



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

**Charakterizace a porovnání vybraných  
ručních dozimetrických přístrojů  
používaných složkami integrovaného  
záchranného systému**

**Characterization and Comparison of  
Selected Hand-held Dosimetric Devices  
Used by Integrated Rescue System Units**

Bakalářská práce

Studijní program: Ochrana obyvatelstva

Studijní obor: Plánování a řízení krizových situací

Autor bakalářské práce: Josef Runštuk

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

---

Kladno 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Runštuk** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **496203**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**  
Studijní program: **Ochrana obyvatelstva**  
Studijní obor: **Plánování a řízení krizových situací**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Charakterizace a porovnání vybraných ručních dozimetrických přístrojů používaných složkami integrovaného záchranného systému**

Název bakalářské práce anglicky:

**Characterization and Comparison of Selected Hand-held Dosimetric Devices Used by Integrated Rescue System Units**

Pokyny pro vypracování:

Předmětem bakalářské práce bude porovnání charakteristických veličin vybraných dozimetrických přístrojů užívaných složkami integrovaného záchranného systému. Teoretická část se bude zabývat přehledem současného stavu ručních dozimetrických přístrojů užívaných složkami integrovaného záchranného systému, zejména Armády České republiky a Hasičského záchranného sboru České republiky. V experimentální části budou porovnávány detekční vlastnosti vybraných ručních dozimetrických přístrojů z hlediska měření plošné kontaminace, dávkového příkonu, obdržené dávky a spektrometrických charakteristik. Dále bude provedena komparace naměřených výsledků s reálnými hodnotami a mezi sebou. Výsledkem práce bude zjištění spolehlivosti měření jednotlivých přístrojů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] GILMORE, Gordon, Practical gamma-ray spectroscopy, John Wiley & Sons, 2008, ISBN 978-0-470-86196-7
- [2] KNOLL, Glenn F., Radiation detection and measurement, John Wiley & Sons, 2010, ISBN 0-471-07338-5
- [3] TSOULFANIDIS, Nicholas; LANDSBERGER, Sheldon, Measurement & detection of radiation, CRC press, 2021, ISBN 9781003009849
- [4] LEO, William R., Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach, Springer Science & Business Media, 2012, ISBN 978-3-540-57280-0

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Mgr. Renata Havránková, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

**mjr. doc. Ing. Jiří Janda, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2023**

doc. Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA  
děkan

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Charakterizace a porovnání vybraných ručních dozimetrických přístrojů používaných složkami integrovaného záchranného systému vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne 12.05.2022

.....  
Josef Runštuk

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucí práce, paní Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D., za poskytnuté rady, čas, trpělivost, vstřícnost a ochotu.

Děkuji také odbornému konzultantovi, panu doc. Ing. Jiřímu Jandovi, Ph.D., zejména za cenné rady v rámci praktické části této práce, ale také za dlouhodobou spolupráci.

Veškeré přístroje byly zapůjčeny od jednotek 31. pluku radiální, chemické a biologické ochrany v Liberci, Ústavu ochrany proti zbraním hromadného ničení ve Vyškově a chemické laboratoře Institutu ochrany obyvatelstva v Lázních Bohdaneč, který je součástí Generálního ředitelství HZS ČR, za což jim děkuji.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá objektivním porovnáním ručních dozimetrických přístrojů používaných v integrovaném záchranném systému České republiky, Armádě České republiky a Hasičském záchranném sboru České republiky. Všechny tyto detekční prostředky jsou běžně využívány v praxi, nicméně jejich vzájemné porovnání za stejných podmínek měření přináší cenné informace o jejich spolehlivosti.

První část práce nabízí teoretický základ řešené problematiky, včetně stručného historického vývoje. V experimentální části této práce jsou porovnávány vybrané ruční dozimetrické přístroje různých generací a typů na základě společných charakteristik. Veškerá měření byla nastavena tak, aby byly dodrženy stejné podmínky měření pro všechny testované přístroje. Z hlediska určení vybraných přístrojů byly tyto rozděleny na detektory záření, detektory plošné kontaminace, spektrometry a osobní dozimetry.

V kategorii detektorů záření dosáhl nejlepších výsledků detektor RGU 100 (URAD), naopak nejhorších detektor RadEye B20-ER. Nejlepším testovaným spektrometrickým detektorem byl detektor RT-30, nejhorší vlastnosti vykazovaly detektory FLIR Identifinder 2 a R 400. V oblasti měření plošné kontaminace byl nejúčinnějším testovaným detektorem MicroCont II, naopak RadEye B20-ER vykazoval výsledky nejhorší. Poslední skupinou detektorů byly osobní dozimetry, v níž nejlepších výsledků dosáhly dozimetry THERMO EPD MK2+ a SOR/R. Nejhorším z testovaných osobních dozimetrů byl PED Blue.

## **Klíčová slova**

Dozimetrie; ionizující záření; detekce; radiační ochrana; detektory záření

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with an objective comparison of hand-held dosimetric devices used in the integrated rescue system of the Czech Republic, the Army of the Czech Republic and the Fire and Rescue Service of the Czech Republic. All these detection devices are commonly used in practice, however, their mutual comparison under the same measurement conditions provides valuable information about their reliability.

The first part of the thesis offers a theoretical basics, including a short historical development of this problematics. In the experimental part of this thesis, selected hand-held dosimetric devices of different generations and types are compared on the common characteristics. All measurements were set to maintain the same measurement conditions for all tested devices. According to their purpose, the selected detectors were divided into radiation detectors, surface contamination detectors, spectrometers and personal dosimeters.

In the category of radiation detectors, the RGU 100 (URAD) detector achieved the best results, while the RadEye B20-ER detector was the worst. The best tested spectrometric detector was the RT-30 detector, the worst properties were shown by the FLIR Identifinder 2 and R 400 detectors. MicroCont II was the most effective tested detector of area contamination measurement, while the RadEye B20-ER showed the worst results. The last group of detectors were personal dosimeters, where the THERMO EPD MK2 + and SOR / R dosimeters achieved the best results. The worst of the tested personal dosimeters was PED Blue.

## **Keywords**

Dosimetry; ionizing radiation; detection; radiation protection; radiation detectors

## Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod.....   | 9  |
| 2     | Cíle práce.....   | 10 |
| 3     | Přehled současného stavu.....                             | 11 |
| 3.1   | Radiační ochrana .....                                    | 12 |
| 3.1.1 | Principy radiační ochrany.....                            | 13 |
| 3.1.2 | Cíle radiační ochrany.....                                | 14 |
| 3.1.3 | Legislativa a systém zajištění radiační ochrany v ČR..... | 15 |
| 3.2   | Ionizující záření.....                                    | 19 |
| 3.2.1 | Druhy ionizujícího záření .....                           | 20 |
| 3.2.2 | Zdroje ionizujícího záření .....                          | 26 |
| 3.3   | Detektory ionizujícího záření.....                        | 27 |
| 3.3.1 | Ionizační (plynové) detektory .....                       | 29 |
| 3.3.2 | Scintilační detektory .....                               | 33 |
| 3.3.3 | Polovodičové detektory.....                               | 36 |
| 4     | Metodika.....   | 40 |
| 4.1   | Přístroje a pomůcky.....                                  | 40 |
| 4.2   | Metodika měření.....                                      | 42 |
| 4.2.1 | Linearita odezvy detektorů.....                           | 42 |
| 4.2.2 | Účinnost měření plošné kontaminace .....                  | 43 |
| 4.2.3 | Schopnost identifikace radionuklidu .....                 | 44 |
| 4.2.4 | Linearita měření osobních dozimetrů .....                 | 44 |
| 5     | Výsledky .....  | 45 |
| 5.1   | Linearita odezvy detektorů.....                           | 45 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.1.1 | Detektory záření .....                    | 45 |
| 5.1.2 | Spektrometry .....                        | 57 |
| 5.2   | Účinnost měření plošné kontaminace .....  | 69 |
| 5.3   | Identifikace radionuklidu.....            | 71 |
| 5.4   | Linearita měření osobních dozimetrů ..... | 71 |
| 6     | Diskuze .....                             | 75 |
| 7     | Závěr .....                               | 83 |
| 8     | Seznam použitých zkratk.....              | 85 |
| 9     | Seznam použité literatury .....           | 86 |
| 10    | Seznam použitých obrázků .....            | 90 |
| 11    | Seznam použitých tabulek.....             | 92 |



# 1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním a charakterizací vybraných ručních dozimetrických přístrojů používaných jednotkami bezpečnostních sborů, zejména Hasičským záchranným sborem České republiky, a jednotkami Armády České republiky. Obdobně jako je tomu v ostatních oblastech zájmu těchto organizací, je nutné i v oblasti detekce ionizujícího záření a radiační ochrany průběžně modernizovat detekční prostředky a vybavení. V současné době se na trhu objevuje velké množství takových detekčních prostředků, proto je zapotřebí se mezi nimi orientovat. Primární úkoly Hasičského záchranného sboru České republiky a Armády České republiky se v řešené oblasti liší, proto se liší i detekční prostředky, jimiž jsou tyto organizace vybaveny. V rámci integrovaného záchranného systému České republiky však tyto organizace spolupracují. Obě tyto organizace se v rámci modernizace detekčního vybavení vydaly různými cestami, porovnání těchto prostředků proto může napomoci při udávání dalšího směru vývoje.

Počínaje stručným historickým vývojem oblastí detekce ionizujícího záření a radiační ochrany se teoretická část této práce zabývá systémem radiační ochrany, druhy ionizujícího záření a způsoby, jak je lze detekovat. Praktická část práce pak spočívala v měření vybraných charakteristických veličin, na jejichž základě lze testované detektory porovnat.

## 2 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je porovnání detekčních vlastností vybraných ručních dozimetrických přístrojů používaných jednotkami Hasičského záchranného sboru České republiky a jednotkami chemického vojska Armády České republiky. Dozimetrické přístroje budou rozděleny do skupin dle jejich určení.

První skupinu tvoří detektory záření, tedy dozimetrické přístroje určené k měření úrovně dávkového příkonu v prostředí. U těchto přístrojů bude měřena účinnost detekce a linearita odezvy, přičemž obě tyto charakteristiky budou porovnány s reálnými hodnotami. Odchylka od reálných hodnot by neměla překročit 30 %. Další skupinou přístrojů jsou detektory plošné kontaminace, u kterých bude měřena účinnost detekce pomocí plošných etalonů. Následně dojde k porovnání výsledků. Další zkoumanou charakteristikou bude schopnost identifikace radionuklidů u spektrometrických přístrojů. Poslední skupinou detekčních přístrojů budou osobní dozimetry, kde bude zkoumána účinnost a linearita měření.

Jedním z cílů této práce by mělo být určení nejspolehlivějších a nejvhodnějších detekčních prostředků v daných oblastech, a to na základě porovnávacího měření za stejných podmínek a na základě dalších charakteristických vlastností daných přístrojů.

### 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

Počátky výzkumu v oblasti jaderné fyziky a chemie sahají až na přelom 19. a 20. století, kdy byly postupně objevovány významné milníky této nové éry. Již od roku 1896, kdy Henri Becquerel objevil přirozenou radioaktivitu, tedy schopnost samovolné přeměny atomových jader, se tato nová oblast začíná aplikovat do všech možných oblastí lidského života, tedy průmyslu, zemědělství, medicíny, vojenství a v současné době i terorismu. Největší milník, který odstartoval tzv. jaderný věk, byl objev pánů Otto Hahna a Fritze Strassmana, že jádro atomu lze rozštěpit. O rok později Lise Meitnerová a Otto Robert Frisch zjistili, že jádro lze rozštěpit neutrony a jediný v přírodě se nacházející štěpitelný prvek je izotop uranu,  $^{235}\text{U}$ . Tyto významné objevy završil ve 40. letech 20. století Enrico Fermi, když v americkém Chicagu sestavil zařízení, které bylo schopno první řízené štěpné reakce, CP1 (Chicago Pile 1) [1].

Svět se tehdy nacházel uprostřed největšího válečného konfliktu lidské historie, tedy druhé světové války. Není podivu, že tyto významné objevy ihned vzbudily zájem vojenského výzkumu, který v rámci projektu Manhattan vedl k sestrojení uranové atomové bomby. První úspěšný pokusný jaderný výbuch uskutečněný 16. července 1945, tzv. „Trinity test“, rozhodl o reálném použití jaderných zbraní ve válečném konfliktu, a to 6. a 9. srpna 1945 v japonských městech Hirošima a Nagasaki. Druhá světová válka skončila a oblast jaderného výzkumu se významně rozšiřuje mimo zbraňové odvětví, např. jaderné reaktory pro pohon lodí a ponorek, ale i do civilního sektoru [1].

