119 ± 0,46 %	0,00124 ± 0,47 %	3,95
1836,00	0,00088 ± 0,71 %	0,00092 ± 0,78 %	5,12	
oceľové piliny	59,54	0,00103 ± 0,48 %	0,00092 ± 0,35 %	-10,37
	88,03	0,00253 ± 2,54 %	0,00229 ± 2,23 %	-9,40
	122,06	0,00392 ± 0,91 %	0,00364 ± 0,86 %	-7,19
	165,85	0,00414 ± 0,80 %	0,00392 ± 0,81 %	-5,23
	279,19	0,00317 ± 2,64 %	0,00312 ± 2,90 %	-1,41
	391,69	0,00236 ± 1,80 %	0,00231 ± 1,82 %	-2,20
	513,99	0,00192 ± 1,36 %	0,00190 ± 1,43 %	-0,69
	661,65	0,00154 ± 0,69 %	0,00154 ± 0,69 %	-0,33
	834,83	0,00132 ± 1,76 %	0,00130 ± 1,76 %	-1,35
	898,02	0,00122 ± 0,68 %	0,00123 ± 0,71 %	0,46
	1173,20	0,00098 ± 0,46 %	0,00099 ± 0,45 %	1,25
	1332,50	0,00089 ± 0,48 %	0,00089 ± 0,47 %	0,30
1836,00	0,00069 ± 0,77 %	0,00069 ± 0,78 %	0,79	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V3000 - valcová geometria 3000ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00151 ± 0,61 %	0,00153 ± 0,45 %	1,28
	88,03	0,00368 ± 2,50 %	0,00358 ± 2,28 %	-2,72
	122,06	0,00493 ± 1,23 %	0,00488 ± 1,01 %	-0,92
	165,85	0,00491 ± 1,08 %	0,00488 ± 0,97 %	-0,54
	279,19	0,00394 ± 2,59 %	0,00398 ± 3,08 %	1,06
	391,69	0,00308 ± 1,87 %	0,00314 ± 1,84 %	2,04
	513,99	0,00265 ± 1,41 %	0,00271 ± 1,46 %	2,43
	661,65	0,00225 ± 0,76 %	0,00230 ± 0,69 %	2,14
	834,83	0,00201 ± 1,81 %	0,00203 ± 1,77 %	1,05
	898,02	0,00184 ± 0,77 %	0,00192 ± 0,72 %	4,80
	1173,20	0,00157 ± 0,58 %	0,00160 ± 0,46 %	2,24
	1332,50	0,00146 ± 0,59 %	0,00149 ± 0,47 %	1,87
1836,00	0,00119 ± 0,86 %	0,00124 ± 0,78 %	3,81	
drevené piliny	59,54	0,00497 ± 0,36 %	0,00482 ± 0,45 %	-2,85
	88,03	0,00908 ± 2,15 %	0,00904 ± 2,28 %	-0,42
	122,06	0,01109 ± 0,75 %	0,01115 ± 1,01 %	0,54
	165,85	0,01026 ± 0,62 %	0,01044 ± 0,97 %	1,77
	279,19	0,00754 ± 2,26 %	0,00778 ± 3,08 %	3,08
	391,69	0,00561 ± 1,75 %	0,00581 ± 1,84 %	3,51
	513,99	0,00460 ± 1,21 %	0,00478 ± 1,46 %	3,79
	661,65	0,00373 ± 0,65 %	0,00388 ± 0,69 %	4,11
	834,83	0,00315 ± 1,74 %	0,00330 ± 1,77 %	4,54
	898,02	0,00295 ± 0,60 %	0,00308 ± 0,72 %	4,44
	1173,20	0,00238 ± 0,41 %	0,00246 ± 0,46 %	3,27
	1332,50	0,00216 ± 0,41 %	0,00224 ± 0,47 %	3,72
1836,00	0,00167 ± 0,65 %	0,00177 ± 0,78 %	5,88	
oceľové piliny	59,54	0,00050 ± 0,82 %	0,00047 ± 0,45 %	-6,55
	88,03	0,00208 ± 2,51 %	0,00207 ± 2,28 %	-0,29
	122,06	0,00432 ± 1,08 %	0,00399 ± 1,01 %	-7,73
	165,85	0,00497 ± 0,95 %	0,00474 ± 0,97 %	-4,48
	279,19	0,00427 ± 2,79 %	0,00431 ± 3,08 %	1,06
	391,69	0,00348 ± 1,82 %	0,00346 ± 1,84 %	-0,59
	513,99	0,00298 ± 1,37 %	0,00298 ± 1,46 %	-0,13
	661,65	0,00255 ± 0,68 %	0,00252 ± 0,69 %	-1,14
	834,83	0,00222 ± 1,76 %	0,00222 ± 1,77 %	0,32
	898,02	0,00207 ± 0,68 %	0,00210 ± 0,72 %	1,55
	1173,20	0,00172 ± 0,45 %	0,00174 ± 0,46 %	1,20
	1332,50	0,00158 ± 0,46 %	0,00161 ± 0,47 %	2,05
1836,00	0,00130 ± 0,74 %	0,00132 ± 0,78 %	2,09	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria V3000 - valcová geometria 3000ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00023 ± 1,76 %	0,00023 ± 0,75 %	2,21
	88,03	0,00122 ± 3,32 %	0,00121 ± 2,44 %	-0,94
	122,06	0,00196 ± 2,10 %	0,00196 ± 1,26 %	-0,19
	165,85	0,00191 ± 1,81 %	0,00198 ± 1,21 %	3,74
	279,19	0,00134 ± 3,49 %	0,00143 ± 3,94 %	6,60
	391,69	0,00098 ± 2,06 %	0,00105 ± 1,88 %	7,12
	513,99	0,00080 ± 1,70 %	0,00083 ± 1,61 %	3,70
	661,65	0,00065 ± 1,17 %	0,00066 ± 0,90 %	1,06
	834,83	0,00054 ± 1,91 %	0,00055 ± 1,79 %	1,91
	898,02	0,00051 ± 0,92 %	0,00052 ± 0,77 %	2,03
	1173,20	0,00041 ± 0,89 %	0,00042 ± 0,58 %	2,47
	1332,50	0,00037 ± 0,88 %	0,00038 ± 0,58 %	1,70
1836,00	0,00028 ± 1,05 %	0,00029 ± 0,85 %	3,65	
drevené piliny	59,54	0,00076 ± 0,68 %	0,00073 ± 0,75 %	-4,28
	88,03	0,00295 ± 2,45 %	0,00305 ± 2,44 %	3,28
	122,06	0,00432 ± 1,11 %	0,00448 ± 1,26 %	3,51
	165,85	0,00414 ± 0,98 %	0,00424 ± 1,21 %	2,37
	279,19	0,00271 ± 2,69 %	0,00280 ± 3,94 %	3,31
	391,69	0,00184 ± 1,86 %	0,00193 ± 1,88 %	4,97
	513,99	0,00140 ± 1,45 %	0,00146 ± 1,61 %	4,47
	661,65	0,00109 ± 0,78 %	0,00111 ± 0,90 %	2,03
	834,83	0,00085 ± 1,83 %	0,00089 ± 1,79 %	3,68
	898,02	0,00079 ± 0,81 %	0,00083 ± 0,77 %	5,42
	1173,20	0,00060 ± 0,63 %	0,00064 ± 0,58 %	5,52
	1332,50	0,00054 ± 0,65 %	0,00057 ± 0,58 %	5,27
1836,00	0,00039 ± 0,97 %	0,00042 ± 0,85 %	7,55	
oceľové piliny	59,54	0,000069 ± 2,62 %	0,000071 ± 0,75 %	2,86
	88,03	0,00072 ± 3,08 %	0,00070 ± 2,44 %	-2,88
	122,06	0,00171 ± 1,47 %	0,00160 ± 1,26 %	-6,71
	165,85	0,00212 ± 1,16 %	0,00193 ± 1,21 %	-9,05
	279,19	0,00155 ± 3,33 %	0,00155 ± 3,94 %	0,43
	391,69	0,00114 ± 1,84 %	0,00115 ± 1,88 %	0,43
	513,99	0,00092 ± 1,45 %	0,00091 ± 1,61 %	-0,65
	661,65	0,00075 ± 1,09 %	0,00072 ± 0,90 %	-3,14
	834,83	0,00060 ± 1,77 %	0,00060 ± 1,79 %	-0,46
	898,02	0,00057 ± 0,71 %	0,00056 ± 0,77 %	-0,29
	1173,20	0,00045 ± 0,70 %	0,00045 ± 0,58 %	0,21
	1332,50	0,00041 ± 0,70 %	0,00041 ± 0,58 %	0,73
1836,00	0,00031 ± 0,78 %	0,00031 ± 0,85 %	0,47	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P500 - prstencová geometria 500ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00637 ± 0,67 %	0,00656 ± 0,32 %	3,04
	88,03	0,02379 ± 2,30 %	0,02390 ± 2,11 %	0,45
	122,06	0,03332 ± 1,01 %	0,03413 ± 0,62 %	2,44
	165,85	0,03202 ± 0,90 %	0,03319 ± 0,44 %	3,66
	279,19	0,02266 ± 2,52 %	0,02292 ± 2,14 %	1,13
	391,69	0,01628 ± 1,86 %	0,01662 ± 1,71 %	2,04
	513,99	0,01296 ± 1,41 %	0,01312 ± 1,12 %	1,27
	661,65	0,01034 ± 0,76 %	0,01038 ± 0,61 %	0,36
	834,83	0,00847 ± 1,82 %	0,00858 ± 1,71 %	1,29
	898,02	0,00765 ± 0,78 %	0,00784 ± 0,52 %	2,45
	1173,20	0,00601 ± 0,60 %	0,00614 ± 0,32 %	2,11
	1332,50	0,00547 ± 0,62 %	0,00552 ± 0,32 %	0,89
1836,00	0,00412 ± 0,91 %	0,00417 ± 0,53 %	1,23	
drevené piliny	59,54	0,00877 ± 0,50 %	0,00863 ± 0,32 %	-1,70
	88,03	0,02922 ± 2,20 %	0,02924 ± 2,11 %	0,07
	122,06	0,04176 ± 0,83 %	0,04050 ± 0,62 %	-3,01
	165,85	0,03952 ± 0,72 %	0,03865 ± 0,44 %	-2,20
	279,19	0,02688 ± 2,43 %	0,02603 ± 2,14 %	-3,18
	391,69	0,01928 ± 1,80 %	0,01859 ± 1,71 %	-3,59
	513,99	0,01472 ± 1,35 %	0,01451 ± 1,12 %	-1,40
	661,65	0,01165 ± 0,70 %	0,01136 ± 0,61 %	-2,54
	834,83	0,00941 ± 1,78 %	0,00930 ± 1,71 %	-1,15
	898,02	0,00871 ± 0,71 %	0,00848 ± 0,52 %	-2,68
	1173,20	0,00683 ± 0,51 %	0,00658 ± 0,32 %	-3,65
	1332,50	0,00602 ± 0,53 %	0,00589 ± 0,32 %	-2,19
1836,00	0,00454 ± 0,82 %	0,00440 ± 0,53 %	-3,05	
oceľové piliny	59,54	0,00376 ± 0,64 %	0,00394 ± 0,32 %	4,87
	88,03	0,02015 ± 2,24 %	0,02021 ± 2,11 %	0,28
	122,06	0,03228 ± 0,85 %	0,03256 ± 0,62 %	0,88
	165,85	0,03219 ± 0,74 %	0,03324 ± 0,44 %	3,26
	279,19	0,02226 ± 2,52 %	0,02351 ± 2,14 %	5,64
	391,69	0,01667 ± 1,81 %	0,01707 ± 1,71 %	2,41
	513,99	0,01340 ± 1,36 %	0,01346 ± 1,12 %	0,45
	661,65	0,01065 ± 0,70 %	0,01063 ± 0,61 %	-0,18
	834,83	0,00854 ± 1,78 %	0,00877 ± 1,71 %	2,76
	898,02	0,00784 ± 0,73 %	0,00801 ± 0,52 %	2,22
	1173,20	0,00618 ± 0,51 %	0,00626 ± 0,32 %	1,27
	1332,50	0,00563 ± 0,53 %	0,00562 ± 0,32 %	-0,24
1836,00	0,00419 ± 0,85 %	0,00423 ± 0,53 %	0,95	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P500 - prstencová geometria 500ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,03538 ± 0,38 %	0,03551 ± 0,33 %	0,36
	88,03	0,04202 ± 2,21 %	0,04302 ± 2,13 %	2,38
	122,06	0,04370 ± 0,89 %	0,04476 ± 0,72 %	2,41
	165,85	0,03659 ± 0,81 %	0,03743 ± 0,61 %	2,29
	279,19	0,02306 ± 2,46 %	0,02375 ± 2,37 %	3,01
	391,69	0,01669 ± 1,84 %	0,01683 ± 1,77 %	0,82
	513,99	0,01311 ± 1,37 %	0,01307 ± 1,28 %	-0,32
	661,65	0,01015 ± 0,75 %	0,01019 ± 0,67 %	0,46
	834,83	0,00831 ± 1,81 %	0,00838 ± 1,75 %	0,82
	898,02	0,00752 ± 0,76 %	0,00766 ± 0,66 %	1,82
	1173,20	0,00581 ± 0,58 %	0,00593 ± 0,45 %	2,01
	1332,50	0,00518 ± 0,60 %	0,00529 ± 0,46 %	2,18
	1836,00	0,00382 ± 0,88 %	0,00391 ± 0,76 %	2,44
drevené piliny	59,54	0,04780 ± 0,35 %	0,04666 ± 0,33 %	-2,39
	88,03	0,05281 ± 2,16 %	0,05265 ± 2,13 %	-0,31
	122,06	0,05472 ± 0,82 %	0,05311 ± 0,72 %	-2,94
	165,85	0,04423 ± 0,74 %	0,04359 ± 0,61 %	-1,44
	279,19	0,02766 ± 2,46 %	0,02698 ± 2,37 %	-2,46
	391,69	0,01925 ± 1,83 %	0,01883 ± 1,77 %	-2,19
	513,99	0,01479 ± 1,38 %	0,01445 ± 1,28 %	-2,24
	661,65	0,01151 ± 0,73 %	0,01116 ± 0,67 %	-3,04
	834,83	0,00933 ± 1,80 %	0,00909 ± 1,75 %	-2,54
	898,02	0,00852 ± 0,75 %	0,00828 ± 0,66 %	-2,77
	1173,20	0,00661 ± 0,55 %	0,00635 ± 0,45 %	-3,99
	1332,50	0,00587 ± 0,57 %	0,00565 ± 0,46 %	-3,83
	1836,00	0,00428 ± 0,88 %	0,00413 ± 0,76 %	-3,33
oceľové piliny	59,54	0,01950 ± 0,36 %	0,02134 ± 0,33 %	9,41
	88,03	0,03499 ± 2,16 %	0,03639 ± 2,13 %	4,00
	122,06	0,04220 ± 0,75 %	0,04270 ± 0,72 %	1,18
	165,85	0,03697 ± 0,64 %	0,03748 ± 0,61 %	1,39
	279,19	0,02370 ± 2,36 %	0,02437 ± 2,37 %	2,81
	391,69	0,01693 ± 1,77 %	0,01728 ± 1,77 %	2,07
	513,99	0,01342 ± 1,29 %	0,01341 ± 1,28 %	-0,10
	661,65	0,01037 ± 0,68 %	0,01044 ± 0,67 %	0,73
	834,83	0,00839 ± 1,76 %	0,00857 ± 1,75 %	2,18
	898,02	0,00767 ± 0,67 %	0,00782 ± 0,66 %	1,97
	1173,20	0,00596 ± 0,47 %	0,00604 ± 0,45 %	1,32
	1332,50	0,00533 ± 0,48 %	0,00539 ± 0,46 %	1,11
	1836,00	0,00397 ± 0,78 %	0,00397 ± 0,76 %	0,01
olovené guľ.+voda	661,65	0,00689 ± 1,10 %	0,00683 ± 0,67 %	-0,82
	1173,20	0,00462 ± 0,18 %	0,00464 ± 0,45 %	0,42
	1332,50	0,00424 ± 0,18 %	0,00423 ± 0,46 %	-0,27

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P500 - prstencová geometria 500ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,01811 ± 0,51 %	0,01820 ± 0,38 %	0,49
	88,03	0,03788 ± 2,29 %	0,03921 ± 2,16 %	3,52
	122,06	0,04881 ± 1,01 %	0,05037 ± 0,77 %	3,20
	165,85	0,04751 ± 0,90 %	0,04878 ± 0,65 %	2,67
	279,19	0,03534 ± 2,47 %	0,03669 ± 2,36 %	3,81
	391,69	0,02674 ± 1,84 %	0,02738 ± 1,77 %	2,40
	513,99	0,02163 ± 1,38 %	0,02151 ± 1,27 %	-0,51
	661,65	0,01787 ± 0,75 %	0,01801 ± 0,66 %	0,80
	834,83	0,01506 ± 1,81 %	0,01537 ± 1,74 %	2,08
	898,02	0,01355 ± 0,76 %	0,01368 ± 0,64 %	0,96
	1173,20	0,01081 ± 0,57 %	0,01103 ± 0,42 %	2,06
	1332,50	0,00991 ± 0,59 %	0,01003 ± 0,43 %	1,15
1836,00	0,00774 ± 0,87 %	0,00786 ± 0,70 %	1,54	
drevené piliny	59,54	0,02443 ± 0,37 %	0,02392 ± 0,38 %	-2,06
	88,03	0,04942 ± 2,15 %	0,04798 ± 2,16 %	-2,92
	122,06	0,06138 ± 0,74 %	0,05978 ± 0,77 %	-2,61
	165,85	0,05782 ± 0,60 %	0,05680 ± 0,65 %	-1,77
	279,19	0,04106 ± 2,25 %	0,04167 ± 2,36 %	1,50
	391,69	0,03142 ± 1,75 %	0,03063 ± 1,77 %	-2,51
	513,99	0,02503 ± 1,21 %	0,02379 ± 1,27 %	-4,94
	661,65	0,02030 ± 0,65 %	0,01971 ± 0,66 %	-2,89
	834,83	0,01703 ± 1,74 %	0,01667 ± 1,74 %	-2,09
	898,02	0,01537 ± 0,61 %	0,01480 ± 0,64 %	-3,71
	1173,20	0,01221 ± 0,41 %	0,01182 ± 0,42 %	-3,19
	1332,50	0,01100 ± 0,42 %	0,01070 ± 0,43 %	-2,76
1836,00	0,00859 ± 0,66 %	0,00830 ± 0,70 %	-3,40	
oceľové piliny	59,54	0,01007 ± 0,48 %	0,01094 ± 0,38 %	8,62
	88,03	0,03188 ± 2,24 %	0,03316 ± 2,16 %	4,02
	122,06	0,04771 ± 0,82 %	0,04806 ± 0,77 %	0,72
	165,85	0,04773 ± 0,70 %	0,04885 ± 0,65 %	2,34
	279,19	0,03629 ± 2,38 %	0,03765 ± 2,36 %	3,74
	391,69	0,02725 ± 1,78 %	0,02812 ± 1,77 %	3,21
	513,99	0,02252 ± 1,28 %	0,02207 ± 1,27 %	-2,00
	661,65	0,01846 ± 0,67 %	0,01845 ± 0,66 %	-0,06
	834,83	0,01548 ± 1,75 %	0,01572 ± 1,74 %	1,54
	898,02	0,01391 ± 0,65 %	0,01398 ± 0,64 %	0,45
	1173,20	0,01123 ± 0,44 %	0,01125 ± 0,42 %	0,11
	1332,50	0,01024 ± 0,45 %	0,01021 ± 0,43 %	-0,28
1836,00	0,00789 ± 0,72 %	0,00798 ± 0,70 %	1,11	
olovené guľ.+voda	661,65	0,01252 ± 1,18 %	0,01207 ± 0,66 %	-3,60
	1173,20	0,00868 ± 0,46 %	0,00863 ± 0,42 %	-0,55
	1332,50	0,00811 ± 0,47 %	0,00801 ± 0,43 %	-1,20

