



JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

**Optimalizace měření HPGe detektorem s velmi nízkým pozadím pro
dosažení nízkých hodnot MDA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Bc. Kristýna Černá
VEDOUcí PRÁCE: Ing. Josef Tecl Ph.D.

2008



UNIVERSITY OF SOUTH BOHEMIA ČESKÉ BUDĚJOVICE
FACULTY OF HEALTH AND SOCIAL STUDIES

**Optimization of measurements by the HPGe detector with a very low
background for achievement of the low MDA values**

DIPLOMA THESIS

AUTHOR: Bc. Kristýna Černá
SUPERVISOR: Ing. Josef Tecl Ph.D.

2008

Summary

My thesis examines the measurement optimization when the semiconductor HPGe detectors with a low background and a high relative efficiency are used for achieving low values of MDA (minimum detectable activity). I conducted my research in the Department of Spectrometry of SÚRO (National Radiation Protection Institute) in Prague. In this laboratory the standard geometries of detectors with lower efficiency are used. The aim of this thesis is to offer a proposal of new geometry, sizes and shapes of measurement cells which will better correspond with the demand for higher efficiency of updated detectors.

The assignment was to find the best mathematical function to describe the correlation between efficiency and the direction of the radiation point source towards the detector. This function is derived from experimentally obtained data. To conduct measurements, three kinds of detectors with high relative efficiency used for activity measurements at different geometries were selected. As the source of gamma radiation, the point sources with energies of 46 keV, 661 keV, 1332 keV in different distances and positions were used. The function was applied separately to each of the three detectors and to the areas above the detector and sideways of the detector. The objective of the research was to project new measurement geometries or to optimize the current ones which could be used also in other detectors with high efficiency. After integrating the function in the cylindrical area above the detector and the annular area sideways of the detector, areas contributing substantially to the overall efficiency were determined. These areas may be considered to be the optimal sizes for new geometries in given positions.

After combining all the optimal areas above the detector, sideways of the detector and for selected energies and the detector, optimal sizes of a new geometry were found. The function can be used both in the front part and the side part of the detector but its validity is limited.

The value of MDA for the particular geometry is in indirect proportion to the efficiency square root and thus this new geometry should lead to minimum values of MDA.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Optimalizace měření HPGe detektorem s velmi nízkým pozadím pro dosažení nízkých hodnot MDA“ vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.

Prohlašuji, že v souladu s § 47 b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím s uveřejněním diplomové práce, a to v nezkrácené podobě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zdravotně sociální fakultou elektronickou cestou, ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích, 15.5.2008

.....

Poděkování:

Velmi ráda bych poděkovala těm, bez nichž by tato diplomová práce nemohla vzniknout. Patří k nim především můj konzultant a zároveň vedoucí diplomové práce pan Ing. Josef Tecl, Ph.D., pracující na oddělení spektrometrie SÚRO Praha, za jeho trpělivost, energii a čas.

Zvláštní poděkování vyslovuji svým rodičům.

OBSAH

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | ÚVOD | 1 |
| 2. | SOUČASNÝ STAV | 2 |
| 2.1. | Definice pojmů | 3 |
| 2.2. | Detektor HPGe. | 7 |
| 2.2.1. | Detekce záření | 9 |
| 2.2.2. | Interakce ionizujícího záření s látkou | 9 |
| 2.2.2.1. | Fotoelektrický jev | 10 |
| 2.2.2.2. | Comptonův efekt | 10 |
| 2.2.2.3. | Tvorba párů | 11 |
| 2.2.3. | Zdroj vysokého napětí | 12 |
| 2.2.4. | Předzesilovač | 12 |
| 2.2.5. | Zesilovač | 12 |
| 2.2.6. | Analýza podle výšky pulsů | 12 |
| 2.2.7. | Analogově digitální konvertor | 13 |
| 2.2.8. | Mnohakanálové analyzátory | 13 |
| 2.3. | Spektrum | 13 |
| 2.3.1. | Zpracování spekter | 14 |
| 2.4. | Kalibrace a ověření funkce spektrometru | 15 |
| 2.4.1. | Energetická kalibrace | 15 |
| 2.4.2. | Účinnostní kalibrace | 16 |
| 2.5. | Geometrie vzorku | 19 |
| 2.5.1. | Geometrie používané SÚRO | 20 |
| 2.6. | Stínění | 21 |
| 2.7. | Germanium | 22 |
| 2.7.1. | Krystalová struktura Germania | 23 |
| 3. | CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY | 24 |
| 4. | POPIS METODIKY | 25 |
| 4.1. | Experimentální metodika | 25 |
| 4.1.1. | Získání experimentálních dat | 26 |
| 4.2. | Jednorozměrná regres experimentálních dat | 29 |
| 4.3. | Dvojdímenzionální regrese | 31 |
| 4.4. | Oblast F+G | 33 |
| 4.5. | Nalezení optimální oblasti kolem detektoru | 34 |
| 4.5.1. | Numerický výpočet integrálů | 35 |
| 4.5.2. | Vztažení na jednotku objemu | 35 |
| 4.5.3. | Numerická derivace | 37 |
| 4.5.4. | Odhad účinnosti | 38 |
| 4.5.5. | Odhad MDA | 38 |
| 5. | VÝSLEDKY | 40 |
| 5.1. | Výsledky měření experimentálních dat | 40 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.2. | Výsledky jednorozměrné regrese experimentálních dat... | 43 |
| 5.3. | Výsledky dvojdimenzionální regrese..... | 54 |
| 5.4. | Výsledky numerického výpočtu integrálů..... | 82 |
| 5.4.1. | Vztažení na jednotku objemu..... | 83 |
| 5.4.2. | Výsledky numerické derivace..... | 88 |
| 5.5. | Výsledky hledání optimální oblasti kolem detektoru..... | 91 |
| 6. | DISKUZE..... | 94 |
| 6.1. | Dosažení nízkých hodnot MDA..... | 94 |
| 6.2. | Porovnání..... | 94 |
| 6.2.1. | Porovnání s programem EFAUT..... | 94 |
| 6.2.2. | LABSOCS..... | 96 |
| 6.3. | Výhody a nevýhody volené metody..... | 97 |
| 6.3.1. | Experimentální data..... | 97 |
| 6.3.2. | Jednorozměrná regrese..... | 97 |
| 6.3.3. | Dvojdimenzionální regrese..... | 98 |
| 6.3.4. | Oblast F+G..... | 98 |
| 6.3.5. | Numerický výpočet integrálů..... | 99 |
| 6.3.6. | Návrhy nových geometrií..... | 99 |
| 6.3.7. | Samoabsorpce..... | 100 |
| 7. | ZÁVĚR..... | 103 |
| 8. | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 104 |
| 9. | KLÍČOVÁ SLOVA..... | 107 |
| 10. | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK..... | 108 |

1. ÚVOD

Polovodičová spektrometrie gama se stala praktickým nástrojem pro stanovení aktivity jednotlivých radionuklidů v různých vzorcích. Její použití se předpokládá v případě radiální nehody či havárie jaderně energetického zařízení spojené s únikem radioaktivních látek do životního prostředí, kdy bude třeba získat informaci o kontaminaci pomocí měření jednotlivých vzorků. Je však zároveň citlivou metodou, která může být s výhodou použita pro rutinní monitorování obsahu radionuklidů v životním prostředí za normální situace.

Dnes jsou používány převážně polovodičové detektory z čistého germania (HPGe – high purity germanium), které mají oproti dříve používaným Ge(Li) detektorům řadu výhod nejen z hlediska spektrometrických vlastností (vyšší účinnost, lepší energetické rozlišení), ale i z hlediska provozních vlastností (není je třeba chladit mimo provoz).

Tato diplomová práce se zabývá tématem optimalizace měření velkoobjemovým HPGe detektorem s velmi nízkým pozadím pro dosažení nízkých hodnot MDA a byla zpracovávána pod záštitou SÚRO Praha v laboratoři spektrometrie.

Základním cílem této práce bylo dosažení co nejnižších hodnot minimálních detekovatelných aktivit a zlepšení využití nových HPGe detektorů o velkém aktivním objemu.

2. SOUČASNÝ STAV

Spektrometrie gama se používá ke kvalitativnímu stanovení umělých a přírodních radionuklidů a jejich kvantitativnímu stanovení na základě detekce fotonů gama. Tento způsob měření aktivity je vhodný pro účely ochrany před ionizujícím zářením. Mnoho radionuklidů má alespoň jednu dobře stanovitelnou energii záření gama, podle které lze určit daný izotop. Výhodou spektrometrie je to, že není nutné provádět chemické zpracování nebo jinou úpravu vzorků, pouze v případě kvantitativní analýzy je nutné dodržet určitou geometrii měření. [26]

V současné době se v laboratoři SÚRO Praha k měření aktivity radionuklidů v různých vzorcích používají geometrie, které byly vyvinuty podle nároků na množství vzorku, umístění vzhledem k detektoru a především, aby byly dosaženy co nejnižší hodnoty minimálních detekovatelných aktivit (MDA). Nejčastěji jsou využívány pro vzorky geometrie nádob: Marinelliho nádoba o objemu 450 až 600 ml, válcová nádoba o průměru 6,5 cm, výšce 9 cm, výšce vzorku 6,3 cm a objemu 200 ml (masťovka) a Petriho miska o průměru 52 mm a objemu 5 ml, dále speciální geometrie např. pro filtry, bombičky pro měření vzácných plynů nebo bodové zdroje.

2.1. Definice pojmů

Aktivita

Aktivita charakterizuje počet přeměn určitého izotopu za časovou jednotku. Aktivita vzorku je rychlost, s níž se atomy určitého materiálu přeměňují. Je-li počet jader N vyskytujících se v daném okamžiku ve vzorku, pak aktivita je podíl středního počtu dN radioaktivních přeměn z daného energetického stavu v určitém množství radionuklidů za časový interval dt . [28]

Definice aktivity je následující:

$$A = \frac{dN}{dt} [\text{Bq}] \quad (1) \quad [28]$$

Jednotkou aktivity je počet přeměněných atomů za sekundu, tedy $[\text{s}^{-1}]$. Tato jednotka je v případě fyzikální veličiny aktivity označována jako Becquerel [Bq]. [28]

Jednou radioaktivní přeměnou, například v případě ^{137}Cs , se rozumí přeměna jednoho jádra tohoto izotopu na stabilní ^{137}Ba . Ve skutečnosti se přeměňuje ^{137}Cs na metastabilní $^{137\text{m}}\text{Ba}$ přeměnou beta, které se vyzářením kvanta energie mění na ^{137}Ba . Metastabilní ^{137}Ba má velmi krátký poločas, proto dojde asi za půl hodiny k rovnovážnému stavu mezi rozpadem z ^{137}Cs a $^{137\text{m}}\text{Ba}$, a proto můžeme tvrdit, že $^{137\text{m}}\text{Ba}$ se rozpadá s poločasem rozpadu ^{137}Cs vyzářením stejné aktivity. Z tohoto důvodu přiřazujeme aktivitu mateřskému nuklidu. Obdobným mechanismem dochází k emisi fotonů gama i u jiných radionuklidů. Pouze např. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ s poločasem rozpadu 6 hodin lze izolovat přímo jako metastabilní stav a vyjadřuje se tak aktivita tohoto stavu.

Becquerel

Becquerel je jednotkou SI pro aktivitu. Jeden bequerel [Bq] se rovná jedné přeměně za sekundu $[\text{s}^{-1}]$. Hmotnostní aktivita se měří v Bq/kg , objemová v Bq/m^3 nebo Bq/l , plošná v Bq/m^2 . [17]

Elektronvolt

Elektronvolt je jednotka energie. Tuto energii získá elektron při průchodu potenciálovým rozdílem 1 V. V soustavě SI 1 eV odpovídá $1,602 \cdot 10^{-19} \text{J}$ [17].

FWHM

FWHM (Full wide at half of maximum) je šířka píku v polovině jeho výšky, udávána je v jednotkách energie např. keV nebo v %. Vyjadřuje kvalitu rozlišení detektoru, u polovodičových detektorů je tato hodnota kolem 1,8 keV pro 1332 keV ^{60}Co , u NaI(Tl) detektorů kolem 7 %. [26]

Hlavními faktory, které ovlivňují rozlišení jsou vlastní detektor a elektronika systému. Proto pološířka v polovině maximální výšky píku je dána:

$$FWHM = \sqrt{R_{\text{det}}^2 + R_{\text{el}}^2} \quad (2) \quad [26]$$

kde R_{det} je rozlišení detektoru, R_{el} je rozlišení elektroniky.

HPGe (high purity germanium) detektor

Polovodičový detektor s krystalem z velmi čistého germania. [12]

LaBr detektor

Scintilační detektor s lanthan-bromidovým krystalem, který není nutné za provozu chladit a je schopen snášet velké rozdíly teplot bez vlivu na přesnost měření (-20 °C – +50 °C).

Zároveň má velmi dobré rozlišení, ve srovnání s NaI(Tl) (FWHM 7,5% pro 661 keV) je LaBr (FWHM 3,5% pro 661keV) výrazně přesnější. [14]

Monitorování

Měření a hodnocení ozáření radiačních pracovníků, obyvatel a znečištění pracoviště a jeho okolí ionizujícím zářením nebo radionuklidy.

MDA

MDA (minimum detectable aktivity) značí minimální detekovatelnou aktivitu pro hladinu statistické spolehlivosti 95%. [24]

NaI (Tl)

Scintilační detektor s krystalem NaI(Tl), který je založen na excitačním principu. Skládá se z vlastního scintilátoru připojeného k fotonásobiči. [26]

Vzhledem k tomuto detektoru (3x3“) se vyjadřuje relativní účinnost polovodičových detektorů (pro 1332 keV a bodový zdroj 25 cm nad čelem detektoru v jeho ose).

Nuklid

Nuklid je soubor atomů, které mají stejné hmotnostní (A) a protonové(Z) číslo pro všechny atomy, např. ^{137}Cs . [21]

Izomer

Izomery jsou jádra atomu, které mají stejné hmotnostní (A) i protonové (Z) číslo, ale s odlišným stavem jádra, např. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a ^{99}Tc . [21]

Izotop

Izotopy chemického prvku jsou atomy, jehož jádra mají stejný protonové číslo (Z), ale různé číslo hmotnostní (A), např. ^{14}C a ^{12}C jsou dva izotopy uhlíku. [21]

Poločas přeměny

Aktivita všech radioaktivních prvků klesá exponenciálně s časem. Obsahuje-li vzorek v čase N jader v čase t_0 , je počet dN přeměněných jader za dobu dt roven součinu počtu nepřeměněných jader N a přeměnové konstanty λ . [18]

$$\frac{dN}{dt} = -N\lambda \quad (3) \quad [18]$$

kde λ je přeměnová konstanta a má jinou hodnotu pro každý izotop. Integrací tohoto výrazu se dostane:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} [Bq] = A_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \quad (4) \quad [18]$$

kde e se rovná základu přirozeného logaritmu.

A poločas přeměny je dán:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (5) \quad [18].$$

Relativní účinnost

Relativní účinnost HPGe detektorů se standardně udává pro energii 1332 keV ^{60}Co , který je v geometrii bodového zářiče umístěn do osy detektoru ve vzdálenosti 25 cm od čela detektoru. [26]

Vlastní relativní účinnost R_{Eff} se vypočítá ze vzorce:

$$R_{\text{Eff}} = \frac{P \cdot 100}{t \cdot A \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}} [\%] \quad (6) \quad [26]$$

kde: P je čistá plocha píku (počet impulsů) ^{60}Co s energií 1332 keV,

t je čistý měřicí čas v sekundách,

A je aktivita ^{60}Co korigovaná k datu měření v Bq,

$1,2 \cdot 10^{-3}$ je převodní koeficient (účinnost referenčního scintilačního detektoru NaI(Tl) 3x3“ se kterým je polovodičový detektor srovnáván).

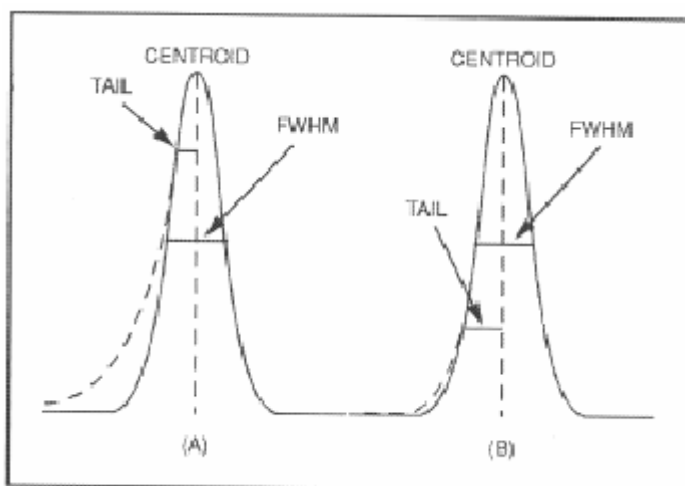
Radioaktivita

Samovolná přeměna atomových jader. [16]

Tailing

Tailing je jedna z charakteristik polovodičových detektorů. Projevuje se v nízkoenergetické části píku a to tak, že levá část píku má pozvolnější náběh, což je způsobeno nedokonalým sběrem náboje (čím účinnější detektor, tím větší tailing). [10]

Obr. 1: Tailing



2.2. Detektor HPGe

Pro gamaspektrometrická měření pomocí spektrometrie gama se v současné době používají polovodičové HPGe (zkratka High Purity Germanium – germanium o velmi vysoké čistotě) detektory, které v řadě případů nahradily používané scintilační detektory NaI(Tl). Výhodou germaniových detektorů je jejich rozlišovací schopnost, která je asi 30 krát lepší než u scintilačního detektoru NaI(Tl). Na druhé straně tato vynikající rozlišovací schopnost je kompenzována horší účinností detekce germaniových detektorů v porovnání s NaI(Tl) [26]. Rozdíl je také v ceně, HPGe detektory jsou finančně náročnější. V současnosti jsou komerčně dostupné scintilační detektory na bázi LaBr, jejichž relativní schopnost je výrazně lepší než NaI(Tl) a cena je ve srovnání s HPGe detektorem výrazně nižší. Germaniové detektory se vyrábějí jako planární geometrii (kruhový tvar o průměru 1-2 cm, citlivý objem 10-20 cm³), a dále koaxiální, kde lze dosáhnout objemu přes 400 cm³; jsou i ReGe detektory (Re-reversní) s opačnou orientací p a n vodivostních oblastí i další typy. [9]

Základní charakteristikou HPGe detektorů jsou: relativní účinnost, energetické rozlišení, což je pološířka píku úplné (totální) absorpce (FWHM), poměr peak/Compton.

Relativní účinnost detektoru je definována jako poměr účinnosti HPGe detektoru pro bodový zdroj s ⁶⁰Co a energii 1332 keV, umístěný ve vzdálenosti 25 cm nad čelem detektoru v jeho ose, k účinnosti referenčního NaI(Tl) scintilačního detektoru o rozměrech 3x3“.

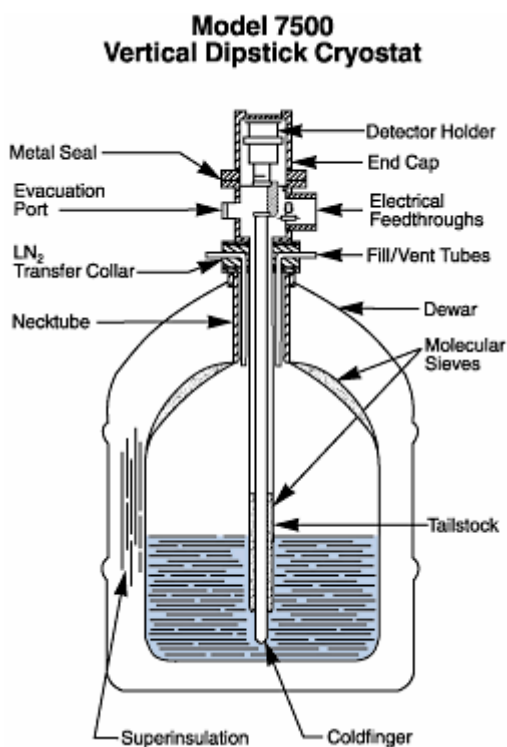
Energetické rozlišení se udává jako šířka píku totální absorpce v polovině jeho výšky (FWHM) obvykle (závisí na typu detektoru) pro energii fotonů 1332 keV (energie ⁶⁰Co). [26] Šířka každé čáry (píku) ve spektru není ve skutečnosti nulová (1 kanál), ale pík má při správném nastavení přibližně tvar Gaussovy křivky. Je to dáno tím, že odražený elektron (fotoefekt) s danou energií nevytvoří vždy stejný počet nosičů náboje (elektron – díra), navíc má zde vliv i šum elektroniky. [26] Tvar píku je důležitý pro počítačové zpracování spekter. Někdy se rovněž používá šířka v jedné desetíně maxim píku úplné absorpce (FWTM), která je definována jako poměr šířky v jedné desetíně maxima píku. Úhrnem je rozlišení funkcí fyzikálně – mechanických vlastností

detektoru a vlastností elektronických prvků systému, jako jsou šумы tranzistorů, odporů atd.

Poměr Peak/Compton vyjadřuje spektrometrické vlastnosti. Je definován jako poměr výšky píku 1332 keV ^{60}Co k průměrné výšce Comptonovského plata v intervalu energií 1040 – 1096 keV. [26]

V horní části detektoru pod čelem je upevněn krystal germania, který má obvykle průměr a výšku několik centimetrů. Pod detektorem bývá umístěn předzesilovač, který tvaruje pulzy a vytváří výstupní signál. Spodní část detektoru je tvořena Dewarovou nádobou s objemem kolem 30 litrů, která je naplněna kapalným dusíkem s teplotou – 196°C. Tzv. chladicí prst (obrázek číslo 2), který je ponořen v dusíku v Dewarově nádobě, je teplosměně spojen s vlastním krystalem a elektronikou v jeden kryostat (rozebíratelný nebo fixní).

Obr. 2: HPGe detektor



Detektor HPGe musí být vychlazen pouze při zapojení vysokého napětí. Chlazení detektoru přispívá ke zpomalení pohybu elektronů a především ke snížení jejich

fluktuace, čímž se značně snižuje šum. Germaniové detektory mají různé konstrukce a rozsahy detekované energie gama. [26]

Většina detektorů pracuje jako kondenzátor, ve kterém je uložen náboj vzniklý interakcí s materiálem krystalu. Připojením vysokého napětí se vytvoří elektrické pole, elektrony vzniklé interakcí s fotony jsou odebírány. Během odběru náboje se vytvoří slabý proud a dojde k poklesu napětí na rezistoru a tedy napěťovému pulsu.

Pro měření vzorků ze životního prostředí se používají koaxiální detektory, které spolehlivě měří vzorky vyzařující energii od cca 40 keV do 10 MeV. Prakticky stačí měřit v rozsahu 40 keV až 3 MeV, kde lze spolehlivě najít píky přírodních, ale i umělých izotopů, které se mohou dostat do životního prostředí z jaderně energetických zařízení, lékařských aplikací průmyslových činností a podobně.

2.2.1. Detekce záření

Nejpodstatnější částí spektrometrické trasy je vlastní detekční část – polovodičový krystal germania, na který je připojeno vysoké napětí obvykle v rozsahu 3000 až 5000 V. Při interakci záření gama v tomto germaniovém krystalu se uvolňuje elektrický náboj, který svým pohybem vytváří v krystalu napěťové nebo proudové pulsy, které se zesilují v předzesilovači a zesilovači o několik řádů a pomocí analogově-digitálního převodníku se převádí do digitální formy. Tyto impulsy jsou pak přivedeny na vstup multikanalového analyzátoru, který je čítá v jednotlivých kanálech. Tato data pak mohou být zobrazena jako spektrum na obrazovce počítače. [26]

2.2.2. Interakce ionizujícího záření s látkou

Při průchodu fotonů gama hmotou (a tedy i detektorem nebo stíněním) dochází k jedné ze tří základních interakcí: fotoefektu, Comptonově rozptylu nebo tvorbě párů. Tyto interakce závisí na energii dopadajícího záření a na materiálu, kterým toto záření prochází. Obecně lze říci, že pravděpodobnost těchto interakcí se mění s rostoucí energií záření a také závisí na protonovém čísle absorbující látky. Pravděpodobnost interakce fotoelektrickým jevem s rostoucí energií klesá a při asi 200 – 300 keV začíná

převažovat Comptonův rozptyl. Při energii 1000 keV je pravděpodobnost fotoefektu asi 100krát menší než pravděpodobnost Comptonova rozptylu. Pravděpodobnost tvorby páru je do energie 1,02 MeV nulová (prahová reakce). Při překročení této energie začíná narůstat pravděpodobnost tvorby párů, zatímco interakce Comptonovým efektem a fotoefektem se postupně zeslabuje.

Záření gama dopadající ze zdroje na olověné stínění je částečně pohlceno, částečně dochází k Comptonovu rozptylu a rozptýlené fotony mohou směřovat do germaniového krystalu a přispívat ke Comptonovu záření v naměřeném spektru

Spektra měřená gamaspektrometrickým systémem vznikají kombinací všech výše uvedených efektů.

Vlastní olověné stínění detektoru se v případě měření vzorků s velmi nízkou aktivitou používá k zeslabení okolního záření (např. kosmické, zemské nebo z dceřinných produktů radonu).

2.2.2.1. Fotoelektrický jev

Při fotoelektrickém jevu (fotoefekt) je celá energie fotonu předána jedinému elektronu na orbitalu nižší energetické hladiny, tzn. v blízkosti jádra atomu látky. Tento jev se též nazývá totální absorpce energie záření gama. Uvolněné místo po elektronu se okamžitě obsazuje elektrony z vyšších hladin s vyzářením charakteristického rentgenového záření nebo Augerova elektronu. Fotoelektrický efekt způsobuje čárové spektrum (pík). Pík 661,6 keV u izotopu ^{137}Cs (ve skutečnosti $^{137\text{m}}\text{Ba}$ – viz výše) je způsoben fotoefektem a proto se nazývá fotopík. Jak již bylo uvedeno dříve, s rostoucí energií fotonů klesá pravděpodobnost interakce fotoefektem, při energii fotonů do 200 keV převažuje interakce fotoelektrickým jevem, která se plynule zmenšuje a při energiích vyšších než 300 keV začíná převažovat interakce Comptonovým rozptylem (platí pro germanium). [18]

2.2.2.2. Comptonův efekt

V oblasti od 100 keV do 1,02 MeV převažuje interakce Comptonovým efektem. Projde-li foton s touto energií do detektoru a interaguje se slaběji vázaným nebo zcela

volným elektronem atomového obalu germania Comptonovým efektem, uvolní se elektron (respektive získá energii) a rozptýlený foton, jež ztratil interakcí část energie. Takto uvolněný foton se pohybuje polovodičovým detektorem, než dojde k další interakci a opět je vyražen elektron a vznikne další foton. Tento proces se může opakovat a vznikají postupně fotony se stále nižší energií, až nakonec může dojít k fotoefektu. [12]

Další možností je, že tyto fotony uniknou. Elektron je podstatě ihned vlivem vysokého napětí analyzován jako impuls. Protože dochází k celé posloupnosti těchto interakcí, je tak vytvořeno ve spektru tzv. Comptonovské kontinuum. To je spojitě, začíná od nuly a končí Comptonovou hranou. Tato hrana odpovídá prahové (maximální možné) energii Comptonova elektronu. Vzdálenost mezi fotopíkem a Comptonovou hranou je okolo 250 keV. Nesymetrické maximum na počátku Comptonova kontinua je pik zpětného rozptylu. Je způsoben registrací záření gama, které vzniká Comptonovým rozptylem pod velkými úhly (kolem 180°) na součástkách obklopující scintilátor (pouzdro, okénko fotonásobiče, těleso sondy). Jeho poloha odpovídá přibližně energii 250 keV. [29]

Spektrum vzniklých fotonů Comptonovým rozptylem vzhledem k různým energiím sekundárních fotonů není čárové, ale vzniká spojitě spektrum záření gama.

2.2.2.3. Tvorba párů

Při tomto jevu předá foton veškerou svou energii páru elektron pozitron a zanikne. Na základě zákona zachování energie vyplývá, že počáteční energie musí být alespoň 1,02 MeV, protože právě taková je klidová energie páru elektronu a pozitronu. Ze zákona zachování hybnosti vyplývá, že uvedený jev může nastat jen v poli atomového jádra nebo elektronu. Elektron i pozitron se po svém vzniku pohybují v germaniovém krystalu. Pozitron asi po 10^{-10} s anihiluje s elektronem z hmoty za vzniku dvou fotonů γ o energii 511 keV směřujících 180° proti sobě. Elektron vytvoří elektrický puls úměrný jeho energii. [19]

2.2.3. Zdroj vysokého napětí

HPGe detektory pracují obvykle s napětím od 3 do 5 kV. Vzhledem k malé velikosti měřených pulzů musí být toto vysoké napětí velice stabilní.

2.2.4. Předzesilovač

U většiny polovodičových detektorů se používají nábojově citlivé předzesilovače. U nábojově citlivého předzesilovače je výstupní napěťový puls úměrný vstupnímu náboji. Aby se maximalizovala jeho činnost, musí být předzesilovač umístěn co nejbližší detektoru (snížení kapacity vedení). [26]

2.2.5. Zesilovač

Zesilovač slouží v gamaspektrometrické trase ke tvarování pulsu a jeho zesílení (výstupní signál 0-10 V). Cílem spektroskopického zesilovače je též provedení filtrace signálu a získání optimálního poměru signál-šum a zesílení první derivací výstupního signálu předzesilovače. Některé spektroskopické zesilovače provádějí druhou derivaci, kdy se vytvoří bipolární pulz, který má výhodu, že obsahuje dvě téměř stejné části. Jednu v kladné části a druhou v záporné, takže celkové napětí je nulové. Když projde bipolární pulz určitým stupněm obvodu přes kondenzátor, mezi jednotlivými pulzy nezůstává na kondenzátoru náboj. U unipolárních pulzů se musí náboj odvést přes rezistenci a vynulovat. Šířka výstupního pulzu spektrometrického zesilovače je zhruba 7,3 krát časová konstanta. V praxi se k dosažení optimálního rozlišení u koaxiálních detektorů používá časová konstanta při gaussovském tvarování 2 μ s nebo 4 μ s. [26]

2.2.6. Analýza podle výšky pulzů

Analýza podle výšky pulzů může být prováděna jednoduchým diskriminátorem, který může být nastaven nad úroveň šumu. Jednokanálový analyzátor má spodní a horní diskriminační úroveň a vytváří logický výstupní puls, kdykoli výška vstupního pulsu ze

zesilovače padne do specifikovaného rozsahu. Ostatní pulsy mimo specifikovaný rozsah jsou eliminovány.

2.2.7. Analogově-digitální konvertor

Odpovídá-li napěťový puls určitému kanálu, analogově-digitální konvertor (ADC) převádí pulz na číselný údaj úměrný amplitudě dané události. ADC může být používán se zesilovačem a mnohokanálovým analyzátozem k vytvoření spektra radioaktivního vzorku. Existují dva typy Wilkinson ADC a FCT (Fixed conversation type) ADC. Liší se korekcí mrtvé doby, pro Wilkinson je to 5-80 μ s a pro FCT 0,8-6 μ s. [2]

2.2.8. Mnohokanálové analyzátory

Mnohokanálový analyzátor (MCA) lze považovat za řadu jednokanálových analyzátorů. Obvykle se používá 4096 (2^{12}) nebo 8192 kanálů. MCA nabírá pulsy a v celém napěťovém rozsahu.

V současné době se nejčastěji používají mnohokanálové analyzátory, které jsou instalovány jako deska do PC a činnost analyzátoru je ovládána prostřednictvím osobního počítače a softwaru dodaného s touto deskou. [26]

2.3. Spektrum

Spektrum čárové při radioaktivní přeměně vyzařují atomy s přesně definovanou energií, je to dáno kvantováním energetických hladin v atomech. Tyto energie ve spektru označované jako čáry nebo píky jsou charakteristické pro určitý izotop. Například izotop ^{137}Cs vyzařuje čáru 661,6 keV, ^{60}Co má dvě čáry 1173 keV a 1332 keV.

Spektrum spojitě je spojitě kontinuum ve spektru a je způsobeno Comptonovým efektem při interakci hmoty a záření gama.

Ze spektra záření gama lze vyčíst řadu informací o měřeném vzorku, především lze provést kvalitativní analýzu, tzn. stanovení jednotlivých izotopů ve vzorku. Rovněž

lze z velikosti, resp. plochy píků jednotlivých nuklidů stanovit množství nuklidů obsažených ve vzorku (vyjádřené jako aktivita v Bq/kvantita).

Energie fotonu absorbovaného v polovodičovém detektoru je převedena na elektrický impuls, jehož výška v mV je lineárně úměrná energii absorbovaného fotonu, tedy čím vyšší energie absorbovaného atomu, tím vyšší vzniká elektrický puls. Analogově-digitální konvertor převádí analogový puls s odpovídající výškou na digitální údaj a ten je přiřazen odpovídajícímu kanálu. Tedy pro pík ^{137}Cs jsou převáděny údaje do kanálu odpovídající maximu píku a vlivem šumů jsou obsazovány i kanály v okolí tohoto kanálu, takže pík má téměř gaussovský tvar. Šířka tohoto píku je ovlivněna rozlišením elektronického systému a detektoru. Plocha píku je přímo úměrná aktivitě daného izotopu.

2.3.1. Zpracování spekter

Fotony dopadlé na detektor mohou interagovat řadou procesů, z nichž se v oblasti energií desítky keV až jednotky MeV významněji uplatňuje fotoefekt, Comptonův rozptyl a tvorba párů. Vzhledem k tomu že fotony mohou interagovat v citlivém detektoru i vícekrát, dostaneme na výstupu poměrně složité spektrum.

Hlavním úkol při zpracování spektra je nalézt a identifikovat píky ve spektru a určit jejich plochy. Při zpracování komplexních spekter vzorků z životního prostředí je toto vyhodnocení dnes prakticky výlučně prováděno pomocí počítačů. Při udávání konečné přesnosti analytického výsledku nesmíme opomenout vzít v úvahu přesnost kalibrace spektrometrického systému a chybou spojenou s přípravou vzorků.

Gamaspektrometrický software, v našem případě GENIE 2000 firmy Canberra (dále G2k), provádí na základě výše uvedených pravidel kvalitativní a kvantitativní vyhodnocení (analýzu) naměřených spekter a na základě této analýzy generuje výstupní sestavu (report). Knihovny používané pro identifikaci nalezených píků ve spektru, stejně jako šablonu (template) pro vytváření reportů, si vytváří uživatel na základě specifických potřeb nebo je možno použít standardní (default) knihovny a šablony sestav předem nadefinované výrobcem a dodávané jako součást firemního software.

2.4. Kalibrace a ověření funkce spektrometru

Přesná energetická a účinnostní kalibrace spektrometrického systému je bezpodmínečnou nutností při náročném problému analýzy komplexních spekter radionuklidů.