Obrovské množství energie, které se uvolňuje v průběhu štěpné reakce logicky vzbudilo obrovské nadšení napříč světovou společností. Výzkum se mimo vojenské odvětví rozšířil zejména do oblasti energetiky, ve které jaderné reakce představovaly obrovský potenciál. V 50. letech minulého století byla spuštěna první jaderně energetická zařízení, výrobní závody, byly zakládány

vysoké školy s jaderným zaměřením, výzkumné a konstrukční kanceláře. V průběhu dalších let docházelo ke zdokonalování konstrukcí jaderných reaktorů a k mohutné výstavbě jaderných energetických zařízení po celém světě. V současné době je napříč světem 448 funkčních jaderných reaktorů, kde je zahrnuto i šest bloků nacházejících se na území České republiky, konkrétně v jaderných energetických zařízeních (dále jen JEZ) Dukovany a Temelín. Dále byly provedeny tisíce testů jaderných zbraní a zdroje ionizujícího záření se hojně využívají v mnoha oblastech průmyslu, zemědělství a medicíny [2].

### **3.1 Radiační ochrana**

Skutečnost, že ionizující záření má neblahé účinky na lidské zdraví, je známa již z dob krátce po objevení záření X (Roentgenovo záření) v roce 1895 a objevení radioaktivity v roce 1896. První případ nádorového onemocnění spojovaného právě s působením ionizujícího záření byl zaznamenán již v roce 1902. Ve 20. a 30. letech minulého století byla zachycena další radiační poškození (zejména poškození kůže) u rentgenologů i pacientů, ale také u pracovníků ve výrobě svítících barev. K významnému rozvoji radiační ochrany došlo po druhé světové válce v důsledku použití jaderných zbraní a rostoucímu ozařování osob v profesních i lékařských odvětvích, kdy na základě studií zabývajících se účinky ozáření byly určeny koeficienty rizika pravděpodobnosti smrti pro nádorová onemocnění a jiné zdravotní újmy. V důsledku rostoucích obav z dalšího použití jaderných zbraní, ale také v důsledku postupného rozvoje jaderné energetiky, docházelo v 50. letech minulého století k rychlému rozvoji dozimetrie, tedy oboru zabývajícího se měřením veličin, které charakterizují interakci ionizujícího záření s prostředím. S rostoucími poznatky v oblasti účinků ionizujícího záření na lidský organismus docházelo v průběhu 70. a 80. let k vědomostním posunům v oblasti vzniku nádorů, genetických poškození a popisu rozdílů mezi stochastickými a deterministickými účiny ionizujícího záření [3; 4].

Významnou roli v rozvoji radiační ochrany zastávaly a stále zastávají mezinárodní organizace, které zajišťují mezinárodní spolupráci a sdílení poznatků v této oblasti. První důležitou událostí pro kontrolu ozáření osob pracujících se zdroji ionizujícího záření, usnesenou komisí pro ochranu před zářením X v roce 1934, bylo stanovení tzv. toleranční dávky pro rentgenové záření, jež byla stanovena ve výši 0,2 R (rentgenů) za pracovní týden. Tato komise byla později přetransformována na Mezinárodní komisi pro radiologickou ochranu (ICRP – International Commission on Radiological Protection), která je dodnes velmi důležitou organizací a všude ve světě udává směr při rozhodování legislativních orgánů v oblasti radiační ochrany. Pro zajištění ucelené koncepce radiační ochrany při jakékoliv činnosti byly stanoveny obecné zásady [3; 4; 5].

### 3.1.1 Principy radiační ochrany

Na základě doporučení ICRP lze principy základní principy radiační ochrany definovat tímto způsobem [3; 4; 5]:

- **Princip odůvodnění** – odůvodněnou činností lze chápat takovou, jejíž přínos pro jednotlivce nebo společnost je vyšší než rizika, která při nebo v důsledku této činnosti vznikají.
- **Princip optimalizace** – opakovaný proces, který má za cíl dosáhnout či udržet takovou úroveň radiační ochrany, aby ohrožení osob či životního prostředí bylo tak nízké, jakého je možné při uvážení všech hospodářských a společenských hledisek **rozumně** dosáhnout.
- **Princip limitování** – povinnost omezit ozáření osob tak, aby celkové ozáření (kombinace všech ozáření v rámci expozičních činností) bylo odůvodněné, optimalizované a nepřekračovalo stanovené limity ozáření.
- **Zabezpečení zdrojů** – zabezpečení zdrojů ionizujícího záření před nepovolenou manipulací, poučení o zabezpečení a ověření znalostí pracovníků s přístupem k daným zdrojům, případně zajištění fyzické ochrany zdrojů.

Obecnou zásadou platnou v normálních provozních a pracovních podmínkách je nejen splnit limity pro ozáření stanovené legislativou jednotlivých států, ale zabezpečit mnohem vyšší míru ochrany pracovníků i obyvatel, než je s daných legislativních pramenech stanoveno. Ač je v současné době míra bezpečnosti jaderných energetických zařízení a naprosté většiny všech ostatních provozů využívajících ke své činnosti zdroje ionizujícího záření na velmi vysoké úrovni, neustále je zapotřebí vnímat a vyhledávat veškerá rizika, která by mohla vymknout situaci z normálu [3; 4; 5].

### **3.1.2 Cíle radiační ochrany**

Základním cílem radiační ochrany je vyloučení deterministických účinků a snížení pravděpodobnosti vzniku účinků stochastických na společensky přijatelnou míru. Musíme však brát v úvahu i možné abnormální situace, kdy nemusí být možné výše uvedeného dosáhnout. Z toho důvodu jsou rozhodující dva základní úkoly radiační ochrany [4; 5]:

- Za normálních okolností zajistit, aby ozáření osob a životního prostředí bylo co nejmenší, bylo optimalizováno a odůvodněno s ohledem na přínos nebo újmu. S přihlédnutím ke všem ostatním relevantním aspektům.
- Snížit pravděpodobnost radiační nehody, havárie či jiné mimořádné události vedoucí k výskytu deterministických biologických účinků. Zároveň zabezpečit připravenost na podobné situace, zejména na eliminaci či alespoň minimalizaci jejich dopadů.

Abnormální situace, ke kterým doposud docházelo v důsledku havárií, se v současné míře bezpečnosti, kterou zajišťují platné předpisy, vyskytují pouze výjimečně, nelze však vyloučit ani akty sabotáží či teroristických činů. Z toho důvodu je zapotřebí klást velký důraz zejména na zabezpečení a fyzickou ochranu zdrojů i jaderných energetických zařízení, které by mohly být těmito způsoby zneužity. V konečném důsledku by se podobné akty projevíly

obdobným způsobem jako radiační havárie, proto by podrobně zpracované havarijní plány, které jsou k eliminaci či zmírnění následků očekávatelných radiačních událostí připraveny a neustále aktualizovány, měly být ke zvládnutí takové situace dostatečným nástrojem [4; 5].

### **3.1.3 Legislativa a systém zajištění radiační ochrany v ČR**

#### **Systém radiační ochrany**

Odpovědnost za prosazování principů radiační ochrany a ochrany zdrojů ionizujícího záření v rámci státu mají vlády, kterým pro zajištění této oblasti slouží národní infrastruktury radiační ochrany v čele s kompetentními odbornými organizacemi. Nejinak je tomu v případě České republiky, kde je pro tento účel zřízen Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB). Tento ústřední správní úřad je přímo podřízen vládě České republiky a je ústředním správním orgánem, který vykonává státní dozor v celé oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření [6; 7].

V přímé podřízenosti SÚJB je zejména pro zajištění odborné, informační, metodické, vzdělávací a vývojové účely zřízen Státní ústav radiační ochrany (dále jen SÚRO), který slouží jako jeden z hlavních pracovních orgánů v oblasti ochrany před zdroji ionizujícího záření v České republice. Mezi hlavní úkoly SÚRO patří zejména monitoring distribuce umělých radionuklidů v životním prostředí a potravinách, problematika vnitřní kontaminace, lékařské expozice (tzn. užívání zdrojů ionizujícího záření v medicíně) a problematika přírodních zdrojů ionizujícího záření (sledování ozáření obyvatelstva z přírodních zdrojů a hodnocení rizik) [6; 7].

Další organizací přímo podřízenou a zřízenou SÚJB je Státní ústav jaderné, biologické a radiační ochrany (dále jen SÚJCHBO). Tento ústav byl zřízen hlavně pro výzkumné a vývojové účely. Hlavními úkoly SÚJCHBO jsou identifikace

(tedy kvalitativní analýza) a kvantifikace (tedy kvantitativní analýza) radioaktivních, chemických a biologických látek, vývoj a testování prostředků individuální ochrany (dále jen PIO), prostředků kolektivní ochrany (dále jen PKO) a problematika dekontaminace [6].

Na celý systém radiační ochrany vycházející z existence SÚJB, jakožto ústředního správního úřadu, a jeho pracovních orgánů plynne navazuje integrovaný záchranný systém České republiky (dále jen IZS ČR). V případě vzniku jakékoliv mimořádné události spojené s problematikou radiační ochrany je právě IZS výkonnou složkou celého systému. Nejdůležitější složkou IZS je v případě radiačních mimořádných událostí v mírovém prostředí bezpochyby Hasičský záchranný sbor České republiky (dále jen HZS ČR), který danou oblast odborně zaštituje, jelikož ve své struktuře obsahuje jednotky chemické služby, chemické laboratoře a prostředky pro hromadnou dekontaminaci osob. Další, avšak ostatní složkou IZS ČR, která disponuje mnoha prostředky pro zvládnutí mimořádných událostí radiačního charakteru je Armáda České republiky (dále jen AČR), konkrétně chemické vojsko. Chemické vojsko AČR je primárně určeno jako útvar podpory pro bojové jednotky během ozbrojených konfliktů. I v civilním bezpečnostním systému však má své místo, a to zejména při zvládnutí větších mimořádných událostí.

### **Legislativa**

Základní právní normou, která upravuje systém radiační ochrany a nakládání se zdroji ionizujícího záření je zákon č. 263/2016 Sb., *Atomový zákon*, který z valné většiny nahradil zákon č. 18/1997 Sb., *o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a o změně a doplnění některých zákonů*. Z původního zákona č. 18/1997 Sb. zůstala v platnosti pouze oblast odpovědnosti za jaderné škody. V souvislosti s přijetím zákona č. 263/2016 Sb., *Atomový zákon*, vešel v platnost



i zákon č. 264/2016 Sb., *Zákon, kterým se mění některé zákony v souvislosti s přijetím atomového zákona* [6].

Další důležitou právní normou je zákon č. 21/1993 Sb., který pojednává o zřízení ministerstev a jiných ústředních orgánů státní správy České republiky. Na základě tohoto zákona je zřízen i SÚJB, jakožto nosný prvek celého systému jaderné bezpečnosti a radiační ochrany.

Atomový zákon, tedy zákon č. 263/2016 Sb., je prováděn mnoha dalšími právními předpisy. Pro zajištění bezpečnosti a zvládnutí mimořádných událostí jsou to zejména tyto vyhlášky [6]:

- 374/2016 Sb., o evidenci a kontrole jaderných materiálů a oznamování údajů o nich;
- 361/2016 Sb., o zabezpečení jaderného zařízení a jaderného materiálu;
- 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace;
- 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události;
- 409/2016 Sb., o činnostech zvláště důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, zvláštní odborné způsobilosti a přípravě osoby zajišťující radiační ochrany;
- 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje;
- 21/2017 Sb., o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení;
- 162/2017 Sb., o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona;
- 266/2017 Sb., o koncepci nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem;

- 379/2016 Sb., o schválení typu některých výrobků v oblasti mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření a přepravě radioaktivní nebo štěpné látky.

### **Radiační monitorovací síť**

Nedílnou součástí současného systému radiační ochrany v České republice je radiační monitorovací síť (dále RMS), která slouží k včasnému upozornění v případě jakékoliv mimořádné události tak, aby bylo možné ihned zasáhnout a minimalizovat následky na co nejnížší úrovni. Počátek nepřetržitého monitorování radiační situace na území České republiky je často spojován s havárií jaderné elektrárny Černobyl, ve skutečnosti však započalo o několik týdnů dříve. Po této havárii se do ovzduší uvolnilo velké množství umělých radionuklidů a došlo k jejich distribuci napříč celým evropským kontinentem, tedy tehdejší Československo nevyjímaje. V současné době je radiační situace v České republice trvale monitorována a průběžně se vyhodnocuje aktuální ozáření obyvatelstva České republiky. Podrobné informace jsou prostřednictvím SÚJB zveřejňovány na jejich webových stránkách [6; 7].

Radiační monitorovací síť je spravována SÚJB, na její struktuře se však podílí mnoho dalších subjektů – z nejvýznamnějších jsou to regionální centra SÚJB, SÚRO, Hasičský záchranný sbor ČR, Armáda České republiky nebo Český hydrometeorologický ústav. Základním kamenem radiační monitorovací sítě v České republice je Síť včasného zjištění (SVZ), která je v oblastech kolem jaderných energetických zařízení Temelín a Dukovany posílena o Teledozimetrický systém (TDS). Tento základní systém čítá 169 měřících míst napříč územím České republiky jako součást SVZ a 98 měřících míst teledozimetrického systému v okolí JEZ. Síť včasného zjištění je doplněna dalšími monitorovacími systémy jako jsou sítě termoluminiscenčních dozimetrů (teritoriální síť v gesci SÚRO a SÚJB, lokální síť JEZ Temelín a Dukovany), síť

pro vnitřní ozáření, teritoriální síť odběru vzorků životního prostředí, lokální síť odběru vzorků životního prostředí při JEZ Temelín a Dukovany. Velmi významnou složkou RMS jsou také mobilní monitorovací skupiny, mezi které patří letecká monitorovací skupina v gesci SÚRO a AČR a pozemní monitorovací skupiny, které vyčleňují SÚJB, SÚRO, Ministerstvo vnitra – Hasičský záchranný sbor ČR a Policie ČR, Armáda ČR, Ministerstvo financí – Celní správa a provozovatelé JEZ Dukovany a Temelín [6; 7].