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P500 - prstencová geometria 500ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00303 ± 0,75 %	0,00307 ± 0,37 %	1,13
	88,03	0,01220 ± 2,45 %	0,01207 ± 2,15 %	-1,03
	122,06	0,01850 ± 1,24 %	0,01819 ± 0,71 %	-1,68
	165,85	0,01761 ± 1,08 %	0,01736 ± 0,52 %	-1,42
	279,19	0,01082 ± 2,77 %	0,01101 ± 2,27 %	1,72
	391,69	0,00740 ± 1,87 %	0,00752 ± 1,73 %	1,62
	513,99	0,00577 ± 1,44 %	0,00579 ± 1,19 %	0,34
	661,65	0,00446 ± 1,37 %	0,00446 ± 0,63 %	-0,12
	834,83	0,00355 ± 1,82 %	0,00354 ± 1,72 %	-0,31
	898,02	0,00327 ± 0,79 %	0,00327 ± 0,58 %	0,16
	1173,20	0,00246 ± 1,01 %	0,00250 ± 0,37 %	1,87
	1332,50	0,00217 ± 1,01 %	0,00222 ± 0,38 %	2,43
1836,00	0,00163 ± 0,93 %	0,00164 ± 0,62 %	0,78	
drevené piliny	59,54	0,00401 ± 0,64 %	0,00403 ± 0,37 %	0,41
	88,03	0,01563 ± 2,70 %	0,01477 ± 2,15 %	-5,46
	122,06	0,02257 ± 1,12 %	0,02158 ± 0,71 %	-4,36
	165,85	0,02038 ± 1,02 %	0,02021 ± 0,52 %	-0,83
	279,19	0,01254 ± 2,82 %	0,01250 ± 2,27 %	-0,35
	391,69	0,00856 ± 1,86 %	0,00842 ± 1,73 %	-1,66
	513,99	0,00645 ± 1,45 %	0,00640 ± 1,19 %	-0,75
	661,65	0,00491 ± 0,85 %	0,00488 ± 0,63 %	-0,50
	834,83	0,00394 ± 1,81 %	0,00384 ± 1,72 %	-2,50
	898,02	0,00368 ± 0,77 %	0,00354 ± 0,58 %	-3,82
	1173,20	0,00276 ± 0,64 %	0,00268 ± 0,37 %	-2,97
	1332,50	0,00245 ± 0,66 %	0,00237 ± 0,38 %	-3,46
1836,00	0,00177 ± 0,91 %	0,00173 ± 0,62 %	-2,15	
oceľové piliny	59,54	0,00180 ± 1,16 %	0,00184 ± 0,37 %	2,14
	88,03	0,01088 ± 2,61 %	0,01021 ± 2,15 %	-6,16
	122,06	0,01873 ± 1,37 %	0,01735 ± 0,71 %	-7,35
	165,85	0,01811 ± 1,26 %	0,01738 ± 0,52 %	-4,02
	279,19	0,01153 ± 3,34 %	0,01129 ± 2,27 %	-2,02
	391,69	0,00786 ± 1,92 %	0,00773 ± 1,73 %	-1,71
	513,99	0,00606 ± 1,59 %	0,00594 ± 1,19 %	-2,04
	661,65	0,00457 ± 1,29 %	0,00457 ± 0,63 %	-0,10
	834,83	0,00359 ± 1,83 %	0,00362 ± 1,72 %	0,81
	898,02	0,00332 ± 0,84 %	0,00335 ± 0,58 %	0,80
	1173,20	0,00254 ± 1,02 %	0,00255 ± 0,37 %	0,60
	1332,50	0,00230 ± 0,98 %	0,00226 ± 0,38 %	-1,64
1836,00	0,00160 ± 1,00 %	0,00166 ± 0,62 %	3,87	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M500 - Marinelliho geometria 500ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00498 ± 0,72 %	0,00478 ± 0,37 %	-3,97
	88,03	0,01998 ± 2,33 %	0,01912 ± 2,13 %	-4,30
	122,06	0,02998 ± 1,03 %	0,02906 ± 0,67 %	-3,04
	165,85	0,02991 ± 0,90 %	0,02927 ± 0,51 %	-2,12
	279,19	0,02060 ± 2,55 %	0,02079 ± 2,24 %	0,89
	391,69	0,01531 ± 1,86 %	0,01526 ± 1,73 %	-0,33
	513,99	0,01233 ± 1,41 %	0,01206 ± 1,17 %	-2,20
	661,65	0,00987 ± 0,76 %	0,00964 ± 0,62 %	-2,27
	834,83	0,00814 ± 1,82 %	0,00802 ± 1,72 %	-1,55
	898,02	0,00745 ± 0,78 %	0,00734 ± 0,56 %	-1,40
	1173,20	0,00588 ± 0,60 %	0,00578 ± 0,35 %	-1,61
	1332,50	0,00522 ± 0,62 %	0,00521 ± 0,36 %	-0,22
1836,00	0,00399 ± 0,92 %	0,00394 ± 0,59 %	-1,07	
drevené piliny	59,54	0,00656 ± 0,52 %	0,00654 ± 0,37 %	-0,27
	88,03	0,02443 ± 2,20 %	0,02412 ± 2,13 %	-1,24
	122,06	0,03611 ± 0,82 %	0,03542 ± 0,67 %	-1,91
	165,85	0,03538 ± 0,69 %	0,03491 ± 0,51 %	-1,32
	279,19	0,02453 ± 2,37 %	0,02409 ± 2,24 %	-1,79
	391,69	0,01720 ± 1,79 %	0,01739 ± 1,73 %	1,10
	513,99	0,01363 ± 1,31 %	0,01356 ± 1,17 %	-0,49
	661,65	0,01071 ± 0,69 %	0,01071 ± 0,62 %	0,06
	834,83	0,00875 ± 1,77 %	0,00881 ± 1,72 %	0,77
	898,02	0,00806 ± 0,69 %	0,00805 ± 0,56 %	-0,22
	1173,20	0,00633 ± 0,49 %	0,00627 ± 0,35 %	-0,93
	1332,50	0,00567 ± 0,50 %	0,00562 ± 0,36 %	-0,76
1836,00	0,00425 ± 0,78 %	0,00421 ± 0,59 %	-1,11	
oceľové piliny	59,54	0,00277 ± 0,92 %	0,00273 ± 0,37 %	-1,26
	88,03	0,01713 ± 2,33 %	0,01586 ± 2,13 %	-7,40
	122,06	0,02951 ± 0,99 %	0,02757 ± 0,67 %	-6,57
	165,85	0,03081 ± 0,88 %	0,02933 ± 0,51 %	-4,81
	279,19	0,02149 ± 2,70 %	0,02141 ± 2,24 %	-0,38
	391,69	0,01613 ± 1,85 %	0,01574 ± 1,73 %	-2,45
	513,99	0,01239 ± 1,47 %	0,01242 ± 1,17 %	0,24
	661,65	0,00989 ± 0,74 %	0,00991 ± 0,62 %	0,27
	834,83	0,00831 ± 1,80 %	0,00822 ± 1,72 %	-0,98
	898,02	0,00773 ± 0,78 %	0,00753 ± 0,56 %	-2,63
	1173,20	0,00601 ± 0,55 %	0,00591 ± 0,35 %	-1,56
	1332,50	0,00543 ± 0,57 %	0,00532 ± 0,36 %	-1,99
1836,00	0,00413 ± 0,90 %	0,00401 ± 0,59 %	-2,76	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M500 - Marinelliho geometria 500ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,03659 ± 0,32 %	0,03565 ± 0,33 %	-2,55
	88,03	0,04273 ± 2,14 %	0,04181 ± 2,14 %	-2,17
	122,06	0,04408 ± 0,70 %	0,04369 ± 0,74 %	-0,88
	165,85	0,03694 ± 0,55 %	0,03604 ± 0,64 %	-2,44
	279,19	0,02430 ± 2,25 %	0,02370 ± 2,43 %	-2,48
	391,69	0,01699 ± 1,74 %	0,01682 ± 1,78 %	-1,00
	513,99	0,01326 ± 1,19 %	0,01307 ± 1,30 %	-1,40
	661,65	0,01036 ± 0,65 %	0,01020 ± 0,67 %	-1,53
	834,83	0,00843 ± 1,73 %	0,00837 ± 1,75 %	-0,72
	898,02	0,00768 ± 0,59 %	0,00765 ± 0,66 %	-0,36
	1173,20	0,00594 ± 0,40 %	0,00585 ± 0,44 %	-1,56
	1332,50	0,00527 ± 0,41 %	0,00522 ± 0,46 %	-0,93
	1836,00	0,00395 ± 0,64 %	0,00391 ± 0,75 %	-0,97
drevené piliny	59,54	0,04916 ± 0,32 %	0,04875 ± 0,33 %	-0,83
	88,03	0,05259 ± 2,12 %	0,05274 ± 2,14 %	0,30
	122,06	0,05365 ± 0,69 %	0,05324 ± 0,74 %	-0,77
	165,85	0,04366 ± 0,56 %	0,04297 ± 0,64 %	-1,56
	279,19	0,02776 ± 2,23 %	0,02747 ± 2,43 %	-1,04
	391,69	0,01885 ± 1,75 %	0,01917 ± 1,78 %	1,67
	513,99	0,01461 ± 1,21 %	0,01470 ± 1,30 %	0,65
	661,65	0,01132 ± 0,65 %	0,01134 ± 0,67 %	0,10
	834,83	0,00918 ± 1,74 %	0,00920 ± 1,75 %	0,22
	898,02	0,00842 ± 0,61 %	0,00839 ± 0,66 %	-0,34
	1173,20	0,00644 ± 0,42 %	0,00634 ± 0,44 %	-1,47
	1332,50	0,00574 ± 0,43 %	0,00563 ± 0,46 %	-1,88
	1836,00	0,00421 ± 0,67 %	0,00417 ± 0,75 %	-0,81
oceľové piliny	59,54	0,02056 ± 0,34 %	0,02035 ± 0,33 %	-1,03
	88,03	0,03547 ± 2,13 %	0,03468 ± 2,14 %	-2,25
	122,06	0,04202 ± 0,71 %	0,04145 ± 0,74 %	-1,36
	165,85	0,03849 ± 0,57 %	0,03611 ± 0,64 %	-6,21
	279,19	0,02458 ± 2,28 %	0,02441 ± 2,43 %	-0,70
	391,69	0,01762 ± 1,75 %	0,01735 ± 1,78 %	-1,53
	513,99	0,01362 ± 1,23 %	0,01347 ± 1,30 %	-1,12
	661,65	0,01020 ± 0,66 %	0,01049 ± 0,67 %	2,87
	834,83	0,00867 ± 1,74 %	0,00859 ± 1,75 %	-0,94
	898,02	0,00783 ± 0,62 %	0,00785 ± 0,66 %	0,20
	1173,20	0,00611 ± 0,42 %	0,00598 ± 0,44 %	-2,12
	1332,50	0,00539 ± 0,43 %	0,00533 ± 0,46 %	-1,12
	1836,00	0,00401 ± 0,71 %	0,00398 ± 0,75 %	-0,70
olovené guľ.+voda	661,65	0,00659 ± 1,14 %	0,00666 ± 0,67 %	1,16
	1173,20	0,00444 ± 0,33 %	0,00450 ± 0,44 %	1,57
	1332,50	0,00406 ± 0,34 %	0,00411 ± 0,46 %	1,24

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M500 - Marinelliho geometria 500ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,01796 ± 0,38 %	0,01720 ± 0,38 %	-4,19
	88,03	0,03846 ± 2,16 %	0,03671 ± 2,16 %	-4,55
	122,06	0,04877 ± 0,75 %	0,04800 ± 0,77 %	-1,59
	165,85	0,04640 ± 0,60 %	0,04586 ± 0,66 %	-1,16
	279,19	0,03324 ± 2,23 %	0,03355 ± 2,42 %	0,92
	391,69	0,02608 ± 1,75 %	0,02546 ± 1,77 %	-2,40
	513,99	0,02148 ± 1,20 %	0,02103 ± 1,28 %	-2,09
	661,65	0,01746 ± 0,66 %	0,01715 ± 0,66 %	-1,77
	834,83	0,01494 ± 1,74 %	0,01453 ± 1,74 %	-2,76
	898,02	0,01322 ± 0,61 %	0,01300 ± 0,65 %	-1,65
	1173,20	0,01062 ± 0,42 %	0,01052 ± 0,43 %	-0,99
	1332,50	0,00963 ± 0,43 %	0,00957 ± 0,43 %	-0,54
1836,00	0,00750 ± 0,67 %	0,00751 ± 0,71 %	0,15	
drevené piliny	59,54	0,02366 ± 0,36 %	0,02352 ± 0,38 %	-0,56
	88,03	0,04679 ± 2,15 %	0,04631 ± 2,16 %	-1,01
	122,06	0,05842 ± 0,73 %	0,05849 ± 0,77 %	0,12
	165,85	0,05498 ± 0,59 %	0,05469 ± 0,66 %	-0,53
	279,19	0,03876 ± 2,25 %	0,03889 ± 2,42 %	0,32
	391,69	0,02920 ± 1,75 %	0,02901 ± 1,77 %	-0,64
	513,99	0,02389 ± 1,21 %	0,02365 ± 1,28 %	-1,02
	661,65	0,01921 ± 0,65 %	0,01905 ± 0,66 %	-0,81
	834,83	0,01621 ± 1,73 %	0,01598 ± 1,74 %	-1,43
	898,02	0,01456 ± 0,60 %	0,01425 ± 0,65 %	-2,11
	1173,20	0,01164 ± 0,41 %	0,01140 ± 0,43 %	-2,02
	1332,50	0,01042 ± 0,42 %	0,01033 ± 0,43 %	-0,92
1836,00	0,00810 ± 0,66 %	0,00801 ± 0,71 %	-1,15	
oceľové piliny	59,54	0,01008 ± 0,52 %	0,00982 ± 0,38 %	-2,57
	88,03	0,03203 ± 2,23 %	0,03045 ± 2,16 %	-4,93
	122,06	0,04753 ± 0,88 %	0,04553 ± 0,77 %	-4,20
	165,85	0,04814 ± 0,76 %	0,04594 ± 0,66 %	-4,55
	279,19	0,03448 ± 2,47 %	0,03455 ± 2,42 %	0,22
	391,69	0,02665 ± 1,80 %	0,02626 ± 1,77 %	-1,44
	513,99	0,02164 ± 1,33 %	0,02166 ± 1,28 %	0,13
	661,65	0,01753 ± 0,69 %	0,01763 ± 0,66 %	0,56
	834,83	0,01518 ± 1,77 %	0,01491 ± 1,74 %	-1,78
	898,02	0,01362 ± 0,69 %	0,01333 ± 0,65 %	-2,08
	1173,20	0,01089 ± 0,48 %	0,01075 ± 0,43 %	-1,20
	1332,50	0,00985 ± 0,49 %	0,00978 ± 0,43 %	-0,75
1836,00	0,00770 ± 0,77 %	0,00764 ± 0,71 %	-0,80	
olovené guľ.+voda	661,65	0,01147 ± 1,14 %	0,01120 ± 0,66 %	-2,36
	1173,20	0,00812 ± 0,34 %	0,00810 ± 0,43 %	-0,30
	1332,50	0,00755 ± 0,34 %	0,00753 ± 0,43 %	-0,25

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M500 - Marinelliho geometria 500ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00292 ± 0,65 %	0,00275 ± 0,39 %	-5,73
	88,03	0,01209 ± 2,32 %	0,01231 ± 2,13 %	1,87
	122,06	0,01873 ± 1,03 %	0,01798 ± 0,69 %	-4,01
	165,85	0,01787 ± 0,88 %	0,01743 ± 0,54 %	-2,46
	279,19	0,01094 ± 2,55 %	0,01096 ± 2,30 %	0,25
	391,69	0,00773 ± 1,82 %	0,00771 ± 1,74 %	-0,32
	513,99	0,00590 ± 1,35 %	0,00592 ± 1,20 %	0,38
	661,65	0,00455 ± 0,99 %	0,00456 ± 0,64 %	0,26
	834,83	0,00369 ± 1,79 %	0,00363 ± 1,73 %	-1,66
	898,02	0,00341 ± 0,72 %	0,00336 ± 0,59 %	-1,49
	1173,20	0,00256 ± 0,74 %	0,00257 ± 0,38 %	0,16
	1332,50	0,00228 ± 0,74 %	0,00227 ± 0,39 %	-0,81
1836,00	0,00173 ± 0,84 %	0,00169 ± 0,64 %	-1,99	
drevené piliny	59,54	0,00375 ± 0,66 %	0,00376 ± 0,39 %	0,26
	88,03	0,01562 ± 2,46 %	0,01554 ± 2,13 %	-0,55
	122,06	0,02237 ± 1,08 %	0,02191 ± 0,69 %	-2,03
	165,85	0,02069 ± 0,98 %	0,02079 ± 0,54 %	0,47
	279,19	0,01256 ± 2,81 %	0,01271 ± 2,30 %	1,14
	391,69	0,00870 ± 1,87 %	0,00878 ± 1,74 %	0,93
	513,99	0,00667 ± 1,46 %	0,00665 ± 1,20 %	-0,20
	661,65	0,00504 ± 0,80 %	0,00506 ± 0,64 %	0,38
	834,83	0,00398 ± 1,82 %	0,00399 ± 1,73 %	0,15
	898,02	0,00369 ± 0,81 %	0,00368 ± 0,59 %	-0,22
	1173,20	0,00279 ± 0,63 %	0,00278 ± 0,38 %	-0,23
	1332,50	0,00244 ± 0,65 %	0,00244 ± 0,39 %	0,35
1836,00	0,00173 ± 0,98 %	0,00180 ± 0,64 %	4,15	
oceľové piliny	59,54	0,00159 ± 1,40 %	0,00157 ± 0,39 %	-1,03
	88,03	0,01035 ± 2,67 %	0,01021 ± 2,13 %	-1,30
	122,06	0,01823 ± 1,46 %	0,01706 ± 0,69 %	-6,45
	165,85	0,01832 ± 1,32 %	0,01746 ± 0,54 %	-4,68
	279,19	0,01155 ± 3,54 %	0,01129 ± 2,30 %	-2,26
	391,69	0,00806 ± 1,98 %	0,00795 ± 1,74 %	-1,36
	513,99	0,00623 ± 1,69 %	0,00610 ± 1,20 %	-2,17
	661,65	0,00475 ± 0,98 %	0,00469 ± 0,64 %	-1,39
	834,83	0,00382 ± 1,88 %	0,00372 ± 1,73 %	-2,50
	898,02	0,00354 ± 0,93 %	0,00344 ± 0,59 %	-2,84
	1173,20	0,00261 ± 0,79 %	0,00263 ± 0,38 %	0,65
	1332,50	0,00226 ± 0,84 %	0,00231 ± 0,39 %	2,20
1836,00	0,00174 ± 1,12 %	0,00172 ± 0,64 %	-1,28	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P1000 - prstencová geometria 1000ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00475 ± 0,55 %	0,00484 ± 0,44 %	1,93
	88,03	0,01784 ± 2,24 %	0,01802 ± 2,17 %	1,01
	122,06	0,02528 ± 0,92 %	0,02606 ± 0,78 %	3,12
	165,85	0,02474 ± 0,85 %	0,02540 ± 0,67 %	2,68
	279,19	0,01743 ± 2,92 %	0,01810 ± 2,57 %	3,84
	391,69	0,01277 ± 1,83 %	0,01314 ± 1,78 %	2,91
	513,99	0,01011 ± 1,46 %	0,01045 ± 1,32 %	3,34
	661,65	0,00808 ± 0,70 %	0,00829 ± 0,66 %	2,57
	834,83	0,00672 ± 1,78 %	0,00695 ± 1,74 %	3,40
	898,02	0,00618 ± 0,74 %	0,00640 ± 0,65 %	3,51
	1173,20	0,00490 ± 0,49 %	0,00500 ± 0,42 %	2,05
	1332,50	0,00440 ± 0,50 %	0,00451 ± 0,43 %	2,33
1836,00	0,00337 ± 0,84 %	0,00344 ± 0,72 %	2,29	
drevené piliny	59,54	0,00725 ± 0,51 %	0,00746 ± 0,44 %	2,91
	88,03	0,02430 ± 2,21 %	0,02490 ± 2,17 %	2,46
	122,06	0,03432 ± 0,87 %	0,03435 ± 0,78 %	0,07
	165,85	0,03207 ± 0,81 %	0,03249 ± 0,67 %	1,33
	279,19	0,02250 ± 2,85 %	0,02226 ± 2,57 %	-1,06
	391,69	0,01617 ± 1,84 %	0,01578 ± 1,78 %	-2,41
	513,99	0,01214 ± 1,52 %	0,01232 ± 1,32 %	1,49
	661,65	0,00957 ± 0,71 %	0,00960 ± 0,66 %	0,36
	834,83	0,00782 ± 1,79 %	0,00794 ± 1,74 %	1,56
	898,02	0,00720 ± 0,79 %	0,00727 ± 0,65 %	0,96
	1173,20	0,00557 ± 0,52 %	0,00559 ± 0,42 %	0,46
	1332,50	0,00504 ± 0,54 %	0,00501 ± 0,43 %	-0,62
1836,00	0,00374 ± 0,91 %	0,00377 ± 0,72 %	0,76	
oceľové piliny	59,54	0,00190 ± 0,79 %	0,00195 ± 0,44 %	2,98
	88,03	0,01250 ± 2,27 %	0,01239 ± 2,17 %	-0,88
	122,06	0,02279 ± 0,90 %	0,02228 ± 0,78 %	-2,27
	165,85	0,02418 ± 0,80 %	0,02389 ± 0,67 %	-1,19
	279,19	0,01770 ± 2,89 %	0,01801 ± 2,57 %	1,75
	391,69	0,01286 ± 1,82 %	0,01319 ± 1,78 %	2,56
	513,99	0,01060 ± 1,43 %	0,01051 ± 1,32 %	-0,87
	661,65	0,00862 ± 0,68 %	0,00834 ± 0,66 %	-3,22
	834,83	0,00693 ± 1,76 %	0,00700 ± 1,74 %	1,11
	898,02	0,00631 ± 0,72 %	0,00644 ± 0,65 %	2,16
	1173,20	0,00502 ± 0,46 %	0,00503 ± 0,42 %	0,21
	1332,50	0,00451 ± 0,48 %	0,00453 ± 0,43 %	0,49
1836,00	0,00334 ± 0,82 %	0,00346 ± 0,72 %	3,46	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P1000 - prstencová geometria 1000ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{\text{exp.}}$	$\epsilon_{\text{vyp.}}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,02531 ± 0,35 %	0,02520 ± 0,34 %	-0,47
	88,03	0,03143 ± 2,16 %	0,03123 ± 2,15 %	-0,65
	122,06	0,03291 ± 0,81 %	0,03364 ± 0,77 %	2,21
	165,85	0,02820 ± 0,74 %	0,02859 ± 0,70 %	1,37
	279,19	0,01848 ± 2,70 %	0,01895 ± 2,60 %	2,53
	391,69	0,01297 ± 1,81 %	0,01299 ± 1,80 %	0,18
	513,99	0,01021 ± 1,41 %	0,01022 ± 1,38 %	0,12
	661,65	0,00801 ± 0,68 %	0,00804 ± 0,68 %	0,40
	834,83	0,00656 ± 1,77 %	0,00659 ± 1,76 %	0,51
	898,02	0,00598 ± 0,72 %	0,00614 ± 0,70 %	2,68
	1173,20	0,00473 ± 0,47 %	0,00472 ± 0,47 %	-0,18
	1332,50	0,00420 ± 0,49 %	0,00430 ± 0,47 %	2,34
	1836,00	0,00317 ± 0,82 %	0,00318 ± 0,80 %	0,25
drevené piliny	59,54	0,03852 ± 0,34 %	0,03882 ± 0,34 %	0,80
	88,03	0,04311 ± 2,15 %	0,04315 ± 2,15 %	0,11
	122,06	0,04408 ± 0,79 %	0,04433 ± 0,77 %	0,56
	165,85	0,03624 ± 0,73 %	0,03657 ± 0,70 %	0,90
	279,19	0,02314 ± 2,67 %	0,02330 ± 2,60 %	0,66
	391,69	0,01630 ± 1,82 %	0,01560 ± 1,80 %	-4,27
	513,99	0,01212 ± 1,45 %	0,01204 ± 1,38 %	-0,65
	661,65	0,00942 ± 0,70 %	0,00932 ± 0,68 %	-1,04
	834,83	0,00759 ± 1,78 %	0,00753 ± 1,76 %	-0,81
	898,02	0,00702 ± 0,75 %	0,00698 ± 0,70 %	-0,68
	1173,20	0,00540 ± 0,50 %	0,00528 ± 0,47 %	-2,26
	1332,50	0,00478 ± 0,52 %	0,00478 ± 0,47 %	-0,09
	1836,00	0,00350 ± 0,88 %	0,00348 ± 0,80 %	-0,61
oceľové piliny	59,54	0,01020 ± 0,40 %	0,01016 ± 0,34 %	-0,36
	88,03	0,02289 ± 2,18 %	0,02147 ± 2,15 %	-6,19
	122,06	0,03017 ± 0,81 %	0,02875 ± 0,77 %	-4,71
	165,85	0,02720 ± 0,73 %	0,02689 ± 0,70 %	-1,13
	279,19	0,01877 ± 2,81 %	0,01885 ± 2,60 %	0,44
	391,69	0,01296 ± 1,81 %	0,01304 ± 1,80 %	0,61
	513,99	0,01059 ± 1,40 %	0,01028 ± 1,38 %	-2,92
	661,65	0,00851 ± 0,68 %	0,00809 ± 0,68 %	-4,84
	834,83	0,00671 ± 1,76 %	0,00664 ± 1,76 %	-0,97
	898,02	0,00618 ± 0,71 %	0,00618 ± 0,70 %	-0,04
	1173,20	0,00483 ± 0,46 %	0,00475 ± 0,47 %	-1,60
	1332,50	0,00435 ± 0,47 %	0,00432 ± 0,47 %	-0,68
	1836,00	0,00321 ± 0,80 %	0,00320 ± 0,80 %	-0,47
olovené guľ.+voda	661,65	0,00429 ± 1,22 %	0,00451 ± 0,68 %	4,93
	1173,20	0,00326 ± 0,52 %	0,00327 ± 0,47 %	0,35
	1332,50	0,00305 ± 0,60 %	0,00307 ± 0,47 %	0,75