Energetickou a účinnostní kalibraci spektrometru provádíme pomocí sady známých radionuklidů o známé aktivitě. Při účinnostní kalibraci je základní podmínkou shodný geometrický tvar a rozměry použitých etalonů s rozměry měřených vzorků. Přesnost účinnostní kalibrace běžných spektrometrů se pohybuje v oblasti jednotek procent. Přesnost a správnost celého analytického procesu, tj. měření spekter, jejich zpracování, provádění všech korekcí a konečné vyhodnocení aktivit, je nutno periodicky kontrolovat. Pro běžnou kontrolu postačí, když cca 10 % analyzovaných vzorků je vzorky kontrolními. Pro tento úkol se nejlépe osvědčuje používání certifikovaných referenčních materiálů, se známou měrnou aktivitou jednotlivých radionuklidů.

Přesnost též kontrolujeme prostým opakovaným měřením vybraných vzorků. Je nutné i kontrolování správnosti metodiky a vyhledávání případných systematických chyb.

2.4.1. Energetická kalibrace

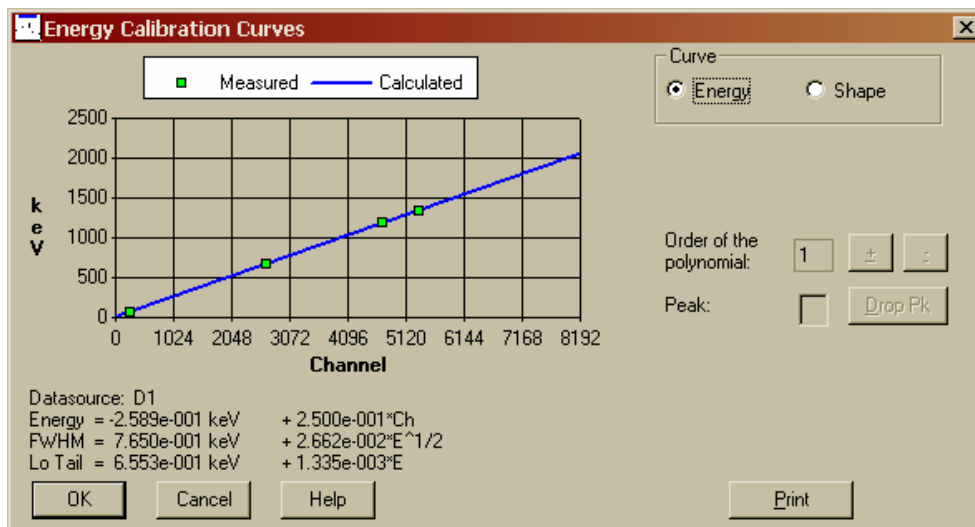
Aby bylo možné provést kvalitativní analýzu naměřených spekter, tzn. určit jednotlivé píky ve spektru a přiřadit je podle jejich energií příslušným nuklidům, je nutné provést energetickou kalibraci. Energetická kalibrace je v podstatě vyjádřením skoro lineární závislosti mezi energií dopadajících fotonů záření gama (v keV) a číslem přiřazeným kanálu analyzátoru. [31]

Lineární (přímková) závislost mezi energií fotonů a kanály analyzátoru se stanovuje jako lineární funkce (podle používaného softwaru je možná i kvadratická či kubická funkce) :

$$E = k * n + E_0 [keV] \quad (7) \quad [26]$$

kde: k je směrnice přímky,
n je číslo kanálu analyzátoru.

Obr. 3: Příklad energetické kalibrační křivky a rovnice (G2k)



Aplikace GENIE 2000 umožňuje následující způsoby zadávání hodnot pro energetickou kalibraci spekter:

- Zadání pomocí certifikačního souboru obsahujícího požadované energie
- Zadání pomocí seznamu nuklidů ze specifikované knihovny nuklidů obsahující jednotlivé nuklidy a jejich energie
- Zadání pomocí předem vytvořeného kalibračního souboru, který definuje seznam párů energie/kanál, který bude použit pro kalibraci
- Ruční zadání parametrů (tj. každé energie, příslušného čísla kanálu, jejich FWHM a hodnot pro tvorbu týlu na stranách nižší energie píků).

Příklad energetické kalibrační křivky a rovnice ukazuje obrázku č. 3.

2.4.2. Účinnostní kalibrace

Pokud chceme provádět kvantitativní analýzu naměřených spekter neboli stanovení množství izotopů obsažených ve vzorku, musíme provést účinnostní kalibraci.

Účinnostní kalibrace musí být provedena pro každou kombinaci detektor+geometrie, pro kterou bude prováděno měření vzorků. Aby mohla být provedena účinnostní kalibrace, musí již existovat energetická kalibrace (včetně FWHM+tailing) pro daný detektor. Účinnostní kalibrace v podstatě spočívá ve stanovení převodního faktoru, kterým se násobí počet detekovaných impulsů (tj. plocha

píku), čímž získáme množství izotopu ve vzorku vyjádřené veličinou aktivita. Vztah mezi plochou píku a aktivitou vzorku je následující:

$$A_0 = \frac{P}{\varepsilon_E \cdot t \cdot Y \cdot C} = K \times P [\text{Bq}] \quad (8) \quad [26]$$

kde:

- A aktivita vzorku v době kalibrace [Bq],
- P plocha píku (počet pulsů pro danou energii) [imp],
- ε_E účinnost detektoru pro energii E,
- t čistá doba měření (live time) [s],
- Y procentuální zastoupení píku pro danou energii,
- C korekční faktor pro přepočítání aktivity podle referenčního data,
- K kalibrační konstanta pro přepočítání čisté plochy píku na počáteční aktivitu izotopu vypočtenou z dané gama čáry k referenčnímu datu,

dále C se vypočte ze vztahu:

$$C = e^{-\ln 2 \times \frac{\tau}{T_{1/2}}} \quad (9) \quad [26]$$

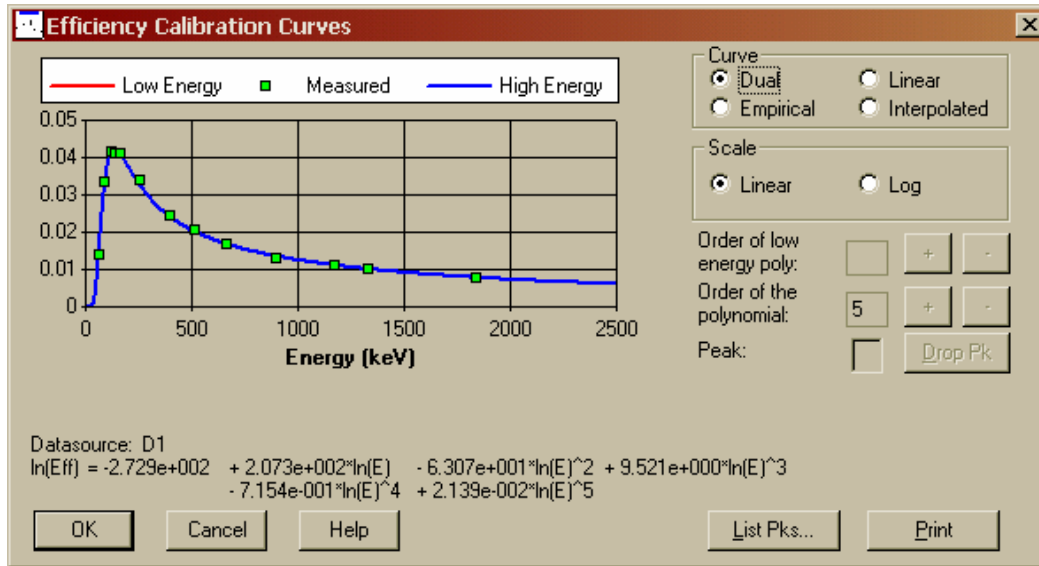
kde :

- τ doba mezi datem měření a referenčním datem [d, h, m, s]
- $T_{1/2}$ poločas rozpadu (přeměny) [d, h, m, s].

Kalibrační křivka je spojitá čára, na rozdíl od kalibračních konstant, které jsou diskrétními hodnotami pro jednotlivé píky. K provádění účinnostní kalibrace se používají etalony radionuklidů o známém složení a aktivitě. Většinou jsou používány metrologicky ověřené směsi nebo sada jednotlivých radionuklidů fixované v požadované nádobě a geometrii.

Příklad účinnostní kalibrační křivky a rovnice ukazuje obrázek č. 4.

Obr. 4: Příklad účinnostní kalibrační křivky a rovnice (G2k)



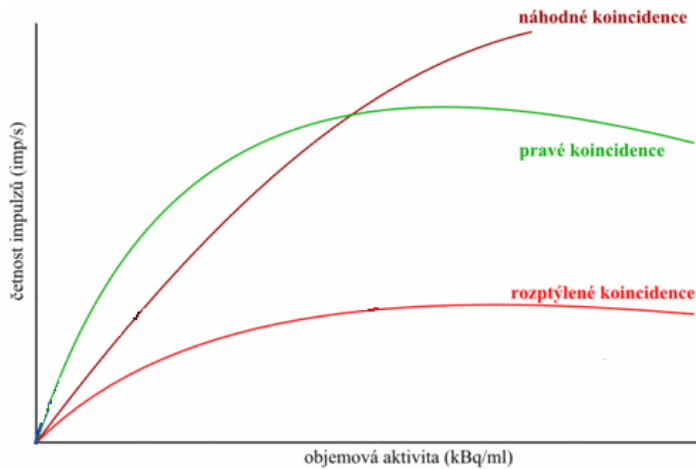
Takto stanovená účinnost je správná pouze pro monoenergetické zářiče. U nuklidů, které mají více píků, je nutné vzhledem k pravým koincencím (pravým sumacím píků) provést korekci stanovené účinnostní křivky. Korekce na sumace by měla být provedena i pro měřený vzorek, pokud stanovujeme nuklidy s více píky.

Dochází ke dvěma jevům. První efekt je zmenšení plochy píku totální absorpce příslušného fotonu s energií E_1 . K tomu dochází, když současně (tzn. v době kratší než může rozlišit spektrometrický systém) je s fotonem s energií E_1 emitován foton s energií E_2 a v detektoru bude deponována energie vyšší než E_1 , tj. kromě úplné energie fotonu E_1 je ještě detekována jakákoliv rozlišitelná část energie E_2 .

Druhý efekt má za následek zvětšení plochy píku totální absorpce a vzniká tehdy, jestliže vyzáření fotonu s energií E_1 může být ve složitém rozpadovém schématu nahrazeno vyzářením dvojice (trojice apod.) fotonů s celkovou energií rovnou E_1 . Potom při současné detekci dvou nebo více fotonů dochází ke zvětšení píku příslušného fotonu s energií E_1 . [26]

Rozlišují se 3 typy koincencí: pravé, rozptýlené a náhodné, avšak pouze pravé koincidence jsou žádoucí, protože je lze korigovat. Zatímco počet pravých a rozptýlených koincencí roste lineárně s aktivitou obsaženou v zorném poli přístroje, počet náhodných koincencí roste s druhou mocninou aktivity v zorném poli detektoru. Jelikož pouze detekce pravých koincencí vytváří obraz distribuce aktivity zářiče, registrace náhodných a rozptýlených koincencí představuje šum. [27]

Obr. 5: Závislost vzniku koincidencí na rostoucí aktivitě



2.5. Geometrie vzorku

Geometrické uspořádání a samoabsorpce hrají velmi důležitou roli při kvantitativní analýze vzorku. Pokud chceme stanovit množství jednotlivých izotopů v měřeném vzorku, musíme měření provádět ve stejném geometrickém uspořádání, ve kterém bylo prováděno měření kalibračního vzorku pro stanovení účinnostní křivky.

Geometrií se rozumí geometrické uspořádání vzorku obsahujícího radioaktivní prvky a jeho poloha vůči detektoru. Měření je optimální, pokud je co nejvíce fotonů ze vzorku detekováno detektorem. Ideální případ je geometrie 4π , kdy detektor obklopuje bodový vzorek a tedy všechny fotony vycházející ze zdroje jsou detektorem registrovány za předpokladu, že nejsou absorbovány mediem mezi vzorkem a povrchem detektoru. Detekční krystal má obvykle rozměr válce s průměrem a výškou několika centimetrů a vzorek je přikládán do blízkosti detektoru. Aby se co nejvíce zvýšila účinnost detekce při měření vzorků, je snaha vzorek rozložit kolem detektoru tak, aby co nejvíce obklopoval detektor. V praxi se nejvíce 4π geometrii blíží měření ve studnovém detektoru (ovšem za cenu velmi malého množství vzorku). [26]

Pro provádění kvantitativní analýzy se musí stanovit pro každou geometrii a pro každý detektor energetická a účinnostní křivka.

2.5.1 Geometrie používané SÚRO

Nejčastěji používanými těsnými geometriemi v SÚRO jsou Petriho miska, masťovka v poloze na a vedle detektoru a Marinelliho nádoba. Charakteristiky jsou uvedeny v tabulce číslo 1. [30] Objem vzorku geometrie masťovka se pohybuje od 200 do 1400 ml v závislosti na množství vzorku, jaké máme k dispozici.

Tab. 1: Charakteristiky nádob pro jednotlivé geometrie

| Popis | Objem vzorku | Průměr vzorku | Výška vzorku |
|--------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| | ml | cm | cm |
| Petriho miska na detektoru | 4 | 5,2 | 0,2 |
| masťovka 0,2 l na detektoru | 200 | 6,3 | 6,3 |
| masťovka 0,2 l kolem detektoru | 200-1400 | 6,3 | 6,3 |
| Marinelliho nádoba -0530G | 450 ,600 | 12 | 10 |
| Marinelliho nádoba -445N | 3000 | 20 | 18 |

Geometrie Petriho misky na detektoru

Při této geometrii se umísťuje miska na čelo detektoru. Obvykle se tato geometrie používá k měření různých odpadků.

Válcové nádoby (masťovky)

Používají se pro objemy vzorků 0,2 až 1,2 litru. Tzv. masťovka je tenkostěnná umělohmotná nádoba s průměrem 6,3 cm a výškou 8,6 cm, tedy s pracovním objemem až 260 ml (je možné masťovku plnit i na jiné objemy, pro které si zavedeme geometrii měření). Výhodou masťovky je, že ji lze umístit na detektor shora, pokud je menší množství vzorku a potom je ale účinnost zhruba stejná jako u Petriho misky, nebo je možné umístit až šest masťovek (na velké detektory až 7 masťovek) kolem detektoru s celkovým objemem až 1200 ml (1400ml). V tomto případě je součin účinností a množství detekce vyšší, protože nádoby obklopují detektor a je větší pravděpodobnost interakce fotonů s krystalem.

Marinelliho nádoby

Optimální geometrií pro laboratorní měření většího množství vzorku (450 ml až 600 ml provedení 0530G) jsou tzv. Marinelliho nádoby. Tato nádoba je vyrobena tak, že svým vnitřním tvarem je přizpůsobena detektoru a nasazuje se na něj. Vzorek obklopuje

detektor ze všech stran s výjimkou spodní části, kde je ke krystalu připojena elektronika včetně předzesilovače. Při této geometrii se obvykle dosahuje větší účinnosti měření.

Nevýhodou je, že toto provedení nelze nasadit na velké detektory kvůli příliš malému vnitřnímu otvoru.

2.6. Stínění

Při měření vzorku je třeba použít stínění, které snižuje pozadí způsobené kosmickým zářením a radionuklidy obsaženými v konstrukčních materiálech stěn laboratoře. Nejdůležitějším hlediskem při výběru vhodného materiálu pro konstrukci stínění je jeho vlastní obsah radionuklidů a až druhotným faktorem je co nejvyšší protonové číslo. Nejběžnější stínící materiál je olovo, dalším často užívaným stínícím materiálem železo. Železo vytavené v období po druhé světové válce vykazuje ovšem často zvýšenou aktivitu některých umělých radionuklidů, které se do železa dostávají náhodně z taveb kontaminovaných omylem roztavenými starými průmyslovými zářiči, z globálního spadu a také z pokusů s atomovými bombami v atmosféře v 50.-70. letech 20. století. Nejvyšší stínění jsou budována z ocelových plátů z pancéřů křižníků z první světové války – kvalitní kované oceli s nízkým obsahem strusky vyrobené dlouho před zahájením pokusných výbuchů jaderných zbraní v atmosféře a před havárií jaderné elektrárny v Černobylu.

Dalším zdrojem pozadového záření může být vzduch a v něm obsažené prachové částice. Snížení těchto složek je možno docílit

- dodržováním čistoty v měřicí místnosti,
- provozováním měřicí místnosti v režimu provozu se sníženou prašností,
- vzduchotěsným uzavřením vlastního stínění,
- trvalým proplachováním stíněného prostoru plynem neobsahující izotopy radonu.

V laboratoři spektrometrie gama SÚRO Praha jsou používány dva typy stínění: 10 cm Pb nebo 20 cm Fe, které snižují pozadí cca 100x.

2.7. Germanium

Jak bylo uvedeno výše, krystaly polovodičových detektorů jsou vyrobeny z vysoce čistého germania. Proto jsou zde uvedeny ve stručnosti jeho fyzikálně-chemické charakteristiky.

Germanium, jehož chemická značka je Ge (lat. germanium), bylo objeveno v roce 1886 německým chemikem Clemensem A. Winklerem. Jeho existence byla předpovězena tvůrcem periodické tabulky prvků, ruským chemikem Dmitrijem Ivanovičem Mendělejevem, který jej nazýval eka-silicium a poměrně přesně určil základní fyzikálně-chemické vlastnosti.

Germanium je v zemské kůře značně vzácným prvkem. Průměrný obsah činí pouze 5 - 7 ppm (mg/kg), v mořské vodě je to 0,07 $\mu\text{g/l}$. V horninách se vyskytuje pouze jako příměs a to v rudách zinku a stříbra, nebo ve stopovém množství v ložiscích uhlí. Z minerálů se velmi vzácně setkáme se směsným sulfidem stříbra a germania argyroditem o složení Ag_8GeS_6 [11]. Germanium vytváří sloučeniny v mocenství: -4, +2 a +4. V pevném skupenství se germanium chová jako polovodič, a to jak v krystalické tak v amorfní fázi. Naproti tomu v kapalném skupenství je germanium kovem. Hustota činí $5327 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Vyskytuje se v několika stabilních izotopech o hmotnostních číslech 70 (20,5%), 72 (27,4%), 73 (7,8%), 74 (36,5%) a 76 (7,8%). [5] [6]

Obr. 6: Germanium



Germanium se průmyslově získává ze zbytků po zpracování zinkových rud a z popele po spalování uhlí s jeho zvýšeným obsahem. Po vyredukování kovu s čistotou

přibližně 99 % se germanium o vysoké čistotě připravuje metodou zonálního tavení. Další metodou získávání vysoce čistého germania je frakční destilace těkavého chloridu germaničitého GeCl_4 .

Zájem o germanium nastal v 50. letech minulého století, kdy byly připraveny první tranzistory a další elektronické součástky na bázi vysoce čistého germania. Během dalších desetiletí bylo germanium nahrazeno křemíkem, jež se vyskytuje v přírodě v daleko větší míře, pouze bylo nutno vyvinout postupy pro jeho průmyslovou výrobu v čistotě minimálně 99,9999 %.

I v současné době se germanium používá v průmyslové výrobě polovodičů jako germanid křemíku (SiGe) pro výrobu integrovaných obvodů s vysokou rychlostí přenosu signálu. Je také součástí obvodů, které reagují na elektromagnetické vlnění v infračervené oblasti spektra. Důležité uplatnění má germanium při výrobě světlovodné optiky, protože jeho přítomnost v materiálu optických vláken podstatným způsobem zvyšuje index lomu materiálu. Tato vlastnost se uplatní i ve výrobě speciálních optických součástek jako jsou čočky pro kamery s širokým úhlem záběru nebo optika pro zpracování signálu v infračervené oblasti spektra (přístroje pro noční vidění). [11]

2.7.1 Krystalová struktura germania

Germanium má krystalovou strukturu typu diamantu. Jednotlivé atomy zde nemají přesně definovanou energetickou hladinu jednotlivých atomů, místo toho má celý krystal pás energií. Do tohoto stavu se může dostat dodáním energie, např. nárazem elektricky nabitě částice či fotonu. Elektrony získají dodatečnou energii a mohou opustit energetické hladiny a přejít do vodivostních pásů a mohou být v případě níže uvedeného zapojení germaniového krystalu k elektrodám registrovány jako proud procházející polovodičem.

Krystal v polovodičovém detektoru je zapojen jako dioda se strukturou typu P-I-N, ve které se vytvoří oblast vlastní vodivosti připojením opačné polarity. Z této oblasti se odvedou nosiče nábojů. Tato tzv. depleční (intristiální) vrstva neobsahuje žádné volné náboje a chová se takovým způsobem, že se náboje v depleční vrstvě dají těžko odebrat. Depleční vrstva může být použita jako detekční část pro nabitě částice nebo fotony. [26]

3. CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

Cílem teoretické části práce bylo komplexní shrnutí problematiky týkající se laboratorní spektrometrie.

Cílem samotné diplomové práce byla optimalizace těsných objemných geometrií měření na HPGe detektorech s vysokou relativní účinností, směřující k dosažení co nejnižších hodnot MDA. Optimalizované geometrie budou využity i na dalších HPGe detektorech, zejména na dvojici detektorů o relativní účinnosti 150%, k dosažení co nejnižších hodnot minimálních detekovatelných aktivit. Tato práce zahrnuje studii HPGe detektorů s velmi nízkým pozadím a vysokou relativní účinností, analýzu efektivnosti stávajících geometrií měření vzhledem k velikosti krystalu detektoru a návrh nových geometrií měření a zavedení vybraných nových geometrií v laboratoři spektrometrie gama SÚRO Praha. A na závěr porovnání nových geometrií měření z hlediska MDA se stávajícími geometriemi a potvrzení či vyvrácení hypotézy.

Hypotéza: Optimalizované geometrie přinesou zlepšení využití nových HPGe detektorů o velkém aktivním objemu.

Následující kapitola prokáže potvrzení stanovené hypotézy.

4. POPIS METODIKY

V současnosti se k měření objemných vzorků rutinně používá v laboratoři spektrometrie gama SÚRO Praha Marinelliho nádoba o objemu 400 - 600 ml a masťovky o objemu od 200 ml do 1400 ml (možné použití 1 až 7 masťovek), podle množství vzorku, které je k dispozici.

Dnes jsou používány detektory o stále větší účinnosti, se kterou roste i velikost krystalu. Z tohoto důvodu nelze využít pro detektory o vysoké relativní účinnosti stávající geometrii Marinelliho nádoby, neboť vnitřní průměr nádoby je menší než vnější průměr krytu těchto detektorů, takže nádobu nelze na detektor umístit. I z tohoto důvodu se nyní zavádí geometrie Marinelliho nádoba o objemu 3 l. Z hlediska masťovek lze konstatovat, že tato geometrie je použitelná i na nových účinných detektorech, ale vzhledem k tomu, že nádoby byly vyvinuty pro starší detektory, je zde otázka, zda optimálně využívají vlastnosti nových detektorů.

Cílem práce je optimalizace těsných objemných geometrií měření na zmíněných HPGe detektorech směřující k dosažení co nejnižších hodnot minimálních detekovatelných aktivit a zohledňující i rozměry vysoce účinných detektorů.

4.1. Experimentální metodika

Základním úkolem bylo najít funkci, která by popisovala účinnost v závislosti na poloze vzorku vzhledem k detektoru. Tato funkce vychází z naměřených hodnot.

K získání experimentálních dat byly používány bodové zářiče, které byly umístěny v definovaných bodech kolem detektoru.

Fyzikální skutečností je, že účinnost se se vzrůstající vzdáleností od detektoru se snižuje (Gaussova věta).

4.1.1. Získání experimentálních dat

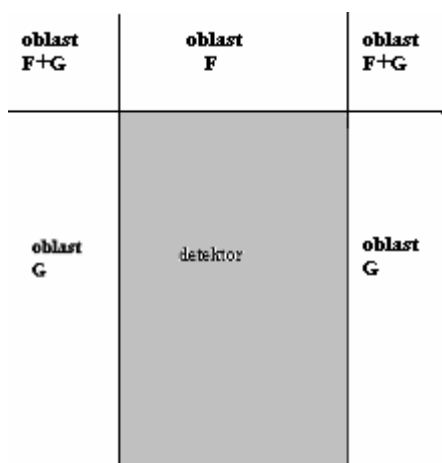
Pro získání experimentálních dat byly použity tři detektory s vysokou relativní účinností. Konkrétně detektory 23, 29, 30 (identifikační označení SÚRO, jež bude dále používáno v této práci), jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce číslo 2.

Tab. 2: Popisy detektorů

| číslo detektoru | popis detektoru | relativní účinnost | FWHM (keV) | průměr det. (mm) | výška det. (mm) | objem det. (cm ³) | stínění det. |
|-----------------|---|--------------------|------------|------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------|
| 23 | HPGe detektor EG&G Ortec | 110 | 2,1 | 81,7 | 107,5 | 563,3 | kobka CTP (200 mm) |
| 29 | HPGe detektor Canberra oknový (uhlíkové okno), extranízokopozad'ový kryostat, ²²⁶ Ra | 100,3 | 1,99 | 80 | 79 | 396,9 | Fe stínění (200 mm) |
| 30 | HPGe detektor Canberra | 150 | 2,3 | 90 | 90 | 572,3 | Pb stínění (100mm) |

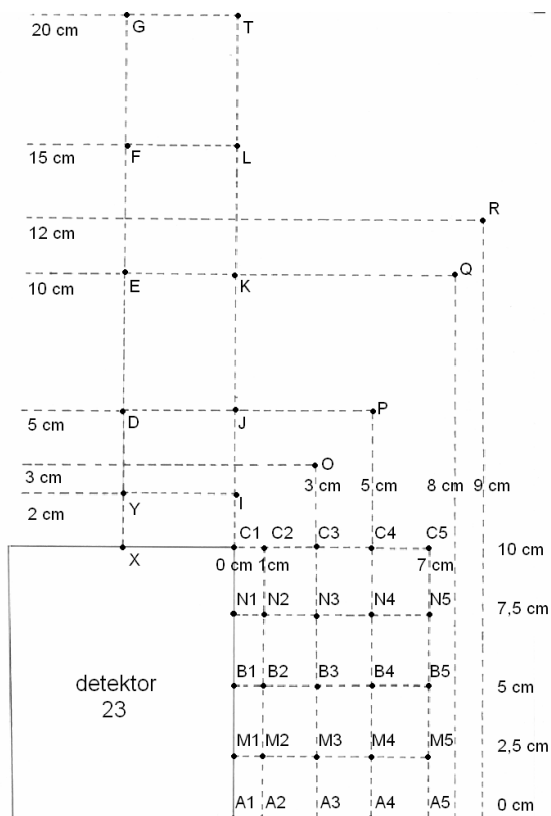
Bodové zdroje byly umístěny a měřeny ve třech oblastech, které jsou znázorněny jako bokorys na obrázku číslo 7. Oblast nad detektorem byla definována jako oblast F, oblast z boku detektoru jako oblast G a oblast, ze které mohou fotony dopadat jak na čelo detektoru tak na bok detektoru, byla nazvána jako oblast F+G.

Obr. 7: Oblasti měření

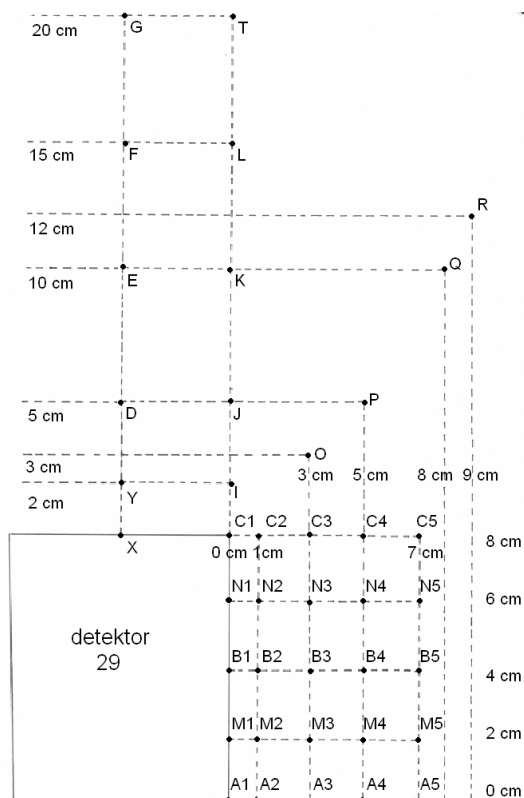


Polohy, ve kterých byly jednotlivé zdroje měřeny, jsou na obrázku číslo 8, 9 a 10. Uvedené vzdálenosti byly měřeny od pláště detektoru.

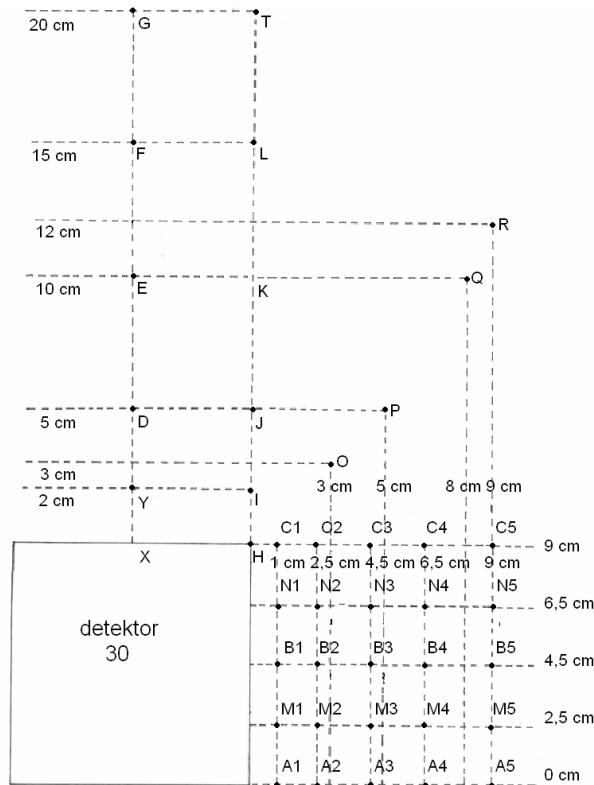
Obr. 8: Polohy bodových zdrojů při měření na detektoru 23



Obr. 9: Polohy bodových zdrojů při měření na detektoru 29



Obr. 10: Polohy bodových zdrojů při měření na detektoru 30



Pro vlastní experimentální stanovení byly použity tři energie, které demonstrují energetické spektrum. A to energie 46 keV, jako zářič bylo použito ^{210}Pb ($A=305,8$ kBq k datu 17.3.1997), dále energie 661 keV z ^{137}Cs ($A=19,2$ kBq k datu 17.5.1989) a energie 1331 keV od ^{60}Co ($A=227$ kBq k datu 28.11.1997). Aktivity zářiče byly voleny s ohledem na mrtvou dobu měření.

Ve výše popsaných bodech bylo provedeno měření účinnosti pro jednotlivé energie.

Doba měření byla různá, závislá na aktivitě zářiče, účinnosti detektoru a vzdálenosti od něj. Minimálně byl však požadován počet 10 000 impulsů v hodnoceném píku, kdy vzhledem k Poissonovu rozdělení četnosti impulsů činí nejistota v počtu impulsů cca 1%.

Získaná spektra byla vyhodnocena píkovou analýzou, čímž byl získán počet impulsů v jednotlivém píku za dobu, po kterou se měřilo. K vyhodnocení naměřených spekter byl použit program Genie 2000 fy Canberra.

Dále byla vypočítána účinnost η v jednotlivých bodech podle vztahu:

$$\eta = \frac{P}{A \cdot t \cdot \gamma} \quad (10)$$

Kde:

P je počet impulsů v píku za čas t ,

A je aktivita daného radionuklidů v době měření

t je doba měření,

γ je zastoupení dané energie.

Vyhodnocené údaje jsou uvedeny v tabulce číslo 9, 10 a 11 v kapitole 5, kde jsou udány impulsy za 1 sekundu, účinnost a chyba měření.

Měřením bylo získáno v každé linii 5 naměřených hodnot, celkem 25 hodnot v oblasti z boku detektoru (G), v oblasti nad detektorem (F) 10 hodnot a to ve sloupcích v ose detektoru a nad hranou a 4 hodnoty v oblasti F+G. Veškeré tyto hodnoty byly naměřeny pro již zmíněné tři energie.

4.2. Jednorozměrná regrese experimentálních dat

Pro proložení těchto bodů a získání funkce popisující závislost účinnosti na vzdálenosti bodu od detektoru byly použity tři rovnice.

$$d = \frac{1}{sa + b} \quad (11)$$

$$d = a \cdot e^{bs} \quad (12)$$

$$d = \frac{1}{(as^2 + bs + c)} \quad (13)$$

Kde d ...vzdálenost bodu od detektoru,

s ...počet impulsů za sekundu,

a, b, c ...hledané koeficienty rovnice.

Proklad byl vždy hledán zvlášť pro hodnoty jedné energie naměřené v jednotlivých sloupcích (oblast F), jednotlivých liniích (oblast G) a v linii F+G.

Výpočet byl proveden programem Regrese.xls, jehož matematické vztahy vychází z knih Matematické vzorce a metody [7] a Kompendium statistického zpracování [22]. Tento program pomocí metody nejmenších čtverců vypočítá koeficienty rovnice, které nejlépe odpovídají zadaným datům. Porovnáním reziduálního součtu čtverců byla vyhodnocena jako nejlépe popisující reciproká kvadratická funkce (13). Příklad porovnání je v tabulce číslo 3.

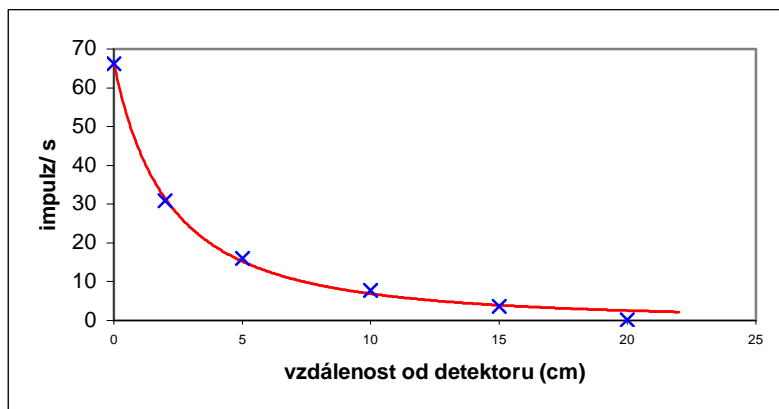
Tab. 3: Porovnání RSC pro reciprokou lineární, exponenciální a reciprokou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – nad osou detektoru 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,47 | 0,01 | 0,02 |
| Koeficient b | 0,12 | 0,02 | 0,03 |
| RSC | 0,010 | 32,3 | 17,8 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 2,6 | 68,2 | 21,0 |
| Koeficient b | -0,21 | -0,25 | -0,18 |
| RSC | 34,8 | 125,8 | 194,7 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Koeficient b | 0,47 | 0,01 | 0,47 |
| Koeficient c | 0,12 | 0,02 | 0,12 |
| RSC | 0,010 | 7,4 | 0,010 |

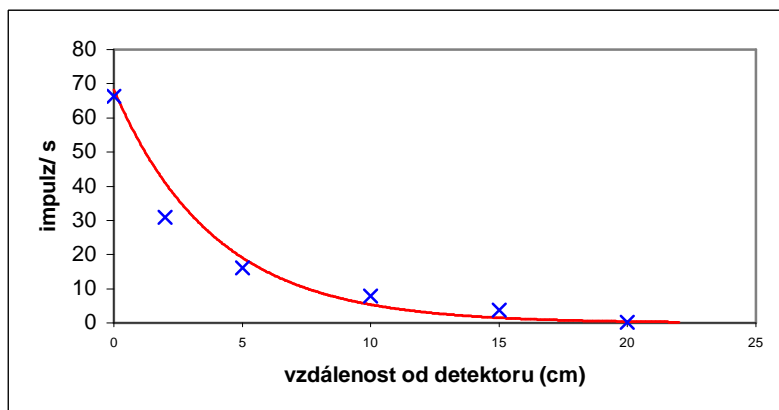
Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

Na obrázku číslo 11, 12 a 13 jsou graficky znázorněny příklady prokladů funkcí.