### **3.2 Ionizující záření**

K přenosu energie v prostoru dochází prostřednictvím záření, tedy mikročástic nebo fyzikálních polí. V případech, kdy přenášená energie je dostatečně vysoká, aby byla schopna ionizovat okolní prostředí (tedy vyřázet elektrony z atomového obalu), pak mluvíme o záření ionizujícím. K tomu, aby k ionizaci mohlo dojít, je zapotřebí, aby energie daného záření byla větší, než je vazebná energie elektronu, který má být ze své struktury vyražen. Vazebná energie elektronů jednotlivých prvků se samozřejmě liší, obecně platí, že vazebná energie elektronů klesá směrem od jádra, tudíž nejmenší vazebnou energii mají valenční elektrony. V praxi se pro běžné druhy ionizujícího záření (alfa, beta minus, gama a X) považuje za hraniční hodnotu, kdy mluvíme o ionizujícím záření, energie 5 keV. Tuto hranici nelze využít pro neutrony, jelikož i velmi pomalé neutrony mohou svými interakcemi s jádry způsobovat sekundární ionizaci či jádra aktivovat. Stejný problém nastává u pozitronového záření, jelikož pozitrony po zabrzdění anihilují s elektrony za vzniku pronikavého záření gama [8].

Ionizující záření se dělí na dvě základní skupiny, a to podle mechanismu jejich účinku s prostředím. Přímě ionizující záření tvoří částice, které nesou náboj a jsou schopny elektrickými silami vytrhávat či vyřázet elektrony z atomů. Do skupiny přímě ionizujícího záření se řadí částice alfa (jádra helia), beta minus (elektrony)

a beta plus (pozitrony). Nepřímo ionizující záření nenesou vlastní náboj, tudíž není schopno ionizovat prostředí přímo. Kvanta nepřímo ionizujícího záření musí nejprve předat energii nabitým částicím, které potom přímo ionizují. Do této skupiny se tedy řadí záření gama, rentgenové záření a neutrony [8; 9].

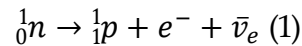
### 3.2.1 Druhy ionizujícího záření

Jak již bylo zmíněno, rozlišujeme několik druhů ionizujícího záření, a to na základě jejich odlišných vlastností. Druhy ionizujícího záření, se kterými se lze běžně setkat v praxi, jsou záření alfa, beta, gama, neutronové a rentgenové záření.

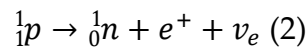
**Záření alfa** je částicové (korpuskulární) záření, které je tvořeno 2 protony a 2 neutrony, tedy jádrem helia. Toto záření má hodně vysokou energii, avšak kvůli velké hmotnosti částice svou energii v prostoru rychle ztrácí, má proto velmi krátký dosah. K vyzařování částic alfa dochází u těžkých prvků, které mají velký počet nukleonů, tedy částic obsažených ve svých jádrech. Silné interakce přitažlivých sil, které působí na částice v jádře atomu, mají krátký dosah a na periferních částech jádra již nemají dostatečnou intenzitu, aby dostatečně vyrovnaly vzájemné odpuzování protonů. V takovém případě dochází k tomu, že 2 protony a 2 neutrony vytvoří lokálně silnější vazebný objekt, který je po překonání potenciálové bariéry vymrštěn z jádra jako částice alfa. Záření alfa je velmi silně ionizující, nese s sebou náboj  $2+$ , avšak působí na krátké vzdálenosti a je možné jej odstínit i listem papíru. Vzhledem ke svému krátkému působení není záření alfa zajímavé v souvislosti s vnějším ozářením, velké riziko však působí při vnitřní kontaminaci [8; 10].

**Záření beta** je korpuskulární (částicové) záření, které vzniká několika způsoby. Stejně jako u záření alfa je i přeměna beta důsledkem stabilizace jádra daného atomu. Záření beta je typické pro izotopy, které mají velký rozdíl mezi počty protonů a neutronů v jádře. Pokud jádro atomu obsahuje nadbytek

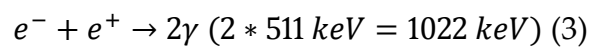
neutronů, dojde podle reakce (1) působením slabé jaderné interakce k přeměně kvarku d na kvark u, tedy neutron se změní na proton za současného vyzáření elektronu a antineutrína (Obrázek 1). V tomto případě se jedná o beta mínus záření, jehož nosnými částicemi jsou elektrony [8; 10].

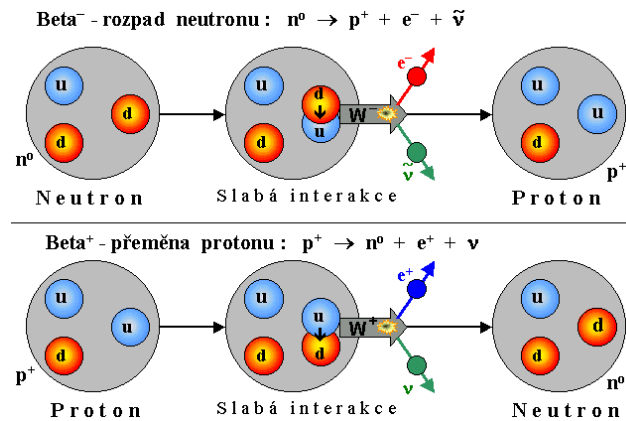


V případě, že jádro obsahuje nadbytek protonů, dochází k přeměně kvarku u na kvark d, tedy proton se podle reakce (2) přemění na neutron za současného vyzáření pozitronu a neutrína (obrázek 1). V takovém případě se jedná o záření beta plus, jehož nosnými částicemi jsou pozitrony.



Částice záření beta plus, tedy pozitron, má kladný náboj a během ionizace prostředí rychle ztrácí svou energii. Jakmile pozitron již nemá dostatek energie k ionizaci prostředí, dochází podle reakce (3) k anihilaci s elektronem v atomovém obalu, kdy obě částice zaniknou a dochází ke vzniku dvou kvant fotonového záření gama o energii 511 keV, které se pohybují pod úhlem 180 ° od sebe.

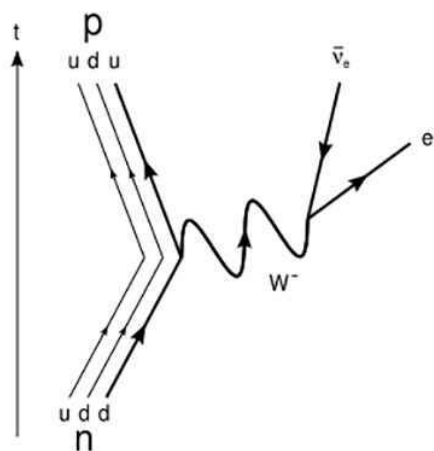




Obrázek 1 Grafické znázornění beta přeměn [8].

Třetím možným způsobem vzniku beta přeměny je tzv. elektronový záchyt, který je inverzní (opačný) přeměně beta mínus. Při elektronovém záchytu dochází k zachycení elektronu z obalu atomu v jádře, které způsobí přeměnu protonu na neutron.

Při přeměně beta dochází vždy k vyzáření dvou částic (beta mínus – elektron, antineutrino; beta plus – pozitron, neutrino) nesoucích energii s různým distribučním charakterem, proto je spektrum beta záření vždy spojitě (Obrázek 2). Maximální energie vyzářených částic je charakteristická pro daný radioizotop [10].

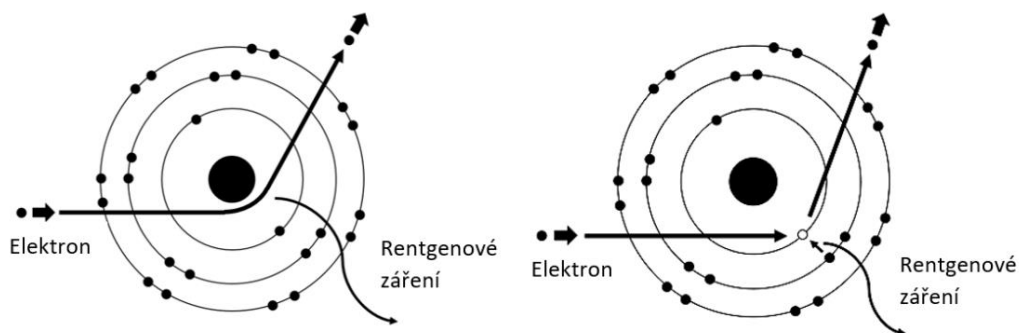


Obrázek 2 Feynmanův diagram rozpadu beta mínus [11].

Obecně záření beta je z hlediska vnějšího ozáření nebezpečně na kratší vzdálenosti od zdroje záření, jelikož se jedná o záření tvořené nabitými částicemi, které jsou již od své emise z jádra zpomalovány ionizací okolí. Nemají tedy dostatečnou energii, aby penetrovaly materiály. K odstínění zdrojů záření beta postačí již tenká vrstva lehkých kovů, avšak u silnějších zdrojů je zapotřebí nezapomínat, že při stínění částic beta dochází k fotonovému brzdnému záření. Stejně jako v případě záření alfa je záření beta významnější v kontextu s kontaminací, a to jak vnitřní, tak i vnější, jelikož při kontaktu s pokožkou může způsobovat radiační dermatitidu.

**Fotonové záření** se rozlišuje pouze na základě místa jeho vzniku, jelikož z fyzikálního hlediska jde o totožný jev. Fotonové záření vznikající v atomovém obalu jako důsledek návratu elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší (deexcitace – návrat atomu z excitovaného stavu do základního energetického stavu), se nazývá **rentgenové záření** (nebo také záření X; X-rays; RTG záření). Na základě vzniku rentgenového záření rozlišuje dva typy, brzdné rentgenové záření a charakteristické rentgenové záření (Obrázek 3). Pokud elektron dopadne na materiál, dojde k jeho zpomalení a změně dráhy, přičemž každé takové zpomalení je ztrátou energie, jež se vždy projevuje emisí fotonů. Takový proces označujeme jako brzdné rentgenové záření. Jelikož přesné ztráty energie není možné stanovit, vyznačuje se brzdné rentgenové záření spojitým energetickým spektrem a energie vzniklého záření je závislá pouze na vstupní energii (rychlosti) elektronů, nikoliv na materiálu s ním interaguje [10].

U charakteristického rentgenového záření záleží na materiálu, s nímž interaguje. Vzniká totiž při návratu elektronu z excitovaného energetického stavu do stavu základního, tedy z vyššího energetického stavu do nižšího. Dochází k uvolnění energie ve formě fotonů, přičemž rozdíl energií mezi těmito vrstvami atomového obalu je pro každý prvek charakteristický [10].



Obrázek 3 Princip vzniku brzdného (vlevo) a charakteristického (vpravo) rentgenového záření [12].

**Záření gama** je souhrnným označením fotonového záření, které vzniká jako důsledek stabilizace atomového jádra. Jedná se o doprovodný jev radioaktivních přeměn, po kterých se atomové jádro nachází ve vyšším energetickém stavu. Pokud tedy jádro atomu přechází z vyššího energetického stavu do nižšího, dojde k uvolnění jistého kvanta energie v podobě fotonu. K tomuto jevu může docházet jednorázově nebo i skokově (kaskádovitě). Spektrum záření gama je diskrétní (čárové), jelikož rozdíly mezi energetickými hladinami v jádře jsou pro každý prvek charakteristické. Ve valné většině případů je záření gama doprovodným jevem alfa nebo beta jaderné přeměny, kdy se přeměněné (dceřiné) jádro nachází v excitovaném (nebo metastabilním) stavu. Záření gama tedy není důsledkem jaderné přeměny, tudíž nedochází ke změně protonového čísla [8; 10].

V některých případech může při deexcitaci nabuzených jader dojít k předání excitační energie přímo elektronu atomového obalu, který je poté emitován s kinetickou energií sniženou o jeho vazebnou energii na příslušné orbitě (slupce). Tento jev se označuje jako vnitřní konverze. Elektron emitovaný tímto způsobem je charakteristický čárovým (diskrétním) energetickým spektrem, což znamená, že pokud jádro emituje elektrony, nemusí se jednat o záření beta. Obecně lze říci, že k záření gama a procesu vnitřní konverze v důsledku deexcitace jádra dochází vždy, není-li energie dostatečná k emisi nukleonu, tedy



jaderné částice. Nicméně k tomuto jevu může dojít i v případě, kdy je emise nukleonu energeticky možná, avšak komplikovaná vlivem jiných zákonitostí kvantové mechaniky [8; 10].

Vzhledem k faktu, že záření gama není tvořeno částicemi a nenesou žádný náboj, je velice pronikavé. Ionizuje nepřímo až při interakci s materiálem, kde předá část nebo celou svou energii elektronům v atomových obalech. Záření gama je vzhledem ke svému charakteru nejvýznamnější pro vnější ozáření, kdy při pronikání živočišnou tkání působí sekundární ionizaci a poškozuje ji.