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P1000 - prstencová geometria 1000ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,01299 ± 0,39 %	0,01300 ± 0,44 %	0,13
	88,03	0,02953 ± 2,17 %	0,02922 ± 2,23 %	-1,04
	122,06	0,03691 ± 0,80 %	0,03770 ± 0,92 %	2,15
	165,85	0,03657 ± 0,69 %	0,03671 ± 0,87 %	0,40
	279,19	0,02678 ± 2,55 %	0,02735 ± 2,84 %	2,14
	391,69	0,02054 ± 1,78 %	0,02086 ± 1,84 %	1,58
	513,99	0,01707 ± 1,31 %	0,01761 ± 1,46 %	3,17
	661,65	0,01398 ± 0,65 %	0,01426 ± 0,71 %	2,02
	834,83	0,01199 ± 1,74 %	0,01206 ± 1,78 %	0,58
	898,02	0,01086 ± 0,65 %	0,01104 ± 0,76 %	1,67
	1173,20	0,00875 ± 0,41 %	0,00889 ± 0,51 %	1,49
	1332,50	0,00797 ± 0,42 %	0,00813 ± 0,52 %	1,95
1836,00	0,00619 ± 0,71 %	0,00633 ± 0,88 %	2,30	
drevené piliny	59,54	0,02001 ± 0,37 %	0,02004 ± 0,44 %	0,13
	88,03	0,03984 ± 2,15 %	0,04038 ± 2,23 %	1,35
	122,06	0,04966 ± 0,76 %	0,04968 ± 0,92 %	0,05
	165,85	0,04637 ± 0,66 %	0,04696 ± 0,87 %	1,28
	279,19	0,03485 ± 2,44 %	0,03363 ± 2,84 %	-3,49
	391,69	0,02616 ± 1,77 %	0,02505 ± 1,84 %	-4,24
	513,99	0,02049 ± 1,30 %	0,02075 ± 1,46 %	1,26
	661,65	0,01658 ± 0,66 %	0,01653 ± 0,71 %	-0,30
	834,83	0,01376 ± 1,74 %	0,01378 ± 1,78 %	0,13
	898,02	0,01264 ± 0,65 %	0,01255 ± 0,76 %	-0,70
	1173,20	0,01003 ± 0,42 %	0,00995 ± 0,51 %	-0,81
	1332,50	0,00913 ± 0,43 %	0,00903 ± 0,52 %	-1,06
1836,00	0,00701 ± 0,73 %	0,00693 ± 0,88 %	-1,19	
oceľové piliny	59,54	0,00510 ± 0,52 %	0,00524 ± 0,44 %	2,90
	88,03	0,02031 ± 2,23 %	0,02009 ± 2,23 %	-1,08
	122,06	0,03390 ± 0,83 %	0,03222 ± 0,92 %	-4,95
	165,85	0,03480 ± 0,73 %	0,03453 ± 0,87 %	-0,77
	279,19	0,02683 ± 2,61 %	0,02721 ± 2,84 %	1,42
	391,69	0,02081 ± 1,78 %	0,02094 ± 1,84 %	0,58
	513,99	0,01785 ± 1,32 %	0,01771 ± 1,46 %	-0,81
	661,65	0,01493 ± 0,66 %	0,01436 ± 0,71 %	-3,83
	834,83	0,01235 ± 1,74 %	0,01215 ± 1,78 %	-1,64
	898,02	0,01102 ± 0,66 %	0,01112 ± 0,76 %	0,95
	1173,20	0,00908 ± 0,42 %	0,00894 ± 0,51 %	-1,50
	1332,50	0,00824 ± 0,43 %	0,00817 ± 0,52 %	-0,75
1836,00	0,00633 ± 0,73 %	0,00636 ± 0,88 %	0,45	
olovené guľ.+voda	661,65	0,00767 ± 1,19 %	0,00799 ± 0,71 %	4,15
	1173,20	0,00616 ± 0,45 %	0,00617 ± 0,51 %	0,13
	1332,50	0,00576 ± 0,46 %	0,00581 ± 0,52 %	0,79

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P1000 - prstencová geometria 1000ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00224 ± 0,64 %	0,00231 ± 0,50 %	2,83
	88,03	0,00923 ± 2,36 %	0,00926 ± 2,59 %	0,33
	122,06	0,01401 ± 1,14 %	0,01407 ± 1,29 %	0,41
	165,85	0,01306 ± 1,11 %	0,01364 ± 0,85 %	4,43
	279,19	0,00855 ± 3,62 %	0,00876 ± 3,01 %	2,40
	391,69	0,00595 ± 1,87 %	0,00621 ± 1,81 %	4,37
	513,99	0,00474 ± 1,56 %	0,00480 ± 1,40 %	1,22
	661,65	0,00360 ± 0,80 %	0,00364 ± 0,74 %	1,11
	834,83	0,00277 ± 1,81 %	0,00288 ± 1,77 %	3,99
	898,02	0,00259 ± 0,80 %	0,00269 ± 0,70 %	3,69
	1173,20	0,00207 ± 0,57 %	0,00208 ± 0,47 %	0,21
	1332,50	0,00184 ± 0,58 %	0,00185 ± 0,48 %	0,61
1836,00	0,00133 ± 0,92 %	0,00137 ± 0,76 %	3,04	
drevené piliny	59,54	0,00342 ± 0,49 %	0,00355 ± 0,50 %	4,00
	88,03	0,01336 ± 2,22 %	0,01279 ± 2,59 %	-4,22
	122,06	0,01829 ± 0,93 %	0,01854 ± 1,29 %	1,35
	165,85	0,01686 ± 0,88 %	0,01745 ± 0,85 %	3,50
	279,19	0,01064 ± 3,17 %	0,01077 ± 3,01 %	1,16
	391,69	0,00742 ± 1,82 %	0,00745 ± 1,81 %	0,48
	513,99	0,00555 ± 1,47 %	0,00565 ± 1,40 %	1,84
	661,65	0,00414 ± 0,91 %	0,00422 ± 0,74 %	1,74
	834,83	0,00323 ± 1,78 %	0,00328 ± 1,77 %	1,56
	898,02	0,00300 ± 0,75 %	0,00305 ± 0,70 %	1,72
	1173,20	0,00232 ± 0,57 %	0,00232 ± 0,47 %	0,16
	1332,50	0,00204 ± 0,59 %	0,00206 ± 0,48 %	1,02
1836,00	0,00147 ± 0,87 %	0,00150 ± 0,76 %	2,02	
oceľové piliny	59,54	0,00091 ± 1,09 %	0,00093 ± 0,50 %	2,15
	88,03	0,00657 ± 2,44 %	0,00637 ± 2,59 %	-3,14
	122,06	0,01276 ± 1,13 %	0,01202 ± 1,29 %	-5,79
	165,85	0,01293 ± 1,06 %	0,01283 ± 0,85 %	-0,80
	279,19	0,00857 ± 3,70 %	0,00871 ± 3,01 %	1,63
	391,69	0,00626 ± 1,85 %	0,00623 ± 1,81 %	-0,51
	513,99	0,00485 ± 1,56 %	0,00483 ± 1,40 %	-0,49
	661,65	0,00373 ± 0,92 %	0,00366 ± 0,74 %	-1,82
	834,83	0,00288 ± 1,79 %	0,00290 ± 1,77 %	0,56
	898,02	0,00264 ± 0,78 %	0,00271 ± 0,70 %	2,61
	1173,20	0,00208 ± 0,65 %	0,00209 ± 0,47 %	0,48
	1332,50	0,00187 ± 0,64 %	0,00186 ± 0,48 %	-0,32
1836,00	0,00134 ± 0,89 %	0,00138 ± 0,76 %	2,44	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M1000 - Marinelliho geometria 1000ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00330 ± 0,42 %	0,00330 ± 0,48 %	0,16
	88,03	0,01401 ± 2,16 %	0,01364 ± 2,19 %	-2,61
	122,06	0,02098 ± 0,73 %	0,02103 ± 0,80 %	0,25
	165,85	0,02118 ± 0,59 %	0,02115 ± 0,69 %	-0,13
	279,19	0,01505 ± 2,48 %	0,01515 ± 2,62 %	0,66
	391,69	0,01134 ± 1,74 %	0,01123 ± 1,78 %	-1,00
	513,99	0,00913 ± 1,23 %	0,00902 ± 1,33 %	-1,23
	661,65	0,00729 ± 0,63 %	0,00729 ± 0,66 %	0,03
	834,83	0,00604 ± 1,72 %	0,00613 ± 1,74 %	1,49
	898,02	0,00559 ± 0,59 %	0,00560 ± 0,65 %	0,17
	1173,20	0,00444 ± 0,36 %	0,00447 ± 0,42 %	0,62
	1332,50	0,00403 ± 0,37 %	0,00404 ± 0,43 %	0,25
1836,00	0,00307 ± 0,63 %	0,00310 ± 0,72 %	0,85	
drevené piliny	59,54	0,00506 ± 0,40 %	0,00531 ± 0,48 %	5,02
	88,03	0,01883 ± 2,14 %	0,01954 ± 2,19 %	3,75
	122,06	0,02773 ± 0,71 %	0,02861 ± 0,80 %	3,20
	165,85	0,02718 ± 0,57 %	0,02786 ± 0,69 %	2,51
	279,19	0,01894 ± 2,41 %	0,01913 ± 2,62 %	1,01
	391,69	0,01388 ± 1,75 %	0,01381 ± 1,78 %	-0,52
	513,99	0,01077 ± 1,26 %	0,01087 ± 1,33 %	0,89
	661,65	0,00849 ± 0,64 %	0,00863 ± 0,66 %	1,64
	834,83	0,00699 ± 1,73 %	0,00714 ± 1,74 %	2,12
	898,02	0,00646 ± 0,61 %	0,00649 ± 0,65 %	0,40
	1173,20	0,00505 ± 0,38 %	0,00509 ± 0,42 %	0,73
	1332,50	0,00453 ± 0,39 %	0,00456 ± 0,43 %	0,82
1836,00	0,00341 ± 0,66 %	0,00344 ± 0,72 %	0,82	
oceľové piliny	59,54	0,00125 ± 0,61 %	0,00128 ± 0,48 %	2,12
	88,03	0,00937 ± 2,18 %	0,00917 ± 2,19 %	-2,12
	122,06	0,01846 ± 0,74 %	0,01779 ± 0,80 %	-3,59
	165,85	0,02012 ± 0,60 %	0,01983 ± 0,69 %	-1,46
	279,19	0,01456 ± 2,50 %	0,01510 ± 2,62 %	3,67
	391,69	0,01118 ± 1,75 %	0,01129 ± 1,78 %	0,95
	513,99	0,00931 ± 1,24 %	0,00909 ± 1,33 %	-2,38
	661,65	0,00757 ± 0,63 %	0,00736 ± 0,66 %	-2,85
	834,83	0,00617 ± 1,72 %	0,00619 ± 1,74 %	0,41
	898,02	0,00564 ± 0,59 %	0,00565 ± 0,65 %	0,26
	1173,20	0,00451 ± 0,37 %	0,00450 ± 0,42 %	-0,10
	1332,50	0,00407 ± 0,37 %	0,00407 ± 0,43 %	-0,11
1836,00	0,00308 ± 0,63 %	0,00311 ± 0,72 %	1,04	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M1000 - Marinelliho geometria 1000ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,02415 ± 0,34 %	0,02417 ± 0,35 %	0,12
	88,03	0,02974 ± 2,15 %	0,02917 ± 2,17 %	-1,91
	122,06	0,03079 ± 0,77 %	0,03125 ± 0,84 %	1,48
	165,85	0,02612 ± 0,70 %	0,02612 ± 0,80 %	0,00
	279,19	0,01696 ± 2,77 %	0,01675 ± 2,85 %	-1,28
	391,69	0,01226 ± 1,79 %	0,01235 ± 1,84 %	0,78
	513,99	0,00972 ± 1,35 %	0,00967 ± 1,48 %	-0,57
	661,65	0,00758 ± 0,67 %	0,00758 ± 0,71 %	-0,02
	834,83	0,00623 ± 1,75 %	0,00632 ± 1,79 %	1,47
	898,02	0,00569 ± 0,68 %	0,00577 ± 0,77 %	1,42
	1173,20	0,00447 ± 0,44 %	0,00449 ± 0,51 %	0,45
	1332,50	0,00400 ± 0,45 %	0,00401 ± 0,53 %	0,33
	1836,00	0,00300 ± 0,76 %	0,00305 ± 0,89 %	1,80
drevené piliny	59,54	0,03836 ± 0,34 %	0,03892 ± 0,35 %	1,46
	88,03	0,04150 ± 2,15 %	0,04177 ± 2,17 %	0,64
	122,06	0,04185 ± 0,79 %	0,04251 ± 0,84 %	1,57
	165,85	0,03418 ± 0,73 %	0,03441 ± 0,80 %	0,69
	279,19	0,02140 ± 2,72 %	0,02114 ± 2,85 %	-1,22
	391,69	0,01538 ± 1,82 %	0,01520 ± 1,84 %	-1,14
	513,99	0,01168 ± 1,45 %	0,01165 ± 1,48 %	-0,23
	661,65	0,00893 ± 0,70 %	0,00897 ± 0,71 %	0,48
	834,83	0,00720 ± 1,78 %	0,00737 ± 1,79 %	2,26
	898,02	0,00671 ± 0,75 %	0,00669 ± 0,77 %	-0,26
	1173,20	0,00513 ± 0,50 %	0,00511 ± 0,51 %	-0,23
	1332,50	0,00458 ± 0,51 %	0,00454 ± 0,53 %	-0,96
	1836,00	0,00339 ± 0,88 %	0,00339 ± 0,89 %	0,05
oceľové piliny	59,54	0,00860 ± 0,35 %	0,00934 ± 0,35 %	8,63
	88,03	0,02016 ± 2,14 %	0,01960 ± 2,17 %	-2,77
	122,06	0,02734 ± 0,71 %	0,02644 ± 0,84 %	-3,30
	165,85	0,02505 ± 0,59 %	0,02449 ± 0,80 %	-2,23
	279,19	0,01694 ± 2,49 %	0,01669 ± 2,85 %	-1,50
	391,69	0,01251 ± 1,75 %	0,01243 ± 1,84 %	-0,68
	513,99	0,00997 ± 1,26 %	0,00974 ± 1,48 %	-2,25
	661,65	0,00794 ± 0,64 %	0,00765 ± 0,71 %	-3,62
	834,83	0,00637 ± 1,73 %	0,00639 ± 1,79 %	0,22
	898,02	0,00581 ± 0,61 %	0,00583 ± 0,77 %	0,28
	1173,20	0,00458 ± 0,38 %	0,00453 ± 0,51 %	-1,02
	1332,50	0,00410 ± 0,39 %	0,00405 ± 0,53 %	-1,30
	1836,00	0,00302 ± 0,66 %	0,00307 ± 0,89 %	1,49
olovené guľ.+voda	661,65	0,00399 ± 1,10 %	0,00395 ± 0,71 %	-1,05
	1173,20	0,00297 ± 0,16 %	0,00295 ± 0,51 %	-0,60
	1332,50	0,00275 ± 0,16 %	0,00273 ± 0,53 %	-1,02