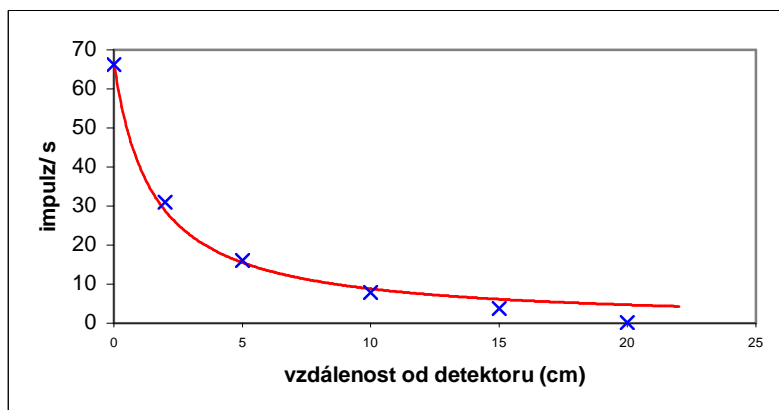
Obr. 11: Proklad reciprokou kvadratickou funkcí – použity naměřené hodnoty ze sloupce nad osou detektoru 30 pro energii 661 keV



Obr. 12: Proklad exponenciální funkcí – použity naměřené hodnoty ze sloupce nad osou detektoru 30 pro energii 661 keV



Obr. 13: Proklad reciprokou lineární funkcí – použity naměřené hodnoty ze sloupce nad osou detektoru 30 pro energii 661 keV



4.3. Dvojdímenzionální regrese

Kvadratická rovnice byla dále upravena. Důvodem je, že bylo třeba přidat další rozměr. Použita byla Pythagorova věta, s tím, že další rozměr může mít jinou váhu než původní, proto byl zmodifikován koeficientem, který má ukázat rozdíl vah.

Rovnice byla aplikována zvlášť na oblast nad detektorem (F) a zvlášť na oblast vedle detektoru (G), ale obě rovnice jsou ve stejném tvaru. Modifikovaná rovnice pro oblast F má tvar:

$$F = \frac{1}{u \cdot (h^2 + xr^2) + y \cdot \sqrt{h^2 + xr^2} + z} \quad (14)$$

h...výška v cm,

r...šířka v cm,

u, x, y, z...koeficienty rovnice pro oblast F (nad detektorem).

Rovnice pro oblast G je:

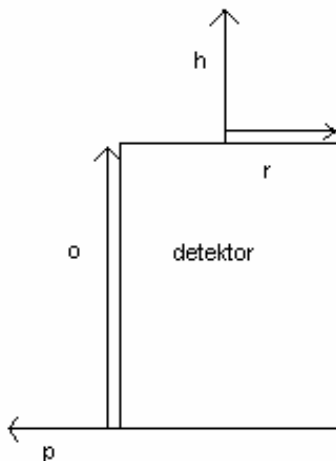
$$G = \frac{1}{j \cdot (o^2 + kp^2) + l \cdot \sqrt{o^2 + kp^2} + m} \quad (15)$$

o...výška v cm,

p...šířka v cm,

j, k, l, m...koeficienty rovnice pro oblast G (vedle detektoru).

Obr. 14: Bokorys detektoru se směry souřadných os h , r , o , p



Pro nalezení koeficientů rovnic byl opět použit program Excel. Jako vstupní data byla zadána výška a šířka a účinnost v daném bodě, která byla vydělena relativní účinností detektoru, na kterém bylo měřeno, což bylo provedeno z důvodu porovnání jednotlivých dat z různých detektorů. Dále byla vypočítána hodnota funkce F nebo G, podle oblasti pro kterou byl výpočet veden. Reziduálním součtem čtverců byla potom suma rozdílů účinnosti naměřené η a účinnosti spočítané funkcí G (případně F). Koeficienty byly vypočítány na základě metody nejmenších čtverců. V tabulce číslo 4 je příklad výpočtu.

Tab. 4: Příklad výpočtu koeficientů funkce F (oblast nad detektorem 23 pro energii 661 keV)

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|-------|----------|---------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,05051 | 0,05060 | 0,007 | u= | 0,3 |
| 2 | 0,1 | 0,02055 | 0,01912 | 2,07 | x= | 0,11 |
| 5 | 0,1 | 0,01223 | 0,00927 | 8,73 | y= | 16 |
| 10 | 0,1 | 0,00615 | 0,00474 | 1,99 | z= | 18 |
| 15 | 0,1 | 0,00260 | 0,00305 | 0,19 | | |
| 20 | 0,1 | 0,00163 | 0,00218 | 0,31 | | |
| 0,1 | 4,75 | 0,02332 | 0,02222 | 1,22 | | |
| 2 | 4,75 | 0,01278 | 0,01610 | 11,1 | | |
| 5 | 4,75 | 0,00913 | 0,00889 | 0,060 | | |
| 10 | 4,75 | 0,00517 | 0,00467 | 0,25 | | |
| 15 | 4,75 | 0,00255 | 0,00303 | 0,233 | | |
| 20 | 4,75 | 0,00152 | 0,00217 | 0,42 | | |
| 0,1 | -4,75 | 0,02332 | 0,02222 | 1,22 | | |
| 2 | -4,75 | 0,01278 | 0,01610 | 11,1 | | |
| 5 | -4,75 | 0,00913 | 0,00889 | 0,060 | | |
| 10 | -4,75 | 0,00517 | 0,00467 | 0,25 | | |
| 15 | -4,75 | 0,00255 | 0,00303 | 0,233 | | |
| 20 | -4,75 | 0,00152 | 0,00217 | 0,42 | | |
| | | | suma= | 39,8 | | |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

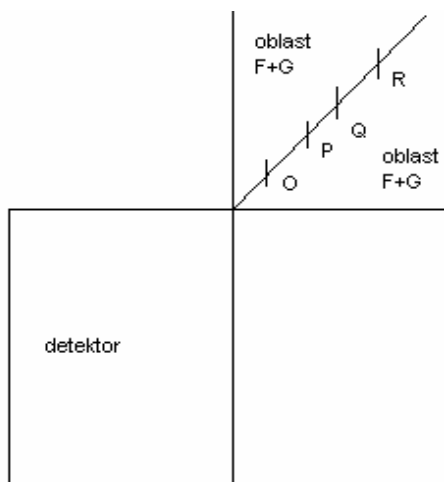
h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

4.4. Oblast F+G

Dále bylo třeba získat vztah, který popisuje oblast F+G. Výchozí teorií bylo, že funkce, která popisuje oblast F+G bude lineární kombinací funkce F a G.

Obr. 15: Schematické znázornění umístění bodových zdrojů při měření



Body O, P, Q, R přispívají svými fotony jak z vrchu detektoru, tak z boku. Jejich příspěvek do oblastí F a G je závislý na úhlu, ve kterém se zdroj nachází.

Protože odvodit vztah pro tuto závislost je velmi složité a fotony z této oblasti dopadající nemají takovou účinnost jako fotony dopadající z boku a zhora na detektor (tabulka číslo 5), byla tato oblast zanedbána.

Tab. 5: Hodnoty účinností pro různé vzdálenosti od detektoru 23, srovnání oblasti F+G s oblastí F (uvedené vzdálenosti od víčka detektoru)

| | 46 keV | | | 661 keV | | | 1332 keV | | |
|--------------------------|---------|---------|--------|---------|-------|--------|----------|---------|--------|
| | 2 cm | 5 cm | 10 cm | 2 cm | 5 cm | 10 cm | 2 cm | 5 cm | 10 cm |
| oblast F- nad osou det. | 0,00446 | 0,00351 | 0,0018 | 0,0226 | 0,013 | 0,0068 | 0,01259 | 0,00324 | 0,0017 |
| oblast F- nad hanou det. | 0,00432 | 0,00325 | 0,0016 | 0,0141 | 0,01 | 0,0057 | 0,00823 | 0,00247 | 0,0015 |
| oblast F+G | 0,00035 | 0,00023 | 0,0001 | 0,0057 | 0,004 | 0,0024 | 0,00018 | 0,00012 | 7E-05 |

4.5. Nalezení optimální oblasti kolem detektoru

Jak již bylo řečeno, cílem práce bylo navrhnout novou geometrii nebo optimalizovat stávající. Geometrie, která bude navržena by měla mít optimální poměr mezi množstvím vzorku a velikostí jeho příspěvku.

Byly získány 2D funkce (viz kapitola 4.3), které popisují závislost klesání účinnosti na stoupající vzdálenosti od detektoru. Integrací funkce získáme číselné vyjádření obsahu plochy pod křivkou dané funkce, z čehož lze vyvozovat vztah pro

poměr množství vzorku a velikost jeho příspěvku. Celý proces byl proveden v 2D projekci za předpokladu válcové symetrie, reálnou 3D oblast lze získat rotací o úhel 2π .

4.5.1. Numerický výpočet integrálů

Pro numerický výpočet hodnot integrálu byla použita lichoběžníková metoda modifikovaná na 3D metodu hranolů. Klasická lichoběžníková metoda rozdělí plochu na mnoho lichoběžníků, jejichž obsah se vypočítá a sečte. Trojrozměrná metoda hranolů, která byla použita, dělí prostor pod plochou na hranoly, jejichž objem se vypočítá a též sečte. Podstava hranolu je dána krokem, který je možno nezávisle určit. Čím je krok menší, tím je celkový výpočet přesnější, avšak numericky náročnější.

Existují i jiné přesnější numerické metody jako například Rombergova integrace nebo Simpsonovo pravidlo, ale jejich numerická náročnost je vyšší a pro daný účel se tato metoda jeví jako dostačující. [3]

Vzorec pro výpočet objemu hranolu:

$$V = \frac{k^2 \cdot (2y_1 + 2y_3 + y_2 + y_4)}{6} \quad (16)$$

, kde k je zvolený krok a y_1 až y_4 jsou výšky hran, s tím, že y_1 musí být minimální a y_3 maximální.

Pomocí programu Excel byla vytvořena tabulka, kde byly vypočteny jednotlivé hodnoty funkce v intervalu od 0 do 100 cm. Velikost kroku byla 0,1 cm. V další tabulce byly pomocí metody hranolů vypočítány odhady podílů hodnot sumy pro vybrané dílčí podintervaly vzhledem k celkové sumě. Výsledky jsou uvedeny v tabulce číslo 51 pro oblast nad detektorem a 52 pro oblast vedle detektoru (viz kapitola 5.4).

4.5.2. Vztažení na jednotku objemu

Výpočtem byly získány objemy pod křivkou účinnosti pro zvolené intervaly, které jsou uvedené v tabulce číslo 6. Intervaly byly vybrány s ohledem na polohy, ve kterých byly měřeny experimentální body, aby nedocházelo k příliš velké extrapolaci funkce.

Tab.6: Zvolené intervaly pro oblasti nad a vedle detektoru

| oblast nad detektorem (cm) | oblast vedle detektoru (cm) |
|----------------------------|-----------------------------|
| 0-1 | 0-1 |
| 0-2,5 | 0-2,5 |
| 0-5 | 0-5 |
| 0-7,5 | 0-7,5 |
| 0-10 | 0-10 |
| 0-15 | |
| 0-20 | |
| 0-25 | |

Pozn. Vzdálenosti od povrchu detektoru

Vypočtené hodnoty byly vyjádřeny v procentech, kde 100 % je hodnota nejrozsáhlejšího intervalu.

Dále byl vypočten skutečný objem válců nad detektory, daných rozměry příslušného intervalu (např. výška válce pro interval 0-2 cm je 2 cm) a poloměrem detektoru. Objemy prstence vedle detektoru byly vypočítány rozdílem objemu válce, s poloměrem daného intervalu přičteného k poloměru krystalu a výškou krystalu, a celkového objemu krystalu. Spočítané objemy jsou uvedeny v tabulce číslo 7.

Tab.7: Objemy válců nad detektory a objemy prstence vedle detektoru

| cm | oblast nad detektorem (cm ³) | | | oblast vedle detektoru (cm ³) | | |
|-------|--|--------|--------|---|--------|--------|
| | det 23 | det 29 | det 30 | det 23 | det 29 | det 30 |
| 0-1 | 52,3 | 50,2 | 63,6 | 146,3 | 132,4 | 134,2 |
| 0-2,5 | 104,7 | 125,6 | 158,9 | 397,4 | 313,8 | 362 |
| 0-5 | 261,8 | 251,2 | 317,8 | 900,4 | 651,2 | 812,4 |
| 0-7,5 | 392,8 | 376,8 | 476,8 | 1508,8 | 1007,8 | 1351,1 |
| 0-10 | 523,8 | 502,4 | 635,7 | 2222,7 | 1612,4 | 1978,2 |
| 0-15 | 811,9 | 753,6 | 953,6 | - | - | - |
| 0-20 | 1047,7 | 1004,8 | 1271,5 | - | - | - |
| 0-25 | 1335,8 | 1256 | 1589,4 | - | - | - |

Po vydělení absolutní hodnoty příslušného intervalu skutečným objemem válce nad detektorem, případně prstence vedle detektoru, získáme účinnost na jednotku objemu pro daný interval a energii. Výsledky a grafické znázornění je uvedeno v kapitole 5.4.1.

4.5.3. Numerická derivace

Dalším způsobem jak zobrazit průběh funkce závislosti účinnosti na poloze je derivace funkce. Derivace ukazuje přírůstek funkce na zvoleném kroku.

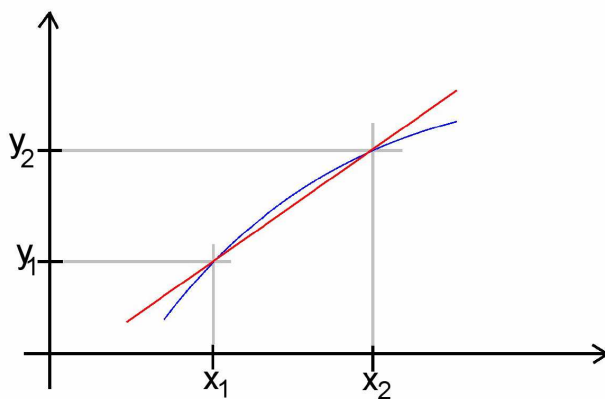
Pro tento případ byla k numerickému vypočtení derivace použit vztah:

$$y' = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (17)$$

kde x_1, x_2 minimální a maximální nezávisle proměnné,

y_1, y_2 hodnoty závislé proměnné odpovídající hodnotám x_1, x_2 .

Obr. 16: Derivace



Příklad výsledku numerické derivace je v tabulce číslo 8, grafické vyobrazení pro detektor 23, 29 a 30 je v kapitole 5.4.2.

Tab. 8: Numerická derivace pro oblast nad detektorem 23

| x | energie | | |
|----------|----------------|----------------|-----------------|
| | 16 keV | 661 keV | 1332 keV |
| | y' | y' | y' |
| 1 | 2800 | 10800 | 4700 |
| 2,5 | 2100 | 7600 | 2600 |
| 5 | 1500 | 5200 | 1300 |
| 7,5 | 1100 | 3800 | 750 |
| 10 | 700 | 2700 | 400 |
| 15 | 450 | 1900 | 210 |
| 20 | 310 | 1400 | 130 |

4.5.4. Odhad účinnosti

Po stanovení rozměrů nové nádoby, byla odečtena absolutní hodnota integrálu pro určený rozměr a to pro všechny zvolené energie a detektory. Tato hodnota byla vydělena skutečným objemem, čímž byla získána velikost účinnosti.

Tento jednodušší postup je možné realizovat pro válcovou nádobu nad detektorem.

Pro typ Marinelliho nádoby je třeba sečíst hodnotu takto vypočítané účinnosti nad detektorem, ale i vedle detektoru. Získaná účinnost je však pouze odhad, protože není započtena oblast F+G.

Pro válcovou nádobu spočteme účinnost stejným způsobem, ale získaná hodnota je účinnost prstence, proto je nutné tuto hodnotu vztáhnout na skutečný objem válcových nádob.

Vztah pro výpočet odhadu účinnosti válcových nádob kolem detektoru:

$$\frac{\eta_{prst.}}{V_{prst.}} = \frac{\eta_{skut}}{V_{skut}} \quad (18)$$

kde: η_{prst} je vypočtená účinnost prstence, který má výšku stejnou jako zvolená válcová nádoba a vrstvu jako průměr válcové nádoby,

η_{skut} je skutečná účinnost válcových nádob kolem detektoru,

V_{prst} je objem prstence, který má výšku stejnou jako zvolená válcová nádoba a vrstvu jako průměr válcové nádoby,

V_{skut} je skutečný objem válcových nádob kolem detektoru.

Bylo vypočteno, že kolem detektoru je možné použít až osm válcových nádob definovaných rozměrů.

4.5.5. Odhad MDA

Pro výpočet MDA byl použit program Genie 2000, který používá pro získání hodnot MDA následující vztah:

$$MDA = \frac{k^2 + 2k \cdot \left[\frac{P}{2m} \cdot \left(\frac{P}{2m} + 1 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^m B_i + \sum_{j=1}^m B_j \right) + P + s_p^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\eta \cdot \gamma \cdot t} \quad (19) \quad [10]$$

kde: MDA je minimální detekovatelná aktivita

k je kvantit normálního rozdělení (obvykle 1-3),

p je počet kanálů odhadnutý z měření pozadového spektra bez přispění měřeného vzorku,

P je plocha píku v pozadí přepočtená na dobu t ,

B_i, B_j je počet impulsů v i -tém kanálu nalevo a v j -tém kanálu napravo od píku, použito pro odhad pozadí pod píkem,

s_p je odchylka charakterizující chybu odhadu plochy píku v potadí, je přepočten na dobu t ,

t je čas měření vzorku,

η je účinnost energie E ,

γ zastoupení,

m je počet kanálů na každé straně píku použitých k odhadu pozadí píku.

Vypočtená hodnota MDA je pouze odhad, protože vychází z odhadnutých hodnot účinnosti.

5. VÝSLEDKY

5.1. Výsledky měření experimentálních dat

Experimentální data byla získána z měření bodovými zdroji v různých polohách kolem detektoru. Umístění zdrojů je znázorněno na obrázku číslo 8, 9, 10.

Vyhodnocením v programu Genie fy Canberra byl získán počet impulzů, z čehož byla vypočítána účinnost v měřeném bodě. V tabulce číslo 9, 10, 11 jsou uvedeny výsledky, a to počet impulzů za sekundu, účinnost (vypočítána dle rovnice 10) a chyba měření.

Tab. 9: Vyhodnocení naměřených údajů z detektoru 23

| použitý etalon | Cs 137 | A= | k datu | Pb 210 | A= | k datu | Co 60 | A= | k datu |
|----------------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| | | 19,2kBq | 17.5.1989 | | 305,8kBq | 17.3.1997 | | 227kBq | 28.11.1997 |
| poloha | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) |
| A1 | 308,0 | 0,0189 | 0,8 | 67,5 | 0,0052 | 0,9 | 255,0 | 0,0011 | 0,6 |
| A2 | 217,2 | 0,0133 | 1,0 | 49,4 | 0,0038 | 1,1 | 182,0 | 0,0008 | 0,8 |
| A3 | 177,7 | 0,0109 | 0,8 | 31,3 | 0,0024 | 1,0 | 123,0 | 0,0005 | 0,9 |
| A4 | 138,8 | 0,0085 | 0,9 | 20,4 | 0,0016 | 1,1 | 83,2 | 0,0004 | 1,1 |
| A5 | 110,5 | 0,0068 | 0,8 | 15,4 | 0,0012 | 1,1 | 32,5 | 0,0003 | 0,9 |
| B1 | 571,6 | 0,0350 | 0,6 | 71,5 | 0,0055 | 0,9 | 271,0 | 0,0012 | 0,6 |
| B2 | 442,0 | 0,0271 | 0,7 | 44,8 | 0,0034 | 1,2 | 189,0 | 0,0008 | 0,7 |
| B3 | 296,0 | 0,0181 | 0,6 | 29,3 | 0,0023 | 1,0 | 123,0 | 0,0005 | 0,9 |
| B4 | 201,0 | 0,0123 | 0,7 | 17,9 | 0,0014 | 1,2 | 79,0 | 0,0003 | 1,1 |
| B5 | 147,3 | 0,0090 | 0,7 | 11,3 | 0,0009 | 1,1 | 53,5 | 0,0002 | 1,0 |
| C1 | 954,0 | 0,0584 | 0,5 | 29,3 | 0,0023 | 1,4 | 163,0 | 0,0007 | 0,8 |
| C2 | 630,0 | 0,0386 | 0,6 | 14,7 | 0,0011 | 2,0 | 122,0 | 0,0005 | 0,9 |
| C3 | 408,0 | 0,0250 | 0,7 | 14,9 | 0,0011 | 1,3 | 92,9 | 0,0004 | 1,0 |
| C4 | 266,0 | 0,0163 | 0,9 | 11,6 | 0,0009 | 1,7 | 68,0 | 0,0003 | 1,2 |
| C5 | 181,0 | 0,0111 | 0,8 | 10,0 | 0,0008 | 1,3 | 52,2 | 0,0002 | 0,4 |
| M1 | 366,0 | 0,0224 | 0,7 | 55,0 | 0,0042 | 1,0 | 263,5 | 0,0012 | 0,4 |
| M2 | 318,0 | 0,0195 | 0,8 | 43,3 | 0,0033 | 0,9 | 198,0 | 0,0009 | 0,7 |
| M3 | 235,0 | 0,0144 | 0,7 | 28,3 | 0,0022 | 1,0 | 127,0 | 0,0006 | 0,9 |
| M4 | 174,0 | 0,0106 | 0,8 | 19,2 | 0,0015 | 1,1 | 83,9 | 0,0004 | 1,1 |
| M5 | 128,7 | 0,0079 | 0,7 | 13,8 | 0,0011 | 1,0 | 60,0 | 0,0003 | 0,9 |
| N1 | 818,0 | 0,0050 | 0,5 | 70,5 | 0,0054 | 0,9 | 229,0 | 0,0010 | 0,7 |
| N2 | 542,0 | 0,0332 | 0,6 | 46,1 | 0,0035 | 1,1 | 166,0 | 0,0007 | 0,8 |
| N3 | 317,0 | 0,0194 | 0,6 | 30,0 | 0,0023 | 1,0 | 121,0 | 0,0005 | 0,9 |
| N4 | 225,0 | 0,0138 | 0,7 | 19,8 | 0,0015 | 1,1 | 76,9 | 0,0003 | 1,1 |
| N5 | 148,0 | 0,0091 | 0,7 | 14,5 | 0,0011 | 1,0 | 58,5 | 0,0003 | 0,9 |
| D | 219,8 | 0,0135 | 0,7 | 25,0 | 0,0019 | 1,0 | 735,0 | 0,0032 | 0,4 |
| E | 110,5 | 0,0068 | 1,0 | 23,0 | 0,0018 | 1,1 | 394,0 | 0,0017 | 0,5 |
| F | 46,7 | 0,0029 | 1,0 | 9,3 | 0,0007 | 1,0 | 193,0 | 0,0009 | 0,7 |
| G | 29,3 | 0,0018 | 0,9 | 5,5 | 0,0004 | 1,1 | 123,0 | 0,0005 | 0,9 |

| použitý etalon | Cs 137 | A= | k datu | Pb 210 | A= | k datu | Co 60 | A= | k datu |
|----------------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| | | 19,2kBq | 17.5.1989 | | 305,8kBq | 17.3.1997 | | 227kBq | 28.11.1997 |
| poloha | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) |
| H | 419,2 | 0,0257 | 0,7 | 71,0 | 0,0056 | 2,3 | 135,0 | 0,0132 | 0,9 |
| I | 229,6 | 0,0141 | 0,9 | 56,1 | 0,0043 | 2,3 | 84,3 | 0,0082 | 1,1 |
| J | 164,0 | 0,0100 | 0,8 | 42,2 | 0,0032 | 0,7 | 560,0 | 0,0025 | 0,4 |
| K | 93,0 | 0,0057 | 0,7 | 20,8 | 0,0016 | 1,1 | 332,0 | 0,0015 | 0,6 |
| L | 45,8 | 0,0028 | 0,7 | 7,1 | 0,0005 | 1,2 | 178,0 | 0,0008 | 0,8 |
| O | 140,0 | 0,0086 | 0,9 | 6,2 | 0,0005 | 2,0 | 65,5 | 0,0003 | 1,2 |
| P | 90,7 | 0,0055 | 0,9 | 4,4 | 0,0003 | 1,4 | 33,8 | 0,0001 | 0,9 |
| Q | 49,0 | 0,0030 | 0,8 | 3,7 | 0,0003 | 1,1 | 22,9 | 0,0001 | 0,7 |
| R | 38,6 | 0,0024 | 0,7 | 2,9 | 0,0002 | 1,4 | 17,2 | 0,0001 | 0,8 |
| T | 27,4 | 0,0017 | 0,9 | 4,6 | 0,0004 | 1,2 | 116,0 | 0,0005 | 0,9 |
| Y | 369,4 | 0,0226 | 0,7 | 58,0 | 0,0045 | 1,1 | 129,0 | 0,0126 | 0,9 |
| X | 907,9 | 0,0556 | 0,3 | 92,0 | 0,0071 | 1,0 | 239,0 | 0,0233 | 0,7 |

Tab. 10: Vyhodnocení naměřených údajů z detektoru 29

| použitý etalon | Cs 137 | A= | k datu | Pb 210 | A= | k datu | Co 60 | A= | k datu |
|----------------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| | | 19,2kBq | 17.5.1989 | | 305,8kBq | 17.3.1997 | | 227kBq | 28.11.1997 |
| poloha | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba |
| A1 | 541,0 | 0,0331 | 0,4 | 9,0 | 0,00065 | 1,3 | 1544,0 | 0,0068 | 0,4 |
| A2 | 381,5 | 0,0233 | 0,4 | 6,3 | 0,000457 | 1,6 | 1194,0 | 0,0053 | 0,4 |
| A3 | 237,3 | 0,0145 | 0,4 | 5,2 | 0,000375 | 1,8 | 856,0 | 0,0038 | 0,5 |
| A4 | 144,3 | 0,0088 | 0,4 | 3,4 | 0,000246 | 2,3 | 568,0 | 0,0025 | 0,6 |
| A5 | 107,4 | 0,0066 | 0,4 | 2,5 | 0,000181 | 2,6 | 410,0 | 0,0018 | 0,7 |
| B1 | 692,0 | 0,0424 | 0,4 | 14,8 | 0,001071 | 0,9 | 1796,0 | 0,0079 | 0,4 |
| B2 | 386,0 | 0,0236 | 0,5 | 7,8 | 0,000566 | 1,2 | 1253,0 | 0,0055 | 0,5 |
| B3 | 248,0 | 0,0174 | 0,6 | 6,0 | 0,000434 | 1,0 | 866,0 | 0,0038 | 0,6 |
| B4 | 132,0 | 0,0081 | 0,9 | 4,9 | 0,000353 | 1,1 | 563,0 | 0,0025 | 0,8 |
| B5 | 91,0 | 0,0056 | 0,7 | 4,2 | 0,000307 | 0,2 | 370,0 | 0,0016 | 1,0 |
| C1 | 277,0 | 0,0170 | 0,6 | 315,7 | 0,022841 | 0,2 | 920,0 | 0,0041 | 0,6 |
| C2 | 192,0 | 0,0118 | 0,7 | 210,5 | 0,015229 | 0,3 | 720,0 | 0,0032 | 0,7 |
| C3 | 140,0 | 0,0086 | 0,9 | 68,9 | 0,004985 | 1,3 | 553,0 | 0,0024 | 0,8 |
| C4 | 92,4 | 0,0057 | 1,1 | 42,4 | 0,003068 | 0,5 | 423,0 | 0,0019 | 0,9 |
| C5 | 64,0 | 0,0039 | 0,9 | 29,6 | 0,002141 | 0,6 | 370,0 | 0,0016 | 1,0 |
| M1 | 654,0 | 0,0400 | 0,4 | 14,4 | 0,001042 | 1,0 | 1836,0 | 0,0135 | 0,3 |
| M2 | 440,0 | 0,0269 | 0,5 | 9,8 | 0,00071 | 1,1 | 1380,0 | 0,0061 | 0,5 |
| M3 | 244,0 | 0,0149 | 0,6 | 5,6 | 0,000403 | 1,8 | 980,0 | 0,0043 | 0,6 |
| M4 | 142,7 | 0,0087 | 0,7 | 4,0 | 0,000291 | 2,2 | 606,0 | 0,0027 | 0,8 |
| M5 | 108,0 | 0,0066 | 0,7 | 2,9 | 0,000211 | 1,8 | 430,0 | 0,0019 | 0,9 |
| N1 | 374,0 | 0,0229 | 0,7 | 44,4 | 0,003212 | 0,6 | 1236,0 | 0,0054 | 0,5 |
| N2 | 260,0 | 0,0159 | 0,6 | 2,6 | 0,000188 | 1,1 | 933,0 | 0,0041 | 0,6 |
| N3 | 186,0 | 0,0114 | 0,7 | 14,6 | 0,001059 | 1,5 | 703,0 | 0,0003 | 0,7 |
| N4 | 127,0 | 0,0078 | 0,9 | 9,4 | 0,00068 | 1,1 | 496,0 | 0,0022 | 0,8 |
| N5 | 90,5 | 0,0055 | 0,8 | 6,7 | 0,000485 | 1,6 | 370,0 | 0,0016 | 1,0 |
| D | 198,5 | 0,0121 | 0,4 | 563,0 | 0,040732 | 0,4 | 716,0 | 0,0032 | 0,5 |
| E | 102,5 | 0,0063 | 0,5 | 257,0 | 0,018593 | 0,7 | 382,0 | 0,0017 | 0,5 |
| F | 44,5 | 0,0027 | 0,6 | 105,0 | 0,007596 | 1,0 | 176,0 | 0,0008 | 0,8 |

| použitý | Cs 137 | A= | k datu | Pb 210 | A= | k datu | Co 60 | A= | k datu |
|---------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| etalon | | 19,2kBq | 17.5.1989 | | 305,8kBq | 17.3.1997 | | 227kBq | 28.11.1997 |
| poloha | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba |
| G | 28,2 | 0,0017 | 0,7 | 63,7 | 0,004609 | 0,4 | 112,0 | 0,0005 | 1,0 |
| H | 298,0 | 0,0182 | 0,8 | 670,0 | 0,048473 | 0,3 | 913,0 | 0,0040 | 0,6 |
| I | 185,0 | 0,0113 | 1,0 | 370,0 | 0,026769 | 0,8 | 656,0 | 0,0029 | 0,7 |
| J | 140,0 | 0,0086 | 0,9 | 288,0 | 0,020836 | 0,5 | 490,0 | 0,0022 | 0,8 |
| K | 77,1 | 0,0047 | 1,1 | 198,0 | 0,014325 | 0,8 | 290,0 | 0,0013 | 0,8 |
| L | 41,1 | 0,0025 | 1,1 | 87,9 | 0,006359 | 1,1 | 150,0 | 0,0007 | 0,8 |
| O | 76,3 | 0,0086 | 1,2 | 79,1 | 0,005723 | 1,2 | 348,0 | 0,0015 | 0,5 |
| P | 70,7 | 0,0055 | 1,2 | 89,2 | 0,006453 | 1,1 | 288,0 | 0,0013 | 0,6 |
| Q | 45,1 | 0,0030 | 1,1 | 58,0 | 0,004196 | 1,0 | 174,0 | 0,0008 | 0,8 |
| R | 33,7 | 0,0000 | 1,0 | 56,7 | 0,0041 | 0,8 | 131,0 | 0,0006 | 0,9 |
| T | 26,6 | 0,0016 | 1,1 | 55,5 | 0,004015 | 1,0 | 102,7 | 0,0005 | 0,8 |
| Y | 328,0 | 0,0201 | 0,8 | 865,0 | 0,062581 | 0,4 | 1060,0 | 0,0047 | 0,6 |
| X | 902,3 | 0,5522 | 0,6 | 2568,7 | 0,185839 | 0,4 | 5936,0 | 0,0262 | 0,5 |

Tab. 11: Vyhodnocení naměřených údajů z detektoru 30

| použitý | Cs 137 | A= | k datu | Pb 210 | A= | k datu | Co 60 | A= | k datu |
|---------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| etalon | | 19,2kBq | 17.5.1989 | | 305,8kBq | 17.3.1997 | | 227kBq | 28.11.1997 |
| poloha | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba |
| A1 | 386 | 0,02362 | 0,72 | 87,5 | 0,0067 | 0,82 | 1370 | 0,0060 | 0,5 |
| A2 | 314,0 | 0,0192 | 0,8 | 64,6 | 0,0050 | 0,6 | 1230,0 | 0,0054 | 0,5 |
| A3 | 226,0 | 0,0138 | 1,0 | 48,8 | 0,0038 | 0,7 | 903,3 | 0,0040 | 0,6 |
| A4 | 167,8 | 0,0103 | 1,1 | 36,6 | 0,0028 | 0,8 | 656,7 | 0,0029 | 0,7 |
| A5 | 127,8 | 0,0078 | 1,3 | 28,8 | 0,0022 | 0,9 | 506,7 | 0,0022 | 0,8 |
| B1 | 758,0 | 0,0464 | 0,5 | 123,0 | 0,0095 | 1,0 | 2036,7 | 0,0090 | 0,4 |
| B2 | 498,0 | 0,0305 | 0,6 | 105,0 | 0,0081 | 1,0 | 1603,3 | 0,0071 | 0,5 |
| B3 | 306,0 | 0,0187 | 0,8 | 65,0 | 0,0050 | 0,9 | 1056,7 | 0,0047 | 0,6 |
| B4 | 204,0 | 0,0125 | 1,0 | 50,3 | 0,0039 | 1,0 | 773,3 | 0,0034 | 0,7 |
| B5 | 147,0 | 0,0090 | 1,2 | 32,3 | 0,0025 | 1,3 | 626,7 | 0,0028 | 0,7 |
| C1 | 350,0 | 0,0214 | 1,0 | 90,6 | 0,0070 | 1,1 | 1420,0 | 0,0063 | 0,5 |
| C2 | 250,0 | 0,0153 | 0,9 | 74,0 | 0,0057 | 0,9 | 1146,7 | 0,0051 | 0,6 |
| C3 | 206,0 | 0,0126 | 1,0 | 54,5 | 0,0042 | 1,0 | 893,3 | 0,0039 | 0,6 |
| C4 | 157,8 | 0,0096 | 1,1 | 38,0 | 0,0029 | 1,0 | 670,0 | 0,0030 | 0,7 |
| C5 | 120,0 | 0,0074 | 1,3 | 25,8 | 0,0020 | 0,9 | 496,7 | 0,0022 | 0,8 |
| M1 | 648,0 | 0,0397 | 0,6 | 121,0 | 0,0093 | 1,0 | 1530,0 | 0,0067 | 0,5 |
| M2 | 440,0 | 0,0269 | 0,7 | 103,0 | 0,0079 | 1,1 | 1420,0 | 0,0063 | 0,5 |
| M3 | 274,0 | 0,0168 | 0,9 | 68,5 | 0,0053 | 0,9 | 1006,7 | 0,0044 | 0,6 |
| M4 | 196,2 | 0,0120 | 1,0 | 47,8 | 0,0037 | 1,1 | 743,3 | 0,0033 | 0,7 |
| M5 | 167,4 | 0,0102 | 1,1 | 33,3 | 0,0026 | 1,1 | 600,0 | 0,0026 | 0,8 |
| N1 | 628,0 | 0,0384 | 0,6 | 101,0 | 0,0078 | 1,1 | 1670,0 | 0,0074 | 0,5 |
| N2 | 422,0 | 0,0258 | 0,7 | 87,0 | 0,0067 | 1,1 | 1106,7 | 0,0049 | 0,6 |
| N3 | 296,0 | 0,0181 | 0,8 | 65,5 | 0,0050 | 0,9 | 923,3 | 0,0041 | 0,6 |
| N4 | 175,2 | 0,0107 | 1,1 | 46,8 | 0,0036 | 1,1 | 680,0 | 0,0030 | 0,7 |
| N5 | 138,0 | 0,0085 | 1,2 | 28,4 | 0,0022 | 0,9 | 543,3 | 0,0024 | 0,8 |
| D | 308,0 | 0,0189 | 0,8 | 145,0 | 0,0112 | 0,9 | 1076,7 | 0,0047 | 0,6 |
| E | 150,0 | 0,0092 | 0,8 | 74,0 | 0,0057 | 1,3 | 586,0 | 0,0026 | 0,6 |
| F | 71,2 | 0,0044 | 0,9 | 29,9 | 0,0023 | 1,4 | 272,0 | 0,0012 | 0,6 |

| použitý etalon | Cs 137 | A= | k datu | Pb 210 | A= | k datu | Co 60 | A= | k datu |
|----------------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| | | 19,2kBq | 17.5.1989 | | 305,8kBq | 17.3.1997 | | 227kBq | 28.11.1997 |
| poloha | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba(%) | impuls/s | účinnost | chyba |
| G | 37,7 | 0,0023 | 0,9 | 17,7 | 0,0014 | 1,5 | 170,5 | 0,0008 | 0,5 |
| H | 932,3 | 0,0219 | 0,8 | 64,5 | 0,0050 | 1,0 | 165,0 | 0,0161 | 0,8 |
| I | 446,0 | 0,01971 | 0,7 | 59,0 | 0,0045 | 1,1 | 100,8 | 0,0098 | 1,1 |
| J | 146,0 | 0,0089 | 0,8 | 56,9 | 0,0044 | 1,5 | 62,9 | 0,0061 | 1,0 |
| K | 103,0 | 0,0063 | 1,0 | 39,7 | 0,0031 | 1,0 | 371,3 | 0,0016 | 0,6 |
| L | 51,5 | 0,0032 | 1,1 | 21,8 | 0,0017 | 1,2 | 206,7 | 0,0009 | 0,4 |
| O | 135,0 | 0,0083 | 0,9 | 10,8 | 0,0008 | 0,9 | 53,7 | 0,0052 | 1,1 |
| P | 99,0 | 0,0061 | 0,6 | 9,8 | 0,0008 | 1,2 | 35,3 | 0,0034 | 1,0 |
| Q | 58,4 | 0,0036 | 0,6 | 8,4 | 0,0006 | 1,8 | 239,0 | 0,0011 | 0,7 |
| R | 39,5 | 0,0024 | 0,7 | 5,6 | 0,0004 | 1,5 | 151,0 | 0,0007 | 0,8 |
| T | 34,6 | 0,0021 | 0,5 | 15,0 | 0,0012 | 0,9 | 140,7 | 0,0006 | 0,7 |
| X | 1272,0 | 0,0778 | 0,4 | 304,0 | 0,0234 | 0,9 | 326,0 | 0,0318 | 0,9 |
| Y | 594,0 | 0,0513 | 0,6 | 206,0 | 0,0159 | 0,6 | 164,6 | 0,0161 | 1,1 |

* použit etalon Co-60 s aktivitou 10,25 kBq

5.2. Výsledky jednorozměrné regrese experimentálních dat

Pro proložení těchto bodů a získání funkce popisující závislost účinnosti na vzdálenosti bodu od detektoru byly použity tři rovnice reciproká lineární (11), exponencionální (12) a reciproká kvadratická (13).