**Neutronové záření** je částicové, avšak obdobně jako záření gama nenesou neutrony žádný náboj a jedná se tedy o nepřímo ionizující záření. Neutronové záření vzniká jako důsledek jaderných interakcí, kdy dochází k vymršťování (emisi) volných neutronů z atomového jádra. Po opuštění jádra je neutron nestabilní, ve volném prostředí je jeho střední doba života okolo 15 minut, poté se rozpadá beta mínus přeměnou. Neutrony jsou emitovány v důsledku interakcí částic v jádře, k jejich emisi tedy dochází při jaderném štěpení, fúzi, či jakýchkoliv jiných jaderných přeměnách a reakcích. Vzhledem k faktu, že se jedná o nenabitě částice, mají mnohem větší pronikavost než ostatní částicové záření, v některých případech i větší než fotonové záření gama, které je zpomalováno těžkými atomy. Neutrony jsou vysoce ionizující částice, často doprovázeny emisí záření gama. Jednou z nejpodstatnějších schopností neutronů je aktivovat stabilní jádra atomů. Tohoto procesu využívá zejména metoda neutronové aktivační analýzy, pomocí níž je možné kvalitativně i kvantitativně stanovit velkou část prvků periodické tabulky. Tento jev je však možné pozorovat také v případě pronikavé radiace, kdy neutrony aktivují materiály, s nimiž interagují a činí je nestabilními, radioaktivními (tzv. indukovaná radioaktivita) [10].

### 3.2.2 Zdroje ionizujícího záření

Zdroje ionizujícího záření lze rozdělit z hlediska původu na přírodní a umělé. Přírodní radioaktivita je souhrnem několika zdrojů. Jedním z nich jsou tzv. primordiální radionuklidy (primární), které se na Zemi dochovaly ještě z dob jejího vzniku. Charakteristické jsou tedy velmi dlouhým poločasem přeměny, mezi primordiální radionuklidy patří například  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . Další složkou přírodních radioaktivních látek jsou sekundární radionuklidy, které jsou produkty přírodních rozpadových řad primordiálních radionuklidů nebo jaderných reakcí, tzv. dceřiné radionuklidy. Obě tyto skupiny, jelikož se vyskytují v zemské kůře, souhrnně označujeme jako terestriální. Třetí složkou přírodní radioaktivity je kosmické záření interagující se zemskou atmosférou. Jedná se zejména o lehké radioizotopy  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$  [10; 13].

Mezi umělé zdroje ionizujícího záření patří veškeré radionuklidy, jejichž vznik je ovlivněn působením člověka. Původ těchto radionuklidů je v urychlovačích částic, jaderných reaktorech, jaderných explozích apod. K nejrozšířenějším zdrojům patří uměle vytvořené nestabilní prvky, zařízení nukleární medicíny, radiofarmaka, průmyslové ozařovače, zařízení pro scintilační a stopovací diagnostické metody, zařízení pro sterilizaci materiálů apod.

Veškerá zařízení i instituce využívající umělé zdroje ionizujícího záření ke své činnosti, jakožto i jaderné elektrárny a úložiště radioaktivního materiálu, podléhají přísné evidenci a kontrolám od subjektů státní správy. Jak již bylo zmíněno, v České republice je institucí odpovědnou za jadernou bezpečnost a kontrolu zdrojů ionizujícího záření Státní úřad pro jadernou bezpečnost a orgány jím zřízené (SÚRO, SÚJCHBO).

Pro lepší orientaci a kontrolu nad umělými zdroji ionizujícího záření je na základě vyhlášky č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje stanoveno pět kategorií umělých zdrojů:

- nevýznamné,
- drobné,
- jednoduché,
- významné,
- velmi významné.

### 3.3 Detektory ionizujícího záření

Jednou z významných vlastností ionizujícího záření je fakt, že jej nelze zaznamenat žádným z lidských smyslů. K jeho detekci, tedy informaci, že je ionizující záření přítomno, je vždy nutné využít zařízení, které je tohoto úkonu schopno. Detekční zařízení ionizujícího záření lze kategorizovat z mnoha hledisek. Základním parametrem, podle kterého lze detektory ionizujícího záření rozdělit, je časový průběh detekce. Dle tohoto parametru se rozlišují [10; 14]:

- **Kontinuální detektory** – poskytují okamžitou informaci o hodnotě měřené veličiny.
- **Integrální (kumulativní) detektory** – poskytují informaci v podobě integrálu celkové expozice za stanovený časový úsek.

Dalším parametrem rozdělení detektorů jsou informace, které detektor měří. Z tohoto hlediska se detektory dělí na [8; 10; 14]:

- **Detektory záření**

Tyto nespektrometrické detektory provádějí pouhou detekci částic nebo fotonů. Výstupem je pouze informace o počtu kvant záření, nikoliv informace o druhu a energii daného záření. Patří sem nejjednodušší detektory jako filmové a termoluminiscenční dozimetry, ionizační komory, proporcionální detektory nebo Geiger-Müllerovy trubice.

- **Spektrometrické detektory**

Kromě informací o intenzitě záření poskytují také informace o energii zachycených kvant, případně dalších jejich charakteristikách. Výstupem je

zpravidla energetické spektrum, kde je počet zachycených kvant záření (osa y) graficky rozdělena na základě jejich energií (osa x). Do této skupina patří zejména scintilační detektory, polovodičové detektory a magnetické spektrometry.

- **Zobrazovací detektory**

Vizuálně nebo elektronicky zobrazují prostorové rozložení intenzity záření. Tyto detektory poskytují informace o místech dopadu záření nebo třeba oúhlech, ze kterých záření přilétá. Patří sem například scintilační kamery nebo polovodičové pixelové detektory.

- **Dráhové detektory částic**

Zabývají se dráhou pohybu jednotlivých částic v prostoru. Pomocí těchto detektorů se získávají důležité informace o vlastnostech elementárních částic, jaderných a částicových interakcích.

Další způsob rozdělení detektorů ionizujícího záření je na základě principu detekce daného zařízení [8; 10; 14]:

- **Fotografické detektory**

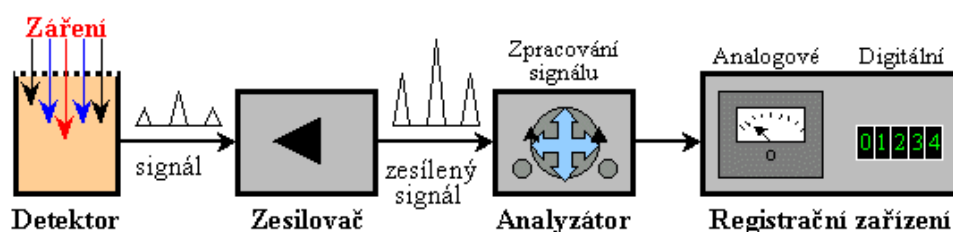
Detektory využívající fotografické zobrazení stop částic v jistém látkovém prostředí nebo detektory založené na fotochemických účincích detekovaného záření (filmové dozimetry).

- **Materiálové detektory**

Využívají dlouhodobějších změn způsobených ionizujícím zářením při interakci s materiály. Tyto detektory mají velmi nízkou citlivost, proto se používají pouze pro vysoké intenzity záření nebo pro dlouhodobou kumulativní (integrální) detekci. Patří sem například radiochemické detektory (změna barvy, objemu či složení materiálu) nebo termoluminiscenční detektory (excitace materiálu).

- **Elektronické detektory**

Nejrozšířenější a nejdůležitější skupina detektorů ionizujícího záření, jelikož elektronické dozimetry jsou zpravidla kontinuální detektory, tedy zobrazují průběžnou informaci o detekovaném záření v daný okamžik. Energie ionizujícího záření je převedena na elektrický proud nebo impuls, který je následně zesílen a zpracován a zobrazen (Obrázek 4). Mezi elektronické detektory patří ionizační detektory (ionizační komory, proporcionální čítače, Geiger-Müllerovy čítače), scintilační detektory, polovodičové detektory, mikrokalorimetrické detektory či magnetické spektrometry.



Obrázek 4 Základní schéma elektronického kontinuálního detektoru [8].

Zvláštní kapitolu detektorů ionizujícího záření tvoří zařízení pro detekci neutronů, těmi se však v této práci zabývat nebudeme.

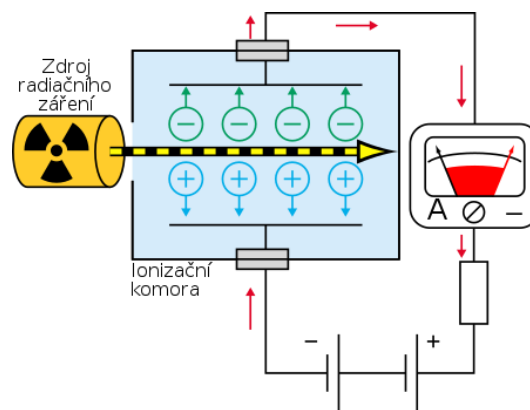
Bezkonkurenčně nejvýznamnější skupinou detektorů pro „polní“ použití jsou elektronické kontinuální spektrometry a detektory záření. Všechna zařízení testovaná v rámci této práce spadají právě do této skupiny. Výjimkou potvrzující pravidlo je v našem případě jen diagnostický dozimetr DD-80, který patří do skupiny materiálových kumulativních detektorů. Proto se v dalších kapitolách budeme zabývat pouze nejvýznamnějšími skupinami elektronických detektorů, tedy ionizačními, scintilačními a polovodičovými detektory.

### 3.3.1 Ionizační (plynové) detektory

Základním principem ionizačních detektorů je sběr náboje vzniklého působením ionizujícího záření v plynu, který se za standardních podmínek

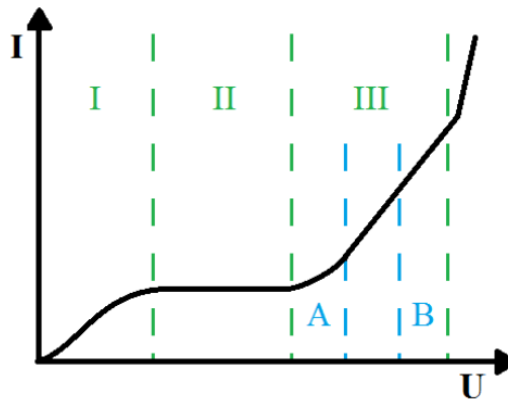
chová jako velmi dobrý izolant. Interakcí tohoto plynu s ionizujícím zářením dochází k ionizaci tohoto plynu, tedy ke vzniku kladných iontů a elektronů, které dále způsobují chemické reakce a rekombinace, dokud nevytvoří opět neutrální prostředí. V případě, že během ionizace plynu je do prostoru aplikováno elektrické pole, pak kladné ionty putují směrem ke katodě a elektrony k anodě. Aplikované napětí musí být dostatečně vysoké, aby předešlo rekombinacím iontů v průběhu migrace k elektrodám. Pokud ionty na elektrody doputují, dojde na elektrickém obvodu ke změně potenciálu ve formě elektrického signálu, který je dále zpracován a vyhodnocen (Obrázek 5) [10; 15; 16].

Plynové ionizační detektory jsou tvořené uzavřeným prostorem (velice často ve formě trubice), který je naplněn vhodným plynem. Vnější plášť trubice většinou slouží jako katoda a středem trubice je vedena centrální anoda v podobě kovového drátku, tyčinky nebo plátku [14; 16; 17].



Obrázek 5 Základní schéma ionizačních detektorů [18].

Mezi základní plynové ionizační detektory patří ionizační komory, proporcionální čítače a Geiger-Müllerovy čítače. Tato zařízení se rozlišují na základě síly elektrického pole, které je aplikováno mezi elektrodami, čímž jednotlivé detektory získávají charakteristické vlastnosti a uplatnění. K vysvětlení rozdělení plynových detektorů se využívá tzv. voltampérové charakteristiky ionizační komory [10; 16; 17].



Obrázek 6 Voltampérová charakteristika ionizačních detektorů [19].

Průběh voltampérové charakteristiky (Obrázek 6) se dělí na tři základní oblasti. Oblast první (I) znázorňuje průběh Ohmova zákona, kdy ionty vznikající působením ionizace spolu rekombinují. Se zvyšujícím se napětím, čímž dojde ke zvýšení rychlosti iontů, pravděpodobnost rekombinace klesá. Proud závislý na ionizaci roste též s rostoucím napětím, jak obecně popisuje Ohmův zákon. Tato oblast se z důvodu vysoké pravděpodobnosti rekombinací vzniklých iontů pro detekci záření nevyužívá [10; 20].

Druhá oblast (II) je oblastí nasyceného proudu. Ionty se v důsledku dostatečně silného elektrického pole pohybují velmi rychle, tudíž je vyloučena jejich rekombinace. Všechny ionty vzniklé ionizací jsou nosiči tedy nosiči proudu. V této pracovní oblasti není proud závislý na napětí, avšak pouze na intenzitě přítomného ionizujícího záření. Tato oblast se využívá v případě ionizačních komor [10; 20].