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M1000 - Marinelliho geometria 1000ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,01183 ± 0,36 %	0,01179 ± 0,39 %	-0,37
	88,03	0,02594 ± 2,15 %	0,02589 ± 2,18 %	-0,19
	122,06	0,03368 ± 0,74 %	0,03364 ± 0,82 %	-0,12
	165,85	0,03275 ± 0,62 %	0,03271 ± 0,73 %	-0,12
	279,19	0,02412 ± 2,44 %	0,02427 ± 2,61 %	0,60
	391,69	0,01880 ± 1,75 %	0,01890 ± 1,79 %	0,54
	513,99	0,01571 ± 1,24 %	0,01570 ± 1,34 %	-0,01
	661,65	0,01284 ± 0,63 %	0,01286 ± 0,67 %	0,11
	834,83	0,01099 ± 1,73 %	0,01104 ± 1,75 %	0,39
	898,02	0,00990 ± 0,60 %	0,00996 ± 0,67 %	0,62
	1173,20	0,00800 ± 0,38 %	0,00803 ± 0,44 %	0,42
	1332,50	0,00730 ± 0,38 %	0,00736 ± 0,45 %	0,78
1836,00	0,00574 ± 0,64 %	0,00581 ± 0,75 %	1,19	
drevené piliny	59,54	0,01851 ± 0,34 %	0,01898 ± 0,39 %	2,52
	88,03	0,03693 ± 2,13 %	0,03708 ± 2,18 %	0,40
	122,06	0,04611 ± 0,69 %	0,04577 ± 0,82 %	-0,75
	165,85	0,04244 ± 0,56 %	0,04309 ± 0,73 %	1,53
	279,19	0,03008 ± 2,33 %	0,03064 ± 2,61 %	1,87
	391,69	0,02338 ± 1,74 %	0,02326 ± 1,79 %	-0,53
	513,99	0,01882 ± 1,22 %	0,01893 ± 1,34 %	0,57
	661,65	0,01515 ± 0,63 %	0,01522 ± 0,67 %	0,42
	834,83	0,01271 ± 1,72 %	0,01285 ± 1,75 %	1,11
	898,02	0,01149 ± 0,59 %	0,01154 ± 0,67 %	0,42
	1173,20	0,00919 ± 0,37 %	0,00915 ± 0,44 %	-0,36
	1332,50	0,00831 ± 0,38 %	0,00832 ± 0,45 %	0,09
1836,00	0,00645 ± 0,64 %	0,00644 ± 0,75 %	-0,05	
oceľové piliny	59,54	0,00423 ± 0,44 %	0,00456 ± 0,39 %	7,63
	88,03	0,01738 ± 2,17 %	0,01740 ± 2,18 %	0,10
	122,06	0,02977 ± 0,74 %	0,02846 ± 0,82 %	-4,40
	165,85	0,03145 ± 0,61 %	0,03067 ± 0,73 %	-2,49
	279,19	0,02399 ± 2,44 %	0,02418 ± 2,61 %	0,81
	391,69	0,01887 ± 1,75 %	0,01901 ± 1,79 %	0,73
	513,99	0,01594 ± 1,23 %	0,01583 ± 1,34 %	-0,66
	661,65	0,01344 ± 0,63 %	0,01298 ± 0,67 %	-3,47
	834,83	0,01117 ± 1,72 %	0,01114 ± 1,75 %	-0,26
	898,02	0,01001 ± 0,59 %	0,01005 ± 0,67 %	0,43
	1173,20	0,00820 ± 0,37 %	0,00811 ± 0,44 %	-1,14
	1332,50	0,00748 ± 0,37 %	0,00742 ± 0,45 %	-0,74
1836,00	0,00576 ± 0,63 %	0,00584 ± 0,75 %	1,37	
olovené guľ.+voda	661,65	0,00684 ± 1,15 %	0,00670 ± 0,67 %	-2,10
	1173,20	0,00542 ± 0,36 %	0,00528 ± 0,44 %	-2,50
	1332,50	0,00510 ± 0,37 %	0,00500 ± 0,45 %	-1,93

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M1000 - Marinelliho geometria 1000ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00193 ± 0,47 %	0,00188 ± 0,63 %	-2,82
	88,03	0,00840 ± 2,20 %	0,00843 ± 2,30 %	0,30
	122,06	0,01270 ± 0,85 %	0,01306 ± 1,05 %	2,81
	165,85	0,01264 ± 0,76 %	0,01243 ± 0,99 %	-1,64
	279,19	0,00786 ± 3,07 %	0,00797 ± 3,34 %	1,37
	391,69	0,00559 ± 1,78 %	0,00566 ± 1,88 %	1,32
	513,99	0,00435 ± 1,37 %	0,00442 ± 1,57 %	1,58
	661,65	0,00345 ± 0,94 %	0,00344 ± 0,80 %	-0,08
	834,83	0,00273 ± 1,74 %	0,00276 ± 1,80 %	0,92
	898,02	0,00254 ± 0,65 %	0,00257 ± 0,80 %	1,24
	1173,20	0,00195 ± 0,60 %	0,00196 ± 0,57 %	0,88
	1332,50	0,00175 ± 0,60 %	0,00172 ± 0,59 %	-1,79
1836,00	0,00129 ± 0,70 %	0,00128 ± 0,94 %	-0,89	
drevené piliny	59,54	0,00295 ± 0,41 %	0,00302 ± 0,63 %	2,38
	88,03	0,01181 ± 2,16 %	0,01207 ± 2,30 %	2,17
	122,06	0,01747 ± 0,76 %	0,01776 ± 1,05 %	1,69
	165,85	0,01646 ± 0,65 %	0,01638 ± 0,99 %	-0,50
	279,19	0,01000 ± 2,81 %	0,01006 ± 3,34 %	0,59
	391,69	0,00696 ± 1,77 %	0,00697 ± 1,88 %	0,10
	513,99	0,00530 ± 1,34 %	0,00532 ± 1,57 %	0,46
	661,65	0,00401 ± 0,75 %	0,00408 ± 0,80 %	1,66
	834,83	0,00317 ± 1,74 %	0,00321 ± 1,80 %	1,41
	898,02	0,00294 ± 0,65 %	0,00298 ± 0,80 %	1,32
	1173,20	0,00219 ± 0,48 %	0,00224 ± 0,57 %	1,97
	1332,50	0,00194 ± 0,49 %	0,00194 ± 0,59 %	0,01
1836,00	0,00146 ± 0,72 %	0,00142 ± 0,94 %	-2,89	
oceľové piliny	59,54	0,00075 ± 0,85 %	0,00073 ± 0,63 %	-3,15
	88,03	0,00594 ± 2,27 %	0,00566 ± 2,30 %	-4,63
	122,06	0,01159 ± 0,91 %	0,01105 ± 1,05 %	-4,68
	165,85	0,01221 ± 0,80 %	0,01166 ± 0,99 %	-4,52
	279,19	0,00802 ± 3,14 %	0,00794 ± 3,34 %	-1,04
	391,69	0,00570 ± 1,80 %	0,00570 ± 1,88 %	-0,14
	513,99	0,00450 ± 1,40 %	0,00445 ± 1,57 %	-1,10
	661,65	0,00358 ± 0,73 %	0,00348 ± 0,80 %	-2,98
	834,83	0,00279 ± 1,75 %	0,00279 ± 1,80 %	-0,11
	898,02	0,00261 ± 0,68 %	0,00260 ± 0,80 %	-0,32
	1173,20	0,00195 ± 0,49 %	0,00198 ± 0,57 %	1,89
	1332,50	0,00172 ± 0,51 %	0,00173 ± 0,59 %	0,63
1836,00	0,00132 ± 0,77 %	0,00129 ± 0,94 %	-2,47	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P3000 - prstencová geometria 3000ml, detektor č.1)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00495 ± 0,60 %	0,00490 ± 0,51 %	-1,02
	88,03	0,01632 ± 2,50 %	0,01656 ± 2,44 %	1,45
	122,06	0,02643 ± 1,05 %	0,02686 ± 1,00 %	1,63
	165,85	0,02741 ± 0,89 %	0,02749 ± 0,94 %	0,29
	279,19	0,02208 ± 2,60 %	0,02247 ± 3,19 %	1,74
	391,69	0,01936 ± 1,78 %	0,01911 ± 1,80 %	-1,29
	513,99	0,01699 ± 1,24 %	0,01692 ± 1,35 %	-0,40
	661,65	0,01444 ± 0,67 %	0,01428 ± 0,67 %	-1,07
	834,83	0,01282 ± 1,74 %	0,01266 ± 1,74 %	-1,23
	898,02	0,01162 ± 0,61 %	0,01189 ± 0,64 %	2,34
	1173,20	0,00985 ± 0,41 %	0,00974 ± 0,41 %	-1,08
	1332,50	0,00902 ± 0,42 %	0,00896 ± 0,42 %	-0,64
1836,00	0,00745 ± 0,64 %	0,00742 ± 0,68 %	-0,49	
drevené piliny	59,54	0,00932 ± 0,54 %	0,00946 ± 0,51 %	1,43
	88,03	0,02736 ± 2,35 %	0,02742 ± 2,44 %	0,23
	122,06	0,04140 ± 0,99 %	0,04151 ± 1,00 %	0,27
	165,85	0,04084 ± 0,88 %	0,04065 ± 0,94 %	-0,47
	279,19	0,03089 ± 2,66 %	0,03133 ± 3,19 %	1,40
	391,69	0,02518 ± 1,80 %	0,02570 ± 1,80 %	2,09
	513,99	0,02134 ± 1,32 %	0,02211 ± 1,35 %	3,61
	661,65	0,01800 ± 0,69 %	0,01818 ± 0,67 %	1,04
	834,83	0,01567 ± 1,76 %	0,01575 ± 1,74 %	0,52
	898,02	0,01433 ± 0,66 %	0,01469 ± 0,64 %	2,52
	1173,20	0,01168 ± 0,46 %	0,01174 ± 0,41 %	0,51
	1332,50	0,01071 ± 0,47 %	0,01069 ± 0,42 %	-0,24
1836,00	0,00853 ± 0,71 %	0,00861 ± 0,68 %	0,96	
oceľové piliny	59,54	0,00170 ± 1,00 %	0,00193 ± 0,51 %	13,56
	88,03	0,01116 ± 2,62 %	0,01147 ± 2,44 %	2,81
	122,06	0,02359 ± 1,07 %	0,02388 ± 1,00 %	1,23
	165,85	0,02725 ± 0,92 %	0,02734 ± 0,94 %	0,33
	279,19	0,02348 ± 2,86 %	0,02378 ± 3,19 %	1,28
	391,69	0,02021 ± 1,79 %	0,02033 ± 1,80 %	0,60
	513,99	0,01774 ± 1,30 %	0,01797 ± 1,35 %	1,32
	661,65	0,01516 ± 0,66 %	0,01512 ± 0,67 %	-0,23
	834,83	0,01323 ± 1,74 %	0,01336 ± 1,74 %	0,97
	898,02	0,01217 ± 0,63 %	0,01253 ± 0,64 %	2,97
	1173,20	0,01027 ± 0,40 %	0,01021 ± 0,41 %	-0,55
	1332,50	0,00936 ± 0,41 %	0,00937 ± 0,42 %	0,11
1836,00	0,00772 ± 0,66 %	0,00770 ± 0,68 %	-0,32	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P3000 - prstencová geometria 3000ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00097 ± 0,97 %	0,00097 ± 0,69 %	0,23
	88,03	0,00714 ± 2,67 %	0,00685 ± 2,35 %	-4,10
	122,06	0,01129 ± 1,06 %	0,01165 ± 0,95 %	3,18
	165,85	0,01233 ± 0,85 %	0,01248 ± 0,85 %	1,22
	279,19	0,00917 ± 2,46 %	0,00932 ± 3,14 %	1,63
	391,69	0,00689 ± 1,79 %	0,00689 ± 1,80 %	0,00
	513,99	0,00550 ± 1,28 %	0,00552 ± 1,40 %	0,33
	661,65	0,00440 ± 0,73 %	0,00432 ± 0,68 %	-1,74
	834,83	0,00382 ± 1,75 %	0,00375 ± 1,75 %	-1,85
	898,02	0,00356 ± 0,64 %	0,00354 ± 0,67 %	-0,36
	1173,20	0,00288 ± 0,48 %	0,00287 ± 0,43 %	-0,01
	1332,50	0,00260 ± 0,49 %	0,00259 ± 0,44 %	-0,27
1836,00	0,00200 ± 0,71 %	0,00200 ± 0,73 %	-0,07	
drevené piliny	59,54	0,00179 ± 0,67 %	0,00188 ± 0,69 %	5,20
	88,03	0,01092 ± 2,31 %	0,01135 ± 2,35 %	3,93
	122,06	0,01726 ± 0,88 %	0,01800 ± 0,95 %	4,31
	165,85	0,01761 ± 0,73 %	0,01846 ± 0,85 %	4,80
	279,19	0,01275 ± 2,40 %	0,01299 ± 3,14 %	1,90
	391,69	0,00884 ± 1,78 %	0,00926 ± 1,80 %	4,73
	513,99	0,00697 ± 1,27 %	0,00721 ± 1,40 %	3,53
	661,65	0,00542 ± 0,70 %	0,00550 ± 0,68 %	1,54
	834,83	0,00462 ± 1,75 %	0,00467 ± 1,75 %	1,08
	898,02	0,00432 ± 0,64 %	0,00438 ± 0,67 %	1,39
	1173,20	0,00341 ± 0,45 %	0,00347 ± 0,43 %	1,67
	1332,50	0,00304 ± 0,47 %	0,00309 ± 0,44 %	1,42
1836,00	0,00228 ± 0,70 %	0,00232 ± 0,73 %	1,88	
oceľové piliny	59,54	0,00036 ± 1,90 %	0,00038 ± 0,69 %	5,90
	88,03	0,00458 ± 2,53 %	0,00475 ± 2,35 %	3,66
	122,06	0,01052 ± 1,08 %	0,01036 ± 0,95 %	-1,54
	165,85	0,01234 ± 0,91 %	0,01242 ± 0,85 %	0,61
	279,19	0,00984 ± 2,81 %	0,00986 ± 3,14 %	0,27
	391,69	0,00731 ± 1,79 %	0,00733 ± 1,80 %	0,21
	513,99	0,00589 ± 1,35 %	0,00586 ± 1,40 %	-0,47
	661,65	0,00468 ± 0,70 %	0,00458 ± 0,68 %	-2,26
	834,83	0,00402 ± 1,75 %	0,00396 ± 1,75 %	-1,44
	898,02	0,00378 ± 0,65 %	0,00373 ± 0,67 %	-1,22
	1173,20	0,00301 ± 0,44 %	0,00301 ± 0,43 %	0,26
	1332,50	0,00274 ± 0,45 %	0,00271 ± 0,44 %	-1,08
1836,00	0,00210 ± 0,71 %	0,00208 ± 0,73 %	-1,17	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P3000 - prstencová geometria 3000ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00487 ± 0,43 %	0,00480 ± 0,38 %	-1,39
	88,03	0,01164 ± 2,42 %	0,01149 ± 2,40 %	-1,24
	122,06	0,01463 ± 0,94 %	0,01456 ± 0,87 %	-0,45
	165,85	0,01363 ± 0,80 %	0,01364 ± 0,79 %	0,06
	279,19	0,00916 ± 2,43 %	0,00918 ± 2,99 %	0,15
	391,69	0,00671 ± 1,79 %	0,00680 ± 1,79 %	1,38
	513,99	0,00546 ± 1,28 %	0,00549 ± 1,36 %	0,53
	661,65	0,00434 ± 0,70 %	0,00446 ± 0,68 %	2,72
	834,83	0,00360 ± 1,76 %	0,00360 ± 1,75 %	-0,09
	898,02	0,00340 ± 0,65 %	0,00335 ± 0,66 %	-1,28
	1173,20	0,00270 ± 0,46 %	0,00269 ± 0,43 %	-0,57
	1332,50	0,00243 ± 0,48 %	0,00242 ± 0,45 %	-0,27
1836,00	0,00184 ± 0,71 %	0,00182 ± 0,73 %	-1,37	
drevené piliny	59,54	0,00892 ± 0,36 %	0,00927 ± 0,38 %	3,98
	88,03	0,01860 ± 2,21 %	0,01903 ± 2,40 %	2,33
	122,06	0,02216 ± 0,77 %	0,02250 ± 0,87 %	1,55
	165,85	0,01929 ± 0,65 %	0,02017 ± 0,79 %	4,57
	279,19	0,01267 ± 2,33 %	0,01279 ± 2,99 %	1,01
	391,69	0,00881 ± 1,76 %	0,00915 ± 1,79 %	3,85
	513,99	0,00697 ± 1,24 %	0,00717 ± 1,36 %	2,82
	661,65	0,00548 ± 0,68 %	0,00567 ± 0,68 %	3,60
	834,83	0,00437 ± 1,74 %	0,00448 ± 1,75 %	2,48
	898,02	0,00409 ± 0,62 %	0,00414 ± 0,66 %	1,22
	1173,20	0,00322 ± 0,43 %	0,00324 ± 0,43 %	0,59
	1332,50	0,00285 ± 0,44 %	0,00289 ± 0,45 %	1,35
1836,00	0,00209 ± 0,69 %	0,00211 ± 0,73 %	0,73	
oceľové piliny	59,54	0,00174 ± 0,57 %	0,00189 ± 0,38 %	8,81
	88,03	0,00776 ± 2,26 %	0,00796 ± 2,40 %	2,58
	122,06	0,01321 ± 0,92 %	0,01295 ± 0,87 %	-2,01
	165,85	0,01352 ± 0,80 %	0,01357 ± 0,79 %	0,35
	279,19	0,00975 ± 2,81 %	0,00971 ± 2,99 %	-0,35
	391,69	0,00719 ± 1,79 %	0,00724 ± 1,79 %	0,68
	513,99	0,00577 ± 1,32 %	0,00583 ± 1,36 %	0,98
	661,65	0,00460 ± 0,67 %	0,00472 ± 0,68 %	2,54
	834,83	0,00381 ± 1,75 %	0,00380 ± 1,75 %	-0,37
	898,02	0,00355 ± 0,65 %	0,00353 ± 0,66 %	-0,47
	1173,20	0,00284 ± 0,43 %	0,00282 ± 0,43 %	-0,82
	1332,50	0,00256 ± 0,43 %	0,00253 ± 0,45 %	-1,10
1836,00	0,00191 ± 0,71 %	0,00188 ± 0,73 %	-1,28	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P3000 - prstencová geometria 3000ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00245 ± 0,58 %	0,00244 ± 0,46 %	-0,16
	88,03	0,00937 ± 2,39 %	0,00909 ± 2,47 %	-2,93
	122,06	0,01637 ± 0,93 %	0,01640 ± 0,84 %	0,22
	165,85	0,01706 ± 0,76 %	0,01754 ± 0,72 %	2,77
	279,19	0,01318 ± 2,36 %	0,01339 ± 2,79 %	1,58
	391,69	0,01080 ± 1,76 %	0,01088 ± 1,76 %	0,81
	513,99	0,00909 ± 1,22 %	0,00913 ± 1,28 %	0,51
	661,65	0,00762 ± 0,71 %	0,00764 ± 0,65 %	0,26
	834,83	0,00657 ± 1,75 %	0,00658 ± 1,73 %	0,09
	898,02	0,00613 ± 0,60 %	0,00627 ± 0,61 %	2,26
	1173,20	0,00507 ± 0,44 %	0,00510 ± 0,39 %	0,54
	1332,50	0,00468 ± 0,44 %	0,00468 ± 0,39 %	0,00
	1836,00	0,00372 ± 0,64 %	0,00375 ± 0,65 %	0,74
drevené piliny	59,54	0,00457 ± 0,52 %	0,00472 ± 0,46 %	3,23
	88,03	0,01487 ± 2,40 %	0,01506 ± 2,47 %	1,28
	122,06	0,02486 ± 0,88 %	0,02534 ± 0,84 %	1,96
	165,85	0,02519 ± 0,75 %	0,02593 ± 0,72 %	2,95
	279,19	0,01877 ± 2,41 %	0,01867 ± 2,79 %	-0,53
	391,69	0,01430 ± 1,79 %	0,01464 ± 1,76 %	2,36
	513,99	0,01164 ± 1,30 %	0,01194 ± 1,28 %	2,49
	661,65	0,00950 ± 0,70 %	0,00973 ± 0,65 %	2,34
	834,83	0,00806 ± 1,76 %	0,00819 ± 1,73 %	1,54
	898,02	0,00750 ± 0,67 %	0,00774 ± 0,61 %	3,19
	1173,20	0,00605 ± 0,48 %	0,00614 ± 0,39 %	1,45
	1332,50	0,00553 ± 0,49 %	0,00557 ± 0,39 %	0,88
	1836,00	0,00428 ± 0,76 %	0,00435 ± 0,65 %	1,72
oceľové piliny	59,54	0,00087 ± 0,86 %	0,00096 ± 0,46 %	10,58
	88,03	0,00626 ± 2,64 %	0,00630 ± 2,47 %	0,57
	122,06	0,01494 ± 0,88 %	0,01458 ± 0,84 %	-2,41
	165,85	0,01711 ± 0,72 %	0,01744 ± 0,72 %	1,95
	279,19	0,01414 ± 2,49 %	0,01417 ± 2,79 %	0,26
	391,69	0,01144 ± 1,76 %	0,01158 ± 1,76 %	1,26
	513,99	0,00965 ± 1,24 %	0,00970 ± 1,28 %	0,56
	661,65	0,00801 ± 0,65 %	0,00809 ± 0,65 %	1,02
	834,83	0,00703 ± 1,73 %	0,00694 ± 1,73 %	-1,19
	898,02	0,00647 ± 0,60 %	0,00660 ± 0,61 %	2,10
	1173,20	0,00535 ± 0,38 %	0,00534 ± 0,39 %	-0,17
	1332,50	0,00490 ± 0,39 %	0,00489 ± 0,39 %	-0,26
	1836,00	0,00386 ± 0,63 %	0,00389 ± 0,65 %	0,88