Proklad byl vždy hledán zvlášť pro hodnoty jedné energie naměřené v jednotlivých sloupcích (oblast F) a jednotlivých liniích (oblast G).

Porovnáním reziduálního součtu čtverců byla vyhodnocena jako nejlépe popisující reciproká kvadratická funkce (13).

Výsledky srovnávání daných funkcí pro jednotlivé detektory je uvedeno v následujících tabulkách (tabulka číslo 12 - 32).

Tab. 12: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – sloupec nad osou detektoru 23)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 1,3 | 0,02 | 0,023 |
| Koeficient b | 3,3 | 0,02 | 0,04 |
| RSC | 0,001 | 6,3 | 10 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,23 | 31 | 17 |
| Koeficient b | -0,13 | -0,16 | -0,19 |
| RSC | 0,17 | 259 | 40 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,06 | 0,0003 | 0,01 |
| Koeficient b | 1,01 | 0,01 | 0,01 |
| Koeficient c | 3,3 | 0,02 | 0,04 |
| RSC | 0,0009 | 3,9 | 0,59 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 13: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – sloupec nad hranou detektoru 23)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(s*a+b)$ | | |
| Koeficient a | 1,02 | 0,02 | 0,04 |
| Koeficient b | 3,76 | 0,045 | 0,07 |
| RSC | 0,002 | 3,3 | 5,8 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,25 | 18 | 9,2 |
| Koeficient b | -0,13 | -0,13 | -0,16 |
| RSC | 0,0006 | 20 | 21 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,069 | 0,0003 | 0,01 |
| Koeficient b | 0,48 | 0,02 | 0,003 |
| Koeficient c | 3,91 | 0,05 | 0,08 |
| RSC | 0,0008 | 2,47 | 0,72 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 14: Porovnání R² pro reciprokní, exponenciální a reciprokní kvadratickní rovnici (použití experimentální body – linie A, detektor 23)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 2,1 | 0,016 | 0,4 |
| Koeficient b | 4 | 0,064 | 0,88 |
| R ² | 5,2E-05 | 1,8 | 0,02 |
| Rovnice | $d = a * e^{(b * s)}$ | | |
| Koeficient a | 0,22 | 14 | 1,1 |
| Koeficient b | -0,22 | -0,14 | -0,27 |
| R ² | 0,0014 | 4,46 | 0,014 |
| Rovnice | $d = 1 / (a*s^2 + b*s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,012 | -0,0008 | 0,04 |
| Koeficient b | 2,08 | 0,02 | 0,24 |
| Koeficient c | 4,01 | 0,063 | 0,9 |
| R ² | 5,08E-05 | 1,31 | 0,011 |

Poznámka: R² – reziduální součet čtvercůTab. 15: Porovnání R² pro reciprokní, exponenciální a reciprokní kvadratickní rovnici (použití experimentální body – linie B, detektor 23)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|----------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 2,5 | 0,01 | 0,53 |
| Koeficient b | 4,3 | 0,03 | 0,6 |
| R ² | 0,0002 | 2,5 | 0,01 |
| Rovnice | $d = a * e^{(b * s)}$ | | |
| Koeficient a | 0,21 | 28 | 1,4 |
| Koeficient b | -0,25 | -0,19 | -0,27 |
| R ² | 0,0008 | 2,4 | 0,24 |
| Rovnice | $d = 1 / (a*s^2 + b*s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,086 | 0,003 | -0,02 |
| Koeficient b | 2,2 | 0,1 | 0,6 |
| Koeficient c | 4,3 | 0,37 | 0,6 |
| R ² | 0,0002 | 16 | 0,01 |

Poznámka: R² – reziduální součet čtverců

Tab. 16: Porovnání RSC² pro reciprokou lineární, exponenciální a reciprokou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie C, detektor 23)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 3,8 | 0,01 | 0,39 |
| Koeficient b | 10 | 0,02 | 1,4 |
| RSC ² | 0,0004 | 4,6 | 0,0009 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,077 | 44 | 0,67 |
| Koeficient b | -0,14 | -0,22 | -0,15 |
| RSC ² | 0,05 | 34 | 2,5 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | -0,56 | 0,0002 | 0,002 |
| Koeficient b | 6,6 | 0,009 | 0,37 |
| Koeficient c | 10 | 0,02 | 1,4 |
| RSC ² | 0,0003 | 3,3 | 0,001 |

Poznámka: RSC² – reziduální součet čtvercůTab. 17: Porovnání RSC² pro reciprokou lineární, exponenciální a reciprokou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie M, detektor 23)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 1,9 | 0,01 | 0,3 |
| Koeficient b | 5,4 | 0,05 | 0,8 |
| RSC ² | 0,0001 | 1,7 | 0,004 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,17 | 19 | 1,9 |
| Koeficient b | -0,19 | -0,14 | -0,21 |
| RSC ² | 5,8E-05 | 0,014 | 0,005 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,14 | 0,0009 | 0,02 |
| Koeficient b | 1,3 | 0,006 | 0,25 |
| Koeficient c | 5,6 | 0,05 | 0,86 |
| RSC ² | 9,1E-08 | 0,006 | 0,0002 |

Poznámka: RSC² – reziduální součet čtverců

Tab. 18: Porovnání RSC² pro reciprokou lineární, exponenciální a reciprokou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie N, detektor 23)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|------------------|-------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 2,1 | 0,012 | 0,35 |
| Koeficient b | 4,3 | 0,023 | 0,99 |
| RSC ² | 5,9E-05 | 1,8 | 0,0035 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,21 | 37 | 0,94 |
| Koeficient b | -0,22 | -0,23 | -0,19 |
| RSC ² | 0,0009 | 30 | 0,007 |
| Rovnice | $d = 1 / (a*s^2+b*s+c)$ | | |
| Koeficient a | 0,02 | 0,0003 | 0,012 |
| Koeficient b | 2,1 | 0,011 | 0,3 |
| Koeficient c | 4,4 | 0,02 | 1 |
| RSC ² | 5,4E-05 | 0,63 | 0,0063 |

Poznámka: RSC² – reziduální součet čtvercůTab. 19: Porovnání RSC² pro reciprokou lineární, exponenciální a reciprokou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – sloupec nad osou detektoru 29)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|------------------|-------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,077 | 0,012 | 0,04 |
| Koeficient b | 0,34 | 0,06 | 0,21 |
| RSC ² | 0,43 | 10 | 0,96 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 3,1 | 17 | 5,1 |
| Koeficient b | -0,13 | -0,15 | -0,11 |
| RSC ² | 0,17 | 14 | 0,31 |
| Rovnice | $d = 1 / (a*s^2+b*s+c)$ | | |
| Koeficient a | 0,01 | 0,001 | 0,004 |
| Koeficient b | -0,02 | 0,001 | -0,001 |
| Koeficient c | 0,35 | 0,06 | 0,21 |
| RSC ² | 0,006 | 0,23 | 0,02 |

Poznámka: RSC² – reziduální součet čtverců

Tab. 20: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – sloupec nad hranou detektoru 29)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,18 | 0,019 | 0,056 |
| Koeficient b | 0,46 | 0,064 | 0,24 |
| RSC | 0,017 | 2,33 | 0,23 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 1,8 | 13 | 3,7 |
| Koeficient b | -0,12 | -0,12 | -0,110 |
| RSC | 0,19 | 5,3 | 0,033 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,001 | 0,001 | 0,002 |
| Koeficient b | 0,17 | 0,015 | 0,035 |
| Koeficient c | 0,46 | 0,065 | 0,25 |
| RSC | 0,016 | 1,4 | 0,053 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 21: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie A, detektor 29)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 10 | 0,022 | 0,047 |
| Koeficient b | 35 | 0,037 | 0,15 |
| RSC | 6,6 | 23 | 0,19 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,027 | 4,7 | 6,6 |
| Koeficient b | -0,18 | -0,49 | -0,19 |
| RSC | 7,22-06 | 15 | 0,096 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,37 | 0,014 | 0,003 |
| Koeficient b | 8,9 | 0,4 | 0,034 |
| Koeficient c | 35 | 0,12 | 0,15 |
| RSC | 5,82-06 | 0,032 | 0,055 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 22: Porovnání RSC² pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie B, detektor 29)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 2,1 | 0,007 | 0,013 |
| Koeficient b | 25, | 0,031 | 0,14 |
| RSC ² | 0,00024 | 67 | 1,8 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,036 | 30 | 7,4 |
| Koeficient b | -0,160 | -0,28 | -0,22 |
| RSC ² | 0,00018 | 39 | 0,45 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | -1,4 | 0,0005 | 0,002 |
| Koeficient b | 17 | 0,019 | 0,045 |
| Koeficient c | 21 | 0,028 | 0,13 |
| RSC ² | 6,67-06 | 4,7 | 0,15 |

 Poznámka: RSC² – reziduální součet čtverců

 Tab. 23: Porovnání RSC² pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie C, detektor 29)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1 / (a * s + b)$ | | |
| Koeficient a | 0,33 | 0,03 | 0,06 |
| Koeficient b | 1,1 | 0,07 | 0,25 |
| RSC ² | 0,49 | 0,85 | 0,02 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,61 | 13 | 3,8 |
| Koeficient b | -0,09 | -0,20 | -0,13 |
| RSC ² | 0,64 | 2,0 | 0,14 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | -0,19 | 0,00 | 0,00 |
| Koeficient b | 1,4 | 0,02 | 0,06 |
| Koeficient c | 0,94 | 0,07 | 0,25 |
| RSC ² | 0,09 | 0,75 | 0,01 |

 Poznámka: RSC² – reziduální součet čtverců

Tab. 24: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie M, detektor 29)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 11 | 0,02 | 0,05 |
| Koeficient b | 21 | 0,03 | 0,12 |
| RSC | 2,4-06 | 4,7 | 0,41 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,04 | 31 | 7,8 |
| Koeficient b | -0,23 | -0,26 | -0,21 |
| RSC | 3,8-05 | 16 | 0,18 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,390 | 0,0013 | 0,0033 |
| Koeficient b | 9,78 | 0,010 | 0,03 |
| Koeficient c | 21 | 0,030 | 0,12 |
| RSC | 5,4-07 | 0,280 | 0,14 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 25: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie N, detektor 29)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 4,9 | 0,02 | 0,05 |
| Koeficient b | 6,9 | 0,05 | 0,18 |
| RSC | 8,8-06 | 0,99 | 0,07 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,12 | 18 | 5,1 |
| Koeficient b | -0,26 | -0,19 | -0,17 |
| RSC | 0,0007 | 4,1 | 0,15 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,08 | 0,00 | 0,00 |
| Koeficient b | 4,64 | 0,02 | 0,05 |
| Koeficient c | 6,91 | 0,05 | 0,19 |
| RSC | 4,8-06 | 0,93 | 0,06 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 26: Porovnání RSC̄ pro reciprokní lineární, exponenciální a reciprokní kvadratickní rovnici (použití experimentální body – sloupec nad osou detektoru 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,48 | 0,010 | 0,023 |
| Koeficient b | 0,12 | 0,015 | 0,029 |
| RSC̄ | 0,01 | 32 | 18 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 2,6 | 68 | 21 |
| Koeficient b | -0,21 | -0,25 | -0,18 |
| RSC̄ | 35 | 126 | 194 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Koeficient b | 0,47 | 0,007 | 0,47 |
| Koeficient c | 0,12 | 0,015 | 0,12 |
| RSC̄ | 0,010 | 7,4 | 0,01 |

Poznámka: RSC̄ – reziduální součet čtverců

Tab. 27: Porovnání RSC̄ pro reciprokní lineární, exponenciální a reciprokní kvadratickní rovnici (použití experimentální body – sloupec nad hranou detektoru 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,026 | 0,005 | 0,006 |
| Koeficient b | 3,6 | 0,021 | 0,065 |
| RSC̄ | 0,001 | 19 | 4,7 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,32 | 29 | 13 |
| Koeficient b | -0,08 | -0,15 | -0,17 |
| RSC̄ | 0,003 | 395 | 7,8 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,030 | 0,002 | 0,003 |
| Koeficient b | -0,064 | 0,008 | 0,013 |
| Koeficient c | 3,6 | 0,021 | 0,062 |
| RSC̄ | 0,001 | 8,1 | 1,4 |

Poznámka: RSC̄ – reziduální součet čtverců

Tab. 28: Porovnání RSC̄ pro reciproknou lineární, exponenciální a reciproknou kvadraticknou rovnici (použitě experimentální body – linie A, detektor 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | -6,03 | -0,009 | -0,005 |
| Koeficient b | 41 | 0,25 | 7,1 |
| RSC̄ | 0,41 | 0,03 | 5,5 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,32 | 0,21 | 7,011 |
| Koeficient b | 0,011 | -0,021 | 0,000 |
| RSC̄ | 0,011 | 0,04 | 5,5 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,045 | -0,11 | 0,002 |
| Koeficient b | -0,46 | 1,2 | -0,02 |
| Koeficient c | 3,7 | 3,1 | 0,17 |
| RSC̄ | 0,001 | 0,023 | 1,5 |

Poznámka: RSC̄ – reziduální součet čtverců

Tab. 29: Porovnání RSC̄ pro reciproknou lineární, exponenciální a reciproknou kvadraticknou rovnici (použitě experimentální body – linie B, detektor 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,76 | 0,013 | 0,035 |
| Koeficient b | 2,4 | 0,025 | 0,11 |
| RSC̄ | 0,001 | 0,94 | 0,053 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,39 | 35 | 8,4 |
| Koeficient b | -0,19 | -0,22 | -0,17 |
| RSC̄ | 0,0004 | 29 | 0,56 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,069 | 0,000 | 0,001 |
| Koeficient b | 0,46 | 0,012 | 0,031 |
| Koeficient c | 2,5 | 0,025 | 0,11 |
| RSC̄ | 0,0003 | 0,49 | 0,018 |

Poznámka: RSC̄ – reziduální součet čtverců

Tab. 30: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie C, detektor 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,96 | 0,014 | 0,037 |
| Koeficient b | 3,3 | 0,057 | 0,16 |
| RSC | 0,001 | 2,1 | 0,085 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,3 | 17 | 6,1 |
| Koeficient b | -0,19 | -0,14 | -0,14 |
| RSC | 0,0002 | 4,6 | 0,076 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,089 | 0,0004 | 0,001 |
| Koeficient b | 0,56 | 0,016 | 0,03 |
| Koeficient c | 3,4 | 0,056 | 0,16 |
| RSC | 0,0002 | 1,86 | 0,046 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 31: Porovnání RSC pro reciprokovou lineární, exponenciální a reciprokovou kvadratickou rovnici (použité experimentální body – linie M, detektor 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,74 | 0,74 | 0,038 |
| Koeficient b | 2,4 | 2,4 | 0,14 |
| RSC | 0,001 | 0,0012 | 2,6 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,4 | 4,3 | 7,9 |
| Koeficient b | -0,18 | -0,65 | -0,23 |
| RSC | 0,0002 | 0,0005 | 2,5 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,075 | 0,0003 | 0,009 |
| Koeficient b | 0,42 | 0,014 | -0,003 |
| Koeficient c | 2,4 | 0,03 | 0,15 |
| RSC | 0,00009 | 0,14 | 0,63 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

Tab. 32: Porovnání RSC pro reciprokní, exponenciální a reciprokní kvadratickní rovnici (použití experimentální body – linie N, detektor 30)

| | energie 46 keV | energie 661 keV | energie 1332 keV |
|--------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Rovnice | $d = 1/(a*s+b)$ | | |
| Koeficient a | 0,76 | 0,014 | 0,041 |
| Koeficient b | 2,9 | 0,031 | 0,14 |
| RSC | 0,002 | 3,9 | 0,55 |
| Rovnice | $d = a * e ^ (b * s)$ | | |
| Koeficient a | 0,34 | 30 | 6,4 |
| Koeficient b | -0,18 | -0,21 | -0,15 |
| RSC | 0,0004 | 15 | 1,3 |
| Rovnice | $d = 1 / (a * s ^ 2 + b * s + c)$ | | |
| Koeficient a | 0,096 | 0,0003 | -0,002 |
| Koeficient b | 0,31 | 0,013 | 0,052 |
| Koeficient c | 3,1 | 0,031 | 0,13 |
| RSC | 0,0002 | 3,4 | 0,42 |

Poznámka: RSC – reziduální součet čtverců

5.3. Výsledky dvojdímenzionální regrese

Výsledkem dvojdímenzionální regrese bylo získání koeficientů u, x, y, z rovnice 14 pro oblast nad detektorem a koeficientů j, k, l, m rovnice 15 pro oblast vedle detektoru (odděleně pro každý detektor 23, 29, 30 a energii), čímž byla získána funkce, která popisuje vztah mezi vzdáleností a účinností na základě naměřených hodnot.

Vstupní data, s kterými byl dělán výpočet a koeficienty, které byly získány jsou v následujících tabulkách číslo 33 až 50.

Pro ukázkou jsou k některým tabulkám dvojdímenzionné grafy (obrázek číslo 17 - 46), na kterých je znázorněno, jak odpovídá proklad funkce experimentálními body v jednotlivých sloupcích a liniích, ve kterých byly měřeny.

Ne vždy proklad plně odpovídá experimentálními body, protože jsou zde faktory, jako například nehomogenost pláště krystalu, které není možné zohlednit při vytváření vztahu, z důvodu, že tyto informace nejsou spolu s detektory od výrobce dodávány.

Tab. 33: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 23 a energii 46 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|-------|----------|---------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,00644 | 0,00635 | 0 | u= | 2,7 |
| 2 | 0,1 | 0,00406 | 0,00422 | 0,02 | x= | 0,05 |
| 5 | 0,1 | 0,00175 | 0,00248 | 0,54 | y= | 36 |
| 10 | 0,1 | 0,00161 | 0,00127 | 0,12 | z= | 153 |
| 15 | 0,1 | 0,00065 | 0,00076 | 0,01 | | |
| 20 | 0,1 | 0,00038 | 0,00051 | 0,02 | | |
| 0,1 | 4,75 | 0,0051 | 0,00511 | 0,00 | | |
| 2 | 4,75 | 0,00392 | 0,004 | 0,01 | | |
| 5 | 4,75 | 0,00295 | 0,00244 | 0,26 | | |
| 10 | 4,75 | 0,00145 | 0,00126 | 0,04 | | |
| 15 | 4,75 | 0,0005 | 0,00076 | 0,07 | | |
| 20 | 4,75 | 0,00032 | 0,00051 | 0,04 | | |
| 0,1 | -4,75 | 0,0051 | 0,00511 | 0,00 | | |
| 2 | -4,75 | 0,00392 | 0,004 | 0,01 | | |
| 5 | -4,75 | 0,00295 | 0,00244 | 0,26 | | |
| 10 | -4,75 | 0,00145 | 0,00126 | 0,04 | | |
| 15 | -4,75 | 0,0005 | 0,00076 | 0,07 | | |
| 20 | -4,75 | 0,00032 | 0,00051 | 0,04 | | |
| | | | suma= | 2,34 | | |

Poznámka: RSC²- reziduální součet čtverců

h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

u, x, y, z – koeficienty funkce F

Tab. 34: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 23 a energii 46 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|----------|----------------|----|----------|
| 0,1 | 0,1 | 0,004722 | 0,004082 | 0,409 | j= | 2,29E-05 |
| 0,1 | 1 | 0,003452 | 0,002898 | 0,307 | k= | 46442 |
| 0,1 | 3 | 0,002186 | 0,001744 | 0,196 | l= | 0,51 |
| 0,1 | 5 | 0,001427 | 0,001234 | 0,037 | m= | 233 |
| 0,1 | 7 | 0,001079 | 0,000947 | 0,018 | | |
| 5 | 0,1 | 0,005001 | 0,004077 | 0,854 | | |
| 5 | 1 | 0,003134 | 0,002898 | 0,056 | | |
| 5 | 3 | 0,002046 | 0,001744 | 0,091 | | |
| 5 | 5 | 0,001249 | 0,001234 | 0,000 | | |
| 5 | 7 | 0,000791 | 0,000947 | 0,024 | | |
| 10 | 0,1 | 0,00205 | 0,004063 | 4,055 | | |
| 10 | 1 | 0,001052 | 0,002897 | 3,404 | | |
| 10 | 3 | 0,001028 | 0,001743 | 0,511 | | |
| 10 | 5 | 0,000808 | 0,001234 | 0,181 | | |

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ |
|-----|-----|----------|----------|----------------|
| 10 | 7 | 0,000697 | 0,000947 | 0,062 |
| 2,5 | 0,1 | 0,003847 | 0,004081 | 0,055 |
| 2,5 | 1 | 0,003031 | 0,002898 | 0,018 |
| 2,5 | 3 | 0,001976 | 0,001744 | 0,054 |
| 2,5 | 5 | 0,001344 | 0,001234 | 0,012 |
| 2,5 | 7 | 0,000962 | 0,000947 | 0,000 |
| 7,5 | 0,1 | 0,004931 | 0,004071 | 0,740 |
| 7,5 | 1 | 0,003221 | 0,002898 | 0,105 |
| 7,5 | 3 | 0,002099 | 0,001743 | 0,126 |
| 7,5 | 5 | 0,001384 | 0,001234 | 0,022 |
| 7,5 | 7 | 0,001014 | 0,000947 | 0,005 |
| | | | suma= | 29,96 |

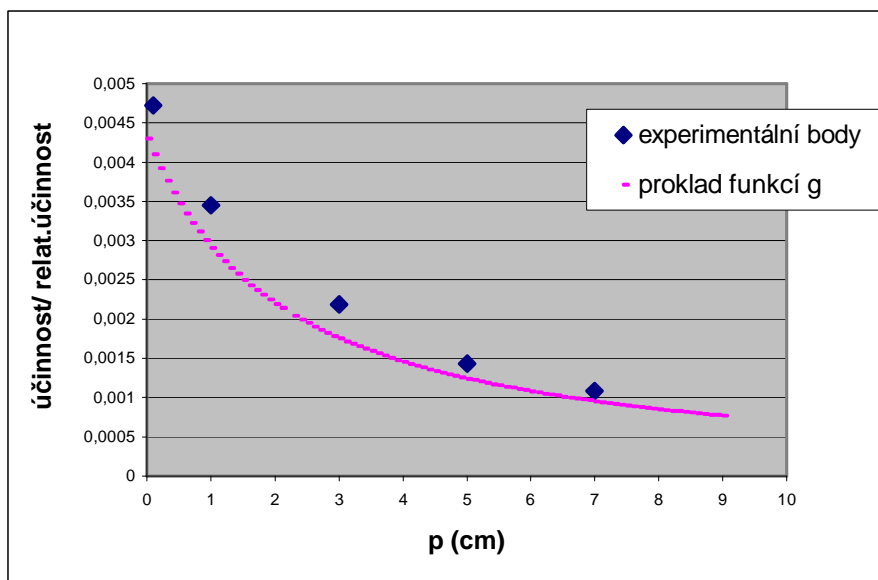
Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

o, p – uvedeno v obrázku číslo 9

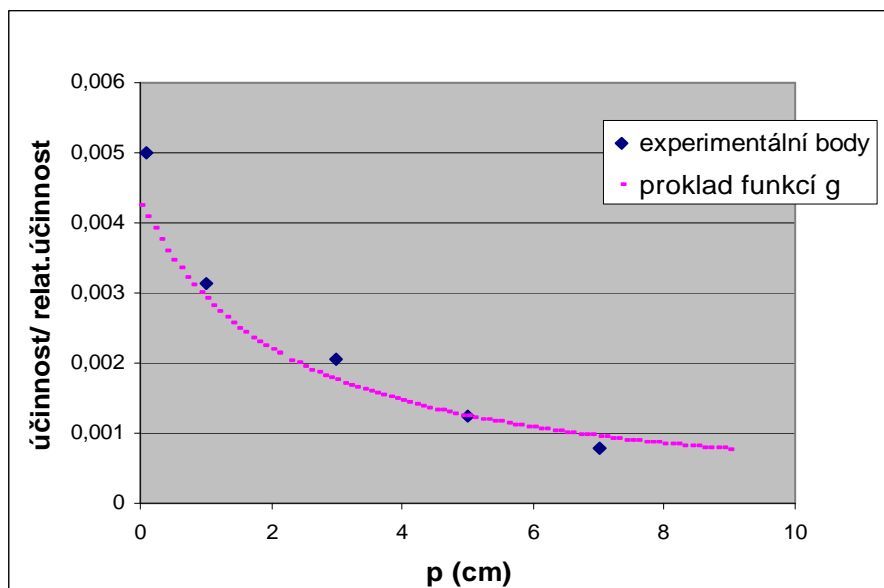
η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

j, k, l, m – koeficienty funkce F

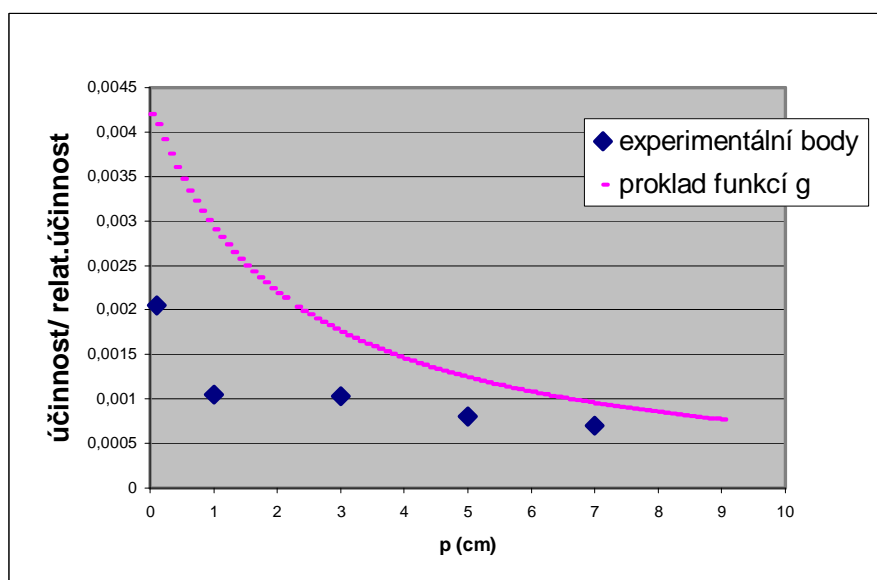
Obr. 17: Proklad funkcí G linie A vedle detektoru 23, energie 46 keV



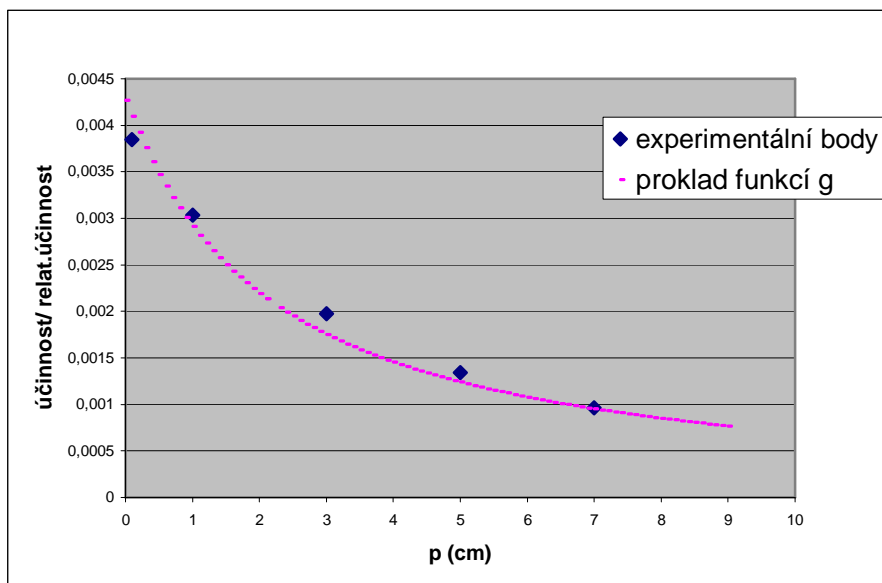
Obr. 18: Proklad funkcí G linie B vedle detektoru 23, energie 46 keV



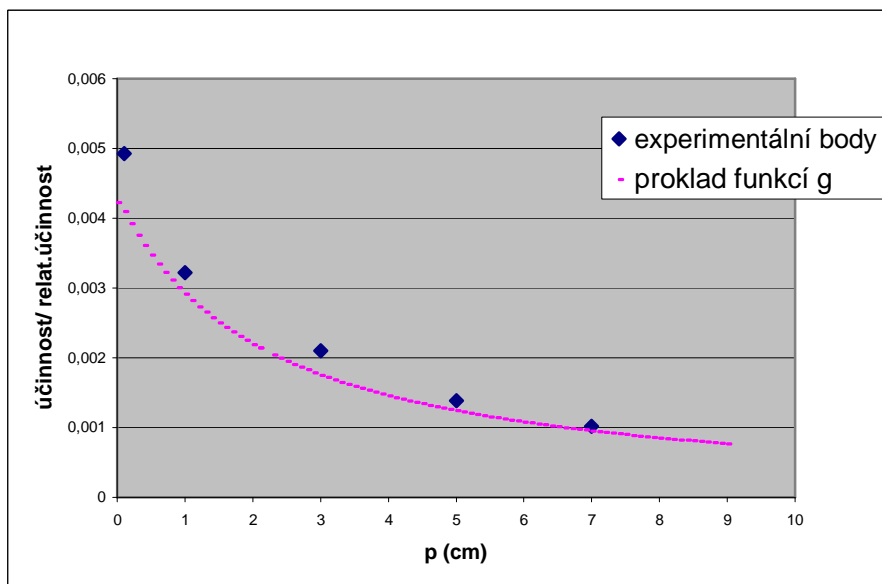
Obr. 19: Proklad funkcí G linie C vedle detektoru 23, energie 46 keV