Třetí oblast (III) je oblastí nárazové ionizace. Aplikované napětí mezi elektrodami (elektrické pole) je tak vysoké, že jsou ionty vzniklé působením ionizujícího záření urychlovány na takovou energii, že po srážce s neutrálními částicemi vytváří sekundární ionty (sekundární ionizace). V první fázi této oblasti (A) jsou počty primárních a sekundárních iontů vzájemně přímo úměrné, tato oblast je pracovním prostředím proporcionálních detektorů. S nadále

zvyšujícím se napětím (oblast B) dochází k lavinovému množení sekundárních iontů a elektronů (dochází k výbojům). V tomto režimu pracují Geiger-Müllerovy detektory [10; 20].

S dalším zvyšováním síly elektrického pole mezi elektrodami se průběh voltampérové charakteristiky dostává do oblasti kontinuálního výboje, kterou pro svou činnost využívají jiskrové a korónové detektory, těmi se však zabývat nebudeme [10; 20].

### **Ionizační komory**

Principiálně se jedná o nejjednodušší elektronické detektory ionizujícího záření. Uzavřená komora naplněná inertním plynem (např. xenon, argon, krypton, ...) je připojena pomocí elektrod k vysokému napětí. Za běžných podmínek detekční oblastí neprotéká žádný proud, jelikož inertní plyn je nevodivý. Pokud do detekční komory vnikne ionizující záření, dojde k ionizaci inertního plynu, vzniklé ionty se pohybují směrem k elektrodám a obvodem protéká slabý proud (iontová vodivost) [14; 16; 17].

Detekovaný elektrický signál je přímo úměrný intenzitě nabitých částic. Ionizační komory jsou vhodné detekci alfa záření, které vytváří na malém prostoru velké množství iontů, proto je výstupní signál dostatečně vysoký a je snadné je detekovat. Beta a gama záření produkují velmi malý signál, proto je zapotřebí využít sofistikovanější elektrické obvody obsahující zesilovače signálu [14; 16; 17].

### **Proporcionální detektory**

V důsledku vyššího aplikovaného napětí mezi elektrodami dochází ke zvyšování kinetické energie primárních iontů vzniklých interakcí plynu s ionizujícím zářením. Tyto primární ionty, urychlovány vyšší energií, než je ionizující energie plynu uvnitř detekční komory, interagují s molekulami plynu



a vytváří sekundární ionty. Počty vzniklých sekundárních iontů je přímo úměrný počtu částic primárních. Tato oblast intenzity elektrického pole se nazývá proporcionální [14; 16; 17].

### **Geiger-Müllerovy detektory**

Pokud je do detekční oblasti přiváděno stále vyšší napětí, dochází k lavinovému navyšování sekundárních iontů vlivem vzniku výbojů ve formě ultrafialového světla. V této oblasti již počet sekundárních částic není závislý na počtu částic primárních ani na typu a energii záření. V oblasti Geiger-Müllerových čítačů již všechny primární ionizační efekty produkují stejnou maximální odezvu detektoru. Z toho důvodu již není možné přímo rozlišit informace o typu a energii přítomného ionizujícího záření. K získání informací o typu záření lze ale využít metodu stínění [14; 16; 17].

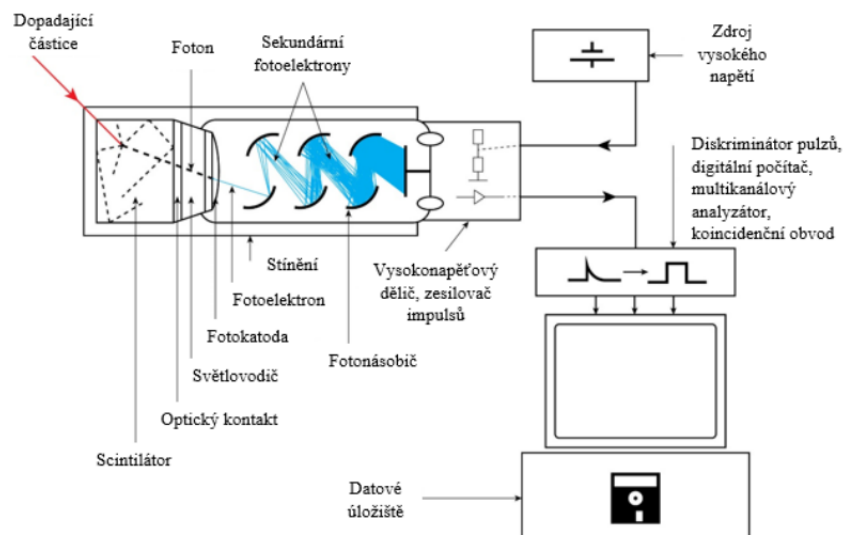
### **3.3.2 Scintilační detektory**

Konstrukce scintilačních detektorů se skládá z těchto základních konstrukčních prvků:

- scintilátor, scintilační krystal;
- fotonásobič;
- multikanálový analyzátor.

Scintilační detektory jsou založeny na principu excitace elektronů scintilačního krystalu působením dopadajícího záření do vyšších energetických stavů, přičemž následný návrat do základních energetických stavů se projevuje jako světelný záblesk (vznik fotonu), jehož vlnová délka spadá do oblasti viditelného či ultrafialového světla. Scintilační krystal bývá pokrytý reflektorem, jehož úlohou je zabránit úniku fotonů do prostoru a usměrňovat je na fotokatodu, kde dochází ke konverzi fotonů na elektrony. Pro uskutečnění tohoto děje je zapotřebí, aby energie fotonů byla dostatečně vysoká k vyražení elektronu

z fotokatody. Fotoelektron vytržený ze struktury fotokatody je následně usměrňován na dynodový systém fotonásobiče. Dynodový systém slouží k maximální multiplikaci elektronů, proto je povrch dynod tvořen materiály, které mají vysoký součinitel sekundární emise. Na dynody je přiváděn narůstající potenciál, čímž dochází k zesílení (urychlení) elektronů, ty jsou pak sesbírány na anodě fotonásobiče. Vzniklý signál je poté zpracován a vyhodnocen pomocí multikanálového analyzátoru. Schéma scintilačního detektoru popisuje Obrázek 7 [10; 14; 16; 21].



Obrázek 7 Schéma scintilačního detektoru [22].

Obecně je **scintilátorem** označován materiál, který na absorpci kvant energie reaguje procesem luminiscence (světelný záblesk – vyzáření fotonu). Dle mechanismu scintilace se rozlišují anorganické a organické scintilátory. Anorganické scintilátory se vyznačují vysokou hustotou, proto se využívají k detekci nabitých částic a fotonového záření. Nevýhodou oproti organickým scintilátorům je delší doba vysvícení. Anorganické scintilátory se využívají v několika formách – čisté monokrystaly, monokrystaly s příměsí, aktivované polykrystalické látky nebo plynové scintilátory. Nejčastější využití v praxi však mají čisté monokrystaly a monokrystaly s příměsí. Přidávání příměsí do

krystalické mřížky krystalu slouží k posunutí vodivostního pásu v krystalu, tedy k posunu vlnových délek scintilačních fotonů. Cílem je přiblížit tyto energie k maximu citlivosti fotokatody a tím zvýšit konverzní účinnost detektoru. Mezi nejznámější a nejpoužívanější anorganické scintilátory v ručních spektrometrických přístrojích patří zejména jodid sodný dopovaný thaliem (NaI:Tl). Dalším hojně užívaným krystalem je lanthan bromid dopovaný cerem (LaBr:Ce), který je charakteristický výborným spektrálním rozlišením [10; 14; 16].

Organické scintilátory se díky menší hustotě využívají hlavně pro detekci částic alfa, beta, protonů a je možné je využít k sekundární detekci rychlých neutronů, které z materiálů vyráží protony. Organické scintilátory se také využívají v kapalinové scintilační spektrometrii, a to zejména k detekci sumárních alfa a beta aktivit. Je možné je využít i pro stanovení dávkového příkonu záření gama či detekci kosmického záření [10; 14; 16].

Organické scintilátory jsou buď jednosložkové – naftalen, anthracen, atd., nebo vícesložkové – organické látky rozpuštěné v rozpouštědle.

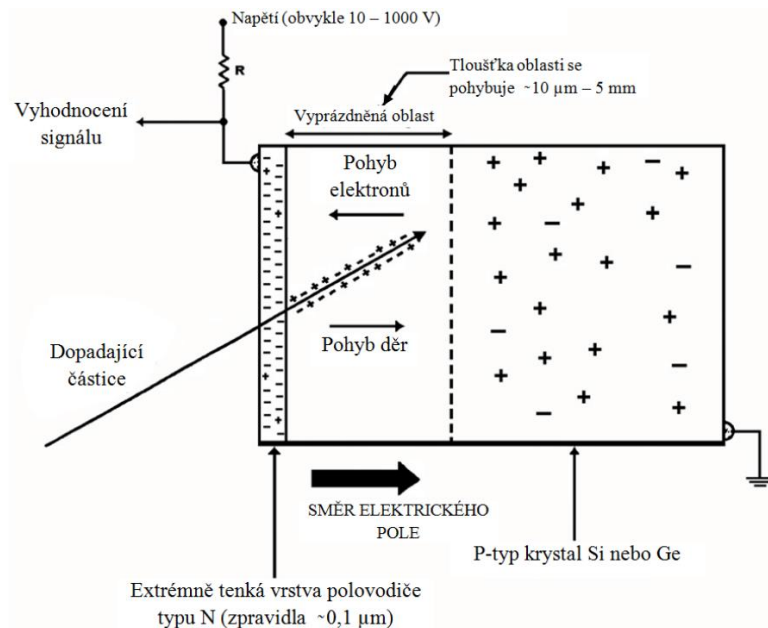
Většinou je **pouzdro scintilátoru** tvořeno několika vrstvami. První vrstvou je odolný materiál, který chrání scintilátor před mechanickým poškozením. Druhou vrstvou je folie, která slouží k odstínění a ochraně před vnějším světlem. Poslední vrstvou je reflektor, který usměřňuje scintilační fotony na čelo fotonásobiče (fotokatodu) [10; 14; 16].

Účelem **světlovodu** je s co nejmenšími ztrátami dopravit scintilační fotony na čelo fotonásobiče. Tato součást se využívá pouze v případech, kdy jsou z různých důvodů scintilátor a fotonásobič více vzdáleny do sebe. Pokud je vzdálenost mezi scintilátorem a fotonásobičem malá, používají se pro zajištění optického kontaktu mezi těmito součástmi minerální a silikonové oleje [10; 14; 16].

Hlavní funkcí **fotonásobiče** je převést fotony na elektrony a převést je na měřitelný signál. Hlavními součástmi fotonásobiče jsou fotokatoda, dynodový systém a anoda. Fotokatoda je tvořena materiály vhodnými pro vznik fotoefektu, nejčastěji se jedná o kombinaci cesia a antimonu (Cs-Sb), přičemž její hlavní funkcí je převést scintilační foton na fotoelektron. Ten následně putuje na dynodový systém, který slouží k zesílení fotoelektronů mechanismem sekundární emise na dynodách. Proudové zesílení je závislé na mezidynodovém potenciálu, který se nejčastěji pohybuje v rozmezí 80–100 V. Poslední dynodou je sběrná anoda s nejvyšším kladným potenciálem, ze které se odebírá signál pro zpracování v multikanálovém analyzátoru. Celý fotonásobič bývá magneticky a tepelně odstíněn pro zajištění lepšího energetického rozlišení [10; 14; 16].

### 3.3.3 Polovodičové detektory

Princip polovodičových detektorů je založen na schopnosti těchto materiálů vést elektrický proud, pokud ionizující záření vnikne do prázdných oblastí tohoto materiálu. Principiálně jde o velmi podobný proces jako v případě ionizačních komor, avšak zde detekční oblast tvoří na místo plynu vyprázdněná vrstva polovodiče. Při průchodu ionizujícího záření tímto materiálem dochází k vygenerování párů elektron-díra, které jsou vlivem elektrického pole usměrněny k elektrodám za vzniku krátkého elektrického impulsu (Obrázek 8). Velikost impulsu je pak přímo úměrná integrálu náboje, a tak i energii záření [10; 14; 15; 16; 23].



Obrázek 8 Princip polovodičového detektoru [10].

Podobně jako u scintilačních detektorů je možné pomocí polovodičových detektorů provádět spektrometrickou analýzu energie záření, avšak mají mnohem (asi 30x) lepší energetickou rozlišovací schopnost, zejména díky téměř dokonalému sběru náboje z detekční oblasti a také díky malé energii potřebné pro vytvoření párů elektron-díra. Nejčastěji používaným polovodičovým materiálem je germanium, a to v podobě vysoce čistého germania (HPGe – High Pure Germanium). Další velkou skupinou polovodičových detektorů jsou křemíkové detektory a v poslední době se výrazně uplatňují také polovodičové materiály jako GaAs nebo CdTe [10; 14; 15; 16; 23].

Významnou charakteristickou vlastností polovodičů je vysoká hustota, díky které dochází k velkým ztrátám energie záření a lze tedy vyrábět velmi tenké detektory, které jsou schopné produkovat velký signál. Další velkou výhodou je rychlá a přesná časová informace, která se u polovodičových detektorů pohybuje v řádech nanosekund [10; 14; 15; 16; 23].