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria P3000 - prstencová geometria 3000ml, detektor č.5)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00041 ± 1,55 %	0,00042 ± 0,88 %	1,86
	88,03	0,00328 ± 2,60 %	0,00342 ± 2,31 %	4,42
	122,06	0,00588 ± 1,35 %	0,00605 ± 1,02 %	2,92
	165,85	0,00613 ± 1,15 %	0,00625 ± 0,94 %	1,82
	279,19	0,00418 ± 2,90 %	0,00425 ± 3,55 %	1,68
	391,69	0,00306 ± 1,89 %	0,00303 ± 1,83 %	-0,99
	513,99	0,00237 ± 1,50 %	0,00240 ± 1,50 %	1,15
	661,65	0,00190 ± 0,96 %	0,00189 ± 0,92 %	-0,35
	834,83	0,00154 ± 1,84 %	0,00153 ± 1,77 %	-0,37
	898,02	0,00143 ± 0,83 %	0,00146 ± 0,73 %	1,65
	1173,20	0,00112 ± 0,72 %	0,00113 ± 0,57 %	0,99
	1332,50	0,00101 ± 0,73 %	0,00102 ± 0,57 %	1,75
1836,00	0,00077 ± 0,96 %	0,00076 ± 0,82 %	-1,33	
drevené piliny	59,54	0,00078 ± 0,98 %	0,00081 ± 0,88 %	3,71
	88,03	0,00558 ± 2,44 %	0,00567 ± 2,31 %	1,50
	122,06	0,00875 ± 1,08 %	0,00935 ± 1,02 %	6,81
	165,85	0,00871 ± 0,96 %	0,00924 ± 0,94 %	6,09
	279,19	0,00571 ± 2,78 %	0,00592 ± 3,55 %	3,76
	391,69	0,00400 ± 1,85 %	0,00407 ± 1,83 %	1,73
	513,99	0,00311 ± 1,43 %	0,00314 ± 1,50 %	0,91
	661,65	0,00241 ± 0,76 %	0,00241 ± 0,92 %	-0,07
	834,83	0,00187 ± 1,80 %	0,00190 ± 1,77 %	1,77
	898,02	0,00174 ± 0,77 %	0,00180 ± 0,73 %	3,25
	1173,20	0,00135 ± 0,56 %	0,00137 ± 0,57 %	1,28
	1332,50	0,00121 ± 0,58 %	0,00122 ± 0,57 %	0,58
1836,00	0,00086 ± 0,91 %	0,00088 ± 0,82 %	2,17	
oceľové piliny	59,54	0,00014 ± 2,68 %	0,00016 ± 0,88 %	16,40
	88,03	0,00223 ± 2,57 %	0,00237 ± 2,31 %	6,18
	122,06	0,00542 ± 1,13 %	0,00538 ± 1,02 %	-0,74
	165,85	0,00633 ± 0,95 %	0,00621 ± 0,94 %	-1,84
	279,19	0,00446 ± 3,06 %	0,00449 ± 3,55 %	0,76
	391,69	0,00322 ± 1,81 %	0,00322 ± 1,83 %	0,12
	513,99	0,00255 ± 1,40 %	0,00255 ± 1,50 %	-0,13
	661,65	0,00202 ± 0,82 %	0,00200 ± 0,92 %	-0,64
	834,83	0,00162 ± 1,76 %	0,00161 ± 1,77 %	-0,38
	898,02	0,00153 ± 0,69 %	0,00154 ± 0,73 %	0,65
	1173,20	0,00119 ± 0,53 %	0,00119 ± 0,57 %	-0,58
	1332,50	0,00107 ± 0,54 %	0,00107 ± 0,57 %	-0,08
1836,00	0,00079 ± 0,76 %	0,00079 ± 0,82 %	-0,07	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M3000 - Marinelliho geometria 3000ml, detektor č.1)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00367 ± 0,57 %	0,00366 ± 0,46 %	-0,47
	88,03	0,01351 ± 2,37 %	0,01331 ± 2,28 %	-1,48
	122,06	0,02085 ± 0,97 %	0,02079 ± 0,89 %	-0,29
	165,85	0,02205 ± 0,79 %	0,02218 ± 0,79 %	0,61
	279,19	0,01837 ± 2,56 %	0,01868 ± 2,94 %	1,69
	391,69	0,01564 ± 1,76 %	0,01559 ± 1,77 %	-0,35
	513,99	0,01377 ± 1,21 %	0,01363 ± 1,29 %	-1,00
	661,65	0,01178 ± 0,65 %	0,01180 ± 0,64 %	0,17
	834,83	0,01056 ± 1,73 %	0,01045 ± 1,73 %	-1,01
	898,02	0,00968 ± 0,59 %	0,00962 ± 0,60 %	-0,60
	1173,20	0,00809 ± 0,39 %	0,00816 ± 0,37 %	0,77
	1332,50	0,00761 ± 0,39 %	0,00761 ± 0,38 %	-0,07
	1836,00	0,00626 ± 0,61 %	0,00627 ± 0,63 %	0,26
drevené piliny	59,54	0,00753 ± 0,42 %	0,00784 ± 0,46 %	4,21
	88,03	0,02331 ± 2,19 %	0,02402 ± 2,28 %	3,06
	122,06	0,03435 ± 0,77 %	0,03470 ± 0,89 %	1,03
	165,85	0,03467 ± 0,62 %	0,03522 ± 0,79 %	1,58
	279,19	0,02676 ± 2,29 %	0,02773 ± 2,94 %	3,65
	391,69	0,02186 ± 1,74 %	0,02220 ± 1,77 %	1,53
	513,99	0,01858 ± 1,19 %	0,01878 ± 1,29 %	1,06
	661,65	0,01556 ± 0,64 %	0,01577 ± 0,64 %	1,31
	834,83	0,01352 ± 1,72 %	0,01360 ± 1,73 %	0,56
	898,02	0,01241 ± 0,57 %	0,01241 ± 0,60 %	0,03
	1173,20	0,01016 ± 0,37 %	0,01022 ± 0,37 %	0,65
	1332,50	0,00933 ± 0,37 %	0,00941 ± 0,38 %	0,89
	1836,00	0,00757 ± 0,59 %	0,00753 ± 0,63 %	-0,63
oceľové piliny	59,54	0,00119 ± 0,88 %	0,00129 ± 0,46 %	8,71
	88,03	0,00852 ± 2,42 %	0,00863 ± 2,28 %	1,35
	122,06	0,01831 ± 0,93 %	0,01788 ± 0,89 %	-2,37
	165,85	0,02176 ± 0,78 %	0,02173 ± 0,79 %	-0,11
	279,19	0,01943 ± 2,68 %	0,01973 ± 2,94 %	1,58
	391,69	0,01649 ± 1,76 %	0,01659 ± 1,77 %	0,64
	513,99	0,01460 ± 1,24 %	0,01449 ± 1,29 %	-0,70
	661,65	0,01270 ± 0,64 %	0,01251 ± 0,64 %	-1,49
	834,83	0,01116 ± 1,72 %	0,01105 ± 1,73 %	-0,99
	898,02	0,01021 ± 0,59 %	0,01016 ± 0,60 %	-0,47
	1173,20	0,00859 ± 0,37 %	0,00857 ± 0,37 %	-0,26
	1332,50	0,00803 ± 0,35 %	0,00797 ± 0,38 %	-0,78
	1836,00	0,00650 ± 0,61 %	0,00652 ± 0,63 %	0,41

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M3000 - Marinelliho geometria 3000ml, detektor č.2)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00061 ± 1,04 %	0,00061 ± 0,62 %	0,23
	88,03	0,00489 ± 2,37 %	0,00483 ± 2,25 %	-1,30
	122,06	0,00874 ± 1,00 %	0,00869 ± 0,82 %	-0,61
	165,85	0,00981 ± 0,80 %	0,00965 ± 0,68 %	-1,66
	279,19	0,00770 ± 2,43 %	0,00766 ± 2,76 %	-0,48
	391,69	0,00576 ± 1,77 %	0,00571 ± 1,75 %	-0,82
	513,99	0,00470 ± 1,25 %	0,00466 ± 1,26 %	-0,85
	661,65	0,00378 ± 0,67 %	0,00379 ± 0,64 %	0,06
	834,83	0,00329 ± 1,74 %	0,00324 ± 1,72 %	-1,44
	898,02	0,00313 ± 0,61 %	0,00303 ± 0,59 %	-3,17
	1173,20	0,00250 ± 0,41 %	0,00246 ± 0,37 %	-1,52
	1332,50	0,00228 ± 0,42 %	0,00225 ± 0,37 %	-1,34
1836,00	0,00178 ± 0,65 %	0,00174 ± 0,62 %	-1,98	
drevené piliny	59,54	0,00125 ± 0,80 %	0,00130 ± 0,62 %	3,98
	88,03	0,00821 ± 2,28 %	0,00871 ± 2,25 %	6,15
	122,06	0,01431 ± 0,92 %	0,01451 ± 0,82 %	1,36
	165,85	0,01512 ± 0,77 %	0,01532 ± 0,68 %	1,30
	279,19	0,01102 ± 2,48 %	0,01137 ± 2,76 %	3,18
	391,69	0,00785 ± 1,79 %	0,00813 ± 1,75 %	3,65
	513,99	0,00624 ± 1,32 %	0,00641 ± 1,26 %	2,70
	661,65	0,00492 ± 0,71 %	0,00506 ± 0,64 %	2,84
	834,83	0,00419 ± 1,76 %	0,00422 ± 1,72 %	0,62
	898,02	0,00393 ± 0,67 %	0,00391 ± 0,59 %	-0,53
	1173,20	0,00306 ± 0,47 %	0,00308 ± 0,37 %	0,70
	1332,50	0,00275 ± 0,49 %	0,00278 ± 0,37 %	1,24
1836,00	0,00210 ± 0,74 %	0,00209 ± 0,62 %	-0,60	
oceľové piliny	59,54	0,00019 ± 2,34 %	0,00021 ± 0,62 %	13,69
	88,03	0,00297 ± 2,41 %	0,00313 ± 2,25 %	5,31
	122,06	0,00785 ± 0,91 %	0,00747 ± 0,82 %	-4,85
	165,85	0,00962 ± 0,74 %	0,00945 ± 0,68 %	-1,79
	279,19	0,00769 ± 2,68 %	0,00809 ± 2,76 %	5,24
	391,69	0,00610 ± 1,76 %	0,00608 ± 1,75 %	-0,32
	513,99	0,00506 ± 1,26 %	0,00495 ± 1,26 %	-2,15
	661,65	0,00396 ± 0,65 %	0,00401 ± 0,64 %	1,31
	834,83	0,00349 ± 1,73 %	0,00343 ± 1,72 %	-1,74
	898,02	0,00323 ± 0,60 %	0,00320 ± 0,59 %	-1,08
	1173,20	0,00263 ± 0,38 %	0,00259 ± 0,37 %	-1,59
	1332,50	0,00239 ± 0,39 %	0,00236 ± 0,37 %	-1,32
1836,00	0,00185 ± 0,63 %	0,00181 ± 0,62 %	-1,86	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M3000 - Marinelliho geometria 3000ml, detektor č.3)

Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00396 ± 0,38 %	0,00390 ± 0,35 %	-1,47
	88,03	0,00994 ± 2,17 %	0,00966 ± 2,15 %	-2,85
	122,06	0,01281 ± 0,79 %	0,01248 ± 0,75 %	-2,55
	165,85	0,01198 ± 0,64 %	0,01189 ± 0,64 %	-0,73
	279,19	0,00819 ± 2,30 %	0,00817 ± 2,71 %	-0,15
	391,69	0,00620 ± 1,75 %	0,00616 ± 1,75 %	-0,77
	513,99	0,00494 ± 1,20 %	0,00490 ± 1,26 %	-0,79
	661,65	0,00398 ± 0,65 %	0,00397 ± 0,64 %	-0,39
	834,83	0,00334 ± 1,73 %	0,00331 ± 1,73 %	-0,89
	898,02	0,00312 ± 0,58 %	0,00307 ± 0,60 %	-1,56
	1173,20	0,00249 ± 0,39 %	0,00245 ± 0,38 %	-1,56
	1332,50	0,00222 ± 0,40 %	0,00221 ± 0,38 %	-0,47
1836,00	0,00172 ± 0,62 %	0,00168 ± 0,64 %	-2,26	
drevené piliny	59,54	0,00787 ± 0,32 %	0,00836 ± 0,35 %	6,27
	88,03	0,01673 ± 2,12 %	0,01743 ± 2,15 %	4,19
	122,06	0,02049 ± 0,65 %	0,02083 ± 0,75 %	1,65
	165,85	0,01861 ± 0,48 %	0,01888 ± 0,64 %	1,49
	279,19	0,01220 ± 2,19 %	0,01214 ± 2,71 %	-0,53
	391,69	0,00844 ± 1,72 %	0,00877 ± 1,75 %	3,85
	513,99	0,00670 ± 1,15 %	0,00675 ± 1,26 %	0,68
	661,65	0,00510 ± 0,62 %	0,00530 ± 0,64 %	3,93
	834,83	0,00418 ± 1,71 %	0,00430 ± 1,73 %	2,87
	898,02	0,00392 ± 0,54 %	0,00396 ± 0,60 %	0,93
	1173,20	0,00303 ± 0,35 %	0,00307 ± 0,38 %	1,34
	1332,50	0,00272 ± 0,35 %	0,00274 ± 0,38 %	0,54
1836,00	0,00201 ± 0,52 %	0,00202 ± 0,64 %	0,54	
oceľové piliny	59,54	0,00125 ± 0,54 %	0,00138 ± 0,35 %	10,22
	88,03	0,00618 ± 2,20 %	0,00627 ± 2,15 %	1,42
	122,06	0,01119 ± 0,81 %	0,01073 ± 0,75 %	-4,08
	165,85	0,01186 ± 0,68 %	0,01165 ± 0,64 %	-1,70
	279,19	0,00863 ± 2,51 %	0,00863 ± 2,71 %	0,06
	391,69	0,00650 ± 1,76 %	0,00655 ± 1,75 %	0,78
	513,99	0,00530 ± 1,25 %	0,00521 ± 1,26 %	-1,65
	661,65	0,00424 ± 0,64 %	0,00421 ± 0,64 %	-0,68
	834,83	0,00354 ± 1,73 %	0,00350 ± 1,73 %	-1,28
	898,02	0,00325 ± 0,60 %	0,00324 ± 0,60 %	-0,46
	1173,20	0,00264 ± 0,38 %	0,00257 ± 0,38 %	-2,50
	1332,50	0,00236 ± 0,39 %	0,00232 ± 0,38 %	-1,82
1836,00	0,00177 ± 0,65 %	0,00175 ± 0,64 %	-1,47	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M3000 - Marinelliho geometria 3000ml, detektor č.4)

Vzorka	Energia [keV]	$\epsilon_{exp.}$	$\epsilon_{vyp.}$	δ_{ϵ} [%]
piesok	59,54	0,00197 ± 0,51 %	0,00193 ± 0,43 %	-1,81
	88,03	0,00794 ± 2,28 %	0,00795 ± 2,25 %	0,17
	122,06	0,01389 ± 0,82 %	0,01378 ± 0,77 %	-0,75
	165,85	0,01488 ± 0,64 %	0,01464 ± 0,64 %	-1,58
	279,19	0,01146 ± 2,27 %	0,01152 ± 2,65 %	0,52
	391,69	0,00947 ± 1,74 %	0,00936 ± 1,75 %	-1,23
	513,99	0,00801 ± 1,18 %	0,00790 ± 1,23 %	-1,41
	661,65	0,00671 ± 0,63 %	0,00670 ± 0,63 %	-0,18
	834,83	0,00588 ± 1,72 %	0,00582 ± 1,72 %	-1,08
	898,02	0,00548 ± 0,56 %	0,00544 ± 0,58 %	-0,83
	1173,20	0,00451 ± 0,37 %	0,00449 ± 0,36 %	-0,47
	1332,50	0,00414 ± 0,37 %	0,00412 ± 0,37 %	-0,60
1836,00	0,00334 ± 0,59 %	0,00328 ± 0,62 %	-1,87	
drevené piliny	59,54	0,00399 ± 0,47 %	0,00414 ± 0,43 %	3,84
	88,03	0,01452 ± 2,20 %	0,01435 ± 2,25 %	-1,15
	122,06	0,02264 ± 0,80 %	0,02301 ± 0,77 %	1,64
	165,85	0,02305 ± 0,65 %	0,02325 ± 0,64 %	0,86
	279,19	0,01660 ± 2,33 %	0,01711 ± 2,65 %	3,08
	391,69	0,01304 ± 1,76 %	0,01332 ± 1,75 %	2,15
	513,99	0,01073 ± 1,23 %	0,01088 ± 1,23 %	1,33
	661,65	0,00878 ± 0,65 %	0,00895 ± 0,63 %	1,98
	834,83	0,00743 ± 1,74 %	0,00757 ± 1,72 %	1,88
	898,02	0,00697 ± 0,61 %	0,00701 ± 0,58 %	0,65
	1173,20	0,00561 ± 0,41 %	0,00563 ± 0,36 %	0,33
	1332,50	0,00506 ± 0,41 %	0,00510 ± 0,37 %	0,64
1836,00	0,00395 ± 0,66 %	0,00393 ± 0,62 %	-0,40	
oceľové piliny	59,54	0,00063 ± 0,55 %	0,00068 ± 0,43 %	8,87
	88,03	0,00502 ± 2,18 %	0,00516 ± 2,25 %	2,73
	122,06	0,01217 ± 0,69 %	0,01185 ± 0,77 %	-2,61
	165,85	0,01456 ± 0,51 %	0,01435 ± 0,64 %	-1,43
	279,19	0,01221 ± 2,23 %	0,01217 ± 2,65 %	-0,32
	391,69	0,01010 ± 1,72 %	0,00996 ± 1,75 %	-1,37
	513,99	0,00850 ± 1,14 %	0,00840 ± 1,23 %	-1,26
	661,65	0,00717 ± 0,61 %	0,00710 ± 0,63 %	-0,88
	834,83	0,00622 ± 1,71 %	0,00615 ± 1,72 %	-1,09
	898,02	0,00578 ± 0,53 %	0,00574 ± 0,58 %	-0,71
	1173,20	0,00477 ± 0,32 %	0,00472 ± 0,36 %	-0,94
	1332,50	0,00438 ± 0,33 %	0,00432 ± 0,37 %	-1,58
1836,00	0,00348 ± 0,54 %	0,00341 ± 0,62 %	-2,01	

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1σ).