Obr. 20: Proklad funkcí G linie M vedle detektoru 23, energie 46 keV



Obr. 21: Proklad funkcí G linie N vedle detektoru 23, energie 46 keV



Tab. 35: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 23 a energii 661 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|-------|----------|---------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,05051 | 0,0506 | 0 | u= | 0,3 |
| 2 | 0,1 | 0,02055 | 0,01912 | 2,07 | x= | 0,11 |
| 5 | 0,1 | 0,01223 | 0,00927 | 8,73 | y= | 16 |
| 10 | 0,1 | 0,00615 | 0,00474 | 2,00 | z= | 18 |
| 15 | 0,1 | 0,0026 | 0,00305 | 0,20 | | |
| 20 | 0,1 | 0,00163 | 0,00218 | 0,31 | | |
| 0,1 | 4,75 | 0,02332 | 0,02222 | 1,22 | | |
| 2 | 4,75 | 0,01278 | 0,0161 | 11,06 | | |
| 5 | 4,75 | 0,00913 | 0,00889 | 0,06 | | |
| 10 | 4,75 | 0,00517 | 0,00467 | 0,25 | | |
| 15 | 4,75 | 0,00255 | 0,00303 | 0,23 | | |
| 20 | 4,75 | 0,00152 | 0,00217 | 0,42 | | |
| 0,1 | -4,75 | 0,02332 | 0,02222 | 1,22 | | |
| 2 | -4,75 | 0,01278 | 0,0161 | 11,06 | | |
| 5 | -4,75 | 0,00913 | 0,00889 | 0,06 | | |
| 10 | -4,75 | 0,00517 | 0,00467 | 0,25 | | |
| 15 | -4,75 | 0,00255 | 0,00303 | 0,23 | | |
| 20 | -4,75 | 0,00152 | 0,00217 | 0,42 | | |
| | | | suma= | 40 | | |

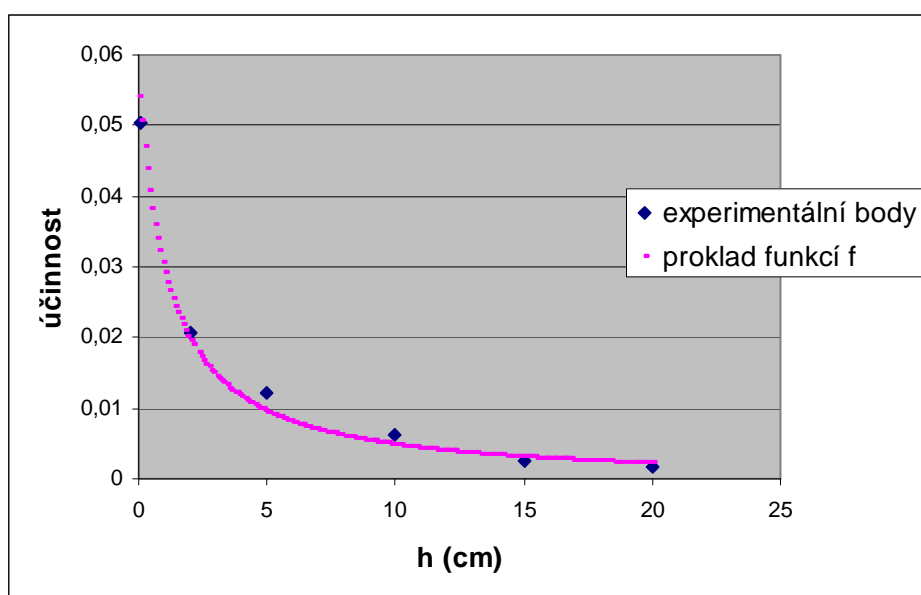
Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

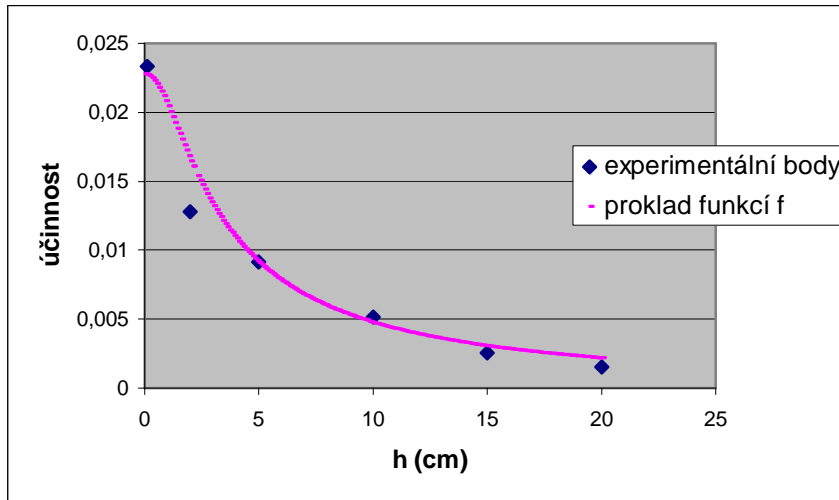
η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

u, x, y, z – koeficienty funkce F

Obr. 22: Proklad funkcí F nad osou detektoru 23, energie 661 keV



Obr. 23: Proklad funkcí F nad hranou detektoru 23 energie 661 keV



Tab. 36: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 23 a energii 661 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^* - G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|---------|------------------|----|--------|
| 0,1 | 0,1 | 0,01714 | 0,03519 | 326,0 | j= | 0,0002 |
| 0,1 | 1 | 0,01208 | 0,02751 | 238,1 | k= | 2817 |
| 0,1 | 3 | 0,00989 | 0,01765 | 60,2 | l= | 0,16 |
| 0,1 | 5 | 0,00772 | 0,01239 | 21,8 | m= | 28 |
| 0,1 | 7 | 0,00615 | 0,00923 | 9,5 | | |
| 5 | 0,1 | 0,031803 | 0,03481 | 9,0 | | |
| 5 | 1 | 0,024592 | 0,02748 | 8,3 | | |
| 5 | 3 | 0,016469 | 0,01764 | 1,4 | | |
| 5 | 5 | 0,011183 | 0,01239 | 1,5 | | |
| 5 | 7 | 0,008197 | 0,00922 | 1,1 | | |
| 10 | 0,1 | 0,053079 | 0,03405 | 362,2 | | |
| 10 | 1 | 0,035052 | 0,02739 | 58,8 | | |
| 10 | 3 | 0,022701 | 0,01763 | 25,8 | | |
| 10 | 5 | 0,0148 | 0,01239 | 5,8 | | |
| 10 | 7 | 0,010071 | 0,00922 | 0,7 | | |
| 2,5 | 0,1 | 0,020364 | 0,03509 | 216,7 | | |
| 2,5 | 1 | 0,017693 | 0,02750 | 96,2 | | |
| 2,5 | 3 | 0,013075 | 0,01765 | 20,9 | | |
| 2,5 | 5 | 0,009681 | 0,01239 | 7,4 | | |
| 2,5 | 7 | 0,007159 | 0,00923 | 4,3 | | |
| 7,5 | 0,1 | 0,045512 | 0,03445 | 122,4 | | |
| 7,5 | 1 | 0,030156 | 0,02744 | 7,4 | | |
| 7,5 | 3 | 0,017637 | 0,01763 | 0,0 | | |
| 7,5 | 5 | 0,012519 | 0,01239 | 0,0 | | |
| 7,5 | 7 | 0,008235 | 0,00922 | 1,0 | | |
| | | | suma= | 1606 | | |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců
 o, p – uvedeno v obrázku číslo 9
 η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností
 j, k, l, m – koeficienty funkce F

Tab. 37: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 23 a energii 1332 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|-------|----------|---------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,0212 | 0,02132 | 0 | u= | 11 |
| 2 | 0,1 | 0,01144 | 0,011 | 0,20 | x= | 0,15 |
| 5 | 0,1 | 0,00294 | 0,0031 | 0,03 | y= | 0 |
| 10 | 0,1 | 0,00158 | 0,00087 | 0,50 | z= | 47 |
| 15 | 0,1 | 0,00077 | 0,0004 | 0,14 | | |
| 20 | 0,1 | 0,00049 | 0,00022 | 0,07 | | |
| 0,1 | 4,75 | 0,01198 | 0,01182 | 0,02 | | |
| 2 | 4,75 | 0,00748 | 0,00778 | 0,09 | | |
| 5 | 4,75 | 0,00224 | 0,00278 | 0,29 | | |
| 10 | 4,75 | 0,00133 | 0,00084 | 0,24 | | |
| 15 | 4,75 | 0,00071 | 0,00039 | 0,10 | | |
| 20 | 4,75 | 0,00046 | 0,00022 | 0,06 | | |
| 0,1 | -4,75 | 0,01198 | 0,01182 | 0,02 | | |
| 2 | -4,75 | 0,00748 | 0,00778 | 0,09 | | |
| 5 | -4,75 | 0,00224 | 0,00278 | 0,29 | | |
| 10 | -4,75 | 0,00133 | 0,00084 | 0,24 | | |
| 15 | -4,75 | 0,00071 | 0,00039 | 0,10 | | |
| 20 | -4,75 | 0,00046 | 0,00022 | 0,06 | | |
| | | | suma= | 2,55 | | |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců
 h, r – uvedeno v obrázku číslo 9
 η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností
 u, x, y, z – koeficienty funkce F

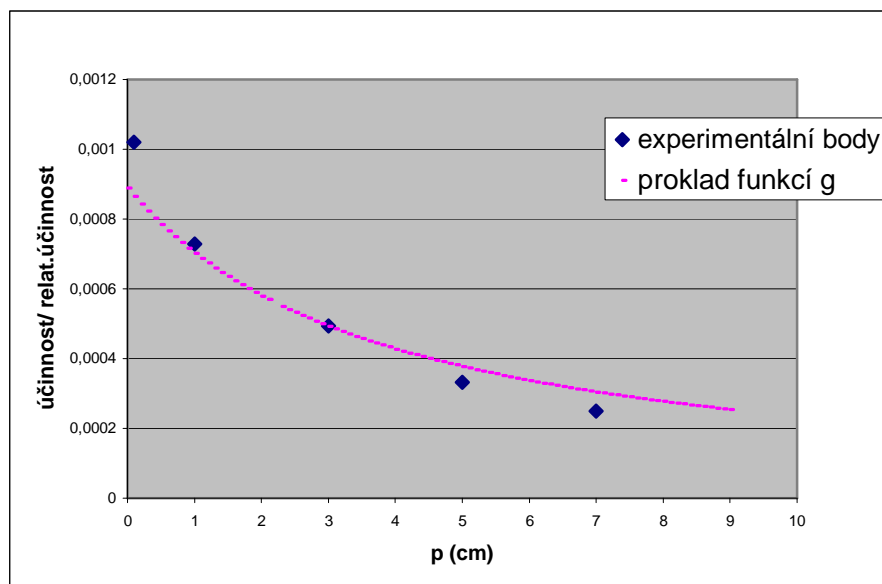
Tab. 38: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 23 a energii 1332 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|------------|----------------|----|----------|
| 0,1 | 0,1 | 0,001021 | 0,00086492 | 0,024489 | j= | 2,36E-05 |
| 0,1 | 1 | 0,000729 | 0,00070444 | 0,000603 | k= | 73167 |
| 0,1 | 3 | 0,000493 | 0,00049631 | 1,32E-05 | l= | 1,1 |
| 0,1 | 5 | 0,000333 | 0,0003811 | 0,002289 | m= | 1127 |
| 0,1 | 7 | 0,00025 | 0,00030799 | 0,003323 | | |
| 5 | 0,1 | 0,001085 | 0,00086455 | 0,048818 | | |
| 5 | 1 | 0,000757 | 0,00070442 | 0,00277 | | |
| 5 | 3 | 0,000493 | 0,0004963 | 1,31E-05 | | |
| 5 | 5 | 0,000316 | 0,0003811 | 0,004181 | | |
| 5 | 7 | 0,000214 | 0,00030799 | 0,008778 | | |

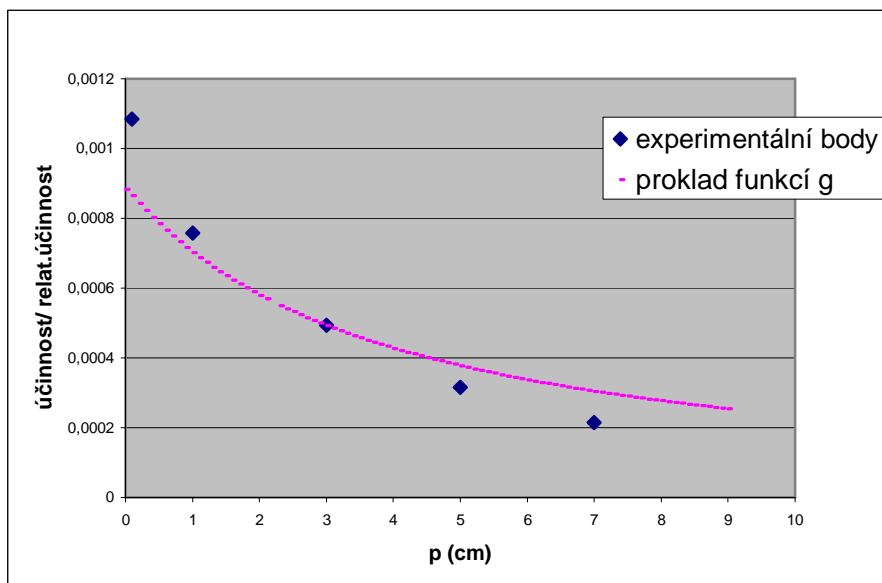
| o | p | η^* | G | $(\eta^* - G)^2$ |
|-----|-----|----------|------------|------------------|
| 10 | 0,1 | 0,000653 | 0,00086348 | 0,044344 |
| 10 | 1 | 0,000489 | 0,00070434 | 0,046512 |
| 10 | 3 | 0,000372 | 0,00049629 | 0,01542 |
| 10 | 5 | 0,000272 | 0,00038109 | 0,01182 |
| 10 | 7 | 0,000209 | 0,00030799 | 0,009781 |
| 2,5 | 0,1 | 0,001055 | 0,00086483 | 0,03634 |
| 2,5 | 1 | 0,000793 | 0,00070443 | 0,007861 |
| 2,5 | 3 | 0,000509 | 0,00049631 | 0,000154 |
| 2,5 | 5 | 0,000336 | 0,0003811 | 0,002028 |
| 2,5 | 7 | 0,00024 | 0,00030799 | 0,004577 |
| 7,5 | 0,1 | 0,000917 | 0,0008641 | 0,002827 |
| 7,5 | 1 | 0,000665 | 0,00070438 | 0,001558 |
| 7,5 | 3 | 0,000485 | 0,0004963 | 0,000135 |
| 7,5 | 5 | 0,000308 | 0,0003811 | 0,00534 |
| 7,5 | 7 | 0,000234 | 0,00030799 | 0,005426 |
| | | | suma= | 0,289399 |

Poznámka: R² - reziduální součet čtverců,
 o,p – uvedeno v obrázku číslo 9
 η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností
 j, k, l, m – koeficienty funkce F

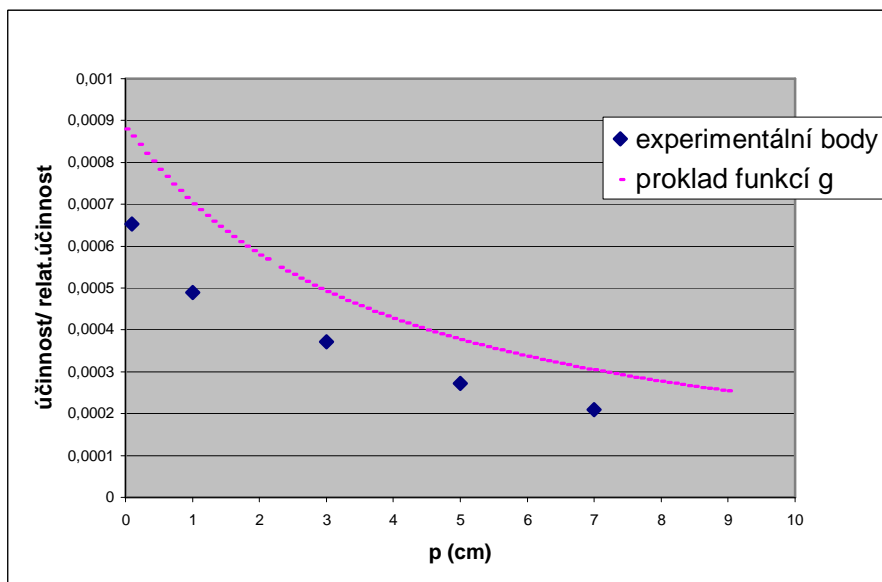
Obr. 24: Proklad funkcí G vedle detektoru 23, linie A, energie 1332 keV



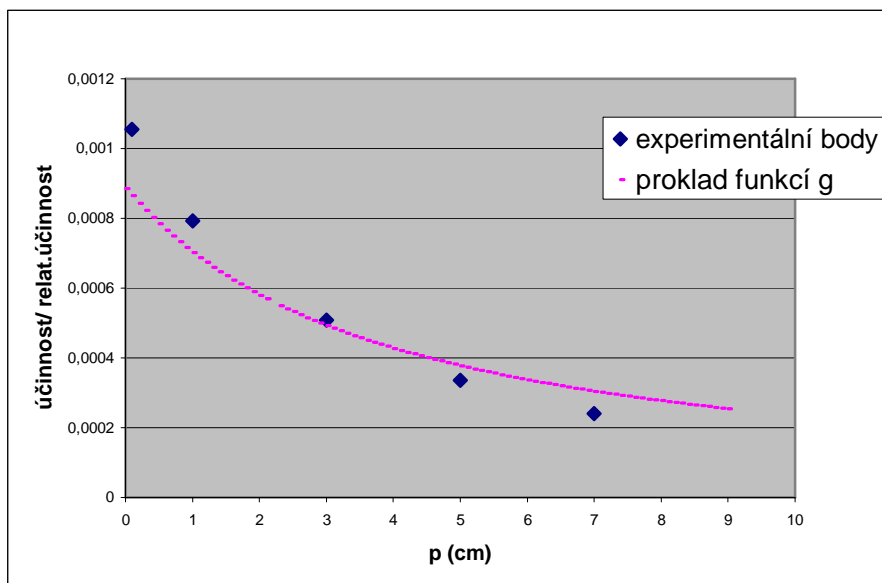
Obr. 25: Proklad funkcí G vedle detektoru 23, linie B, energie 1332 keV



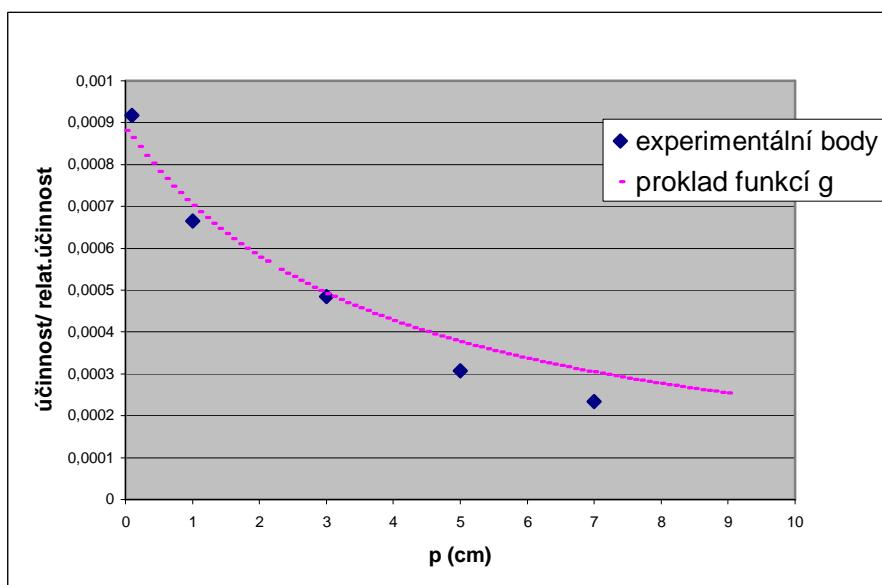
Obr. 26: Proklad funkcí G vedle detektoru 23, linie C, energie 1332 keV



Obr. 27: Proklad funkcí G vedle detektoru 23, linie M, energie 1332 keV



Obr. 28: Proklad funkcí G vedle detektoru 23, linie N, energie 1332 keV



Tab.č. 39: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 29 a energii 46 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|------|----------|---------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,18584 | 0,18574 | 0 | u= | 0,19 |
| 2 | 0,1 | 0,06258 | 0,06497 | 5,72 | x= | 0,46 |
| 5 | 0,1 | 0,04073 | 0,02933 | 130,01 | y= | 4,9 |
| 10 | 0,1 | 0,01859 | 0,01374 | 23,52 | z= | 4,8 |
| 15 | 0,1 | 0,00757 | 0,00828 | 0,50 | | |
| 20 | 0,1 | 0,00461 | 0,00561 | 1,01 | | |
| 0,1 | 5,1 | 0,04873 | 0,04147 | 52,76 | | |
| 2 | 5,1 | 0,02677 | 0,03637 | 92,22 | | |
| 5 | 5,1 | 0,02084 | 0,02399 | 9,96 | | |
| 10 | 5,1 | 0,01433 | 0,01284 | 2,21 | | |
| 15 | 5,1 | 0,00636 | 0,008 | 2,70 | | |
| 20 | 5,1 | 0,00402 | 0,0055 | 2,20 | | |
| 0,1 | -5,1 | 0,04873 | 0,04147 | 52,76 | | |
| 2 | -5,1 | 0,02677 | 0,03637 | 92,22 | | |
| 5 | -5,1 | 0,02084 | 0,02399 | 9,96 | | |
| 10 | -5,1 | 0,01433 | 0,01284 | 2,21 | | |
| 15 | -5,1 | 0,00636 | 0,008 | 2,70 | | |
| 20 | -5,1 | 0,00402 | 0,0055 | 2,20 | | |
| | | | suma= | 485 | | |

Poznámka: RSC²- reziduální součet čtverců

h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

u, x, y, z – koeficienty funkce F

Tab. 40: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 29 a energii 46 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|----------|----------------|----|--------|
| 0,1 | 0,1 | 0,000648 | 0,001000 | 0,124 | j= | 0,0001 |
| 0,1 | 1 | 0,000456 | 0,000778 | 0,104 | k= | 7497 |
| 0,1 | 3 | 0,000374 | 0,000520 | 0,021 | l= | 3,7 |
| 0,1 | 5 | 0,000245 | 0,000390 | 0,021 | m= | 968 |
| 0,1 | 7 | 0,00012 | 0,000311 | 0,037 | | |
| 4 | 0,1 | 0,001068 | 0,000997 | 0,005 | | |
| 4 | 1 | 0,000564 | 0,000778 | 0,046 | | |
| 4 | 3 | 0,000432 | 0,000520 | 0,008 | | |
| 4 | 5 | 0,000352 | 0,000390 | 0,001 | | |
| 4 | 7 | 0,000306 | 0,000311 | 0,000 | | |
| 8 | 0,1 | 0,022773 | 0,000989 | 475 | | |
| 8 | 1 | 0,015184 | 0,000777 | 208 | | |
| 8 | 3 | 0,00497 | 0,000520 | 20 | | |
| 8 | 5 | 0,003058 | 0,000390 | 7,12 | | |
| 8 | 7 | 0,002135 | 0,000311 | 3,3257 | | |

| o | p | η^* | G | $(\eta^* - G)^2$ |
|---|-----|----------|--------------|------------------|
| 2 | 0,1 | 0,001039 | 0,000999 | 0,002 |
| 2 | 1 | 0,000708 | 0,000778 | 0,005 |
| 2 | 3 | 0,000402 | 0,000520 | 0,014 |
| 2 | 5 | 0,00029 | 0,000390 | 0,010 |
| 2 | 7 | 0,000263 | 0,000311 | 0,002 |
| 6 | 0,1 | 0,001327 | 0,000993 | 0,112 |
| 6 | 1 | 0,001169 | 0,000777 | 0,153 |
| 6 | 3 | 0,001056 | 0,000520 | 0,287 |
| 6 | 5 | 0,000678 | 0,000390 | 0,083 |
| 6 | 7 | 0,000483 | 0,000311 | 0,030 |
| | | | suma= | 713 |

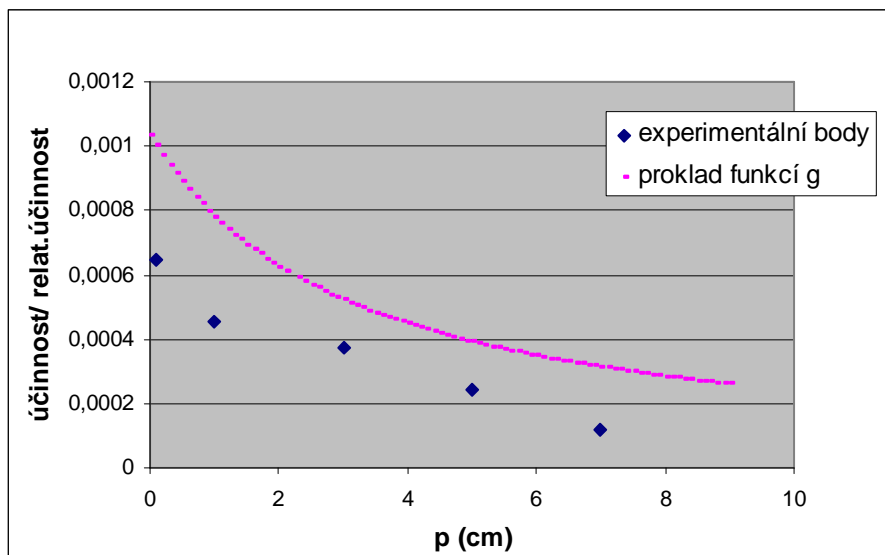
Poznámka: RSC² - reziduální součet čtverců

o, p – uvedeno v obrázku číslo 9

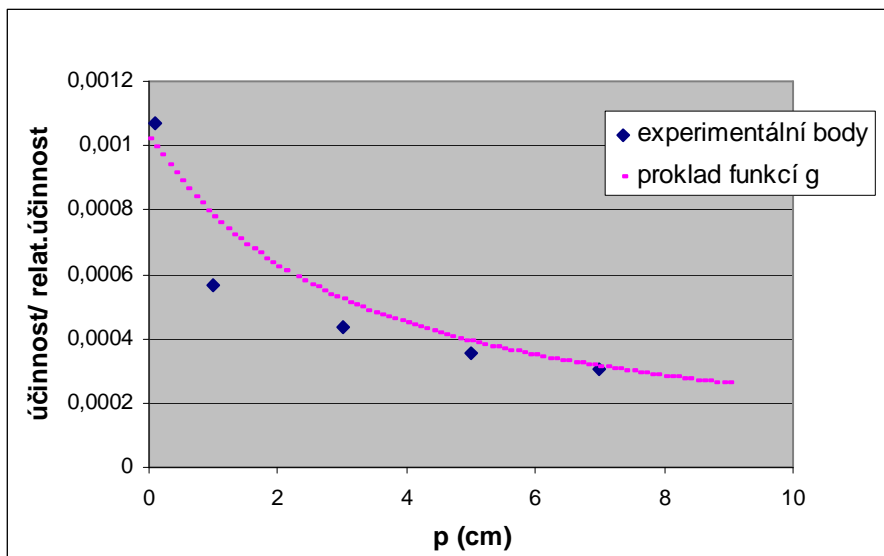
η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

j, k, l, m – koeficienty funkce F

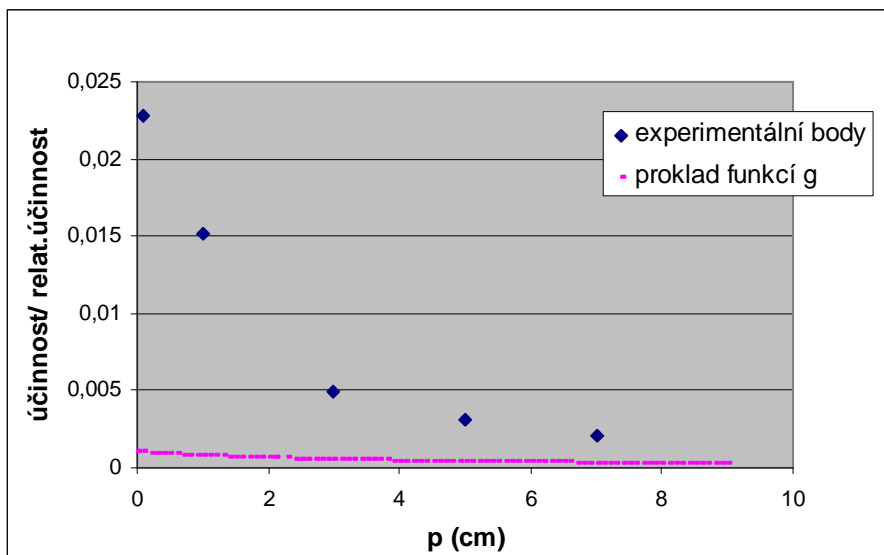
Obr. 29: Proklad funkce G vedle detektoru 29, linie A, energie 46 keV



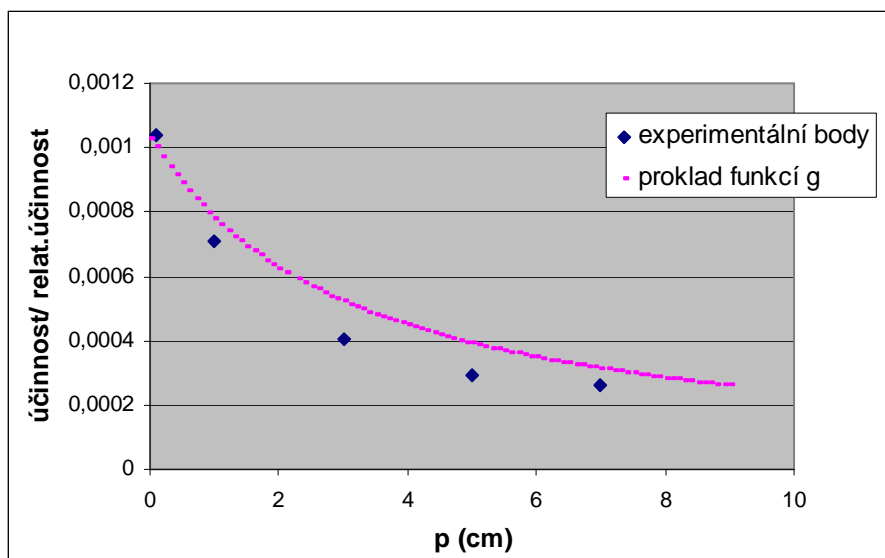
Obr. 30: Proklad funkce G vedle detektoru 29, linie B, energie 46 keV



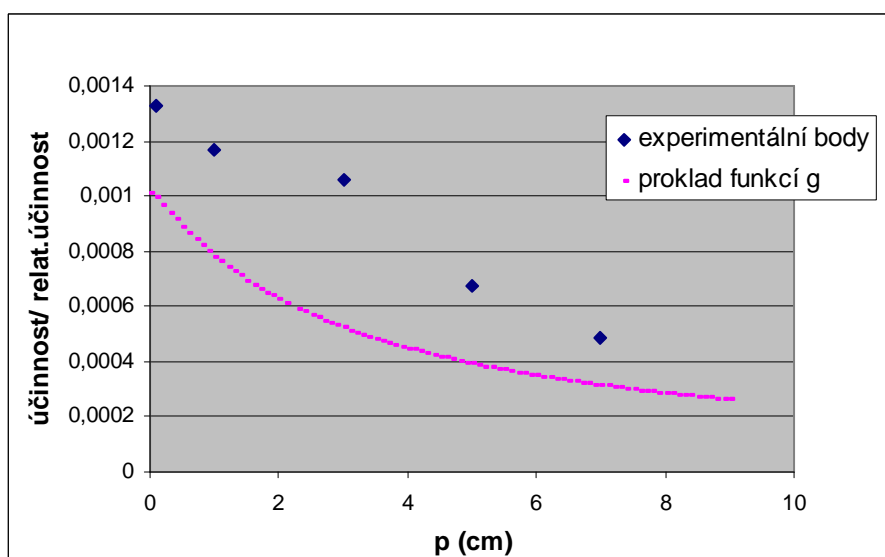
Obr. 31: Proklad funkce G vedle detektoru 29, linie C, energie 46 keV



Obr. 32: Proklad funkcí G vedle detektoru 29, linie M, energie 46 keV



Obr. 33: Proklad funkcí G vedle detektoru 29, linie N, energie 46 keV



Tab.č. 41: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 29 a energii 661 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|------|----------|----------|----------------|----|-------|
| 0,1 | 0,1 | 0,55223 | 0,099688 | 204795 | u= | 0,068 |
| 2 | 0,1 | 0,020074 | 0,020586 | 0,26 | x= | 0,24 |
| 5 | 0,1 | 0,012149 | 0,009027 | 9,74 | y= | 20 |
| 10 | 0,1 | 0,006258 | 0,004605 | 2,73 | z= | 7,8 |
| 15 | 0,1 | 0,002724 | 0,003059 | 0,11 | | |
| 20 | 0,1 | 0,001721 | 0,002272 | 0,30 | | |
| 0,1 | 5,1 | 0,018238 | 0,017031 | 1,46 | | |
| 2 | 5,1 | 0,011322 | 0,013662 | 5,47 | | |
| 5 | 5,1 | 0,008568 | 0,008125 | 0,20 | | |
| 10 | 5,1 | 0,004719 | 0,004469 | 0,06 | | |
| 15 | 5,1 | 0,002515 | 0,003016 | 0,25 | | |
| 20 | 5,1 | 0,001621 | 0,002254 | 0,40 | | |
| 0,1 | -5,1 | 0,018184 | 0,017031 | 1,33 | | |
| 2 | -5,1 | 0,011289 | 0,013662 | 5,63 | | |
| 5 | -5,1 | 0,008543 | 0,008125 | 0,17 | | |
| 10 | -5,1 | 0,004705 | 0,004469 | 0,06 | | |
| 15 | -5,1 | 0,002508 | 0,003016 | 0,26 | | |
| 20 | -5,1 | 0,001621 | 0,002254 | 0,40 | | |
| | | | suma= | 204824 | | |