Vzhledem k detektorům použitým v rámci experimentální části budou dále rozvinuty pouze germaniové a CdTe/CZT detektory.

## **Germaniové detektory**

Jedná se o nejpoužívanější detektory vyráběné v různých geometriích a objemech. Pro svou činnost vyžadují germaniové detektory chlazení, jelikož při pokojové teplotě je velmi vysoký šum a svodový proud. Za použití vysoce čistého germania je chlazení potřebně pouze během provozu detektoru. Existují dvě základní metody chlazení. Prvním z nich je chlazení kapalným dusíkem, druhým pak chlazení pomocí elektronického chladicího systému. Chlazení detektoru je nutné z důvodu snížení elektrického šumu a snížení počtu minoritních nosičů náboje. V případě HPGe detektorů určených pro měření nízkých energií musí být chlazen i předzesilovač, aby byl snížen jeho elektrický šum. Oproti tomu germaniové detektory s příměsí lithia musí být chlazeny trvale, jinak dochází k difuzi lithia do objemu krystalu, čímž dojde ke zničení detektoru [10; 14; 15; 16; 23].

V současné době se do popředí dostávají také polovodičové detektory, které jsou schopné pracovat při pokojové teplotě, takové polovodiče mají velkou šířku zakázaného pásu, díky čemuž mají vyšší detekční účinnost pro fotonové záření, avšak na úkor energetického rozlišení. Mezi takové polovodiče patří zejména kadmium telurid (CdTe), respektive kadmium zinek telurid (CdZnTe) [10; 14; 15; 16; 23].

## **CdTe / CdZnTe (CZT) detektory**

Germaniové a křemíkové polovodičové detektory mají díky svému výbornému energetickému rozlišení jednoznačně nezastupitelnou úlohu v oblasti analýzy záření gama z přírodních vzorků a laboratorních preparátů, nicméně nutnost chlazení těchto detektorů na teploty kapalného dusíku znemožňuje jejich použití v praktických technických aplikacích. Z toho důvodu vznikla potřeba vyvinout polovodičový materiál, který bude mít stále obstojné spektrometrické vlastnosti, avšak nebude nutné jeho chlazení. Z hlediska

stanovených podmínek se nejvíce osvědčila sloučenina telluru, zinku a kadmia. CZT detektory s vysokou účinností převádí fotonové záření na elektrické impulsy, a to za pokojové teploty. Tyto detektory velice dobře slouží jako náhrada scintilačních detektorů, a to s lepšími vlastnostmi a menšími rozměry [10; 14; 15; 16; 23].

## 4 METODIKA

Experimentální část práce je členěna dle skupin zkoumaných detektorů do čtyř částí. Nejprve jsou prezentovány a diskutovány přístroje pro měření plošné kontaminace, poté přístroje určené pro měření úrovně dávkového příkonu či dávkového ekvivalentu, následně spektrometrické přístroje a na závěr skupina vybraných osobních dozimetrů.

### 4.1 Přístroje a pomůcky

Pro účely této práce byly zvoleny nejčastěji používané přístroje pro dané účely, a to zejména jednotkami chemického vojska jako zástupcem bezpečnostního sboru pro vnější napadení ČR a výjezdovými jednotkami jednotek požární ochrany a odborných chemických jednotek HZS ČR jako zástupcem zajištění vnitřní bezpečnosti ČR.

Z užívaných přístrojů pro měření plošné kontaminace byly zvoleny následující přístroje:

- THERMO RadEye B20-ER,
- THERMO RadEye AB100,
- Radiometr DC-3E-98,
- FHT 111 Contamat,
- RADOS MicroCont II.

V oblasti měření úrovně dávkového příkonu či dávkového ekvivalentu byly vybrány následující přístroje:

- THERMO FH 40,
- MIRION RDS-32,
- THERMO RadEye B20-ER,



- Radiometr DC-3E-98,
- RADOS RDS 200,
- THERMO SVG-2,
- THERMO RadEye G10,
- THERMO RadEye PRD-ER,
- MIRION RGU 200,
- MIRION RGU 100 (URAD).

V oblasti spektrometrických ručních přístrojů byla pro účely této práce zvolena tato zařízení:

- FLIR Raider GN (CdZnTe),
- FLIR Identifinder 2 (NaI(Tl)),
- FLIR R 400 (LaBr),
- GEORADIS RT30 (NaI(Tl)),
- FLIR R 500 (NaI(Tl)),
- CANBERRA InSpector 1000 (NaI(Tl)),
- CANBERRA Falcon 5000 (HPGE),
- ORTEC Micro-Detective HX (HPGE).

Poslední zkoumanou skupinou dozimetrických přístrojů byly osobní dozimetry, z nichž byly zvoleny následující zástupci využívané bezpečnostními sbory v ČR:

- MIRION SOR-R,
- MIRION RAD-60,
- THERMO EPD MK2+,
- Tracerco PED Blue,
- Diagnostický dozimetr DD-80.

Veškerá měření probíhala v interiérech a exteriérech Ústavu proti zbraním hromadného ničení ve Vyškově. Pro potřeby daných měření byly použity následující zdroje ionizujícího záření o současných aktivitách:

- Co-60 – typ CO1HK, výrobní číslo AA 292 ( $A = 0,59 \text{ GBq}$ );
- Cs-137 – typ Cs7P03, v.č. 0821/09 ( $A = 2,39 \text{ GBq}$ );
- Am-241 – typ ERX, v.č. 300810-1132002 ( $A = 50,08 \text{ MBq}$ );
- Am-241 – ( $A = 1,1 \text{ Bq/cm}^2$ );
- Pu-239 – ( $A = 1,2 \text{ Bq/cm}^2$ );
- Sr/Y-90 – ( $A = 10,7 \text{ Bq/cm}^2$ );
- Co-60 – typ CO1HK, v.č. AA231 ( $A = 15,34 \text{ MBq}$ );
- Cs-137, typ EG 3, v.č. 251114-1278211 ( $A = 301,24 \text{ kBq}$ );
- Co-60, typ EG 3, v.č. 160714-137208037 ( $A = 93,13 \text{ kBq}$ );
- Cd-109, typ EG 3, v.č. 060115-1491001 ( $A = 15,5 \text{ kBq}$ );
- Y-88, typ EG 3, v.č. 140519-1756011 ( $A = 0,36 \text{ kBq}$ );
- Ba-133, typ EG 3, v.č. 240519-1295083 ( $A = 69,45 \text{ kBq}$ );
- Cs-134, typ EG 3, v.č. 031214-1423001 ( $A = 38,04 \text{ kBq}$ );
- Co-57, typ EG 3, v.č. 240519-1749023 ( $A = 13,17 \text{ kBq}$ ).

## 4.2 Metodika měření

### 4.2.1 Linearita odezvy detektorů

Základní zkoumanou charakteristikou vybraných dozimetrických přístrojů pro měření úrovně radiace gama v prostředí byla linearita odezvy detektorů. Tato charakteristika popisuje chování detektorů při průběžném zvyšování dávkového příkonu. Měření bylo prováděno ve volném venkovním prostředí, aby nedocházelo k odrazům částic a tím k ovlivňování výsledků měření. Pro účely experimentu byly zvoleny tři zdroje ionizujícího záření s charakteristickými energiemi fotonového záření tak, aby zastupovaly nízké, střední i vysoké energie.

Jako zástupce nízkých energií byl zvolen radionuklid  $^{241}\text{Am}$ , jehož charakteristická energie fotonového záření gama je 59,5 keV. Nejsilnějším dostupným zdrojem radionuklidu  $^{241}\text{Am}$  byl v našich podmínkách zdroj o současné aktivitě 50,08 MBq. Vzhledem k nízké aktivitě a zároveň nízké energii fotonového záření gama emitovaného tímto radionuklidem byla počáteční vzdálenost nastavena na 1 m. Následovala měření ve vzdálenostech 0,8 m, 0,6 m, 0,4 m, 0,2 m a 0,1 m.

Zástupcem středních energií byl zvolen radionuklid  $^{137}\text{Cs}$ , jehož charakteristická energie emitovaného fotonového záření gama je 661,6 keV. Pro účely tohoto měření byl použit zdroj o současné aktivitě 2,39 GBq. Pro vysoké energie byl zvolen radionuklid  $^{60}\text{Co}$  o charakteristických gama energiích 1173,2 a 1332,5 keV. Pro účely tohoto měření byl použit zdroj o současné aktivitě 0,59 GBq. Provedeno bylo deset měření ve 2m intervalech, počínaje ve vzdálenosti 20 m.

Před zahájením každého měření bylo naměřeno přírodní pozadí, které bylo od naměřených hodnot odečteno. V každé vzdálenosti byla provedena tři měření, která byla následně zprůměrována. Výsledné hodnoty byly vztaženy k hodnotě dávkového příkonu vypočítaného na základě aktivity příslušného radionuklidového zdroje.

#### 4.2.2 Účinnost měření plošné kontaminace

Pro měření byly použity etalony plošné kontaminace alfa a beta záření, konkrétně radionuklidů  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  a  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . Radionuklid je v případě těchto etalonů rovnoměrně (homogenně) rozprostřen po celé jejich ploše a udávána je přesná aktivita na 1 cm<sup>2</sup> plochy. Detekční prostředky určené pro měření plošné kontaminace byly přikládány do vzdálenosti 1 cm od etalonu, k čemuž byly použity vymežovací podložky vytištěné pomocí 3D tisku pro tento účel.

Naměřené hodnoty byly vztaženy k aktivitě etalonů a byla vypočtena účinnost měření.

#### **4.2.3 Schopnost identifikace radionuklidu**

Tomuto měření byly podrobeny pouze spektrometrické přístroje, které jsou na základě naměřeného spektra, respektive na schopnosti rozlišit charakteristické energie fotonového záření gama, identifikovat zájmový radionuklid. Pro měření byly použity etalony typu EG-3 radionuklidů  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{57}\text{Co}$  a  $^{60}\text{Co}$ . Etalon byl z důvodu nízkých aktivit některých radionuklidů přiložen přímo na čelo detektoru každého přístroje. Většina testovaných ručních spektrometrických přístrojů není schopna identifikace během kontinuálního měření, jelikož identifikaci provádí porovnáním naměřeného spektra se spektry v interní knihovně. Pro zajištění stejných podmínek pro všechny přístroje byla pro schopnost identifikace zvolena integrační doba 30 s.

#### **4.2.4 Linearita měření osobních dozimetrů**

Osobní dozimetry byly umístěny do vzdálenosti 25 cm od zdroje ionizujícího záření, kterým v tomto případě byl  $^{60}\text{Co}$  o současné aktivitě 15,34 MBq. V časových intervalech 10 min byly odečítány hodnoty absorbovaného dávkového ekvivalentu, které byly následně vztaženy k vypočítaným hodnotám. Vzhledem k životnosti osobních dozimetrů a jejich ceně byl rozsah experimentu limitován hodnotou absorbovaného dávkového ekvivalentu 100  $\mu\text{Sv}$ .

Vzhledem k výrazně odlišným měřícím vlastnostem diagnostického dozimetru DD-80, byly pro toto zařízení stanoveny zvláštní podmínky měření. Jedním z předmětů tohoto měření bylo ověření funkčnosti DD-80. Kontrolní měření spočívalo v ozařování diagnostických dozimetrů DD-80 radionuklidovým zdrojem  $^{60}\text{Co}$ , a to od počátku měřícího rozsahu 5 cGy do překročení dvojnásobku prahové dávky pro člověka, tedy 1,5 Gy.

## 5 VÝSLEDKY

V této kapitole jsou prezentovány výsledky experimentálních měření. Výsledky jsou členěny dle zkoumaných charakteristik a typů detekčních přístrojů.

### 5.1 Linearita odezvy detektorů

Linearita odezvy detektorů byla měřena jak u prostých detektorů záření, tak u spektrometrů. Pro zjištění chování detektorů na celém rozsahu byla provedena měření pro nízké energie ( $^{241}\text{Am}$  – 59,5 keV), střední energie ( $^{137}\text{Cs}$  – 661,6 keV) i pro vysoké energie ( $^{60}\text{Co}$  – 1173,2 keV, 1332,5 keV) fotonového záření gama.

#### 5.1.1 Detektory záření

##### Linearita odezvy detektorů záření pro nízké energie gama

Nejprve byla měřena linearita odezvy, odchylek a účinnosti detekce záření pro nízké energie. Jako zástupce nízkoenergetického zdroje fotonového záření gama byl zvolen radionuklid  $^{241}\text{Am}$ , jehož charakteristická energie emitovaných gama kvant je 59,5 keV. Pro účely tohoto měření byl využit nejsilnější dostupný zdroj radionuklidu  $^{241}\text{Am}$ , o současné aktivitě 50,08 MBq. Vzhledem k nízké energii radionuklidu a nízké aktivitě zdroje byla škála měřících vzdáleností vypočtena a nastavena v rozmezí 0,1 – 1 m. Tabulka 1 obsahuje souhrn odchylek naměřené hodnoty od vypočtené hodnoty pro danou vzdálenost pro jednotlivé typy testovaných detektorů.