Experimentálne zmerané a vypočítané hodnoty účinnosti detekcie.
(geometria M3000 - Marinelliho geometria 3000ml, detektor č.5)

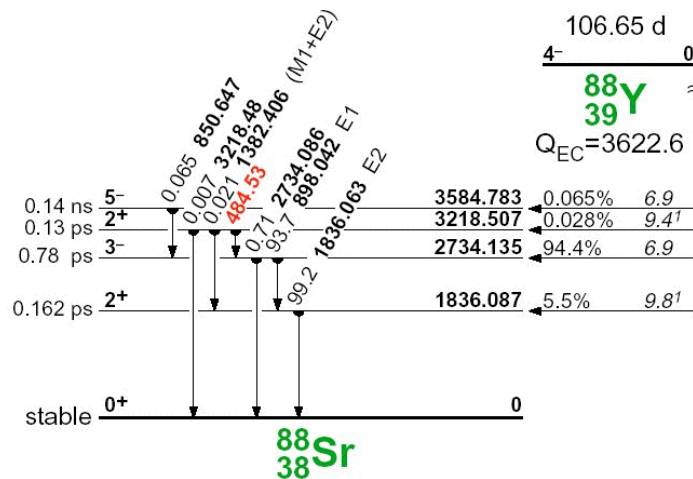
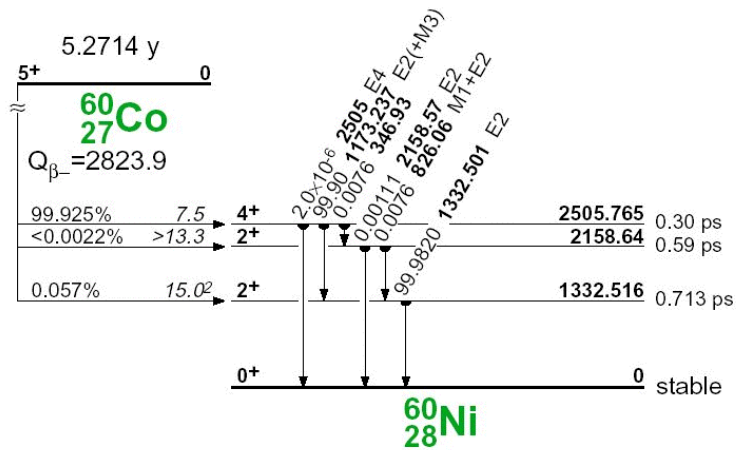
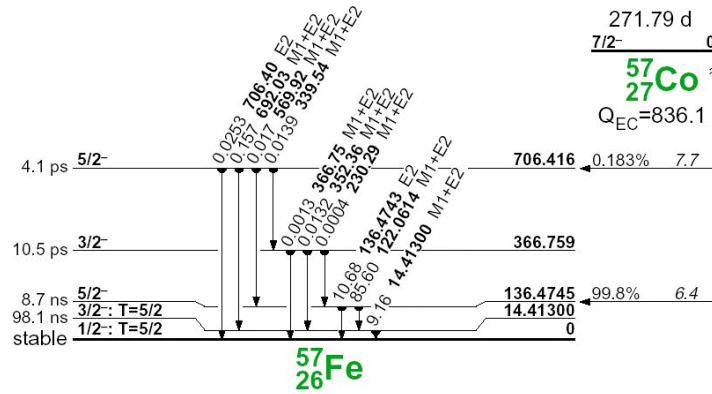
Vzorka	Energia [keV]	$\varepsilon_{exp.}$	$\varepsilon_{vyp.}$	δ_{ε} [%]
piesok	59,54	0,00033 ± 1,14 %	0,00032 ± 0,64 %	-1,32
	88,03	0,00280 ± 2,35 %	0,00275 ± 2,20 %	-1,56
	122,06	0,00528 ± 0,99 %	0,00522 ± 0,80 %	-1,23
	165,85	0,00558 ± 0,80 %	0,00553 ± 0,67 %	-0,93
	279,19	0,00390 ± 2,54 %	0,00391 ± 2,82 %	0,17
	391,69	0,00286 ± 1,78 %	0,00281 ± 1,75 %	-1,93
	513,99	0,00223 ± 1,28 %	0,00222 ± 1,27 %	-0,58
	661,65	0,00176 ± 0,74 %	0,00177 ± 0,69 %	0,14
	834,83	0,00145 ± 1,75 %	0,00144 ± 1,73 %	-0,90
	898,02	0,00137 ± 0,64 %	0,00135 ± 0,60 %	-1,96
	1173,20	0,00107 ± 0,49 %	0,00106 ± 0,40 %	-0,75
	1332,50	0,00096 ± 0,50 %	0,00095 ± 0,41 %	-1,26
	1836,00	0,00073 ± 0,71 %	0,00072 ± 0,64 %	-1,37
drevené piliny	59,54	0,00066 ± 0,81 %	0,00069 ± 0,64 %	4,14
	88,03	0,00475 ± 2,30 %	0,00497 ± 2,20 %	4,75
	122,06	0,00849 ± 0,88 %	0,00871 ± 0,80 %	2,62
	165,85	0,00870 ± 0,74 %	0,00878 ± 0,67 %	0,96
	279,19	0,00573 ± 2,49 %	0,00580 ± 2,82 %	1,23
	391,69	0,00388 ± 1,79 %	0,00400 ± 1,75 %	2,97
	513,99	0,00299 ± 1,32 %	0,00305 ± 1,27 %	2,04
	661,65	0,00233 ± 0,69 %	0,00236 ± 0,69 %	1,13
	834,83	0,00183 ± 1,77 %	0,00187 ± 1,73 %	2,19
	898,02	0,00172 ± 0,68 %	0,00174 ± 0,60 %	1,38
	1173,20	0,00132 ± 0,48 %	0,00133 ± 0,40 %	0,86
	1332,50	0,00117 ± 0,49 %	0,00117 ± 0,41 %	0,67
	1836,00	0,00086 ± 0,78 %	0,00087 ± 0,64 %	0,46
oceľové piliny	59,54	0,00011 ± 2,99 %	0,00011 ± 0,64 %	5,88
	88,03	0,00182 ± 2,59 %	0,00179 ± 2,20 %	-1,80
	122,06	0,00461 ± 1,13 %	0,00449 ± 0,80 %	-2,55
	165,85	0,00558 ± 0,94 %	0,00542 ± 0,67 %	-2,88
	279,19	0,00413 ± 3,04 %	0,00413 ± 2,82 %	-0,06
	391,69	0,00302 ± 1,82 %	0,00299 ± 1,75 %	-0,96
	513,99	0,00235 ± 1,42 %	0,00236 ± 1,27 %	0,13
	661,65	0,00191 ± 0,73 %	0,00187 ± 0,69 %	-1,78
	834,83	0,00154 ± 1,76 %	0,00152 ± 1,73 %	-0,93
	898,02	0,00145 ± 0,70 %	0,00142 ± 0,60 %	-2,14
	1173,20	0,00113 ± 0,49 %	0,00112 ± 0,40 %	-0,71
	1332,50	0,00101 ± 0,50 %	0,00099 ± 0,41 %	-1,28
	1836,00	0,00076 ± 0,78 %	0,00075 ± 0,64 %	-1,22

Pozn. Neistota detekčných účinností je určená s intervalom spoľahlivosti P=68,3% (1 σ).

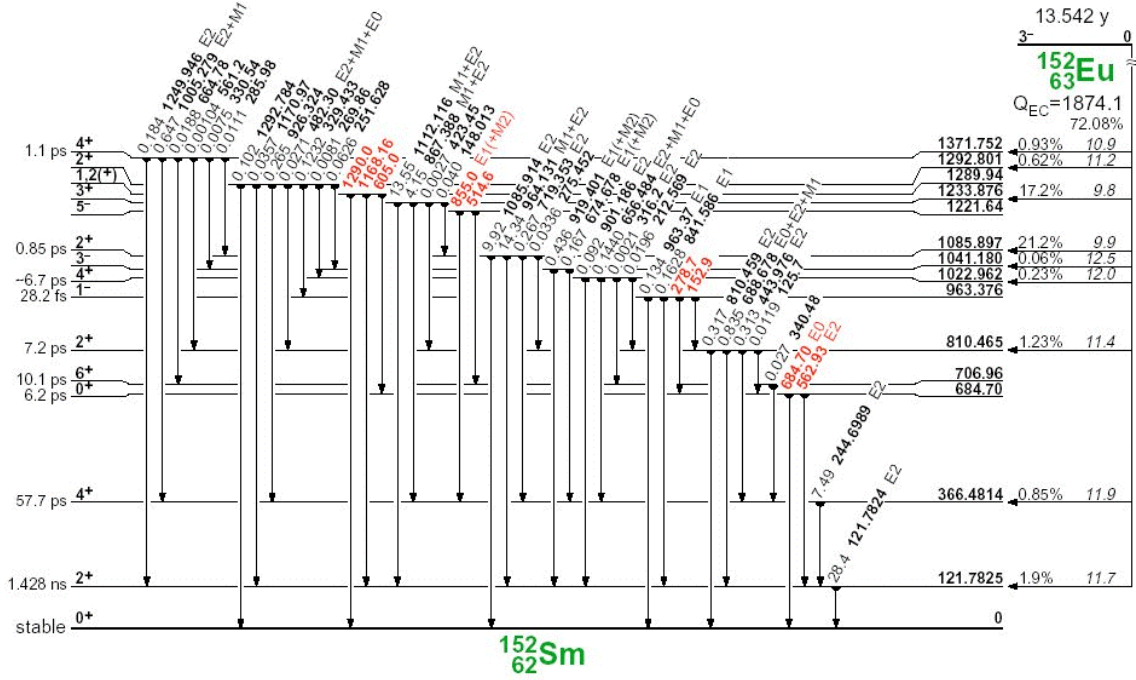
Príloha č.2. Spektrometrické laboratórium Oddelenia radiačnej ochrany Atómových elektrární Jaslovské Bohunice.



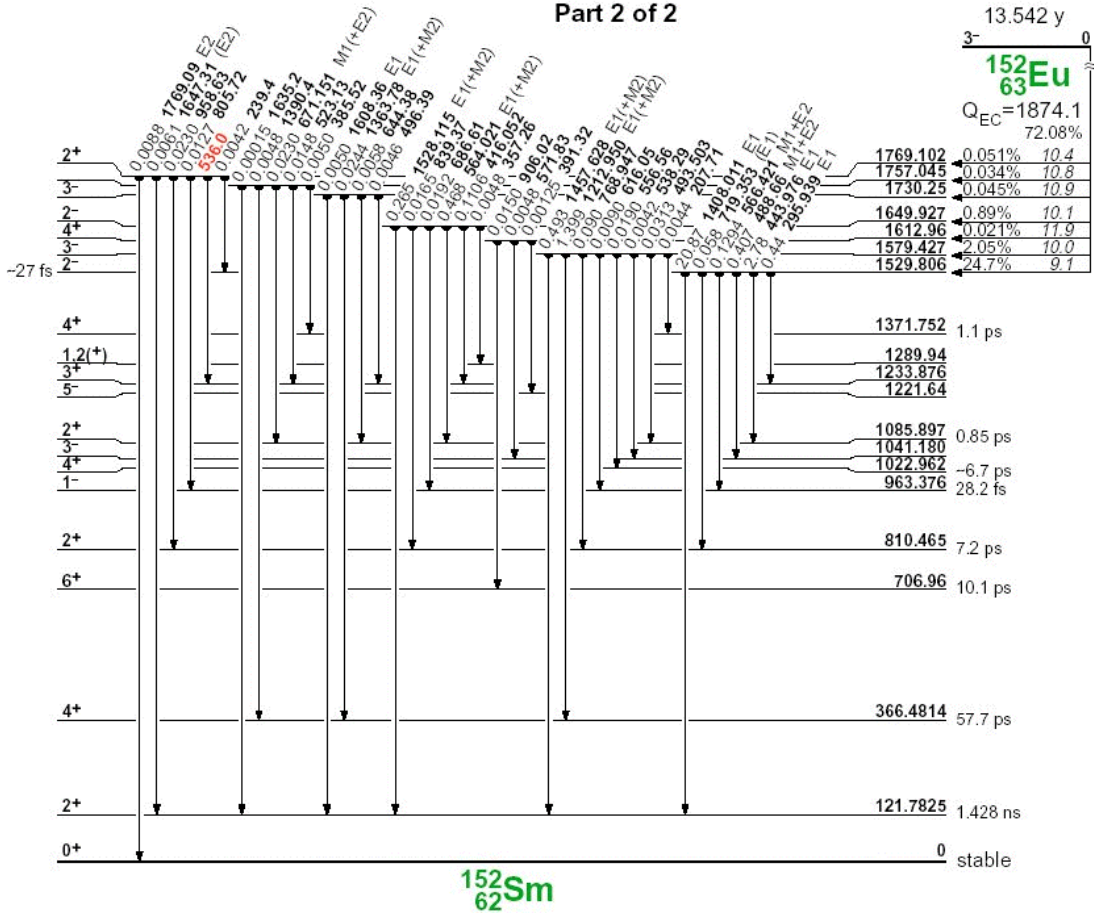
Príloha č.3. Rozpadové schémy použitých rádionuklidov.

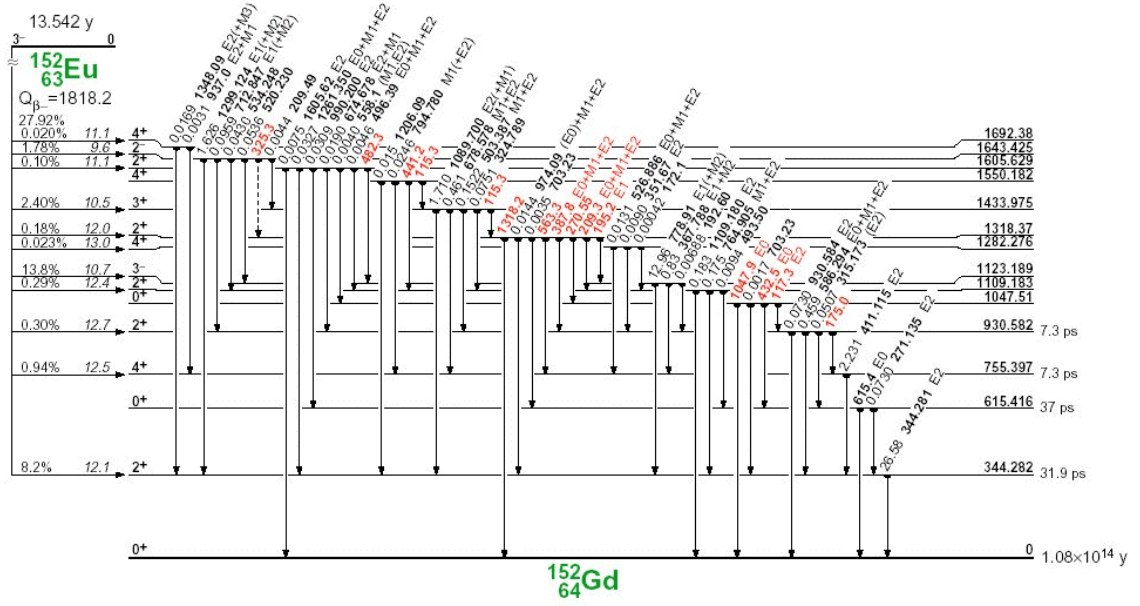


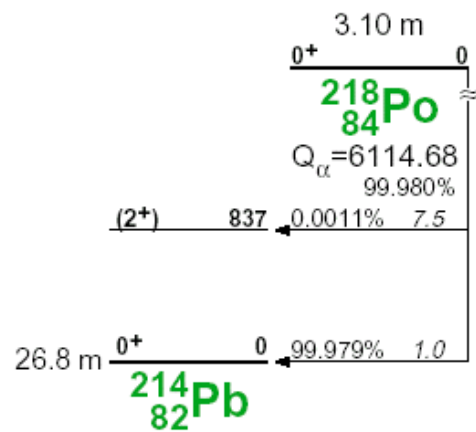
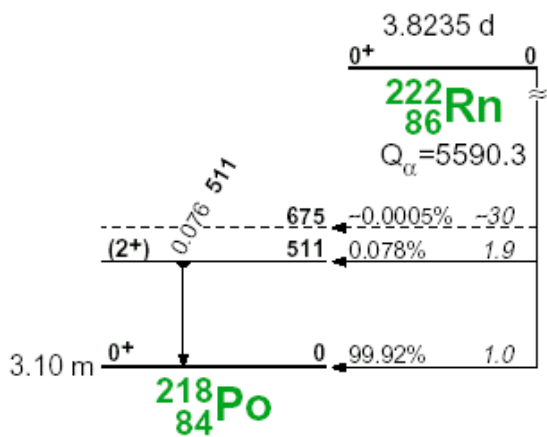
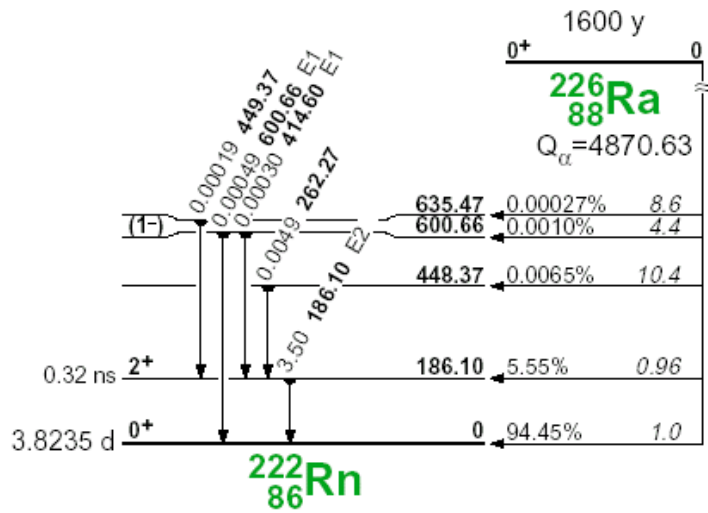
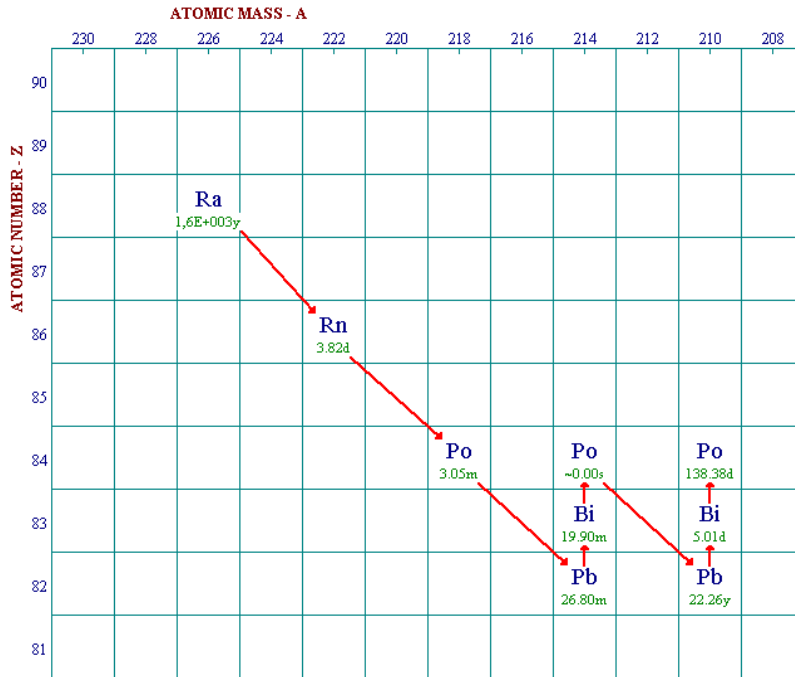
Part 1 of 2