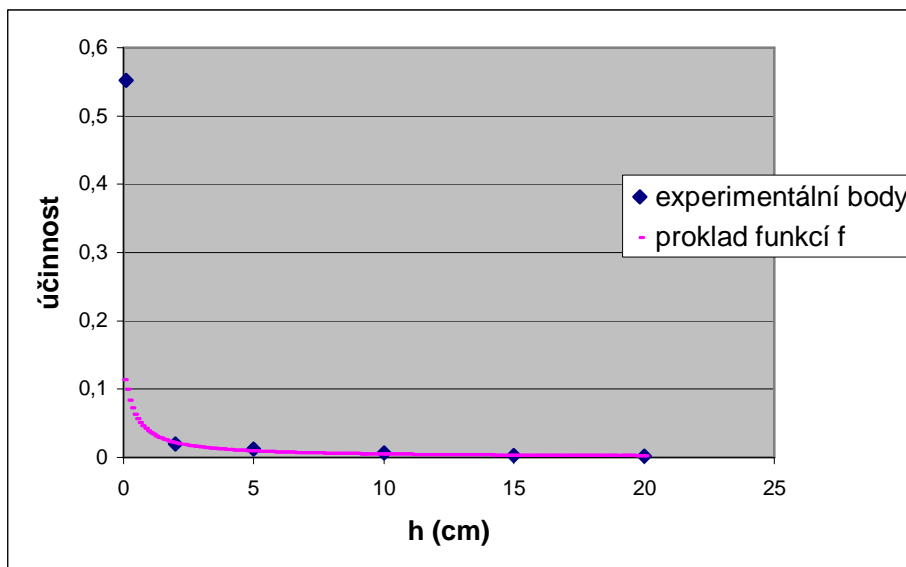
Poznámka: RSČ- reziduální součet čtverců

h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

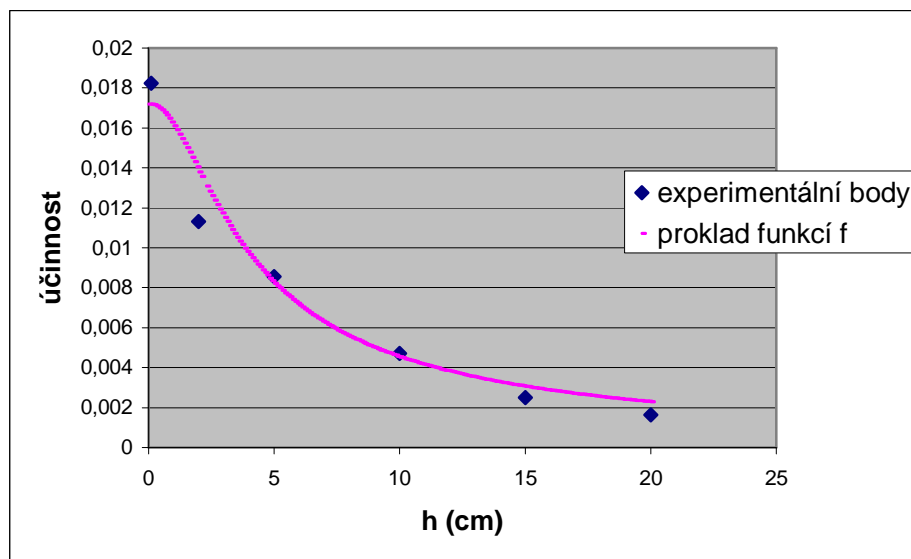
η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

u, x, y, z – koeficienty funkce F

Obr. 34: Proklad funkcí F nad osou detektoru 29, energie 661 keV



Obr. 35: Proklad funkcí F nad osou detektoru 29, energie 46 keV



Tab. 42: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 29, energii 661 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^* - G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|----------|------------------|----|--------|
| 0,1 | 0,1 | 0,033012 | 0,029536 | 12,077 | j= | 0,0009 |
| 0,1 | 1 | 0,023279 | 0,022807 | 0,223 | k= | 2817 |
| 0,1 | 3 | 0,014482 | 0,012384 | 4,402 | l= | 0,16 |
| 0,1 | 5 | 0,008802 | 0,007250 | 2,410 | m= | 33 |
| 0,1 | 7 | 0,006553 | 0,004643 | 3,652 | | |
| 4 | 0,1 | 0,042225 | 0,029342 | 165,976 | | |
| 4 | 1 | 0,023554 | 0,022787 | 0,587 | | |
| 4 | 3 | 0,01733 | 0,012380 | 24,493 | | |
| 4 | 5 | 0,008055 | 0,007249 | 0,649 | | |
| 4 | 7 | 0,005553 | 0,004642 | 0,829 | | |
| 8 | 0,1 | 0,016902 | 0,028913 | 144 | | |
| 8 | 1 | 0,011716 | 0,022728 | 121 | | |
| 8 | 3 | 0,008543 | 0,012370 | 15 | | |
| 8 | 5 | 0,005638 | 0,007246 | 2,58 | | |
| 8 | 7 | 0,003905 | 0,004641 | 0,5413 | | |
| 2 | 0,1 | 0,039907 | 0,029484 | 108,641 | | |
| 2 | 1 | 0,026849 | 0,022802 | 16,375 | | |
| 2 | 3 | 0,014889 | 0,012383 | 6,279 | | |
| 2 | 5 | 0,008705 | 0,007250 | 2,120 | | |
| 2 | 7 | 0,00659 | 0,004642 | 3,793 | | |
| 6 | 0,1 | 0,022821 | 0,029144 | 39,979 | | |

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ |
|---|---|----------|----------|----------------|
| 6 | 1 | 0,015865 | 0,022763 | 47,575 |
| 6 | 3 | 0,01135 | 0,012376 | 1,054 |
| 6 | 5 | 0,007749 | 0,007248 | 0,252 |
| 6 | 7 | 0,005522 | 0,004642 | 0,775 |
| | | | suma= | 725 |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

o, p – uvedeno v obrázku číslo 9

η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

j, k, l, m – koeficienty funkce F

Tab.č. 43: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 29 a energii 1332 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|------|----------|------------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,026076 | 0,02606333 | 0,000 | u= | 0 |
| 2 | 0,1 | 0,004656 | 0,0051581 | 0,252 | x= | 0,30 |
| 5 | 0,1 | 0,003145 | 0,00226713 | 0,771 | y= | 82 |
| 10 | 0,1 | 0,001678 | 0,00117211 | 0,256 | z= | 29 |
| 15 | 0,1 | 0,000773 | 0,00079036 | 0,000 | | |
| 20 | 0,1 | 0,000492 | 0,00059618 | 0,011 | | |
| 0,1 | 5,1 | 0,004012 | 0,00385745 | 0,024 | | |
| 2 | 5,1 | 0,002885 | 0,00320475 | 0,102 | | |
| 5 | 5,1 | 0,002153 | 0,00199617 | 0,024 | | |
| 10 | 5,1 | 0,001274 | 0,00113036 | 0,021 | | |
| 15 | 5,1 | 0,000659 | 0,00077732 | 0,014 | | |
| 20 | 5,1 | 0,000451 | 0,00059056 | 0,019 | | |
| 0,1 | -5,1 | 0,004012 | 0,00385745 | 0,024 | | |
| 2 | -5,1 | 0,002885 | 0,00320475 | 0,102 | | |
| 5 | -5,1 | 0,002153 | 0,00199617 | 0,024 | | |
| 10 | -5,1 | 0,001274 | 0,00113036 | 0,021 | | |
| 15 | -5,1 | 0,000659 | 0,00077732 | 0,014 | | |
| 20 | -5,1 | 0,000451 | 0,00059056 | 0,019 | | |
| | | | suma= | 1,7 | | |

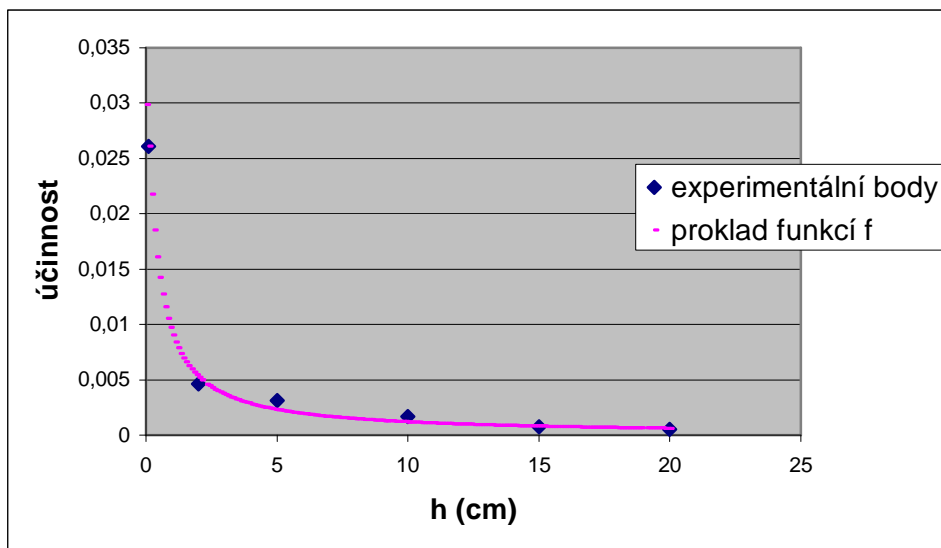
Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

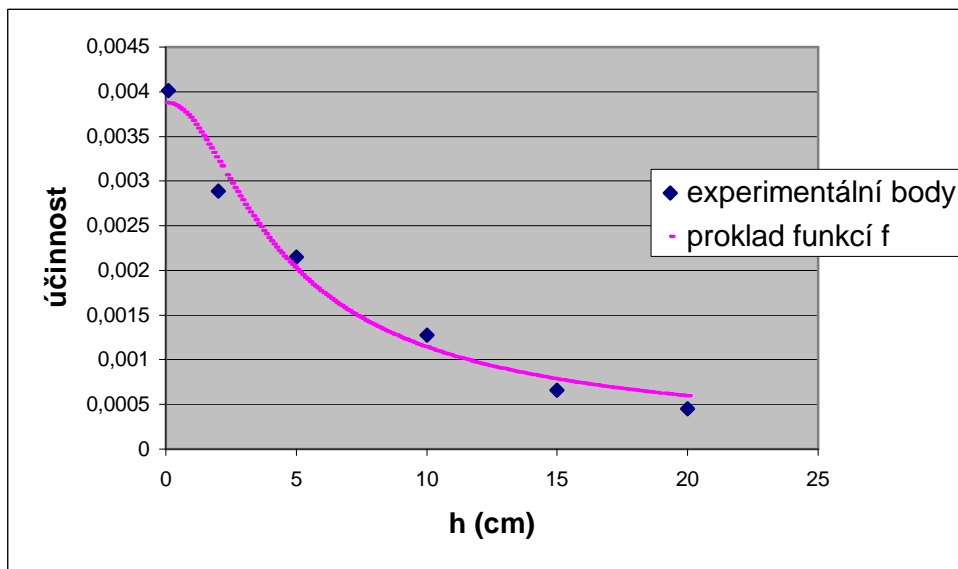
η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

u, x, y, z – koeficienty funkce F

Obr. 36: Proklad funkce F nad osou detektoru 29 a energii 1332 keV



Obr. 37: Proklad funkcí F nad hranou detektoru 29 a energii 1332 keV



Tab. 44: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 29 a energii 1332 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|----------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,006783 | 0,007191 | 0,167 | j= | 1,7 |
| 0,1 | 1 | 0,005245 | 0,006668 | 2,024 | k= | 6,5 |
| 0,1 | 3 | 0,00376 | 0,004223 | 0,214 | l= | 0,10 |
| 0,1 | 5 | 0,002495 | 0,002440 | 0,003 | m= | 139 |
| 0,1 | 7 | 0,001801 | 0,001494 | 0,094 | | |
| 4 | 0,1 | 0,007893 | 0,006025 | 3,490 | | |
| 4 | 1 | 0,005506 | 0,005658 | 0,023 | | |
| 4 | 3 | 0,003807 | 0,003796 | 0,000 | | |
| 4 | 5 | 0,002475 | 0,002291 | 0,034 | | |
| 4 | 7 | 0,001625 | 0,001437 | 0,036 | | |
| 8 | 0,1 | 0,004042 | 0,004063 | 0,000 | | |
| 8 | 1 | 0,003163 | 0,003894 | 0,535 | | |
| 8 | 3 | 0,002431 | 0,002912 | 0,232 | | |
| 8 | 5 | 0,001859 | 0,001937 | 0,006 | | |
| 8 | 7 | 0,001625 | 0,001289 | 0,113 | | |
| 2 | 0,1 | 0,008065 | 0,006856 | 1,463 | | |
| 2 | 1 | 0,006062 | 0,006383 | 0,103 | | |
| 2 | 3 | 0,004305 | 0,004108 | 0,039 | | |
| 2 | 5 | 0,002665 | 0,002401 | 0,070 | | |
| 2 | 7 | 0,001889 | 0,001479 | 0,168 | | |
| 6 | 0,1 | 0,005433 | 0,005015 | 0,174 | | |
| 6 | 1 | 0,0041 | 0,004759 | 0,434 | | |
| 6 | 3 | 0,003075 | 0,003370 | 0,087 | | |
| 6 | 5 | 0,002182 | 0,002129 | 0,003 | | |
| 6 | 7 | 0,001625 | 0,00137 | 0,065 | | |
| | | | suma= | 9,6 | | |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

o, p – uvedeno v obrázku číslo 9

η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

j, k, l, m – koeficienty funkce F

Tab.č. 45: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 30 a energii 46 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|-----|----------|------------|----------------|----|-----|
| 0,1 | 0,1 | 0,015594 | 0,01537238 | 0,049 | u= | 1,4 |
| 2 | 0,1 | 0,010567 | 0,01125482 | 0,473 | x= | 3,6 |
| 5 | 0,1 | 0,007438 | 0,00674277 | 0,483 | y= | 10 |
| 10 | 0,1 | 0,003796 | 0,00330521 | 0,241 | z= | 63 |
| 15 | 0,1 | 0,001531 | 0,00190237 | 0,138 | | |
| 20 | 0,1 | 0,000909 | 0,00122306 | 0,098 | | |
| 0,1 | 5,4 | 0,003309 | 0,00321828 | 0,008 | | |
| 2 | 5,4 | 0,003026 | 0,00314276 | 0,014 | | |
| 5 | 5,4 | 0,002919 | 0,0028016 | 0,014 | | |

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ |
|-----|------|----------|------------|----------------|
| 10 | 5,4 | 0,002036 | 0,00204078 | 0,000 |
| 15 | 5,4 | 0,001118 | 0,00142567 | 0,095 |
| 20 | 5,4 | 0,000769 | 0,00101384 | 0,060 |
| 0,1 | -5,4 | 0,003309 | 0,00321828 | 0,008 |
| 2 | -5,4 | 0,003026 | 0,00314276 | 0,014 |
| 5 | -5,4 | 0,002919 | 0,0028016 | 0,014 |
| 10 | -5,4 | 0,002036 | 0,00204078 | 0,000 |
| 15 | -5,4 | 0,001118 | 0,00142567 | 0,095 |
| 20 | -5,4 | 0,000769 | 0,00101384 | 0,060 |
| | | | suma= | 1,86 |

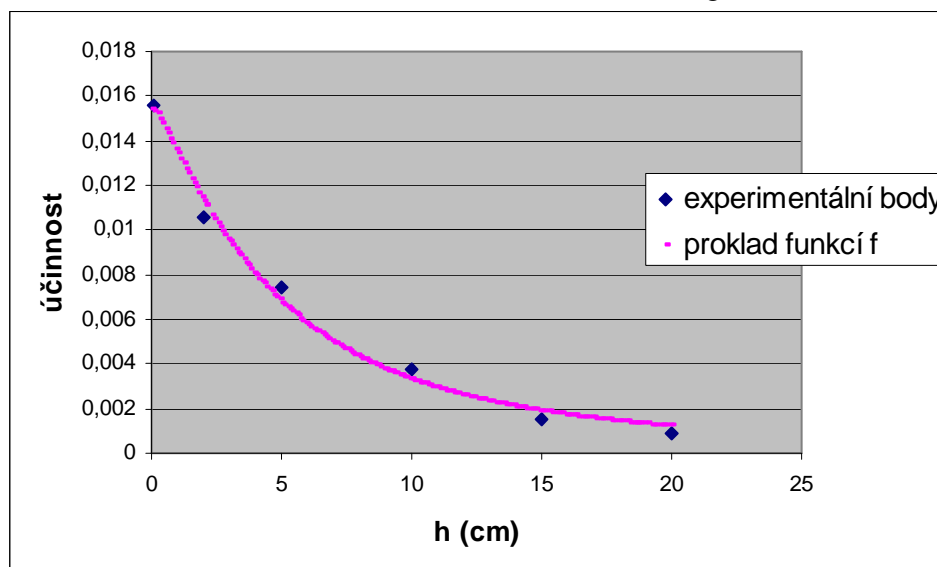
Poznámka: RSČ- reziduální součet čtverců

h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

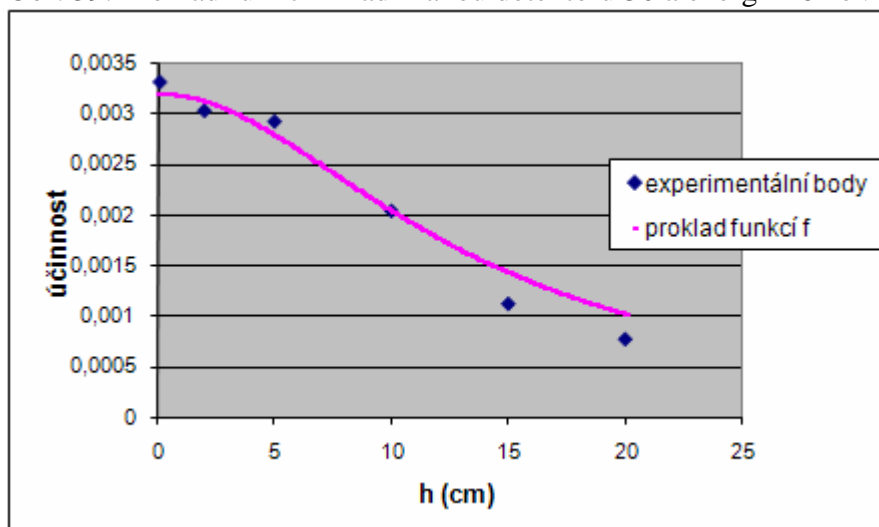
η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

u, x, y, z – koeficienty funkce F

Obr. 38: Proklad funkcí F nad osou detektoru 30 a energii 46 keV



Obr. 39: Proklad funkcí F nad hranou detektoru 30 a energii 46 keV



Tab. 46: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 30 a energii 46 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^* - G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|----------|------------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,004488 | 0,005404 | 0,838 | j= | 0,63 |
| 0,1 | 2,5 | 0,003314 | 0,004563 | 1,561 | k= | 7,2 |
| 0,1 | 4,5 | 0,002503 | 0,003479 | 0,952 | l= | 0,91 |
| 0,1 | 6,5 | 0,001877 | 0,002551 | 0,454 | m= | 185 |
| 0,1 | 9 | 0,001477 | 0,001744 | 0,071 | | |
| 4,5 | 0,1 | 0,006309 | 0,004958 | 1,827 | | |
| 4,5 | 2,5 | 0,005386 | 0,004288 | 1,206 | | |
| 4,5 | 4,5 | 0,003334 | 0,003323 | 0,000 | | |
| 4,5 | 6,5 | 0,002582 | 0,002468 | 0,013 | | |
| 4,5 | 9 | 0,001657 | 0,001704 | 0,002 | | |
| 9 | 0,1 | 0,004647 | 0,004094 | 0,306 | | |
| 9 | 2,5 | 0,003796 | 0,003643 | 0,023 | | |
| 9 | 4,5 | 0,002796 | 0,002929 | 0,018 | | |
| 9 | 6,5 | 0,001949 | 0,002246 | 0,088 | | |
| 9 | 9 | 0,001323 | 0,001597 | 0,075 | | |
| 2,5 | 0,1 | 0,006207 | 0,005235 | 0,945 | | |
| 2,5 | 2,5 | 0,005283 | 0,004474 | 0,655 | | |
| 2,5 | 4,5 | 0,003514 | 0,003429 | 0,007 | | |
| 2,5 | 6,5 | 0,002449 | 0,002525 | 0,006 | | |
| 2,5 | 9 | 0,001706 | 0,001731 | 0,001 | | |
| 6,5 | 0,1 | 0,005181 | 0,004599 | 0,339 | | |
| 6,5 | 2,5 | 0,004504 | 0,004028 | 0,227 | | |
| 6,5 | 4,5 | 0,00336 | 0,003168 | 0,037 | | |
| 6,5 | 6,5 | 0,002398 | 0,002382 | 0,000 | | |
| 6,5 | 9 | 0,001457 | 0,00166 | 0,043 | | |
| | | | suma= | 9,7 | | |

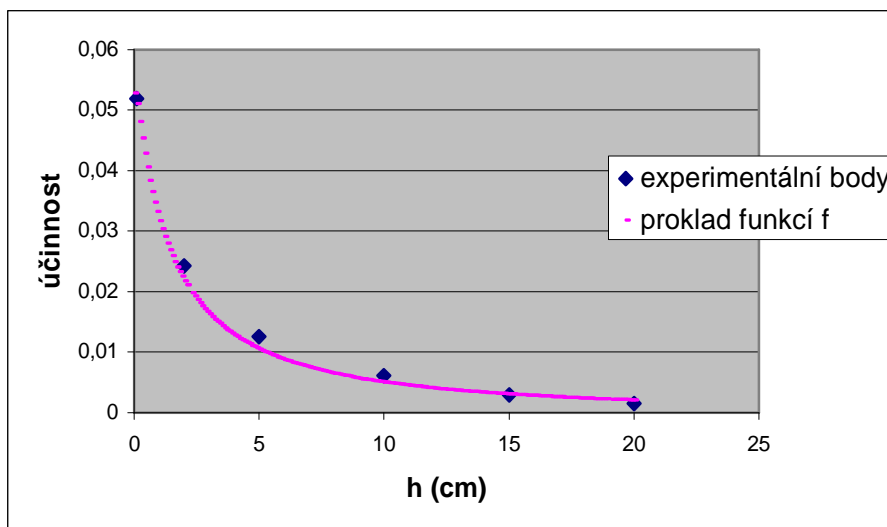
Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců
 o, p – uvedeno v obrázku číslo 9
 η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností
 j, k, l, m – koeficienty funkce F

Tab.č. 47: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 30 a energii 661 keV

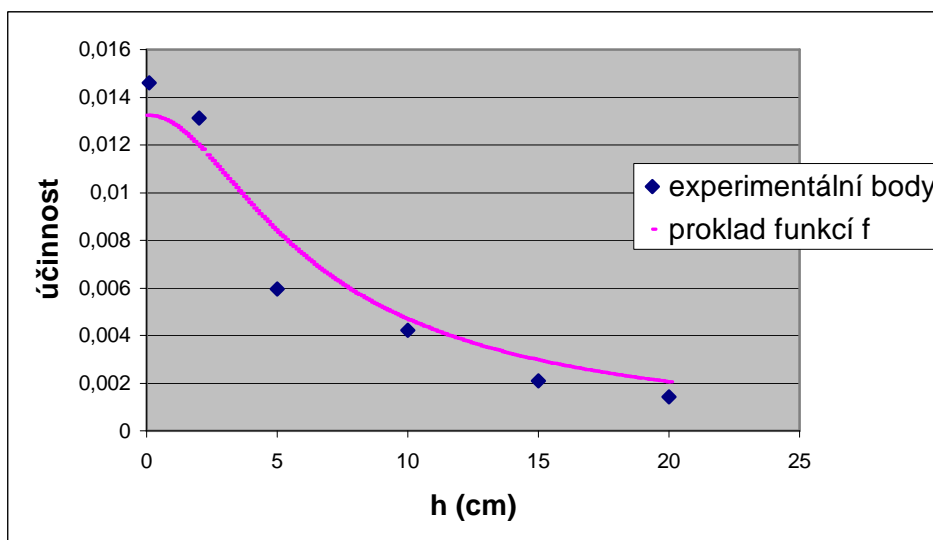
| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|------|----------|------------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,0519 | 0,0505782 | 1,7 | u= | 0,50 |
| 2 | 0,1 | 0,024236 | 0,02169588 | 6,5 | x= | 0,51 |
| 5 | 0,1 | 0,012567 | 0,01047869 | 4,4 | y= | 13 |
| 10 | 0,1 | 0,00612 | 0,00505872 | 1,1 | z= | 18 |
| 15 | 0,1 | 0,002904 | 0,00307761 | 0,0 | | |
| 20 | 0,1 | 0,001537 | 0,00209566 | 0,3 | | |
| 0,1 | 5,4 | 0,014607 | 0,01323616 | 1,9 | | |
| 2 | 5,4 | 0,013138 | 0,01192646 | 1,5 | | |
| 5 | 5,4 | 0,005957 | 0,00834264 | 5,7 | | |
| 10 | 5,4 | 0,004203 | 0,0046643 | 0,2 | | |
| 15 | 5,4 | 0,002103 | 0,00295275 | 0,7 | | |
| 20 | 5,4 | 0,001412 | 0,00204344 | 0,4 | | |
| 0,1 | -5,4 | 0,014607 | 0,01323616 | 1,9 | | |
| 2 | -5,4 | 0,013138 | 0,01192646 | 1,5 | | |
| 5 | -5,4 | 0,005957 | 0,00834264 | 5,7 | | |
| 10 | -5,4 | 0,004203 | 0,0046643 | 0,21 | | |
| 15 | -5,4 | 0,002103 | 0,00295275 | 0,72 | | |
| 20 | -5,4 | 0,001412 | 0,00204344 | 0,40 | | |
| | | | suma= | 35 | | |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců
 h, r – uvedeno v obrázku číslo 9
 η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností
 u, x, y, z – koeficienty funkce F

Obr. 40: Proklad funkcí F nad osou detektoru 30 a energii 661 keV



Obr. 41: Proklad funkcí F nad hranou detektoru 30 a energii 661 keV



Tab. 48: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 30 a energii 661 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|----------|----------------|----|--------|
| 0,1 | 0,1 | 0,015749 | 0,022859 | 50,6 | j= | 0,0004 |
| 0,1 | 2,5 | 0,012812 | 0,015369 | 6,54 | k= | 2497 |
| 0,1 | 4,5 | 0,009221 | 0,010812 | 2,53 | l= | 0,12 |
| 0,1 | 6,5 | 0,006847 | 0,007771 | 0,855 | m= | 43 |
| 0,1 | 9 | 0,005214 | 0,005369 | 0,024 | | |
| 4,5 | 0,1 | 0,030928 | 0,022746 | 66,9 | | |
| 4,5 | 2,5 | 0,020319 | 0,015364 | 24,6 | | |
| 4,5 | 4,5 | 0,012485 | 0,010811 | 2,804 | | |
| 4,5 | 6,5 | 0,008324 | 0,007771 | 0,306 | | |
| 4,5 | 9 | 0,006006 | 0,005369 | 0,406 | | |
| 9 | 0,1 | 0,014281 | 0,022512 | 67,8 | | |
| 9 | 2,5 | 0,0102 | 0,015351 | 26,5 | | |
| 9 | 4,5 | 0,008405 | 0,010806 | 5,76 | | |
| 9 | 6,5 | 0,006349 | 0,007768 | 2,02 | | |
| 9 | 9 | 0,004913 | 0,005368 | 0,207 | | |
| 2,5 | 0,1 | 0,026439 | 0,022821 | 13,09 | | |
| 2,5 | 2,5 | 0,017953 | 0,015367 | 6,68 | | |
| 2,5 | 4,5 | 0,01118 | 0,010812 | 0,135 | | |
| 2,5 | 6,5 | 0,008005 | 0,007771 | 0,055 | | |
| 2,5 | 9 | 0,00683 | 0,005369 | 2,136 | | |
| 6,5 | 0,1 | 0,025623 | 0,022650 | 8,84 | | |
| 6,5 | 2,5 | 0,017218 | 0,015360 | 3,45 | | |
| 6,5 | 4,5 | 0,012077 | 0,010809 | 1,609 | | |
| 6,5 | 6,5 | 0,007148 | 0,007770 | 0,386 | | |
| 6,5 | 9 | 0,005647 | 0,00537 | 0,078 | | |
| | | | suma= | 294 | | |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců

o, p – uvedeno v obrázku číslo 9

η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

j, k, l, m – koeficienty funkce F

Tab.č. 49: Výpočet koeficientů pro oblast nad detektorem 30 a energii 1332 keV

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ | | |
|-----|-----|----------|------------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,028919 | 0,02900224 | 0,007 | u= | 4,6 |
| 2 | 0,1 | 0,014601 | 0,01406224 | 0,291 | x= | 0,14 |
| 5 | 0,1 | 0,004313 | 0,00507327 | 0,579 | y= | 9,6 |
| 10 | 0,1 | 0,002347 | 0,00168826 | 0,434 | z= | 33 |
| 15 | 0,1 | 0,00109 | 0,0008203 | 0,072 | | |
| 20 | 0,1 | 0,000683 | 0,00048139 | 0,041 | | |
| 0,1 | 5,4 | 0,014637 | 0,01408593 | 0,303 | | |
| 2 | 5,4 | 0,008942 | 0,01026642 | 1,755 | | |

| h | r | η^* | F | $(\eta^*-F)^2$ |
|-----|------|----------|------------|----------------|
| 5 | 5,4 | 0,005583 | 0,00456253 | 1,041 |
| 10 | 5,4 | 0,001487 | 0,00163236 | 0,021 |
| 15 | 5,4 | 0,000828 | 0,00080729 | 0,000 |
| 20 | 5,4 | 0,000563 | 0,00047695 | 0,007 |
| 0,1 | -5,4 | 0,014637 | 0,01408593 | 0,303 |
| 2 | -5,4 | 0,008942 | 0,01026642 | 1,755 |
| 5 | -5,4 | 0,005583 | 0,00456253 | 1,041 |
| 10 | -5,4 | 0,001487 | 0,00163236 | 0,021 |
| 15 | -5,4 | 0,000828 | 0,00080729 | 0,000 |
| 20 | -5,4 | 0,000563 | 0,00047695 | 0,007 |
| | | | suma= | 7,7 |

Poznámka: RSC²- reziduální součet čtverců

h, r – uvedeno v obrázku číslo 9

η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností

u, x, y, z – koeficienty funkce F

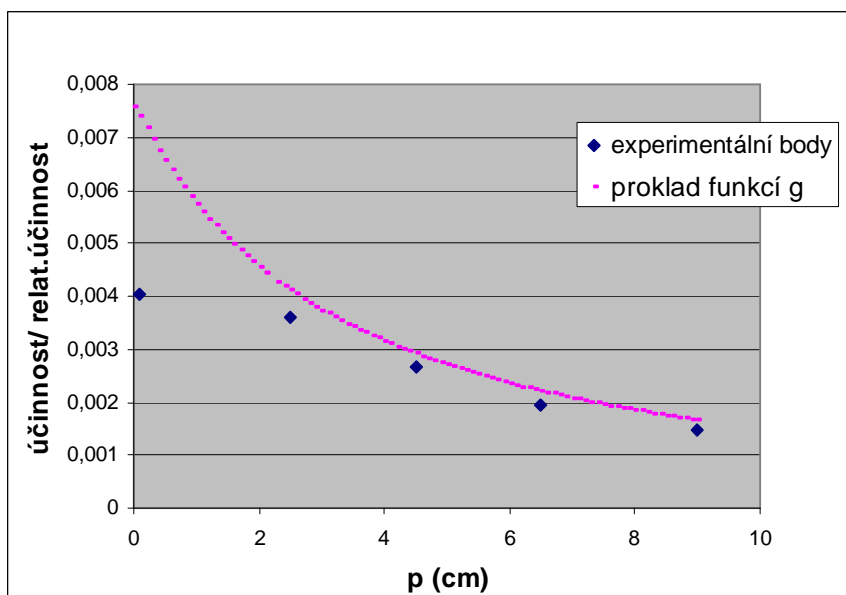
Tab. 50: Výpočet koeficientů pro oblast vedle detektoru 30 a energii 1332 keV

| o | p | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ | | |
|-----|-----|----------|----------|----------------|----|------|
| 0,1 | 0,1 | 0,004024 | 0,007408 | 11,452 | j= | 0,10 |
| 0,1 | 2,5 | 0,003613 | 0,004103 | 0,240 | k= | 11,6 |
| 0,1 | 4,5 | 0,002653 | 0,002899 | 0,060 | l= | 12,4 |
| 0,1 | 6,5 | 0,001929 | 0,002194 | 0,070 | m= | 131 |
| 0,1 | 9 | 0,001488 | 0,001645 | 0,025 | | |
| 4,5 | 0,1 | 0,005982 | 0,005300 | 0,466 | | |
| 4,5 | 2,5 | 0,00471 | 0,003851 | 0,736 | | |
| 4,5 | 4,5 | 0,003104 | 0,002816 | 0,083 | | |
| 4,5 | 6,5 | 0,002272 | 0,002158 | 0,013 | | |
| 4,5 | 9 | 0,001841 | 0,001629 | 0,045 | | |
| 9 | 0,1 | 0,004171 | 0,003988 | 0,033 | | |
| 9 | 2,5 | 0,003368 | 0,003332 | 0,001 | | |
| 9 | 4,5 | 0,002624 | 0,002606 | 0,000 | | |
| 9 | 6,5 | 0,001968 | 0,002058 | 0,008 | | |
| 9 | 9 | 0,001459 | 0,001582 | 0,015 | | |
| 2,5 | 0,1 | 0,004494 | 0,006152 | 2,749 | | |
| 2,5 | 2,5 | 0,004171 | 0,004019 | 0,023 | | |
| 2,5 | 4,5 | 0,002957 | 0,002873 | 0,007 | | |
| 2,5 | 6,5 | 0,002183 | 0,002183 | 0,000 | | |
| 2,5 | 9 | 0,001762 | 0,001640 | 0,015 | | |
| 6,5 | 0,1 | 0,004905 | 0,004635 | 0,073 | | |
| 6,5 | 2,5 | 0,003251 | 0,003632 | 0,145 | | |
| 6,5 | 4,5 | 0,002712 | 0,002734 | 0,000 | | |

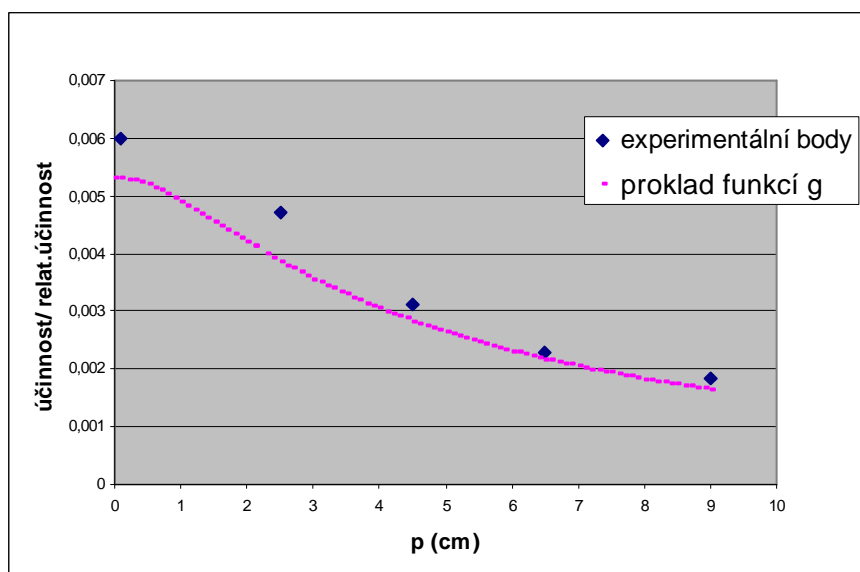
| ρ | ρ | η^* | G | $(\eta^*-G)^2$ |
|--------|--------|----------|----------|----------------|
| 6,5 | 6,5 | 0,001997 | 0,002120 | 0,015 |
| 6,5 | 9 | 0,001596 | 0,00161 | 0,000 |
| | | | suma= | 16,3 |