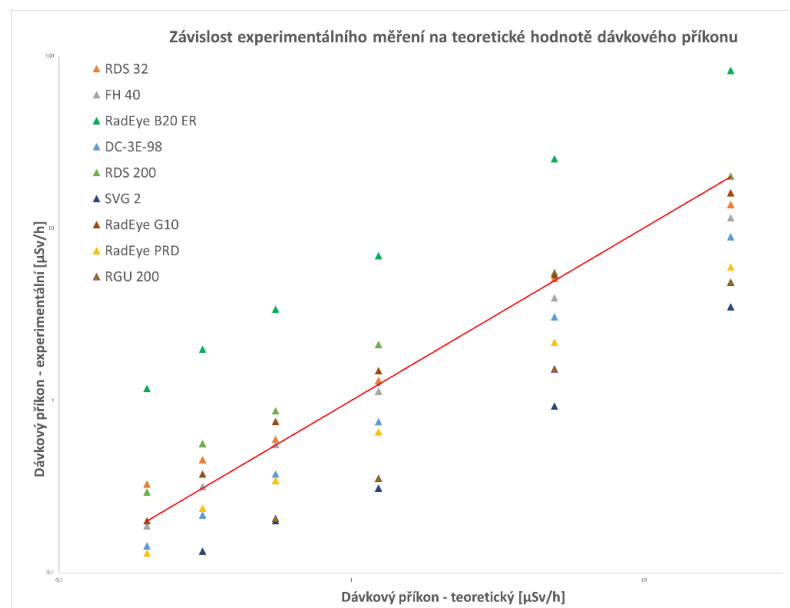
Tabulka 1 - Detektory záření - tabulka odchylek měření pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

| Detektory záření - odchylky měření pro nízké energie za použití radionuklidového zdroje <sup>241</sup> Am o aktivitě 50,08 MBq |                                   |              |        |        |          |         |        |        |        |         |                |
|--|-----------------------------------|--------------|--------|--------|----------|---------|--------|--------|--------|---------|----------------|
| Vzdálenost [cm]  | Vypočítaný dávkový příkon [μSv/h] | Odchylka [%] |        |        |          |         |        |        |        |         |                |
|  |                                   | RDS-32       | FH 40  | B20-ER | DC-3E-98 | RDS 200 | SVG-2  | G-10   | PRD-ER | RGU-200 | RGU 100 (URAD) |
| 100  | 0,2                               | 63,33        | -6,67  | 486,67 | -28,33   | 46,67   | -68,33 | 0,00   | -35,00 | -83,33  | 15,00          |
| 80   | 0,31                              | 46,24        | 2,15   | 539,78 | -30,11   | 81,72   | -56,99 | 20,43  | -23,66 | -72,04  | 9,68           |
| 60   | 0,55                              | 8,48         | 1,21   | 513,94 | -32,12   | 58,18   | -63,64 | 37,58  | -37,58 | -62,42  | -30,91         |
| 40   | 1,24                              | 5,38         | -8,60  | 456,45 | -39,25   | 70,43   | -75,00 | 19,89  | -47,04 | -71,51  | 12,90          |
| 20   | 4,96                              | 2,42         | -20,56 | 409,48 | -38,37   | 11,83   | -81,32 | 8,06   | -56,12 | -69,22  | -7,66          |
| 10   | 19,87                             | -30,90       | -42,21 | 313,71 | -55,18   | 0,96    | -82,39 | -19,36 | -70,06 | -75,52  | -31,52         |

Jak již bylo zmíněno, pro ideální míru spolehlivosti měření v praxi by odchylka neměla překročit hodnotu 30 %. Veškeré naměřené hodnoty, které přesahují tuto hranici, jsou v tabulce 1 označeny červenou barvou. Jednoznačně nejhorší hodnoty vykazoval detektor RadEye B20-ER, jehož výsledky vykazují nadhodnocení reálných hodnot o 300–550 %. Hodnoty vyšší, než byl reálný stav, vykazovaly také detektory RDS 200 a RDS-32, avšak zejména při nízkých úrovních dávkové příkonu dosahujícího dvoj až trojnásobek přírodního pozadí, při vyšších příkonech se jejich detekční odchylky výrazně snížily. Nejlepší výsledky při detekci nízkoenergetického fotonového záření vykazovaly detektory Rad-Eye G-10, FH-40 a RGU 100 (URAD), jejichž detekční odchylky byly téměř při všech měřených úrovních dávkového v dané toleranci 30 %. Výrazné podhodnocené výsledky vykazovaly detektory DC-3E-98, SVG-2, RadEye PRD-ER a RGU 200.

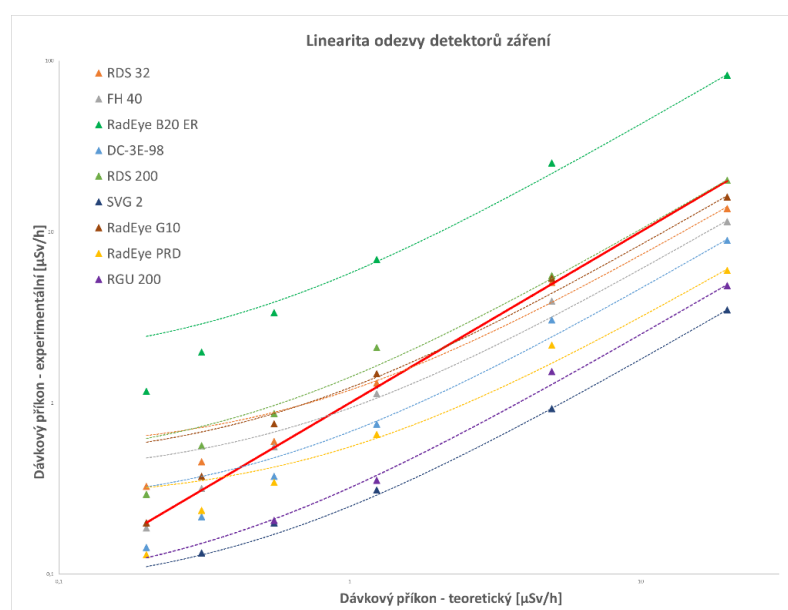
Obrázek 9 zobrazuje závislost experimentálně měřených hodnot dávkového příkonu jednotlivými detektory záření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu na základě aktivity zdroje. Přímka lineární regrese zvýrazněná červenou

barvou značí průběh reálných hodnot dávkového příkonu, od kterých jsou experimentálně měřené hodnoty více či méně odchýleny.



Obrázek 9 - Závislost experimentálního měření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

Na obrázku 10 lze pozorovat linearitu odezvy jednotlivých testovaných detektorů záření. Referenční hodnotou je přímka lineární regrese označená červenou plnou čarou. V ideálním případě by křivky linearitu odezvy měly být s referenční křivkou shodné. Míra linearitu je pak graficky znázorněna mírou vychýlení křivek jednotlivých detektorů z lineární polohy.



Obrázek 10 - Linearita odezvy detektorů pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

Hodnoty vypočítané detekční účinnosti jednotlivých testovaných detektorů záření jsou uvedeny v tabulce 2. Červeným písmem jsou označeny hodnoty účinnosti, které přesahují 100 %, jelikož z fyzikálního hlediska je taková účinnost vyloučena. Ve spodní části tabulky 2 jsou vypočítány průměrné detekční účinnosti pro daný experiment. Hodnoty přesahující 100% průměrnou účinnost detekce vykazují detektory RDS-32 (116 %), RadEye B20-ER (553 %), RDS 200 (145 %) a RadEye G-10 (111 %). Nejlepší průměrná účinnost pro nízké energie byla naměřena u přístroje RGU 100 (URAD), který dosahuje účinnosti téměř 95 %, a přístroje FH 40, jehož účinnost je 88 %. Následují sestupně přístroje DC-3E-98 (63 %), RadEye PRD-ER (55 %), SVG-2 (29 %) a RGU 200 (28 %).

Tabulka 2 - Detektory záření - tabulka účinnosti detekce pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

| Detektory záření - účinnost detekce pro $^{241}\text{Am}$ o aktivitě 50,08 MBq |  |                      |        |        |          |         |       |        |        |         |                |
|--|--|----------------------|--------|--------|----------|---------|-------|--------|--------|---------|----------------|
| Vzdálenost [cm]  | Vypočítaný dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ] | Účinnost detekce [%] |        |        |          |         |       |        |        |         |                |
|  |  | RDS-32               | FH 40  | B20-ER | DC-3E-98 | RDS 200 | SVG-2 | G-10   | PRD-ER | RGU-200 | RGU 100 (URAD) |
| 100  | 0,2  | 163,33               | 93,33  | 586,67 | 71,67    | 146,67  | 31,67 | 100,00 | 65,00  | 16,67   | 115,00         |
| 80   | 0,31   | 146,24               | 102,15 | 639,78 | 69,89    | 181,72  | 43,01 | 120,43 | 76,34  | 27,96   | 109,68         |
| 60   | 0,55   | 108,48               | 101,21 | 613,94 | 67,88    | 158,18  | 36,36 | 137,58 | 62,42  | 37,58   | 69,09          |
| 40   | 1,24   | 105,38               | 91,40  | 556,45 | 60,75    | 170,43  | 25,00 | 119,89 | 52,96  | 28,49   | 112,90         |
| 20   | 4,96   | 102,42               | 79,44  | 509,48 | 61,63    | 111,83  | 18,68 | 108,06 | 43,88  | 30,78   | 92,34          |
| 10   | 19,87  | 69,10                | 57,79  | 413,71 | 44,82    | 100,96  | 17,61 | 80,64  | 29,94  | 24,48   | 68,48          |
| Průměrná účinnost detekce  |  | 115,82               | 87,55  | 553,34 | 62,77    | 144,96  | 28,72 | 111,10 | 55,09  | 27,66   | 94,58          |

### Linearita odezvy detektorů záření pro střední energie gama

Další série měření byla provedena pro střední energie fotonového gama záření. Zástupcem středních energií byl zvolen radionuklid  $^{137}\text{Cs}$ , vyzařující gama kvanta o energii 661,6 keV. Pro účely tohoto experimentu byl použit zdroj radionuklidu  $^{137}\text{Cs}$  o současné aktivitě 2,39 GBq. Na základě parametrů



radionuklidového zdroje byla škála měřících vzdáleností nastavena v rozmezí 2–20 m.

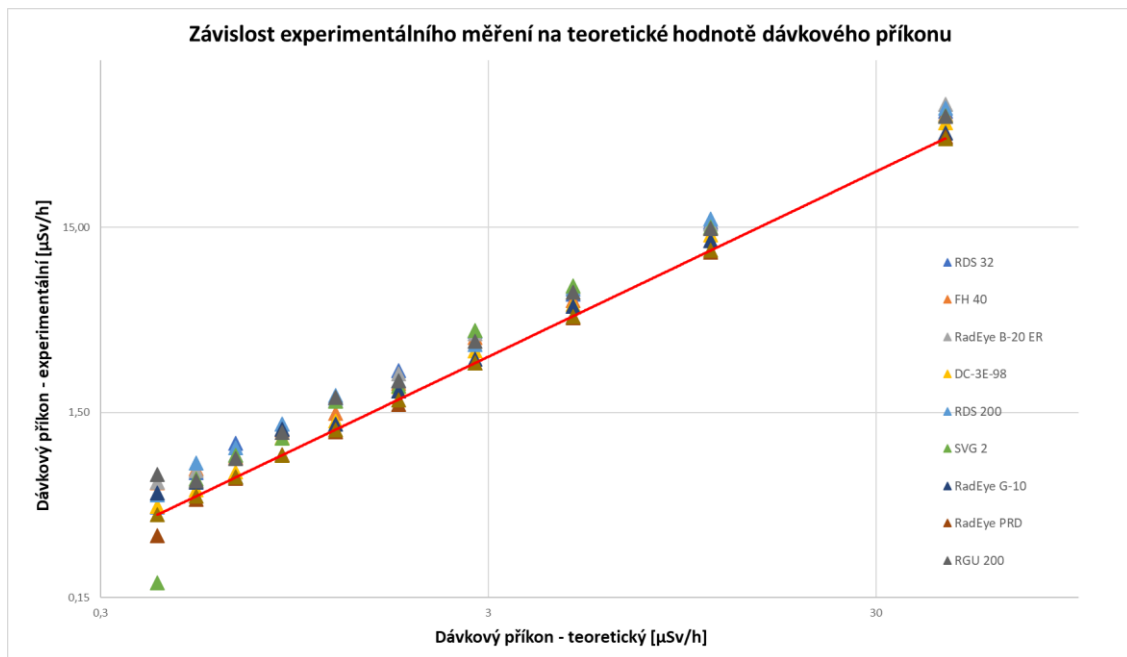
V tabulce 3 jsou uvedeny vypočítané odchylky měření jednotlivých testovaných detektorů záření. Červeným písmem jsou opět označeny odchylky přesahující 30 %. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u detektorů RadEye PRD-ER, DC-3E-98 a RadEye G-10. Ostatní detektory vykazovaly více či méně určitou míru nadhodnocení oproti reálné hodnotě dávkového příkonu.