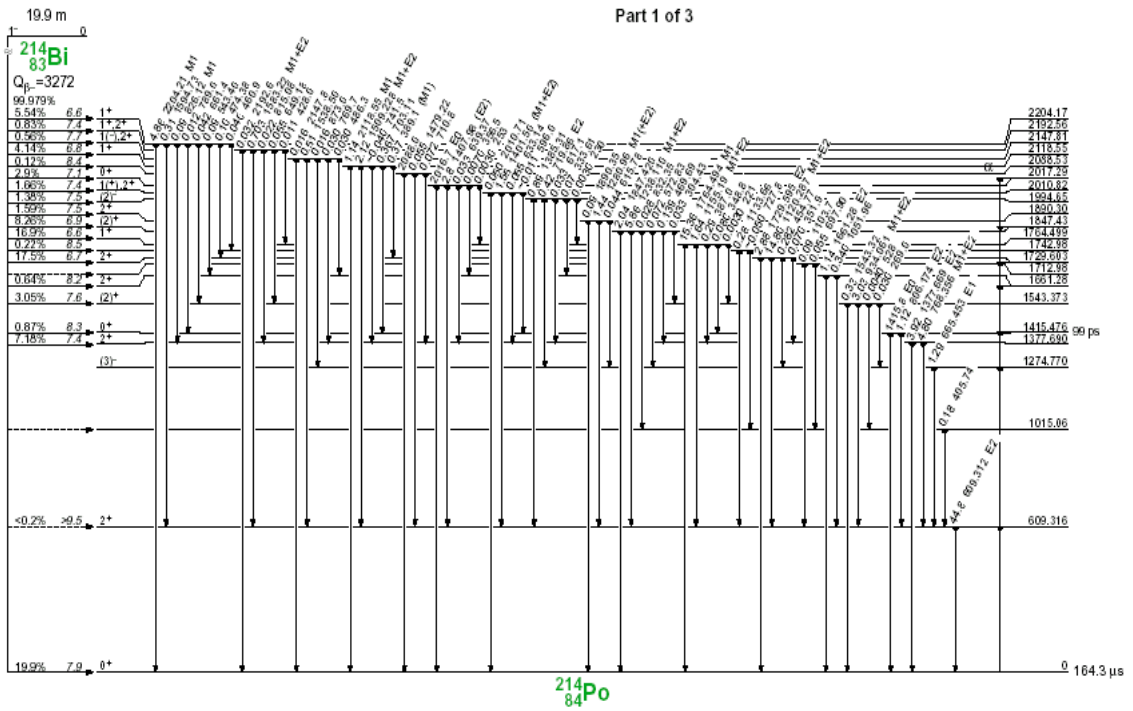
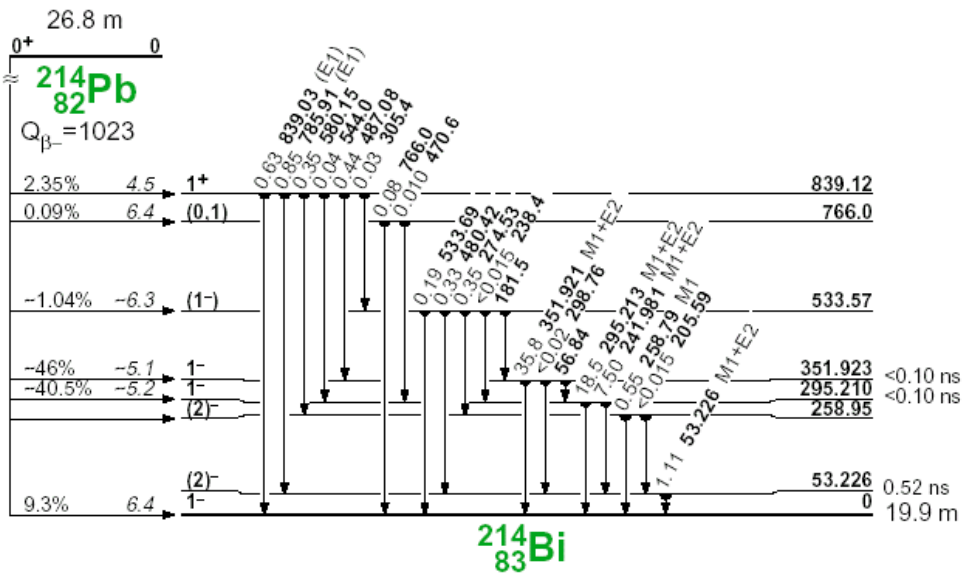


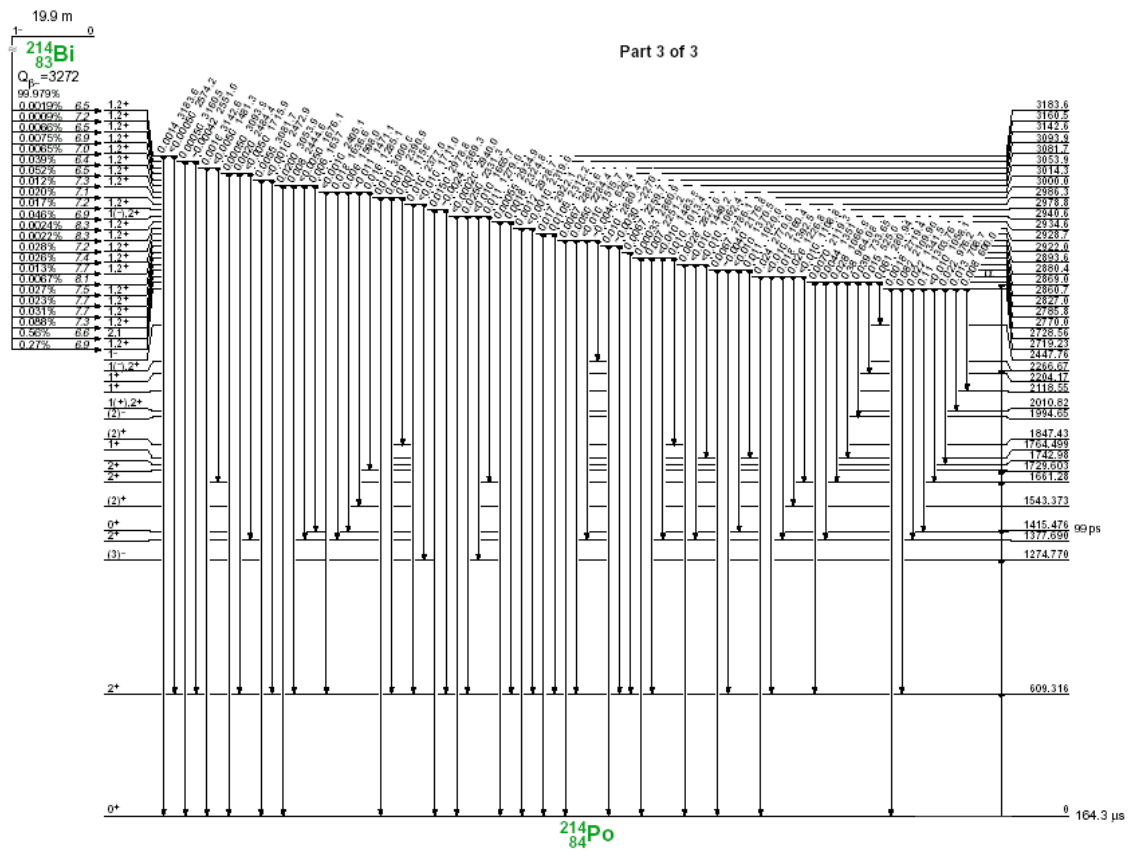
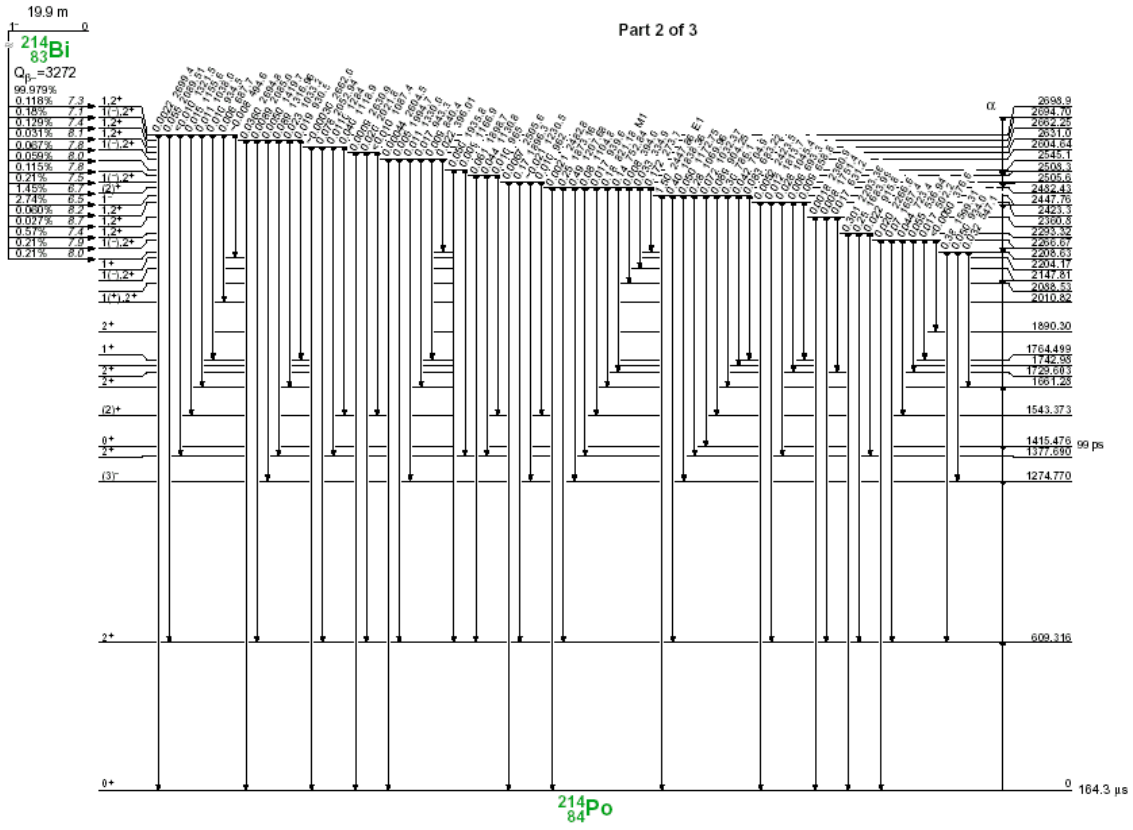
Part 2 of 2

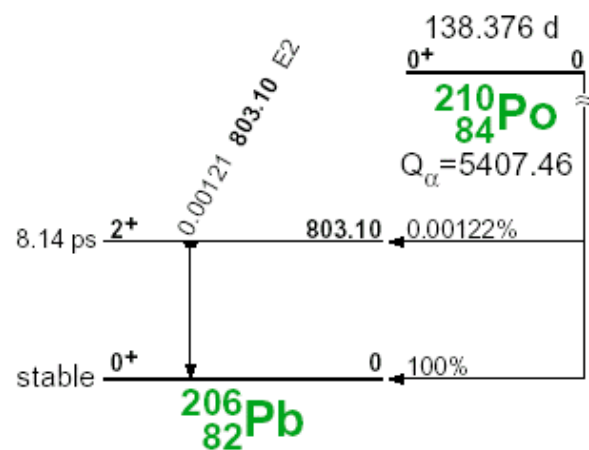
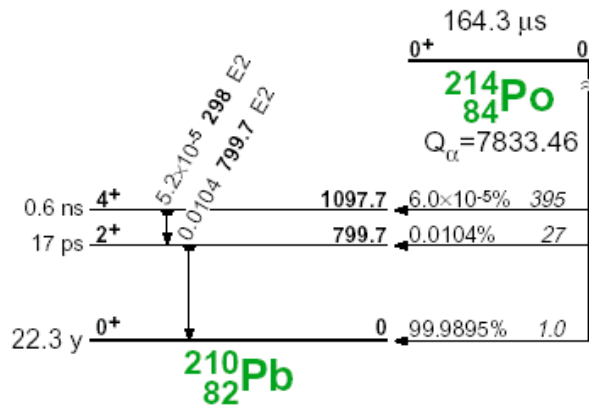












Príloha č.4. Referát - 25. Dni radiačnej ochrany, Jáchymov 2002

Application of Monte Carlo calculations to gamma-spectrometric measurements of large volume samples.

RNDr. Tibor Rapant, Nuclear Power Plant Jaslovské Bohunice

Introduction

The current conception of radiation control of discharges and environment of NPP is based on quantitative measurements of activity of individual radionuclides in several elements of radioactive discharges from NPP and in samples from the surrounding environment [1]. From this reason the semiconductor gamma-spectrometric methods are the basic ones in the determination of radionuclides activities.

The basic condition of the radioactive materials activities measuring with gamma-spectrometric methods is the known peak detection efficiency of used spectrometer. Its value depends on photons energy, spectrometric device, distance detector - source (geometry of measurement), form of source (geometry of sample) and on absorption of photons by insensitive materials between source and sensitive detector volume. It is possible to resolve some methods used to determine peak detection efficiency into three basic classes :

- a) experimental methods
- b) poloempirical methods
- c) computing simulation methods Monte Carlo.

Quickly developing Monte Carlo methods are based on computer simulation of interaction photons with surrounding materials. Exact knowledge of the composition and geometric parameters of experimental setup, beginning with internal parts of detector (dimensions of sensitive volume, thickness of dead layer etc.), is very important because of accuracy of calculations and precision of results. In the case of good knowledge of necessary parameters the precision of simulated values is abreast of 10% [2,3].

Experimental and Monte Carlo simulation Methods

Experimental measurements were accomplished on two liquid nitrogen cooled HPGe detectors with relative efficiency 65%-det.1 and 36%-det.2, which description and parameters are listed in Tab.1. Detectors were placed in the individual lead shielding with the wall thickness 7,5cm and a copper layer from the inside. Spectrometric setup consisted of computer controlled electronic modules made by Canberra Industries and the data were transmitted through the Ethernet network to PC with installed software Genie 2000.

Tab.1

PARAMETER	Detector No.1	Detector No.2
Detector type	GC6021	GC3520
Serial number	b 00148	b 00164
Kryostat	7500SL	7500SL
Preamplifier	2002CSL	2002CSL
FWHM/FWTM (1332,5 keV)	1,99/3,84 keV	1,82/3,39 keV
FWHM (122 keV)	0,957 keV	0,902 keV
Peak/Compton (1332,5 keV)	72,5:1	66,1:1
Rel. efficiency (1332,5 keV)	65,4 %	36,0 %
Crystal volume	255 cm ³	147 cm ³

Computer code GEANT developed in CERN was used for computer simulations of detection efficiency of HPGe detectors. GEANT includes subroutines enabling to make the FORTRAN programs for simulation of various physical processes of interaction and transition of particles through the

mass medium [4]. Program GEANT enables :

- to construct a model of experimental setup as a composition of geometrical shapes with the given parameters and a visual control of created model
- to generate simulated particles by standard Monte Carlo generator
- to control transport of particles through the individual parts of setup and record all interactions
- to register and interactive visualize particle trajectories and absorbed energies.

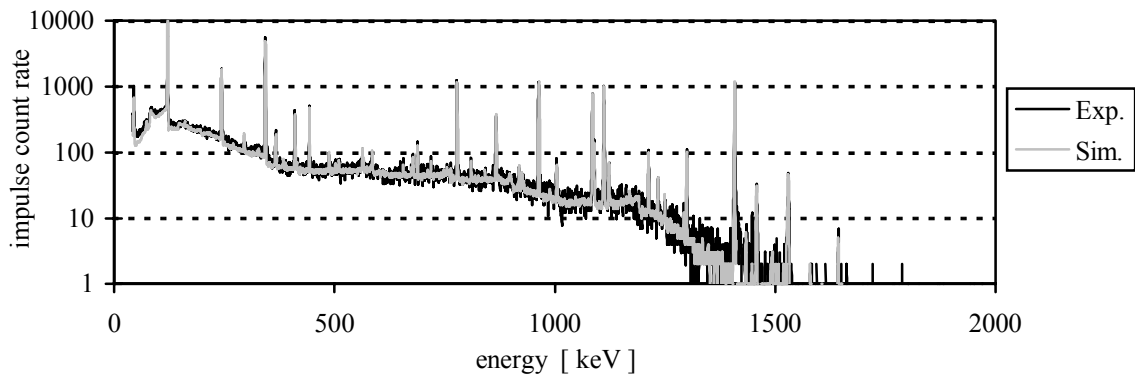
Some experimental spectra of etalons made by CMI or prepared in laboratory were measured with both of detectors. All experimental spectra were supplemented with computer-simulated spectra with photons energies emitted by radionuclides included in standards. The number of simulated desintegrations was ten times as large as the number of desintegrations in experimental measurement, after the simulations completing the simulation counting rate in each canal was divided by ten. Complete photon cascades of given radionuclides for the cascade gamma-emitters were simulated in each step according to literature [5].

Before including of impulse into the simulated spectrum was allowed effect of imperfect charge collection in sensitive detector volume and other electronic pulse processing fluctuations of experimental setup, which results to Gauss normal distribution of impulses in real spectrum. In the computer simulations this effect was solved in such a way, that the initial energy value E was substituted by the new value E', which was determined on the basis of Gauss distribution probability density assigned from real resolution values of both used semiconductor detectors.

Results

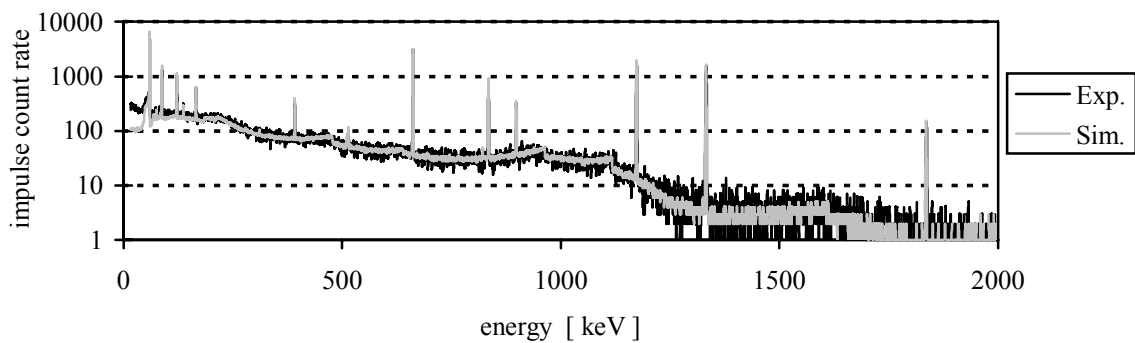
Comparison of selected experimental and simulated spectra is presented on Fig.2 and Fig.3, total absorption peak count rates of included radionuclides are listed under the figures.

Fig.2 Nuclide ^{152}Eu , silicone rubber in plastic tube vessel, Vol.=500ml, det.1.



Nuclide	Energy [keV]	Experimental data	Simulated data	Difference [%]
Eu-152	121,78	24099	24547	1,86
	244,70	4596	4967	8,07
	344,28	15325	15104	-1,44
	411,12	1064	1104	3,76
	443,98	1445	1337	-7,47
	778,90	4236	4106	-3,07
	867,39	1232	1227	-0,41
	964,13	4184	4435	6,00
	1085,91	2912	2807	-3,61
	1112,12	3577	3572	-0,14
1408,01	4919	5112	3,92	

Fig.3 Mixture of radionuclides, silicon sand, plastic Marinelli beaker, Vol.=1000ml, det.2.



Nuclide	Energy [keV]	Experimental data	Simulated data	Difference [%]
Am-241	59,54	9989	10357	3,68
Cd-109	88,03	2362	2499	5,80
Co-57	122,06	1695	1657	-2,24
Ce-139	165,85	932	895	-3,97
Sn-113	391,69	799	815	2,00
Cs-137	661,66	8449	8766	3,75
Mn-54	834,85	2510	2598	3,51
Y-88	898,04	940	1004	6,81
Co-60	1173,24	6358	6565	3,26
Co-60	1332,50	5831	5979	2,54
Y-88	1836,06	644	632	-1,86

Comparison and conclusion

The results of the comparison of the presented data :

1. In the area from 0 to 50 keV count rate in simulated spectra is less than in experimental ones. This fact is probably caused by the existence of significant X-ray lines with energy less than 50 keV in the decay scheme of included radionuclides, which were not added to simulations, and with expressive effect of also small inaccuracies in the thickness of individual materials between measured sample and sensitive detector volume.
2. From the comparison of total impulse count rate in spectra results that distinction between the experimental and simulated total count rate is less than 5% for all energies over 50 keV.
3. Total absorption photon peak count rate of included radionuclides mainly agrees in the interval of 5%, distinction of count rate is not over 10 % in any case, which is comparative with the precision of other used methods [6,7].

The comparison of achieved results indicates very good agreement of experimental and simulated spectra. Advantage of Monte Carlo method is the possibility of fast and accurate determination of self-absorption and coincidence summation correction factors. Computer simulation is at the present the most effective method of semiconductor detectors calibration for gamma-spectrometric measurements of large volume samples with various geometry and composition.

Acknowledgements

Author thanks Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc. and other collaborators from Department of Nuclear Physics FMFI UK Bratislava and from Bohunice NPP for useful advices and assistance in solution of individual problems.