Poznámka: RSC- reziduální součet čtverců
 ρ, p – uvedeno v obrázku číslo 9
 η^* - naměřená účinnost dělená relativní účinností
 j, k, l, m – koeficienty funkce F

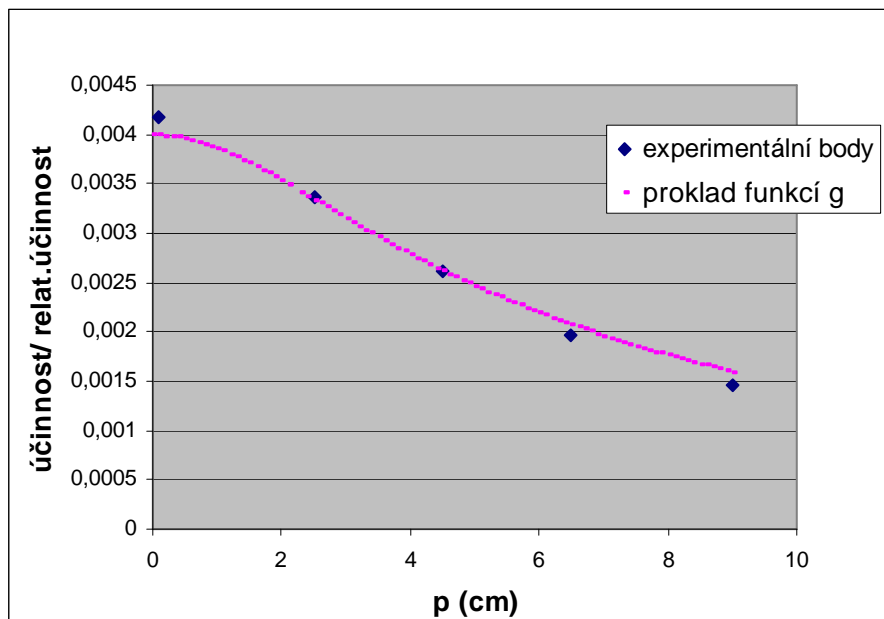
Obr. 42: Proklad funkcí G vedle detektoru 30 pro linii A, energie 1332 keV



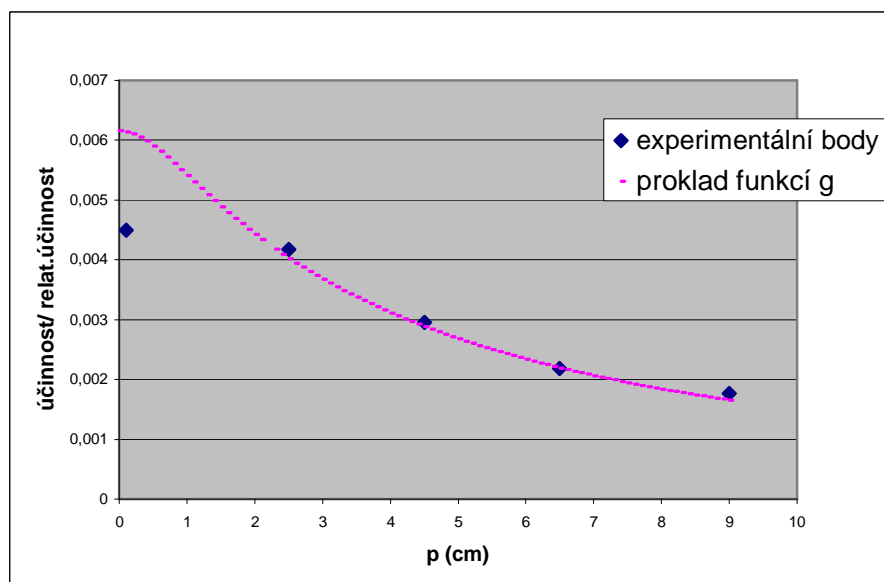
Obr. 43: Proklad funkcí G vedle detektoru 30 pro linii B, energie 1332 keV



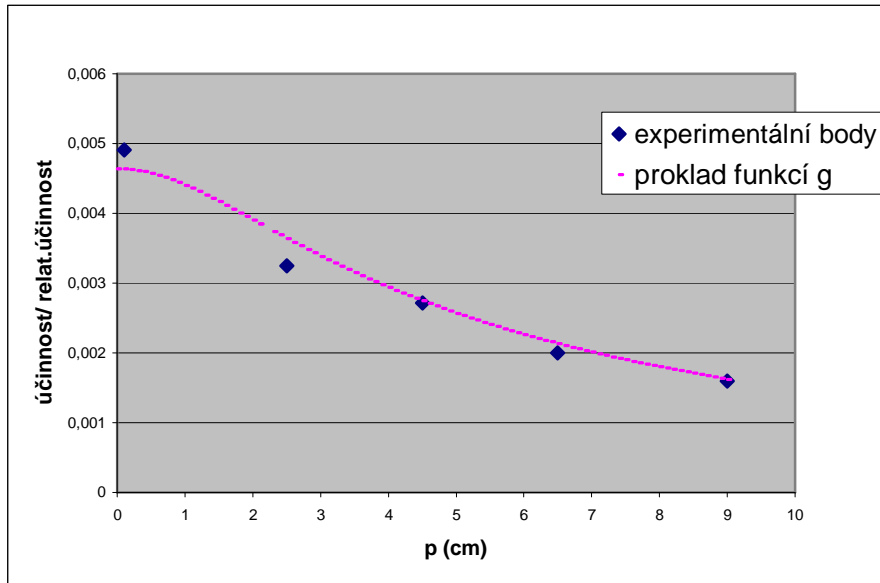
Obr. 44: Proklad funkcí G vedle detektoru 30 pro linii C, energie 1332 keV



Obr. 45: Proklad funkcí G vedle detektoru 30 pro linii M, energie 1332 keV



Obr. 46: Proklad funkcí G vedle detektoru 30 pro linii N, energie 1332 keV



5.4. Výsledky numerického výpočtu integrálů

Výsledkem numerického výpočtu integrálu je absolutní hodnota objemu pod plochou, kterou definovala funkce F respektive funkce G. V oblasti nad detektorem (F) byla největší vzdálenost, pro kterou byla hodnota vypočítána 25 cm, pro oblast vedle detektoru (G) byla tato maximální vzdálenost 10 cm. Tyto hodnoty byly zvoleny na základě bodů, ve kterých byly experimentální data měřeny, a to z důvodu, aby nedocházelo k příliš velké extrapolaci funkce a nevznikaly tak velké odchylky.

Je zde též praktické hledisko a to možnosti stínění, do kterého se musí nová nádoba vejít. Nově navržená nádoba by měla mít takové rozměry, aby ji bylo možné umístit do stínění.

V následujících tabulkách (tabulka číslo 51 a 52) je udána vzdálenost od detektoru a absolutní hodnota v této vzdálenosti.

Tab. 51: Výsledky numerického výpočtu integrálů pro jednotlivé detektory a energie v oblasti nad detektorem

| | def 23 | | | def 29 | | | def 30 | | |
|-----------|---------------|---------|----------|---------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| <i>cm</i> | 46 keV | 661 keV | 1332 keV | 46 keV | 661 keV | 1332 keV | 46 keV | 661 keV | 1332 keV |
| 0-1 | 3680 | 14300 | 6670 | 25000 | 10300 | 2340 | 2710 | 12200 | 10600 |
| 0-2,5 | 7990 | 30500 | 13700 | 56300 | 22500 | 5170 | 6350 | 27700 | 23600 |
| 0-5 | 13300 | 49500 | 20300 | 98200 | 37700 | 8800 | 12090 | 49500 | 41600 |
| 0-7,5 | 16900 | 62500 | 23600 | 129000 | 48400 | 11500 | 17300 | 66400 | 50000 |
| 0-10 | 19600 | 72100 | 25500 | 152000 | 56600 | 13500 | 21800 | 79400 | 55100 |
| 0-15 | 23100 | 85600 | 27600 | 185000 | 68500 | 16500 | 29200 | 98000 | 61000 |
| 0-20 | 25400 | 94900 | 28600 | 206000 | 77000 | 18800 | 34600 | 111000 | 64200 |
| 0-25 | 26900 | 102000 | 29300 | 221000 | 83600 | 20500 | 38700 | 112000 | 66300 |

Tab. 52: Výsledky numerického výpočtu integrálů pro jednotlivé detektory a energie v oblasti vedle detektoru

| | def 23 | | | def 29 | | | def 30 | | |
|-----------|---------------|---------|----------|---------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| <i>cm</i> | 46 keV | 661 keV | 1332 keV | 46 keV | 661 keV | 1332 keV | 46 keV | 661 keV | 1332 keV |
| 0-1 | 1520 | 14600 | 498 | 236 | 3920 | 1280 | 2710 | 8350 | 2400 |
| 0-2,5 | 3590 | 34400 | 1180 | 558 | 9260 | 3010 | 6390 | 19700 | 5670 |
| 0-5 | 7050 | 67600 | 2310 | 1090 | 18100 | 5780 | 12400 | 38700 | 11100 |
| 0-7,5 | 10500 | 100700 | 3440 | 1630 | 27100 | 8340 | 18200 | 57700 | 16300 |
| 0-10 | 14000 | 134000 | 4570 | 2170 | 36000 | 10600 | 23700 | 76600 | 21400 |

5.4.1. Vztažení na jednotku objemu

Vydělením absolutní hodnoty integrálu skutečným objemem daných intervalů, získáme účinnost na jednotku objemu. Výsledky tohoto výpočtu jsou uvedeny v tabulkách číslo 53 - 58. Též jsou získané hodnoty zobrazeny v grafu v závislosti na intervalu.

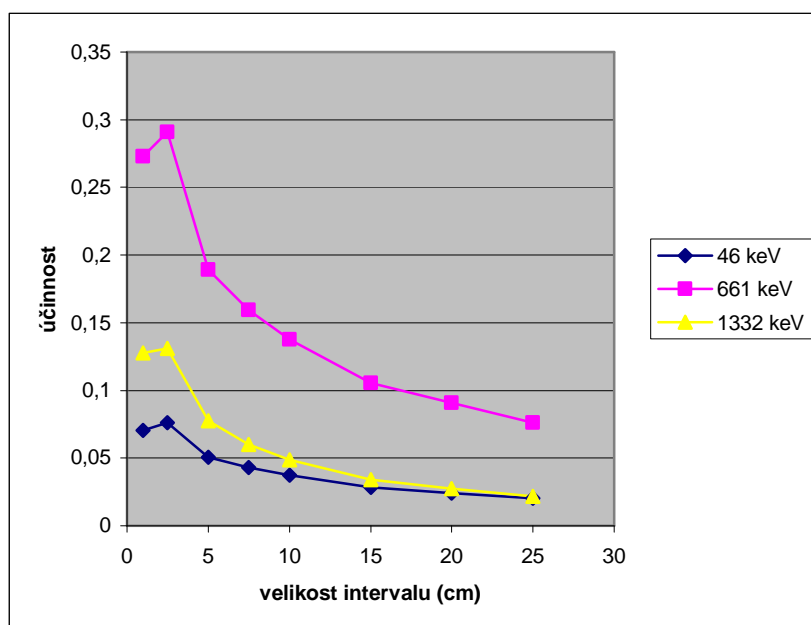
Tab. 53: Výsledky hodnot účinností na jednotku objemu pro detektor 23, oblast nad detektorem

| energie 46 keV | | | | energie 661 keV | | | | energie 1332 keV | | | |
|----------------|-------|--------------------------|----------|-----------------|-------|--------------------------|----------|------------------|-------|--------------------------|----------|
| interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost |
| (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | |
| 0-1 | 3683 | 52300 | 0,070 | 0-1 | 14265 | 52300 | 0,273 | 0-1 | 6669 | 52300 | 0,128 |
| 0-2,5 | 7988 | 104700 | 0,076 | 0-2,5 | 30468 | 104700 | 0,291 | 0-2,5 | 13716 | 104700 | 0,131 |
| 0-5 | 13266 | 261800 | 0,051 | 0-5 | 49527 | 261800 | 0,189 | 0-5 | 20339 | 261800 | 0,078 |
| 0-7,5 | 16915 | 392800 | 0,043 | 0-7,5 | 62529 | 392800 | 0,159 | 0-7,5 | 23845 | 392800 | 0,060 |
| 0-10 | 19557 | 523800 | 0,037 | 0-10 | 72116 | 523800 | 0,138 | 0-10 | 25532 | 523800 | 0,049 |
| 0-15 | 23100 | 811900 | 0,028 | 0-15 | 85622 | 811900 | 0,105 | 0-15 | 27557 | 811900 | 0,034 |
| 0-20 | 25357 | 1047700 | 0,024 | 0-20 | 94903 | 1047700 | 0,091 | 0-20 | 28613 | 1047700 | 0,027 |
| 0-25 | 26916 | 1335800 | 0,020 | 0-25 | 1E+05 | 1335800 | 0,076 | 0-25 | 29257 | 1335800 | 0,022 |

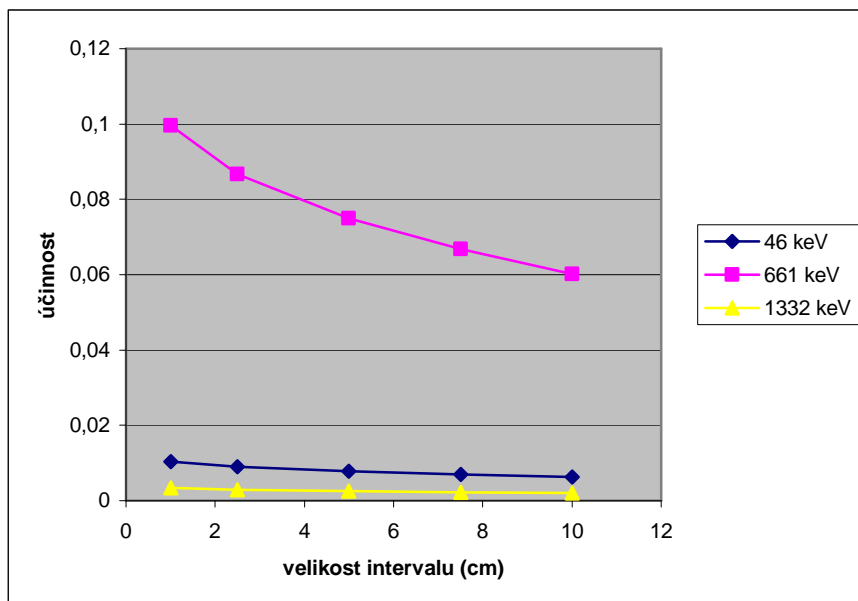
Tab. 54: Výsledky hodnot účinností na jednotku objemu pro detektor 23, oblast vedle detektoru

| energie 46 keV | | | | energie 661 keV | | | | energie 1332 keV | | | |
|----------------|-------|--------------------------|----------|-----------------|-------|--------------------------|----------|------------------|-------|--------------------------|----------|
| interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost |
| (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | |
| 0-1 | 1519 | 146300 | 0,010 | 0-1 | 14570 | 146300 | 0,100 | 0-1 | 498 | 146300 | 0,003 |
| 0-2,5 | 3591 | 397400 | 0,009 | 0-2,5 | 34439 | 397400 | 0,087 | 0-2,5 | 1178 | 397400 | 0,003 |
| 0-5 | 7045 | 900400 | 0,008 | 0-5 | 67551 | 900400 | 0,075 | 0-5 | 2310 | 900400 | 0,003 |
| 0-7,5 | 10498 | 1508800 | 0,007 | 0-7,5 | 1E+05 | 1508800 | 0,067 | 0-7,5 | 3442 | 1508800 | 0,002 |
| 0-10 | 13951 | 2222700 | 0,006 | 0-10 | 1E+05 | 2222700 | 0,060 | 0-10 | 4574 | 2222700 | 0,002 |

Obr. 47: Velikost účinnosti vztažené na skutečný objem daný intervalem (pro oblast nad detektorem 23)



Obr. 48: Velikost účinnosti vztažené na skutečný objem daný intervalem (pro oblast vedle detektoru 23)



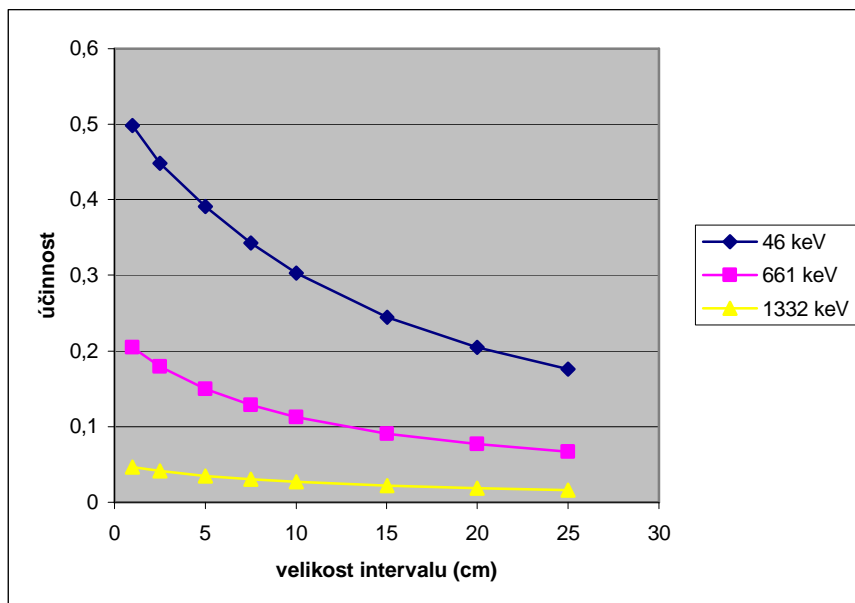
Tab. 55: Výsledky hodnot účinností na jednotku objemu pro detektor 29, oblast nad detektorem

| interval (cm) | energie 46 keV | | | interval (cm) | energie 661 keV | | | interval (cm) | energie 1332 keV | | |
|---------------|----------------|-----------------------------------|----------|---------------|-----------------|-----------------------------------|----------|---------------|------------------|-----------------------------------|----------|
| | abs. hodn. | skutečný objem (mm ³) | účinnost | | abs. hodn. | skutečný objem (mm ³) | účinnost | | abs. hodn. | skutečný objem (mm ³) | účinnost |
| 0-1 | 25037 | 50200 | 0,499 | 0-1 | 10298 | 50200 | 0,205 | 0-1 | 2340 | 50200 | 0,047 |
| 0-2,5 | 56320 | 125600 | 0,448 | 0-2,5 | 22492 | 125600 | 0,179 | 0-2,5 | 5170 | 125600 | 0,041 |
| 0-5 | 98193 | 251200 | 0,391 | 0-5 | 37659 | 251200 | 0,150 | 0-5 | 8807 | 251200 | 0,035 |
| 0-7,5 | 1E+05 | 376800 | 0,343 | 0-7,5 | 48437 | 376800 | 0,129 | 0-7,5 | 11462 | 376800 | 0,030 |
| 0-10 | 2E+05 | 502400 | 0,303 | 0-10 | 56603 | 502400 | 0,113 | 0-10 | 13507 | 502400 | 0,027 |
| 0-15 | 2E+05 | 753600 | 0,245 | 0-15 | 68494 | 753600 | 0,091 | 0-15 | 16536 | 753600 | 0,022 |
| 0-20 | 2E+05 | 1004800 | 0,205 | 0-20 | 77030 | 1004800 | 0,077 | 0-20 | 18751 | 1004800 | 0,019 |
| 0-25 | 2E+05 | 1256000 | 0,176 | 0-25 | 83632 | 1256000 | 0,067 | 0-25 | 20494 | 1256000 | 0,016 |

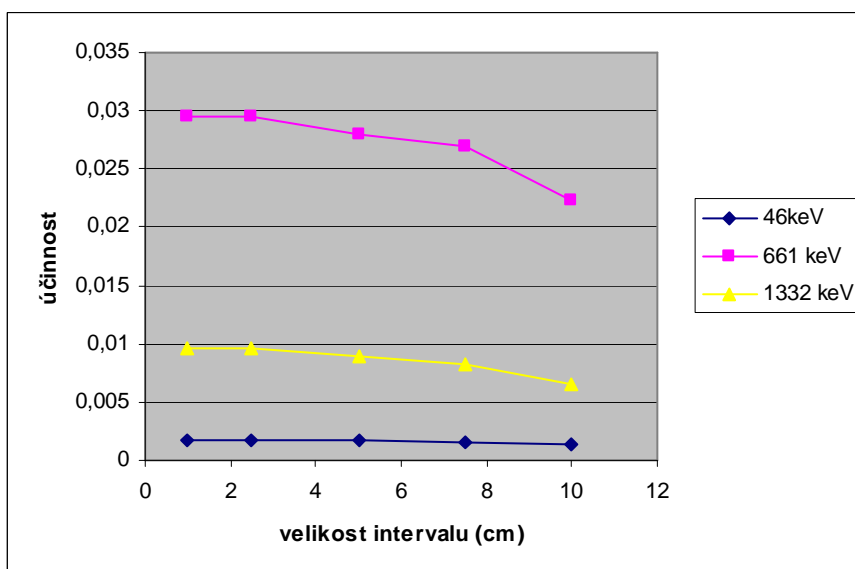
Tab. 56: Výsledky hodnot účinností na jednotku objemu pro detektor 29, oblast vedle detektoru

| interval (cm) | energie 46 keV | | | interval (cm) | energie 661 keV | | | interval (cm) | energie 1332 keV | | |
|---------------|----------------|-----------------------------------|----------|---------------|-----------------|-----------------------------------|----------|---------------|------------------|-----------------------------------|----------|
| | abs. hodn. | skutečný objem (mm ³) | účinnost | | abs. hodn. | skutečný objem (mm ³) | účinnost | | abs. hodn. | skutečný objem (mm ³) | účinnost |
| 0-1 | 236 | 132400 | 0,002 | 0-1 | 3917 | 132400 | 0,030 | 0-1 | 1283 | 132400 | 0,010 |
| 0-2,5 | 558 | 313800 | 0,002 | 0-2,5 | 9259 | 313800 | 0,030 | 0-2,5 | 3013 | 313800 | 0,010 |
| 0-5 | 1094 | 651200 | 0,002 | 0-5 | 18161 | 651200 | 0,028 | 0-5 | 5783 | 651200 | 0,009 |
| 0-7,5 | 1631 | 1007800 | 0,002 | 0-7,5 | 27062 | 1007800 | 0,027 | 0-7,5 | 8342 | 1007800 | 0,008 |
| 0-10 | 2167 | 1612400 | 0,001 | 0-10 | 35960 | 1612400 | 0,022 | 0-10 | 10644 | 1612400 | 0,007 |

Obr. 49: Velikost účinnosti vztažené na skutečný objem daný intervalem (pro oblast nad detektorem 29)



Obr.50: Velikost účinnosti vztažené na skutečný objem daný intervalem (pro oblast vedle detektoru 29)



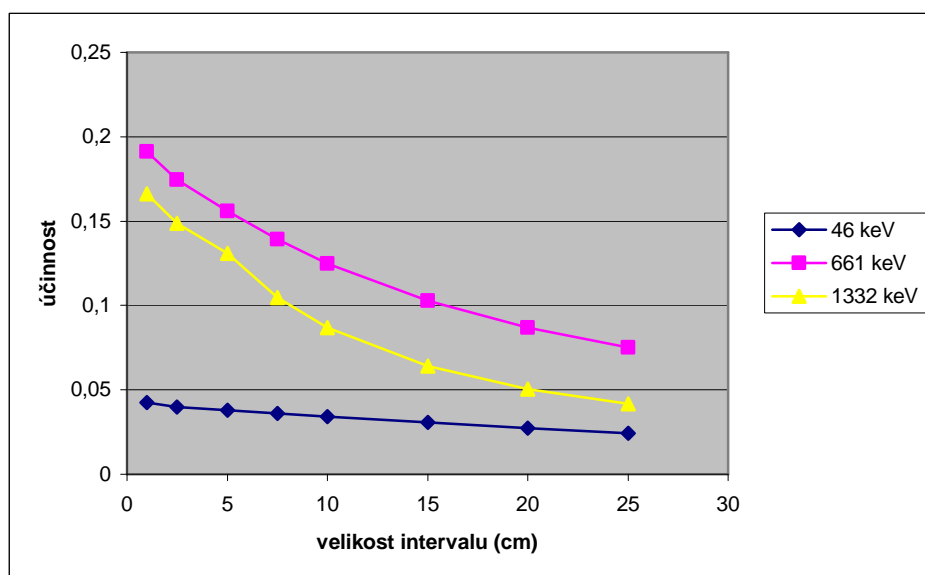
Tab 57: Výsledky hodnot účinností na jednotku objemu pro detektor 30, oblast nad detektorem

| energie 46 keV | | | | energie 661 keV | | | | energie 1332 keV | | | |
|----------------|-------|--------------------------|----------|-----------------|-------|--------------------------|----------|------------------|-------|--------------------------|----------|
| interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost |
| (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | |
| 0-1 | 2711 | 63600 | 0,043 | 0-1 | 12171 | 63600 | 0,191 | 0-1 | 10568 | 63600 | 0,166 |
| 0-2,5 | 6349 | 158900 | 0,040 | 0-2,5 | 27730 | 158900 | 0,175 | 0-2,5 | 23840 | 158900 | 0,149 |
| 0-5 | 12091 | 317800 | 0,038 | 0-5 | 49524 | 317800 | 0,156 | 0-5 | 41551 | 317800 | 0,131 |
| 0-7,5 | 17269 | 476800 | 0,036 | 0-7,5 | 66352 | 476800 | 0,139 | 0-7,5 | 49956 | 476800 | 0,105 |
| 0-10 | 21819 | 635700 | 0,034 | 0-10 | 79386 | 635700 | 0,125 | 0-10 | 55123 | 635700 | 0,087 |
| 0-15 | 29162 | 953600 | 0,031 | 0-15 | 97999 | 953600 | 0,103 | 0-15 | 61014 | 953600 | 0,064 |
| 0-20 | 34616 | 1271500 | 0,027 | 0-20 | 1E+05 | 1271500 | 0,087 | 0-20 | 64238 | 1271500 | 0,051 |
| 0-25 | 38715 | 1589400 | 0,024 | 0-25 | 1E+05 | 1589400 | 0,075 | 0-25 | 66261 | 1589400 | 0,042 |

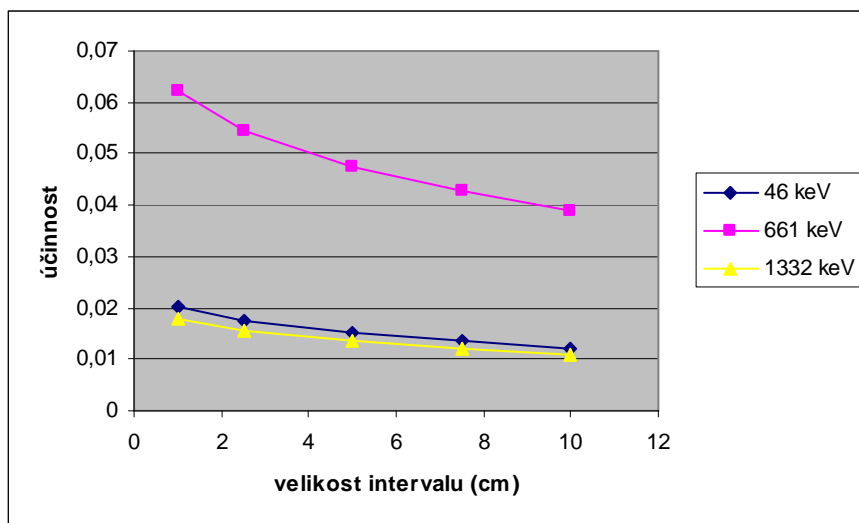
Tab 58: Výsledky hodnot účinností na jednotku objemu pro detektor 29, oblast vedle detektoru

| energie 46 keV | | | | energie 661 keV | | | | energie 1332 keV | | | |
|----------------|-------|--------------------------|----------|-----------------|-------|--------------------------|----------|------------------|-------|--------------------------|----------|
| interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost | interval | abs. | skutečný | účinnost |
| (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | | (cm) | hodn. | objem (mm ³) | |
| 0-1 | 2711 | 134200 | 0,020 | 0-1 | 8348 | 134200 | 0,062 | 0-1 | 2401 | 134200 | 0,018 |
| 0-2,5 | 6389 | 362000 | 0,018 | 0-2,5 | 19726 | 362000 | 0,054 | 0-2,5 | 5665 | 362000 | 0,016 |
| 0-5 | 12404 | 812400 | 0,015 | 0-5 | 38692 | 812400 | 0,048 | 0-5 | 11050 | 812400 | 0,014 |
| 0-7,5 | 18187 | 1351100 | 0,013 | 0-7,5 | 57656 | 1351100 | 0,043 | 0-7,5 | 16322 | 1351100 | 0,012 |
| 0-10 | 23657 | 1978200 | 0,012 | 0-10 | 76616 | 1978200 | 0,039 | 0-10 | 21443 | 1978200 | 0,011 |

Obr. 51: Velikost účinnosti vztažené na skutečný objem daný intervalem (pro oblast nad detektorem 30)



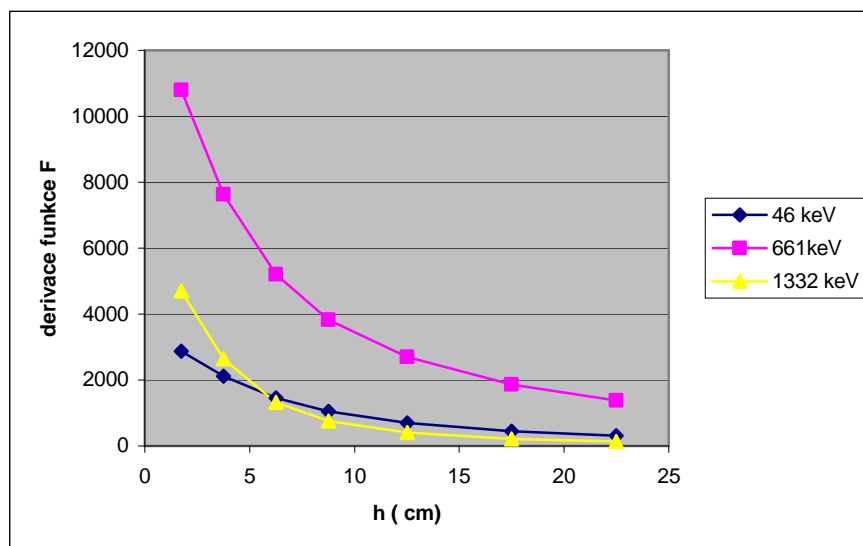
Obr. 52: Velikost účinnosti vztažené na skutečný objem daný intervalem (pro oblast vedle detektoru 30)



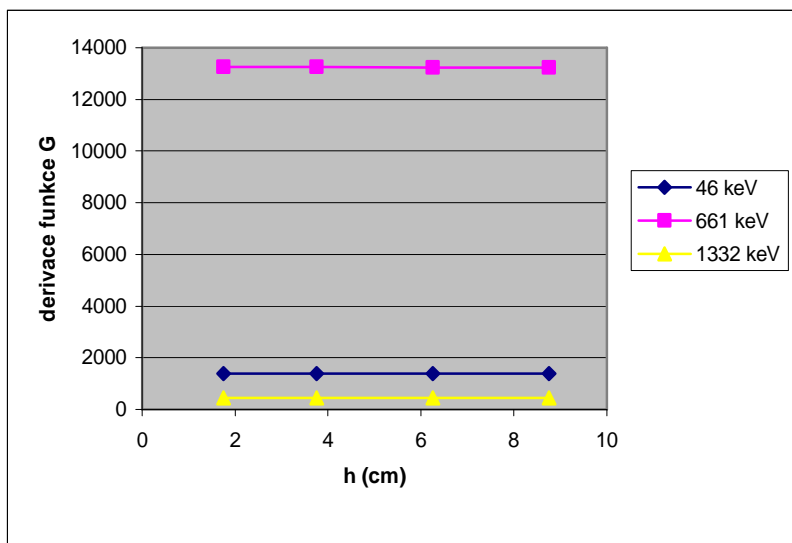
5.4.2. Výsledky numerické derivace

Grafické znázornění numerické derivace je v následujících grafech.