References

- [1] Environment monitoring program of Bohunice NPP, Evaluation of radioactive discharges from Bohunice NPP, documentation of Bohunice NPP, J. Bohunice (2002)
- [2] Bronson F.L., Wang L., Waste Management'96, Tucson AZ USA (1996)
- [3] Sima O., Appl.Rad.Isot., V.47, No.9/10, 919-923 (1996)
- [4] GEANT User's Guide, CERN Program Library Office, CERN-CN, Switzerland (1993)
- [5] Firestone R.B., Frank Chu S.Y., Shirley V.S., Table of Isot. CD-ROM, 8th edition (1996)
- [6] Abbas M.I., Appl.Rad.Isot., V.54, 761-768 (2001)
- [7] Wang T.K. et al, Appl.Rad.Isot., V.48, No.1, 83-95 (1997)

Príloha č.5 Test MAAE – záverečný protokol.



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY ANALYTICAL QUALITY CONTROL SERVICES

AGENCY'S LABORATORIES, A 2444 SEIBERSDORF, AUSTRIA
TEL NO.: + 43 1 2600 28226; FAX NO.: + 43 1 2600 28222; E-MAIL: AQCS@IAEA.ORG
<http://www.iaea.org/programmes/aqcs/>

Seibersdorf, 16 June 2002

RNDr. Tibor Rapant
Department of Radiation Protection
Nuclear Power Plant Bohunice
SK-919 31 Jaslovské Bohunice
SLOVAK REPUBLIC

Summary Report of the Proficiency Test for the Determination of Anthropogenic γ -emitting Radionuclides in a Mineral Matrix (Name of Analyst: Tibor Rapant)

1. Comparison of your results against the IAEA values

(Reporting date: 6 March 2002)

Spiked matrix (Sample Code 179A)

Reference date: 1 January 2002

Analyte	IAEA Data		Reported Results		Relative bias [%]	z-Score	u-test score	Analyst/IAEA ratio	
	Value [Bq/kg d.w.]	Uncertainty*	Value [Bq/kg d.w.]	Uncertainty*				1 σ	2 σ
⁵⁴ Mn	36.5	0.92	38.99	1.99	6.9	0.56	1.15	1.07	0.06
⁵⁷ Co	33.9	0.87	34.88	1.76	2.8	0.22	0.48	1.03	0.06
⁶⁰ Co	145	3.6	146.19	5.47	1.1	0.13	0.24	1.01	0.05
⁶⁵ Zn	23.0	0.71	24.80	1.40	8.0	0.57	1.17	1.08	0.07
⁸⁸ Y	34.9	0.93	37.12	1.57	6.4	0.51	1.23	1.06	0.05
¹³⁴ Cs	76	1.9	81.60	3.08	7.9	0.77	1.65	1.08	0.05
¹³⁷ Cs	160	4.6	161.58	6.24	1.0	0.12	0.21	1.01	0.05
²⁴¹ Am	64	1.6	61.04	3.00	-4.7	-0.25	0.87	0.95	0.05

* Combined standard uncertainty expressed as the square root of the sum of variances of all known sources of uncertainty.

Reported dry/wet ratio: 100 %

Standard solution (Sample Code 179B)

Reference date: 1 January 2002

Analyte	IAEA Data		Reported Results		Relative bias [%]	z-Score	u-test score	Analyst/IAEA ratio	
	Value	Uncertainty* [Bq/g]	Value	Uncertainty* [Bq/g]				1σ	1σ
⁵⁴ Mn	18.2	0.10	19.01	0.70	4.6	0.57	1.17	1.05	0.04
⁵⁷ Co	5.84	0.038	6.50	0.28	11.4	0.96	2.35	1.11	0.05
⁶⁰ Co	24.9	0.10	26.03	0.95	4.6	0.65	1.21	1.05	0.04
⁶⁵ Zn	3.95	0.073	4.70	0.30	19.0	1.39	2.42	1.19	0.08
⁸⁸ Y	10.4	0.10	11.24	0.42	7.9	0.81	1.89	1.08	0.04
¹³⁴ Cs	13.01	0.066	13.35	0.49	2.6	0.29	0.69	1.03	0.04
¹³⁷ Cs	27.0	0.40	29.78	1.10	10.3	1.48	2.37	1.10	0.04
¹⁵² Eu	14.6	0.15	15.52	0.57	6.2	0.71	1.53	1.06	0.04
²⁴¹ Am	17.0	0.10	19.01	0.72	12.0	1.46	2.79	1.12	0.04

* Combined standard uncertainty expressed as the square root of the sum of variances of all known sources of uncertainty.

Explanation of the tables presented above:

The difference between the IAEA value and the reported value is expressed using three parameters:

A) The relative bias between the Analyst's value and the IAEA value expressed as a percentage:

$$\text{Relative bias} = \frac{\text{Value}_{\text{Analyst}} - \text{Value}_{\text{IAEA}}}{\text{Value}_{\text{IAEA}}} \times 100\%$$

B) The z-Score value calculated according to the following equation:

$$z_{\text{Score}} = \frac{\text{Value}_{\text{Analyst}} - \text{Value}_{\text{IAEA}}}{\sigma}$$

The target values for the standard deviation (σ) have been assigned on the basis of the reproducibility standard deviation (the standard deviation of the consensus mean after outlier rejection which expresses inter-laboratory precision) calculated for this exercise as follows:

Analyte	Sample 179A	Sample 179B
⁵⁴ Mn	12.4%	8.0%
⁵⁷ Co	12.7%	11.9%
⁶⁰ Co	8.6%	7.2%
⁶⁵ Zn	14.1%	13.6%
⁸⁸ Y	12.6%	9.7%
¹³⁴ Cs	10.2%	9.0%
¹³⁷ Cs	8.3%	7.0%
¹⁵² Eu	-	8.6%
²⁴¹ Am	18.9%	8.2%

C) The value of the u-test score calculated according to the following equation¹:

$$u_{test} = \frac{|Value_{IAEA} - Value_{Analyst}|}{\sqrt{Unc_{IAEA}^2 + Unc_{Analyst}^2}}$$

The calculated u-test value is compared with the critical values listed in the t-statistic tables to determine if the reported result differs significantly from the expected value at a given level of probability:

Condition	Probability	Status
$u < 1.64$	Greater than 0.1	The reported result does not differ significantly from the expected value
$1.95 > u > 1.64$	Between 0.1 and 0.05	The reported result probably does not differ significantly from the expected value
$2.58 > u > 1.95$	Between 0.05 and 0.01	It is not clear whether the reported result differs significantly from the expected value
$3.29 > u > 2.58$	Between 0.01 and 0.001	The reported result is probably significantly different from the expected value
$u > 3.29$	Less than 0.001	The reported result is significantly different from the expected value

It should be noted that the choice of the significance level is subjective. For this proficiency test we have set the limiting value for the u-test parameter to 2.58 to determine if a result passes the test ($u \leq 2.58$).

2. Acceptance criteria

Your results were evaluated against the following acceptance criteria for accuracy and precision and assigned the status “passed” or “rejected” accordingly. A result must pass both criteria to be assigned the final status of “passed”.

1. Accuracy: result passes if

$$|Value_{IAEA} - Value_{Analyst}| \leq 2.58 \times \sqrt{Unc_{IAEA}^2 + Unc_{Analyst}^2}$$

2. Precision (dependent on the activity level): the result passes if:

$$\sqrt{\left(\frac{Unc_{IAEA}}{Value_{IAEA}}\right)^2 + \left(\frac{Unc_{Analyst}}{Value_{Analyst}}\right)^2} \times 100\%$$

is less than, or equal to the reproducibility standard deviation as given in the table for z-Scores.

¹ Brookes, C.J., Betteley, I.G. and Loxton, S.M.; Fundamentals of Mathematics and Statistics, Wiley 1979

Spiked matrix (Sample Code 179A)

Sample Code	Accuracy criteria			Precision criteria		Final status
	$ Value_{IAEA} - Value_{Analyst} $	$2.58 \times \sqrt{Unc_{IAEA}^2 + Unc_{Analyst}^2}$	Status	[%]	Status	
⁵⁴ Mn	2.52	5.66	passed	5.70	passed	passed
⁵⁷ Co	0.95	5.06	passed	5.66	passed	passed
⁶⁰ Co	1.57	16.92	passed	4.50	passed	passed
⁶⁵ Zn	1.83	4.05	passed	6.43	passed	passed
⁸⁸ Y	2.24	4.71	passed	5.00	passed	passed
¹³⁴ Cs	5.97	9.35	passed	4.54	passed	passed
¹³⁷ Cs	1.63	20.03	passed	4.82	passed	passed
²⁴¹ Am	2.98	8.80	passed	5.53	passed	passed

Standard solution (Sample Code 179B)

Sample Code	Accuracy criteria			Precision criteria		Final status
	$ Value_{IAEA} - Value_{Analyst} $	$2.58 \times \sqrt{Unc_{IAEA}^2 + Unc_{Analyst}^2}$	Status	[%]	Status	
⁵⁴ Mn	0.83	1.82	passed	3.72	passed	passed
⁵⁷ Co	0.66	0.73	passed	4.36	passed	passed
⁶⁰ Co	1.15	2.46	passed	3.67	passed	passed
⁶⁵ Zn	0.75	0.80	passed	6.65	passed	passed
⁸⁸ Y	0.82	1.12	passed	3.87	passed	passed
¹³⁴ Cs	0.34	1.28	passed	3.71	passed	passed
¹³⁷ Cs	2.78	3.02	passed	3.99	passed	passed
¹⁵² Eu	0.90	1.52	passed	3.81	passed	passed
²⁴¹ Am	2.03	1.88	<i>failed</i>	3.83	passed	<i>rejected</i>

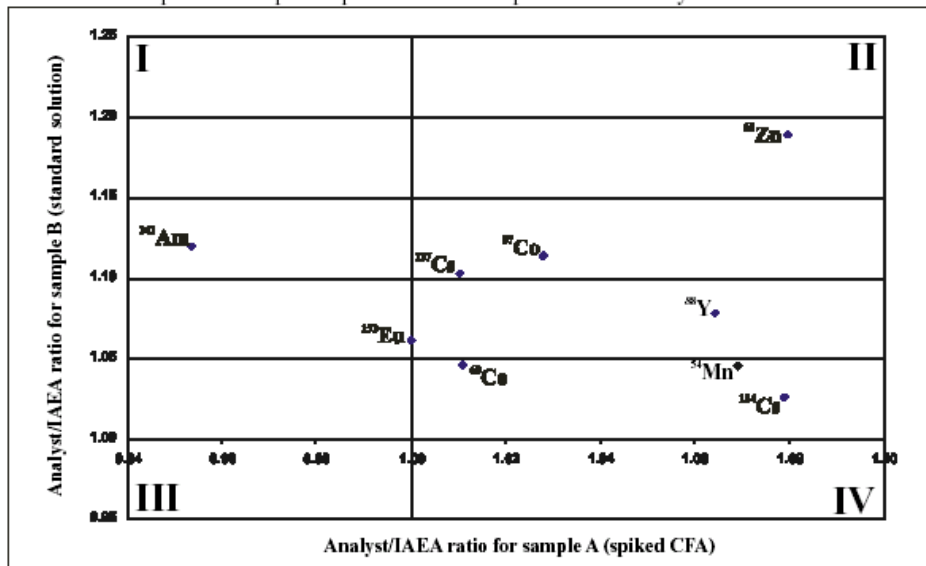
Comments:

Each analyst was requested to report his/her result together with the corresponding combined standard uncertainty expressed as the square root of the sum of variances of all known sources of uncertainty. It is the responsibility of the analyst to report an accurate and precise value and to provide a reliable estimate of the uncertainty. Therefore, for calculation of critical values for accuracy and precision, the evaluation procedure used by the IAEA involves the reported value and its corresponding combined standard uncertainty as well as the IAEA target value and its estimated combined standard uncertainty. However, this latter term is relatively small since certified radioactive standards were used for sample preparation. Therefore, in cases where an analyst reports an unrealistically small uncertainty, a “*Rejected*” final status could be assigned to the result. This is because the difference between the target and the reported values falls outside the range determined by the uncertainties assigned to the values (failed accuracy criterion). To determine the acceptance range for a result to pass the accuracy criterion for this proficiency test, we have set the two-tailed value for Student's t distribution to the 0.01 significance level. There could be a number of cases where the result that passes the z-Score criterion is rejected due to the accuracy criterion. This is due to the fact that the z-Score does not include any uncertainty associated with the analyst's value but rather the target standard deviation derived from the inter-laboratory precision (expressed as a reproducibility standard deviation) which in this case is relatively large (see Table on Page 2). The second criterion (precision) defines the maximum acceptable uncertainty which could be assigned to the reported value and was set as the reproducibility standard deviation (which expresses the inter-laboratory precision) for this exercise.

3. Summary

The results reported for the same analyte in both samples are presented as a Youden plot in Figure 1. This type of graph displays the scatter of results obtained by a laboratory and enables an analyst to determine if the major source of scatter of the data is due to random measurement errors or due to systematic errors (calibration, self-attenuation, summing etc.). Since Eu-152 was present only in the standard solution, its point is shown only on the Y axis. Other radionuclides will also lie on the X or Y axes in cases where an analyst has only detected (or reported) a single value for the radionuclide in question. Please note that all radionuclides except Eu-152 were present in both samples. If the scatter of the results is due entirely to random error, the points would be distributed equally in all four quadrants of the chart. If however, systematic errors are the dominant cause of the scatter, this would lead to a predominance of the points in the top right (II) and the lower left (III) quadrants of the chart. In the hypothetical absence of random errors, all the points would lie on a 45° diagonal on the chart for two samples of the same matrix. However, since in this case, the two samples represent two different matrices, the contribution from various systematic errors could be of different magnitude (e.g. self-attenuation in solution and mineral matrix or “true coincidence summing” for different counting geometries) which could yield points lying along a line of slope differing from 45° or points appearing in the top left (I) and lower right (IV) quadrants of the chart.

Figure 1 Youden plot of the participants' results expressed as Analyst/IAEA ratio



Figures 2 and 3 present the distribution of results expressed as the Analyst/IAEA ratio for the spiked coal fly ash sample (179A) and standard solution (179B) respectively. The error bars used in both figures represent the combined standard uncertainties for the Analyst/IAEA ratio values. Analytes are organized in ascending order according to the major energy lines that are commonly used for data interpretation and evaluation (from ²⁴¹Am – 59.54 keV to ⁸⁸Y – 1836.06 keV). The ¹⁵²Eu was present in the standard solution only. If the dominant source of scatter was random error, the points would be distributed equally above and below the line of Analyst/IAEA ratio (equal to 1.0). If however, systematic errors were the main cause of the scatter, this would lead to a shift of the points above or below the 1.0 target line (calibration error). If the analyst did not correct his/her results for coincidence summing for ⁶⁰Co, ⁸⁸Y, ¹³⁴Cs and ¹⁵²Eu or neglected to count for self-attenuation in the case of ²⁴¹Am, results would fall below the 1.0 target line.

Figure 2 Results for sample 179A expressed as Analyst/IAEA ratio

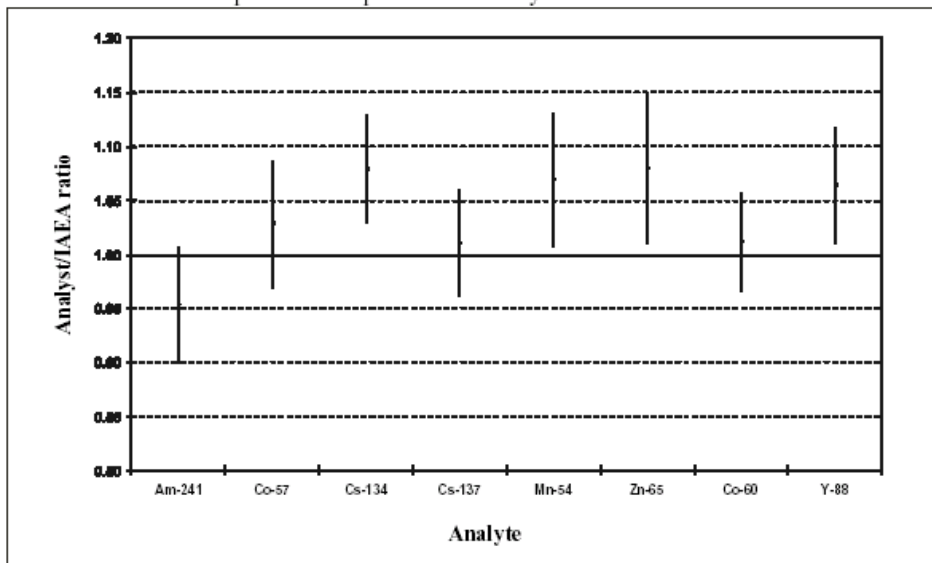
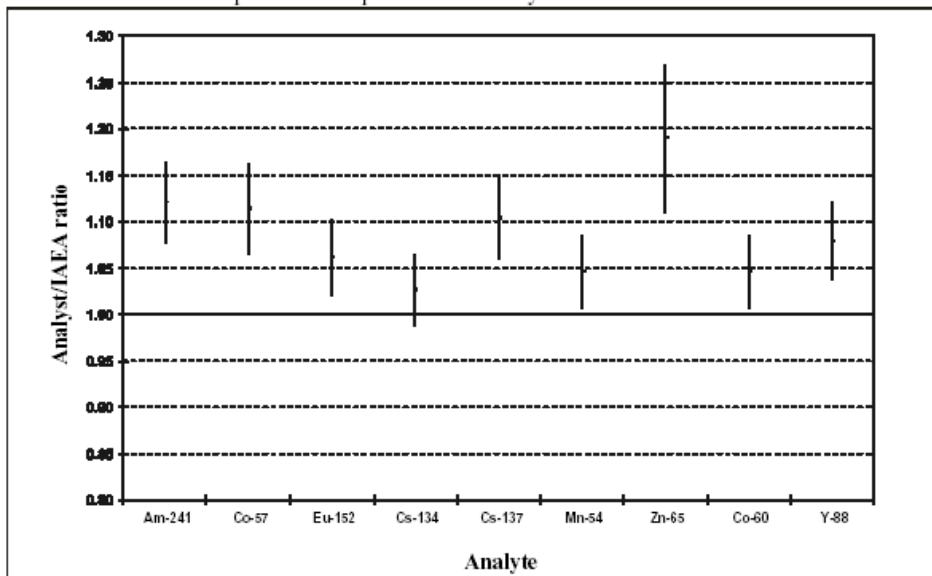


Figure 3 Results for sample 179B expressed as Analyst/IAEA ratio



Note: Eu-152 was present in sample 179B only.

4. Description of the materials used and participation requirements

Matrix origin:	Coal fly ash collected from Kufstein (Austria).
Matrix characterization:	A number of samples were pre-screened for man-made γ -emitting radionuclides prior to spiking. The results indicated that the material was free from anthropogenic γ -emitting radionuclides.
Sample preparation:	<p><i>A) Mineral matrix spiked with γ-emitting radionuclides</i></p> <p>The coal fly ash was dispensed in 100.0 ± 0.1 g aliquots into plastic containers and each was spiked with known amounts of a certified standard solution containing a mixture of gamma-emitting radionuclides (^{54}Mn, ^{57}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{88}Y, ^{134}Cs, ^{137}Cs and ^{241}Am). After spiking the samples were thoroughly shaken for approx. 30 min. Each 100 g sample was measured to ensure that the material could be considered homogeneous for the purpose of this exercise.</p> <p><i>B) Standard solution for γ-emitting radionuclides</i></p> <p>The ampoule contained 2.5 ml of a solution comprised of ^{54}Mn, ^{57}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{88}Y, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{152}Eu and ^{241}Am in 2 mol/L HCl and included 25 μg of relevant carriers. A suitable, weighed aliquot (or several aliquots) of the solution could be used for analysis.</p>
Analytes of interest:	Each participant was requested to analyse both samples for all γ -emitting radionuclides present in the following list of possible candidate γ -emitting anthropogenic radionuclides: ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{88}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{106}Ru , ^{109}Cd , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{113}Sn , ^{125}Sb , ^{133}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}La , ^{140}Ba , ^{144}Ce , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{203}Hg and ^{241}Am . Participants were informed that only some of the radionuclides listed were present in the samples. The activity levels of the radionuclides were such that they could be measured within a 24-hour measurement period using a conventional HPGe γ -spectrometer with a 20 % relative efficiency.
Choice of method/procedure:	Each participant could use any routine method of their choice, however the samples should not have been used to test a new procedure.
Reporting requirements:	<p>A) All results should have been decay corrected to the reference date 2002-01-01, 00:00 GMT.</p> <p>B) The deadline for submission of results was set to 1 March 2002.</p>