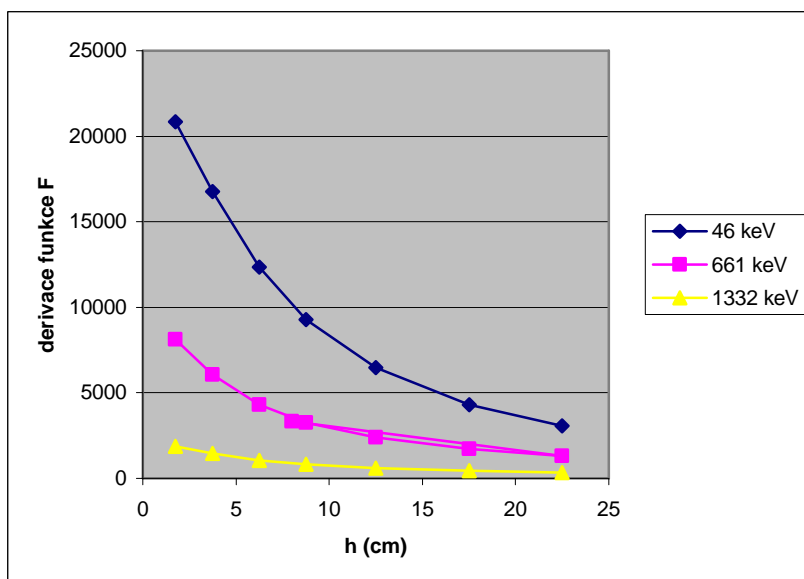
Obr. 53: Numerická derivace – detektor 23, oblast nad detektorem



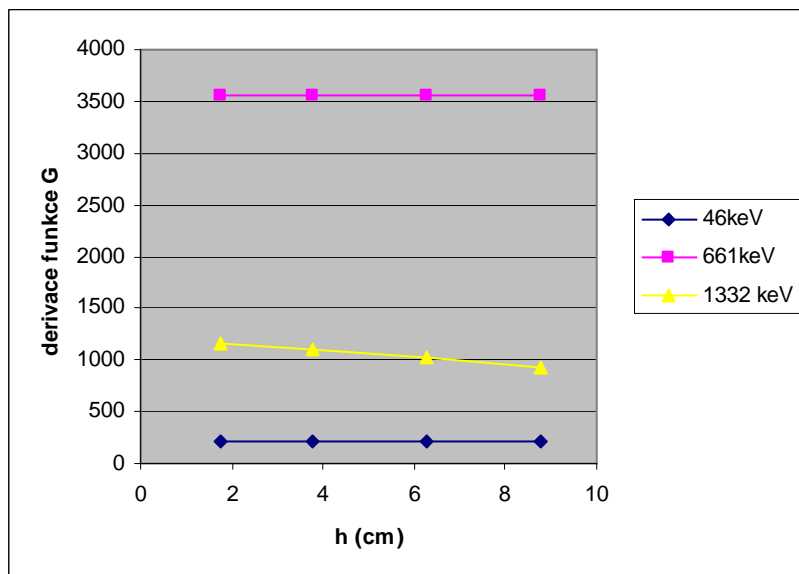
Obr. 54: Numerická derivace – detektor 23, oblast vedle detektoru



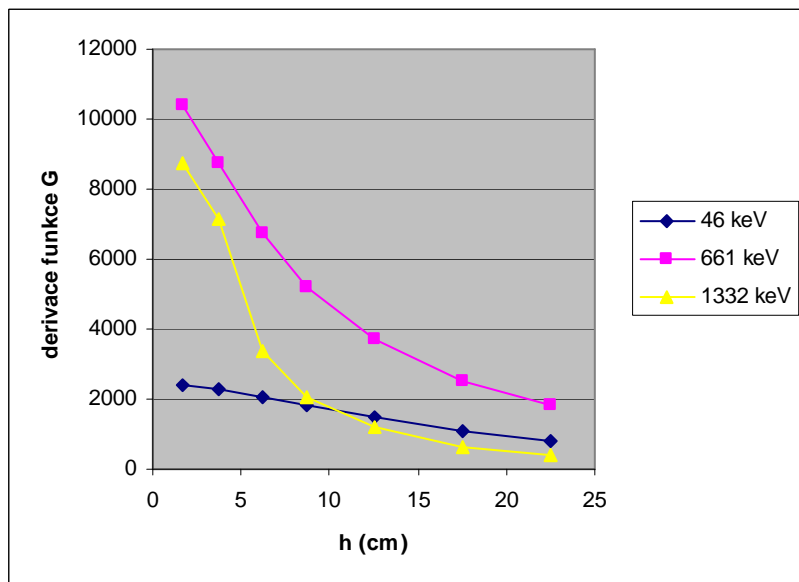
Obr. 55: Numerická derivace – detektor 29, oblast nad detektorem



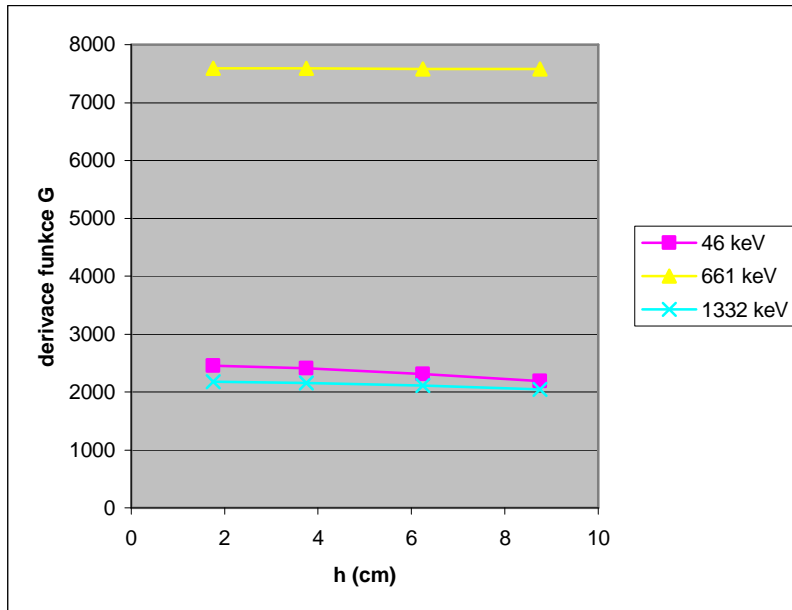
Obr.56: Numerická derivace – detektor 29, oblast vedle detektoru



Obr. 57: Numerická derivace – detektor 30, oblast nad detektorem



Obr. 58: Numerická derivace – detektor 30, oblast vedle detektoru



5.5. Výsledky hledání optimální oblasti kolem detektoru

Po zhodnocení výsledků z předešlých kapitol byla vyhodnocena oblast, která se zdá být optimální z hlediska poměru množství vzorku a účinnosti.

Tyto závěry vychází především z grafického znázornění na obrázcích číslo 47 - 52, které ukazují závislost účinnosti na rostoucím objemu vzorku a z obrázků číslo 53 - 58, kde je vidět derivace funkce.

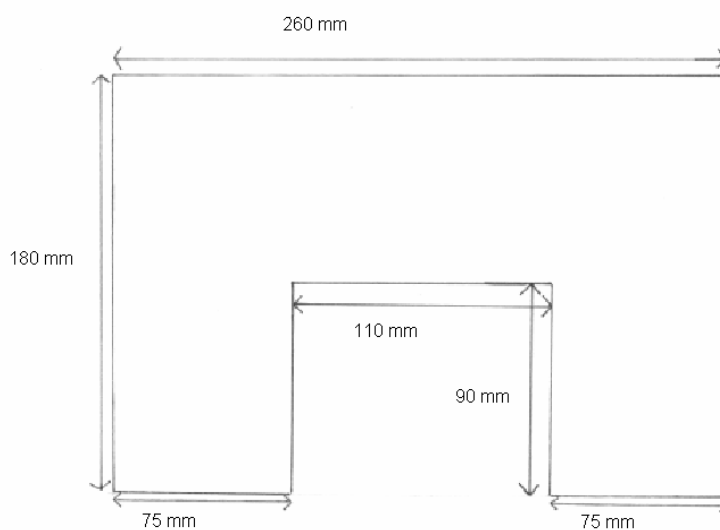
Zvolený optimální rozměr je v oblasti nad detektorem (F) o výšce 9 cm a pro oblast vedle detektoru (G) o šířce 7,5 cm. Při volbě těchto rozměrů byla zohledněna i velikost detektoru.

Byly navrženy dva typy nádob, které mohou být použity tak, jako jsou používány stejné typy nádob s jinými rozměry v zavedených geometriích. Rozměry nových nádob jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 59: Rozměry nádob pro nové geometrie

| geometrie | průměr (cm) | výška (cm) | objem (cm ³) | poznámka |
|---------------------------------|-------------|------------|--------------------------|--|
| „Nová masťovka“ nad detektorem | 7,5 | 9 | 397 | |
| „Nová masťovka“ vedle detektoru | 7,5 | 9 | 397-3179 | možno použít až 8 „nových masťovek“ |
| Nová Marinelliho nádoba | 26 | 18 | 8696 | vnitřní rozměry: průměr 11cm, výška 9 cm |

Obr. 59: Bokorys „Nové Marinelliho nádoby“



Hodnoty účinností a MDA pro nové geometrie jsou v následujících tabulkách. Výsledky jsou pro vzorek hustoty vzduchu, není započítána samoabsorbce.

Obě veličiny jsou netriviální funkcí energie a jsou závislé na velikosti a tvaru měřící nádoby, jejím umístění vzhledem k detektoru a na vlastnostech detektoru. Hodnota MDA je navíc ovlivněna počtem impulzů v pozadí.

Tab. 60: Výsledky účinnosti geometrie „Nová masťovka“ nad detektorem

| geometrie | „Nová masťovka“ nad detektorem | | |
|-----------|--------------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 0,033 | 0,31 | 0,032 |
| 661 keV | 0,12 | 0,12 | 0,11 |
| 1332 keV | 0,047 | 0,027 | 0,077 |

Tab. 61: Výsledky účinnosti geometrie „Nová masťovka“ okolo detektoru

| geometrie | „Nová masťovka“ vedle detektoru | | |
|-----------|---------------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 0,0040 | 0,0013 | 0,0094 |
| 661 keV | 0,039 | 0,019 | 0,029 |
| 1332 keV | 0,017 | 0,0061 | 0,0085 |

Tab. 62: Výsledky účinnosti pro „Novou Marinelliho nádobu“

| geometrie | „Nová Marinelliho nádoba“ | | |
|-----------|---------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 0,038 | 0,31 | 0,043 |
| 661 keV | 0,17 | 0,14 | 0,15 |
| 1332 keV | 0,067 | 0,035 | 0,087 |

Tab. 63: Hodnoty MDA [Bq] pro „Novou masťovku“ nad detektorem (pro čas měření 600 000 s)

| geometrie | „Nová masťovka“ nad detektorem | | |
|-----------|--------------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 3,7E-03 | 1,4E-04 | 2,1E-05 |
| 661 keV | 1,7E-05 | 1,3E-05 | 1,7E-05 |
| 1332 keV | 1,8E-05 | 3,5E-05 | 2,4E-05 |

Tab. 64: Hodnoty MDA [Bq] pro „Novou masťovku“ vedle detektoru (pro čas měření 600 000 s)

| geometrie | „Nová masťovka“ vedle detektoru | | |
|-----------|---------------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 3,9E-03 | 4,2E-03 | 9,8E-04 |
| 661 keV | 7,1E-06 | 9,7E-06 | 7,9E-06 |
| 1332 keV | 6,4E-06 | 1,9E-05 | 2,6E-05 |

Tab. 65: Hodnoty MDA [Bq] pro „Novou Marinelliho nádobu“ (pro čas měření 600 000 s)

| geometrie | „Nová Marinelliho nádoba“ | | |
|-----------|---------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 1,4E-04 | 6,6E-04 | 7,3E-07 |
| 661 keV | 5,8E-07 | 5,1E-07 | 6,0E-07 |
| 1332 keV | 5,7E-07 | 1,2E-06 | 1,0E-04 |

6. DISKUZE

6.1. Dosažení nízkých hodnot MDA

Význam dosažení nízkých hladin MDA je důležitý zejména pro sledování radioaktivity v životním prostředí, kde je vedle přírodních radionuklidů nezbytné analyzovat také přítomnost, pohyb a retenci řady umělých radioaktivních prvků, které se obvykle vyskytují ve velmi malých koncentracích. Kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení radionuklidů v životním a pracovním prostředí umožňuje získat informace nejenom o ozáření obyvatelstva v důsledku těchto zdrojů ionizujícího záření, ale v mnohých případech také poznatky o probíhajících procesech v přírodě včetně kosmického prostoru, např. při studiu změn aktivit ^7Be v atmosféře. [32]

Pro dosažení nízkých hodnot MDA je nutno volit speciální podmínky měření. Nejmenší hodnota aktivity, která je detekčním systémem stanovitelná, je ovlivněna několika faktory, zejména účinností detektoru pro danou geometrii měření, tj. tvarem a objemem vzorku a jeho polohou vzhledem k detektoru, a jeho odstíněním od přírodního pozadí.

Námi zvolený způsob, jak dosáhnout nízkých hodnot MDA, bylo navržení nových měřících geometrií s vysokou účinností. Jelikož hodnota MDA pro danou geometrii je v prvním přiblížení nepřímo úměrná odmocnině z účinnosti, měla by tato geometrie dosahovat i minimálních hodnot MDA.

Germaniové detektory poskytují v současné době nejlepší podmínky ze všech detekčních systémů pro analýzu složitých spekter gama. Naproti tomu ve srovnání se scintilačními krystaly představují pro měření nízké aktivity nevýhodu nižší účinnosti detekce. Spektrometrie s vysokou účinností detekce je kromě příslušných rozměrů detektoru dosahována volbou měřící geometrie.

6.2. Porovnání

6.2.1. Porovnání s programem EFAUT

Podobnou problematikou jako tato práce se zabývá program EFAUT [13], který počítá účinnost detektoru pro objemový vzorek tvaru válce nebo kvádra umístěný nad detektorem ze známé funkce účinnosti bodového zářiče v prostoru nad detektorem.

Tento program byl vyvinut pro případ, že bude nutné použít jiné měřící geometrie než jsou zavedené, protože ne každý vzorek lze zpracovat do standardní geometrie.

Program EFAUT vycházel z experimentálně získaných dat. Oblast nad detektorem byla zmapována změřením 10 nuklidů v doporučených polohách. Počet poloh byl zvolen podle časových možností. Jako nejefektivnější způsob podle mnoha testů byly doporučeny vzdálenosti 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 5; 7; 10; 25 cm od víčka detektoru (měřeny jen body v ose detektoru). Získaná sada účinností závislých na výšce byla proložena funkcí:

$$\eta(h) = \frac{A_1^E}{h^2 + A_2^E \cdot h + A_3^E} \quad (20)$$

kde: A_1, A_2, A_3 jsou koeficienty funkce pro energii E ,

η je účinnost pro energii E ve výšce h nad víčkem detektoru.

Celková účinnost pro objemový zářič je definována vztahem:

$$\eta_V(E) = \frac{\int_V \left(\frac{A_1^E}{r^2 + h^2 + A_2^E \cdot h + A_3^E} \cdot e^{-\mu \cdot d_s} \right) \cdot dV}{V} \quad (21)$$

kde: V je objem zářiče,

d_s je vzdálenost mezi integračním bodem a bodem na spodní podstavě vzorku ležícím na spojnici mezi integračním bodem a bodem nacházejícím se na povrchu krystalu v ose detektoru,

μ je lineární součinitel zeslabení,

A_1, A_2, A_3 jsou koeficienty funkce pro energii E ,

r^2 je vzdálenost od osy detektoru (zavedením členu získána funkce popisující rozložení i mimo osu detektoru).

Praxe ukazuje, že při správně provedeném postupu jsou odchylky mezi účinnostmi pro objemový vzorek stanovené programem EFAUT a experimentálně stanovenými účinnostmi většinou do 10% v celém energetickém rozsahu. Největší nepřesnosti jsou u vzorků s malou výškou a velkým poloměrem a pro nízké energie.

Nevýhodou programu EFAUT je do jisté míry semiempirická metoda, protože je třeba pro každý detektor experimentálně stanovit koeficienty rovnice, navíc pro jistý rozsah energií, tyto zavést do programu a až pak aplikovat. Navíc program komunikuje s uživatelem formou příkazového řádku, což v dnešní době není obvyklé; z hlediska operačních systémů osobních počítačů vyvstává i otázka budoucího provozu tohoto programu bez použití např. emulátoru prostředí MS DOS.

Metoda vypočtení účinností pro zvolenou geometrii měření je podobná jako v této práci. Na základě experimentálních dat, které jsou proloženy funkcí, jsou získány koeficienty definované funkce. Celková účinnost je také získána numerickou integrací přes objem s tím rozdílem, že ve vztahu podle programu EFAUT je zohledněna i samoabsorpce vzorku.

Diplomová práce navíc přináší studii oblasti vedle detektoru a aplikování zvolených vztahů pro tuto oblast.

6.2.2 LABSOCS

Labsocs je počítačový program firmy Canberra, který vypočítává účinnosti kalibraci HPGe detektorů bez použití aktivních zářičů. To dovoluje rychlou a správnou kalibraci mnoha geometrií, bez nutnosti pořizování etalonů. [20] Takto lze snadno a rychle získat účinnost pro jakoukoli námi navrženou geometrii a z výsledku vyhodnotit velikost hodnoty MDA. Výrobce navíc udává, že chyba kalibrace je 4-5% [4], což by měla být menší chyba než při klasické kalibraci zářiči. Tento program tedy skýtá mnoho výhod.

Jeho nevýhodou je, že je nutné ho zakoupit ke konkrétnímu detektoru jako datový balík, který detailně popisuje jeho konstrukci, protože ve svých výpočtech zohledňuje charakteristiky jednotlivých detektorů. Není však reálně možné koupit drahý software pro každý detektor, což se týká například laboratoře SÚRO Praha, kde je větší množství detektorů. Navíc je tu problém s detektory jiných výrobců než firmy Canberra.

Přestože existuje komerční program modelující účinnosti různých geometrií, který je možné si zakoupit, je snaha hledat vztah, který by popisoval účinnost geometrie, byl by možný aplikovat na různé detektory a nebylo by nutné zakupovat drahý software. O tom svědčí například publikované články: ALFASSI, Z.B., GROPPI, F. An empirical

formula for the efficiency detection of Ge detectors for cylindrical radioactive sources. Nuclear Instruments and Methods in Physics research . 2007, no. A 574, s. 280-284 nebo CORNEO DÍAZ, N., JURADO VERGAS, M. An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma - ray detectors. Nuclear Instruments and Methods in Physics research . 2008, no. A 586, s. 204-210.

6.3. Výhody a nevýhody zvolené metody

6.3.1. Experimentální data

Jednou z nevýhod této metody je velká časová náročnost.

Modelování účinnosti vzhledem ke vzdálenosti od detektoru vyžaduje jako vstup naměřená data. Čím máme více poloh, ve kterých byly zdroje měřeny, tím přesněji lze vztah modelovat. Námi byly zvoleny polohy v oblasti nad detektorem v ose a nad hranou detektoru v různých výškách do 25 cm a pro oblast vedle detektoru 5 výšek (vzhledem ke krystalu) s různými vzdálenostmi od pláště detektoru s maximem 9 cm. V této práci byly jako zdroje vybrány jen tři nuklidy ^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{60}Co emitující fotony o energiích cca 46, 661, 1332 keV. Tyto energie byly vybrány jako reprezentativní pro celé energetické spektrum. Bylo by možné pro zpřesnění použít zdroje o dalších energiích a více poloh zdrojů při měření, také více detektorů na kterých byly měřeny, ale to by ještě prodloužilo dobu potřebnou k získání experimentálních dat a podle zkušeností z programu EFAUT, zpřesnění by nemuselo být tak významné.

6.3.2. Jednorozměrná regrese

Experimentální body byly proloženy funkcemi (11, 12, 13) pomocí metody nejmenších čtverců. Pro posouzení, jak odpovídají naměřené body prokladu byla použito kritérium minima součtu čtverců odchylek. Výsledky ukazují (tabulka číslo 12 – 32), že ve většině případů je ze zvolených funkcí nejvhodnější proklad reciprokou kvadratickou funkcí (13). Pro větší přesnost prokladu by bylo možné zvolit kombinaci funkcí, protože v některých oblastech není tento proklad zcela vhodný, ale námi zvolený

cíl byl vyvinout novou geometrii pro skupinu vysokoúčinnostních detektorů, ne pro konkrétní jeden detektor.

6.3.3. Dvojdímní regrese

Koeficienty funkce, modifikované reciproké kvadratické (číslo rovnice 14, 15), byly hledány zvlášť pro oblast nad detektorem, pro oblast vedle detektoru a pro jednotlivé detektory.

Při srovnání koeficientů můžeme říct, že koeficienty jsou poměrně proměnlivé (tabulka číslo 33 – 50), z čehož vychází, že záleží na charakteristikách jednotlivých detektorů. Tyto charakteristiky, jako například materiál obložení krystalu nebo jeho tloušťka, nejsou výrobcem zveřejněny, proto není možné je v modelu zohlednit.

Jeden z detektorů, který byl pro studii použit (detektor 29), je oknový a s ultranízkým pozadím (z boku je Ge krystal stíněn ještě vrstvičkou Cu), což má vliv na vyšší detekci nízkých energií nejen v oblasti nad detektorem, ale ovlivňuje to i detekci v oblasti vedle detektoru v horní části viz obrázek číslo 30.

V oblasti vedle detektoru jsou koeficienty kvadratického členu poměrně nízké, to ukazuje, že funkce se blíží lineární a pokles účinnosti není tak prudký jako v oblasti nad detektorem.

6.3.4. Oblast F+G

Pro oblast F+G (obrázek číslo 7), tj. oblast u hrany detektoru, byly také naměřeny experimentální hodnoty za účelem proložit tuto oblast funkcí, která by vypovídala o jejím vztahu účinnosti a vzdálenosti od detektoru.

Bylo předpokládáno, že funkce F+G bude lineární kombinací funkce pro oblasti F a G. Tato kombinace však neodpovídala skutečnosti. Platí, že fotony z této oblasti přispívají jak z vrchu detektoru, tak z boku detektoru, jak vyplývá z kombinace funkce F a G, ale také závisí na úhlu, ve kterém se zdroj vůči detektoru nachází. Protože odvodit vztah pro tuto závislost je velmi složité a fotony dopadající z této oblasti nemají takovou účinnost (viz. tabulka číslo 5) jako fotony dopadající na čelo a z boku detektoru, byla tato oblast v dalších analýzách zanedbána.

6.3.5. Numerický výpočet integrálů

Tato matematická operace byla prováděna pomocí programu Excel. Byl zvolen krok 0,1 cm, což znamená, že pro vytvoření matice bylo třeba cca 10 000 buněk. Excel 97 – 2003 takové množství neposkytuje, proto musel být použit program Excel 2007.

6.3.6. Návrhy nových geometrií

Na základě výsledků, které jsou uvedeny v předešlých kapitolách, byly navrženy geometrie, které svými tvary vychází z geometrií stávajících. Protože detektory s vyšší účinností mají i větší rozměry krystalu, jsou rozměry nádob pro nové geometrie měření též větší. Optimální je, aby průměr nádoby byl v oblasti nad detektorem shodný s průměrem krystalu a v oblasti vedle detektoru byla výška nádoby shodná s výškou krystalu jak vyplývá z naměřených hodnot a zkušeností. Toto bylo též zohledněno.

Jako nejvhodnější se jeví „Nová masťovka“ s objemem 397 cm³ (rozměry uvedeny v tabulce číslo 59) . Návrh této nádoby umožňuje používat ji pro oblast nad detektorem i pro oblast vedle detektoru. Navíc v oblasti vedle detektoru by bylo možné používat různé množství těchto nádob, a to až 8 kusů (dáno průměrem detektoru) v závislosti na množství vzorku.

„Nová Marinelliho nádoba“ s objemem 8696 cm³ (rozměry uvedeny na obrázku číslo 58) by také přinesla zvýšení účinnosti geometrie, ale ne tak výhodně, protože by bylo třeba velké množství vzorku, které není vždy k dispozici. Navíc u této nádoby se uplatňuje příspěvek z oblasti F+G, který není definován (viz 6.3.4) a tudíž nemůžeme říci, jestli množství vzorku, které je v této oblasti (cca 45 %), je přínosné z hlediska zvýšení účinnosti.

Hodnoty MDA jsou na rozdíl od účinnosti detekce ovlivněny i velikostí pozadí, které se skládá z kombinace impulzů v pozadovém píku (z měření detektorem bez vzorku) a z impulzů Comptonovského pozadí (z měření vzorku) v okolí energie, která je předmětem hodnocení. Díky tomu se výhodnost geometrie měření s větším objemem vzorku měřeném na vybraném detektoru neprojeví tak výrazně, jak by vyplývalo z porovnání prostých účinností. Rovněž i při měření ve zvolené geometrii na detektoru

s různou účinností bude detektor s vyšší účinností mít většinou i vyšší pozadí, takže poměr MDA bude méně výrazný, než by vyplývalo z poměru účinností.

6.3.7. Samoabsorbce

Další věcí, která ještě ovlivňuje velikost účinnosti pro danou geometrii je samoabsorpce. Tento faktor nebyl v této práci zohledněn. Pro ilustraci je uveden v následující tabulce poměr středních zeslabení pro vodu a vzduch pro radionuklidy ^{210}Pb (energie 46 keV), ^{137}Cs (energie 661 keV), ^{60}Co (energie 1332 keV) a pro vzdálenosti, které se uplatňují v rozměrech nových nádob. [15]

Tab. 66: Poměr středních zeslabení pro vodu a vzduch pro vybrané energie a dráhu fotonů ve vzorku

| radionuklid | Poměr středních zeslabení pro dráhu | |
|-------------------|-------------------------------------|-------|
| | 9 cm | 7,5cm |
| ^{210}Pb | 2,37 | 2,1 |
| ^{137}Cs | 1,42 | 1,35 |
| ^{60}Co | 1,32 | 1,26 |

V následujících tabulkách je srovnání nových geometrií se stávajícími po započtení poměru středních zeslabení.

Tab. 67: Porovnání účinností pro „Novou masťovku“ nad detektorem a masťovku nad detektorem

| geometrie | „Nová masťovka“ nad detektorem | | | Masťovka nad detektorem | | |
|-----------|--------------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 0,014 | 0,13 | 0,013 | 0,0049 | 0,063 | 0,011 |
| 661 keV | 0,088 | 0,081 | 0,076 | 0,031 | 0,026 | 0,03 |
| 1332 keV | 0,035 | 0,021 | 0,058 | 0,019 | 0,017 | 0,027 |

Tab. 68: Porovnání účinností na jednotku objemu [l] pro „Novou masťovku“ nad detektorem a masťovku nad detektorem

| geometrie | „Nová masťovka“ nad detektorem | | | Masťovka nad detektorem | | |
|-----------|--------------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 0,0056 | 0,052 | 0,0054 | 0,0010 | 0,013 | 0,0022 |
| 661 keV | 0,035 | 0,033 | 0,031 | 0,0062 | 0,0051 | 0,0077 |
| 1332 keV | 0,014 | 0,0083 | 0,023 | 0,0038 | 0,0034 | 0,0054 |

Tab. 69: Porovnání účinností pro „Novou masťovku“ okolo detektoru a masťovku okolo detektoru

| geometrie | „Nová masťovka“ vedle detektoru | | | Masťovka vedle detektoru | | |
|-----------|---------------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 0,0019 | 0,0006 | 0,0045 | 0,0020 | 0,0008 | 0,0047 |
| 661 keV | 0,029 | 0,015 | 0,022 | 0,027 | 0,018 | 0,028 |
| 1332 keV | 0,013 | 0,0048 | 0,0067 | 0,017 | 0,012 | 0,021 |

Tab. 70: Porovnání účinností na jednotku objemu [l] pro „Novou masťovku“ okolo detektoru a masťovku okolo detektoru

| geometrie | „Nová masťovka“ vedle detektoru | | | Masťovka vedle detektoru | | |
|-----------|---------------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 0,0061 | 0,0020 | 0,014 | 0,0024 | 0,0009 | 0,0057 |
| 661 keV | 0,091 | 0,047 | 0,071 | 0,032 | 0,021 | 0,034 |
| 1332 keV | 0,042 | 0,016 | 0,022 | 0,021 | 0,015 | 0,025 |

Z výsledků těchto tabulek můžeme konstatovat, že i po započtení poměru středních zeslabení jsou nové geometrie z hlediska účinnosti vhodnější a tedy i z hlediska MDA, což ukazují tabulky číslo 71 a 72.

U geometrie „Nová masťovka“ nad detektorem je výhodnost výraznější než u geometrie „Nová masťovka“ okolo detektoru, pokud ale bereme v úvahu, že okolo detektoru je možno použít více masťovek (až 8), tento rozdíl není již tak velký.

Tab. 71: Porovnání MDA [Bq] pro „Novou masťovku“ nad detektorem a masťovku nad detektorem

| geometrie | „Nová masťovka“ nad detektorem | | | Masťovka nad detektorem | | |
|-----------|--------------------------------|----------|---------|-------------------------|---------|----------|
| | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 | Det. 23 | Det. 29 | Det. 30 |
| 46 keV | 8,9E-03 | 3,4E-04 | 5,2E-05 | 0,055 | 0,0014 | 0,00013 |
| 661 keV | 2,5E-05 | 1,9E-05 | 2,5E-05 | 0,00014 | 0,00012 | 0,000099 |
| 1332 keV | 2,4E-05 | 4,62E-05 | 3,2E-05 | 0,000089 | 0,00011 | 0,00013 |

Tab. 72: Porovnání MDA [Bq] pro „Novou masťovku“ okolo detektoru a masťovku okolo detektoru

| geometrie | „Nová masťovka“ vedle detektoru | | | Masťovka vedle detektoru | | |
|-----------|---------------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
| detektor | 23 | 29 | 30 | 23 | 29 | 30 |
| 46 keV | 8,4E-03 | 8,9E-03 | 2,1E-03 | 0,021 | 0,00017 | 4,7E-05 |
| 661 keV | 9,5E-06 | 1,3E-05 | 1,1E-05 | 2,3E-05 | 2,5E-05 | 1,9E-05 |
| 1332 keV | 8,2E-06 | 2,5E-05 | 3,4E-05 | 1,3E-05 | 2,2E-05 | 2,4E-05 |

Tato srovnání jsou provedena jen pro masťovky, protože není žádná stávající geometrie s tak velkým objemem jako „Nová Marinelliho nádoba“, se kterou by bylo možné srovnávat.

7. ZÁVĚR

Tato práce byla vypracována na Oddělení spektrometrie Státního ústavu radiální ochrany v Praze, kde jsou rutinně používány geometrie měření, které byly zavedeny pro starší detektory s menšími rozměry krystalu a tudíž i s nižší účinností. Vzhledem k zavádění detektorů s relativní účinností sto a více procent má význam zavádět i nové geometrie měření, které lépe využijí jejich vlastností. Diplomová práce měla za úkol navrhnout nové geometrie, které by více vyhovovaly novým účinnějším detektorům, jak z hlediska větší účinnosti geometrií, tak z hlediska tvarů a rozměrů měřících nádob.

Byly nalezeny oblasti, které nejvíce přispívají k celkové účinnosti. Tyto oblasti lze pak považovat za optimální rozměry pro nové geometrie v dané pozici. Po zkombinování těchto optimálních oblastí nad detektorem, z boku detektoru a pro vybrané energie a detektor byly nalezeny optimální rozměry nové geometrie, použitelné jak na čele detektoru, tak okolo něj. Jako výhodné se ukazují válcové geometrie, které plochou podstavy odpovídají zhruba průměru krystalu a výškou vzorku výšce detektoru.

Nádoby pro nově navržené geometrie jsou „Nová masťovka“ nad detektorem a „Nová masťovka“ vedle detektoru a „Nová Marinelliho nádoba“, při jejich porovnání z hlediska MDA a účinnosti se ukazuje jejich výhodnost oproti zavedeným geometriím.

Proto tyto geometrie potvrzují hypotézu, že optimalizované geometrie přinesou zlepšení využití nových HPGe detektorů o velkém aktivním objemu.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] ALFASSI, Z.B., GROUPI, F. An empirical formula for the efficiency detection of Ge detectors for cylindrical radioactive sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics research* . 2007, no. A 574, s. 280-284.
- [2] A Practical Guide to High Count Rate Germanium Gamma Spectroscopy [online]. [cit. 2008-02-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.canberra.com/literature/974.asp>>.
- [3] BARTSCH HANS- JOCHEN. Matematické vzorce. Praha: Mladá fronta, 2002. 831 s. ISBN 80-204-0607-7
- [4] BRONSON F. & VENKATAMARAN R. Validation of the Accuracy of the LabSOCS Mathematical Efficiency Calibration for Typical Laboratory Samples. 46th Annual Conference on Bioassay, Analytical and Environmental Radiochemistry, November 11-17, 2000, Seattle, WA.
- [5] BROŽ J., ROSKOVEC V., VALOUCH M. Fyzikální a matematické tabulky. Prahy: SNTL Praha, 1980.
- [6] BŘEZINA F., MALLIN J., PASTOREK R., ŠINDELÁŘ Z. Chemické tabulky anorganických sloučenin. Praha: SNTL Praha, 1986.
- [7] BUBENÍK F., PULTAR M., PULTAROVÁ I. Matematické vzorce a metody. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. 313 s.
- [8] CORNEO DÍAZ, N., JURADO VERGAS, M. An improved Monte Carlo computer program for evaluating the efficiency in coaxial gamma - ray detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics research* . 2008, no. A 586, s. 204-210.
- [9] DOLEŽAL Z. Polovodičové detektory v jaderné a subjaderné fyzice. 2005. [cit. 2007-11-08] Dostupné z <<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz>>
- [10] Genie 2000 – Operations manual. Canberra industries, 2004. 322 s.
- [11] Germanium [online]. 2008 [cit. 2008-01-15]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD_strana>.
- [12] GERNT J. Detektory ionizujícího záření. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. 164 s.
- [13] HŮLKA J., Bučina I., MALÁTOVÁ I. a kolektiv. Účinnostní kalibrace velkoobjemových vzorků polovodičovým detektorem. XII. Radiohygienické dny, Hrubá Skála, 1984.

- [14] IPROL-1 Intelligent LaBr Probe with Sourceless Stabilization for the InSpector™ 1000 - CANBERRA [online]. [cit. 2008-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.canberra.com/products/438135.asp>>.
- [15] JAEGER R. G. Engineering Compedium on Radiation Shield. Shielding fundamentals methods, Springer Verlag, Berlin: 1968.
- [16] KOC J. . Způsoby ochrany zdrojů ionizujícího záření. Učební text, 2006. 118 s.
- [17] Kolektiv autorů, Editor Klener. Principy a praxe radiační ochrany. 1 vyd. Praha: Azin CZ pro SÚJB 2000. 619 s. ISBN 80-238-3703-6
- [18] Kolektiv autorů, Editor Navrátil, Rosina. Biofyzika v medicíně, 1 vyd. Manus: 2003. 398 s. ISBN 80-86571-03-3
- [19] Kuna, Navrátil. Klinická radiobiologie. 1 vyd. Praha: Manus: 2005. 222 s.
- [20] LabSOCS* Calibration Software [online]. [cit. 2008-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.canberra.com/products/839.asp?SELECT=http%3A%2F%2Fwww%2Ecanberra%2Ecom%2F>>.
- [21] MAJER V. A KOLEKTIV. Základy jaderné chemie. 2. vyd. Praha: SNTL. 1981. 592 s.
- [22] MELOUN M., MILITKÝ J. Kompedium statistického zpracování dat. Praha: Academia, 2002.
- [23] MARTIN, M., C., HANSE, S., M., KLINGHER, B. Excel 2000. 1,vyd. Praha: Grada, 2000. 536 s. ISBN 80-7169-870-9
- [24] Metodika SÚRO 31-8-03 – Minimální významná aktivita a minimální detekovatelná aktivita, výklad pojmů, interní dokument, 2005. 60 s.
- [25] *Nuklid* [online]. [cit. 2008-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Nuklid>>.
- [26] OHERA. Úvod do polovodičové gama spektrometrie. 1.vyd. Brno: EnviM, 2000. 124 s.
- [27] Principy PET [online]. 2008 [cit. 2008-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.upol.cz/index.php?id=4446>>.
- [28] SINGER, HEŘMANSKÁ. Principy a praxe radiační ochrany. 1. Vyd. Praha: HEWER, s.r.o., 2004. 11s. ISBN 80-7040-708-5
- [29] *Spektrum záření gama, jeho získávání a analýza* [online]. [cit. 2008-04-12]. Dostupný z WWW: <http://209.85.135.104/search?q=cache:gNc2wUbqH50J:hp.ujf.cas.cz/~wagner/pred>

nasky/spektroskopie/gamma/spektrumgamma.ppt+comptonovsk%C

- [30] ŠKRKAL, Jan, TECL, Josef. Porovnání těsných geometrií měření ve spektrometrii gama.. In XXVIII. Dny radiační ochrany. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2006. s. 306-309. ISBN 80-01-03575-1.
- [31] Standardní zkušební postup SZP 11 SÚRO – Stanovení radionuklidů spektrometrií záření gama s vysokým rozlišením, interní dokument, 2008. 33 s.
- [32] TYKVA R., SABOL J. Stanovení nízké activity radionuklidů. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991. 125 s.
- [33] URBÁNEK T., ŠKÁRKA J. Excel 97 pro vědce a inženýry. Praha: Computer press, 1998. 434 s.

9. KLÍČOVÁ SLOVA

Polovodičový HPGe detektor, účinnost, geometrie měření, minimální detekovatelná aktivita.

10. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| | |
|------|-----------------------------------|
| MDA | Minimální detekovatelná aktivita |
| RN | Radionuklid |
| SÚRO | Státní ústav radiační ochrany |
| G2k | Program Genie 2000 firmy Canberra |
| MCA | Multikanálový analyzátor |
| ADC | Analogově-digitální konvertor |