Tabulka 3 - Detektory záření - tabulka odchylek měření pro střední energie gama [vlastní výzkum]

| Detektory záření - odchylky měření pro střední energie za použití radionuklidového zdroje $^{137}\text{Cs}$ o aktivitě 2,39 GBq |  |              |       |        |          |         |        |       |        |         |                |
|---|--|--------------|-------|--------|----------|---------|--------|-------|--------|---------|----------------|
| Vzdálenost [m]  | Vypočítaný dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ] | Odchylka [%] |       |        |          |         |        |       |        |         |                |
|   |  | RDS-32       | FH 40 | B20-ER | DC-3E-98 | RDS 200 | SVG-2  | G-10  | PRD-ER | RGU-200 | RGU 100 (URAD) |
| 20  | 0,42   | 10,32        | 49,21 | 50,00  | 11,11    | 27,78   | -57,14 | 30,95 | -23,02 | 65,08   | 11,90          |
| 18  | 0,53   | 33,96        | 40,25 | 37,11  | 8,18     | 51,57   | 23,90  | 19,50 | -3,77  | 21,38   | 22,64          |
| 16  | 0,67   | 53,23        | 27,86 | 32,34  | 6,97     | 44,78   | 31,84  | 0,50  | -1,00  | 26,37   | 45,77          |
| 14  | 0,88   | 46,97        | 37,12 | 39,02  | 25,00    | 47,35   | 23,48  | 37,88 | 1,14   | 33,33   | 43,56          |
| 12  | 1,21   | 48,21        | 22,31 | 43,53  | 11,29    | 52,62   | 42,42  | 7,44  | -2,75  | 49,59   | 35,26          |
| 10  | 1,76   | 43,18        | 22,73 | 37,69  | 17,42    | 26,70   | 18,94  | 11,36 | -6,06  | 26,70   | 4,73           |
| 8   | 2,77   | 49,34        | 37,18 | 43,80  | 16,13    | 25,99   | 50,54  | 4,81  | 0,24   | 30,81   | 39,23          |
| 6   | 4,96   | 32,06        | 21,24 | 43,62  | 16,26    | 40,12   | 45,56  | 13,58 | -1,88  | 35,22   | 19,22          |
| 4   | 11,24  | 42,73        | 32,71 | 38,94  | 21,14    | 47,84   | 33,60  | 13,43 | -1,69  | 31,23   | 3,65           |
| 2   | 45,3   | 39,63        | 34,25 | 53,38  | 21,82    | 46,32   | 32,56  | 7,40  | 1,80   | 31,97   | -30,06         |

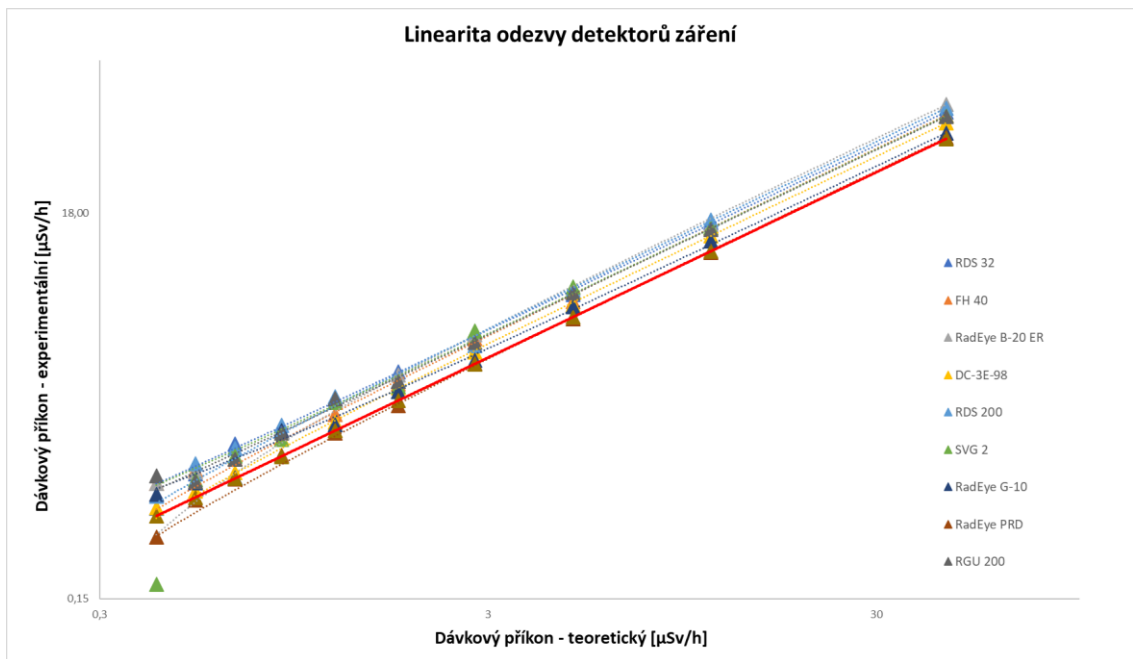
Obrázek 11 vyjadřuje závislost hodnot dávkového příkonu získaných experimentálním měřením na vypočítané hodnotě dávkového příkonu. Ideální průběh je opět označen červenou přímkou. Na obrázku 11 lze pozorovat, že

odchylky od ideálního průběhu jsou oproti měření nízkoenergetického záření výrazně menší.



Obrázek 11 - Závislost experimentálního měření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu pro střední energie gama [vlastní výzkum]

Na obrázku 12 je graficky znázorněna linearita odezvy testovaných detektorů záření. Ideální lineární průběh je opět označen červenou plnou čarou. Míra zakřivení přímek lineární regrese jednotlivých detektorů popisuje míru linearitu odezvy těchto přístrojů. Posunutí oproti ideální přímce pak značí míru nadhodnocení či podhodnocení měřených hodnot. Na první pohled je patrné, že míra linearitu pro střední energie fotonového záření gama je výrazně lepší, než tomu bylo u nízkoenergetického záření.



Obrázek 12 - Linearita odezvy detektorů záření pro střední energie gama [vlastní výzkum]

Hodnoty účinnosti detekce testovaných přístrojů pro střední jsou souhrnně zobrazeny v tabulce 4. Hodnoty přesahující 100% průměrnou účinnost detekce vykazují detektory kromě RadEye PRD-ER všechny testované detektory. RadEye PRD-ER vykazuje účinnost 96 %. Z ostatních detektorů vychází nejlépe RadEye G-10 (115 %) následován přístroji DC-3E-98 (116 %), RGU-100 (120 %), SVG-2 (125 %), FH 40 (133 %), RGU 200 (135 %), RDS-32 (140 %), RDS 200 (141 %) a RadEye B20-ER (142 %).

Tabulka 4 - Detektory záření - tabulka účinnosti detekce pro střední energie gama [vlastní výzkum]

| Detektory záření - odchylky měření pro střední energie za použití radionuklidového zdroje $^{137}\text{Cs}$ o aktivitě 2,39 GBq |  |                      |        |        |          |         |        |        |        |         |                |
|---|--|----------------------|--------|--------|----------|---------|--------|--------|--------|---------|----------------|
| Vzdálenost [m]  | Vypočítaný dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ] | Účinnost detekce [%] |        |        |          |         |        |        |        |         |                |
|   |  | RDS-32               | FH 40  | B20-ER | DC-3E-98 | RDS 200 | SVG-2  | G-10   | PRD-ER | RGU-200 | RGU 100 (URAD) |
| 20  | 0,42   | 110,32               | 149,21 | 150,00 | 111,11   | 127,78  | 42,86  | 130,95 | 76,98  | 165,08  | 111,90         |
| 18  | 0,53   | 133,96               | 140,25 | 137,11 | 108,18   | 151,57  | 123,90 | 119,50 | 96,23  | 121,38  | 122,64         |
| 16  | 0,67   | 153,23               | 127,86 | 132,34 | 106,97   | 144,78  | 131,84 | 100,50 | 99,00  | 126,37  | 145,77         |
| 14  | 0,88   | 146,97               | 137,12 | 139,02 | 125,00   | 147,35  | 123,48 | 137,88 | 101,14 | 133,33  | 143,56         |
| 12  | 1,21   | 148,21               | 122,31 | 143,53 | 111,29   | 152,62  | 142,42 | 107,44 | 97,25  | 149,59  | 135,26         |
| 10  | 1,76   | 143,18               | 122,73 | 137,69 | 117,42   | 126,70  | 118,94 | 111,36 | 93,94  | 126,70  | 104,73         |
| 8   | 2,77   | 149,34               | 137,18 | 143,80 | 116,13   | 125,99  | 150,54 | 104,81 | 100,24 | 130,81  | 139,23         |
| 6   | 4,96   | 132,06               | 121,24 | 143,62 | 116,26   | 140,12  | 145,56 | 113,58 | 98,12  | 135,22  | 119,22         |
| 4   | 11,24  | 142,73               | 132,71 | 138,94 | 121,14   | 147,84  | 133,60 | 113,43 | 98,31  | 131,23  | 103,65         |
| 2   | 45,3   | 139,63               | 134,25 | 153,38 | 121,82   | 146,32  | 132,56 | 107,40 | 101,80 | 131,97  | 69,94          |
| Průměrná účinnost detekce   |  | 139,96               | 132,49 | 141,94 | 115,53   | 141,11  | 124,57 | 114,68 | 96,30  | 135,17  | 119,59         |

### Linearita odezvy detektorů záření pro vysoké energie gama

Zástupcem vysokých energií byl zvolen radionuklid  $^{60}\text{Co}$ , jehož fotonové záření gama má energie 1173,2 a 1332,5 keV. Současná aktivita zdroje používaného při tomto měření je 0,59 GBq. Škála měřících vzdáleností byla stejně jako u měření středních energií nastavena v rozmezí 2–20 m.

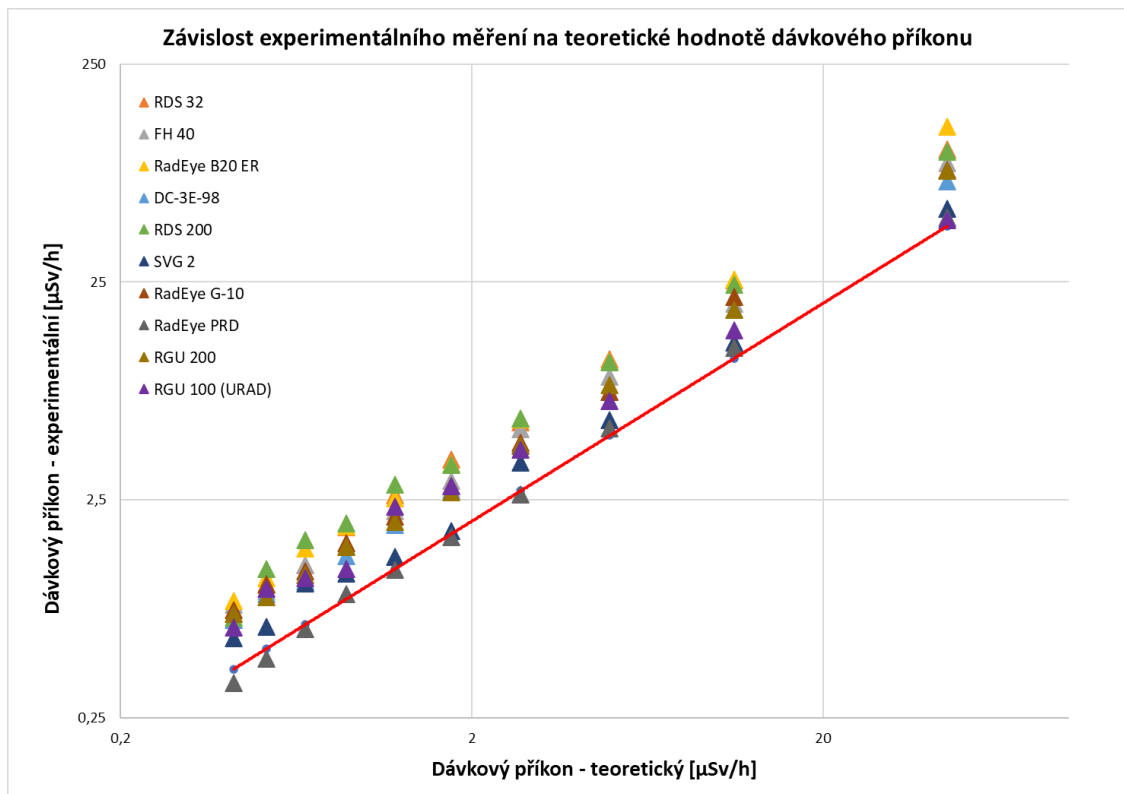
Jednotlivé hodnoty naměřených odchylek jsou zobrazeny v tabulce 5. Červeným písmem jsou opět označeny odchylky přesahující 30% mez. Jednoznačně nejlepších výsledků bylo dosaženo u přístroje RadEye PRD-ER, který je následován detektorem SVG-2. Ostatní přístroje vykazují vysokou míru nadhodnocení výsledků. Nejhorší hodnot odchylek

měření se vyskytují u detektoru RadEye B20-ER, který zobrazuje téměř třikrát vyšší hodnoty, než je reálný stav.

Tabulka 5 - Detektory záření - tabulka odchylek měření pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

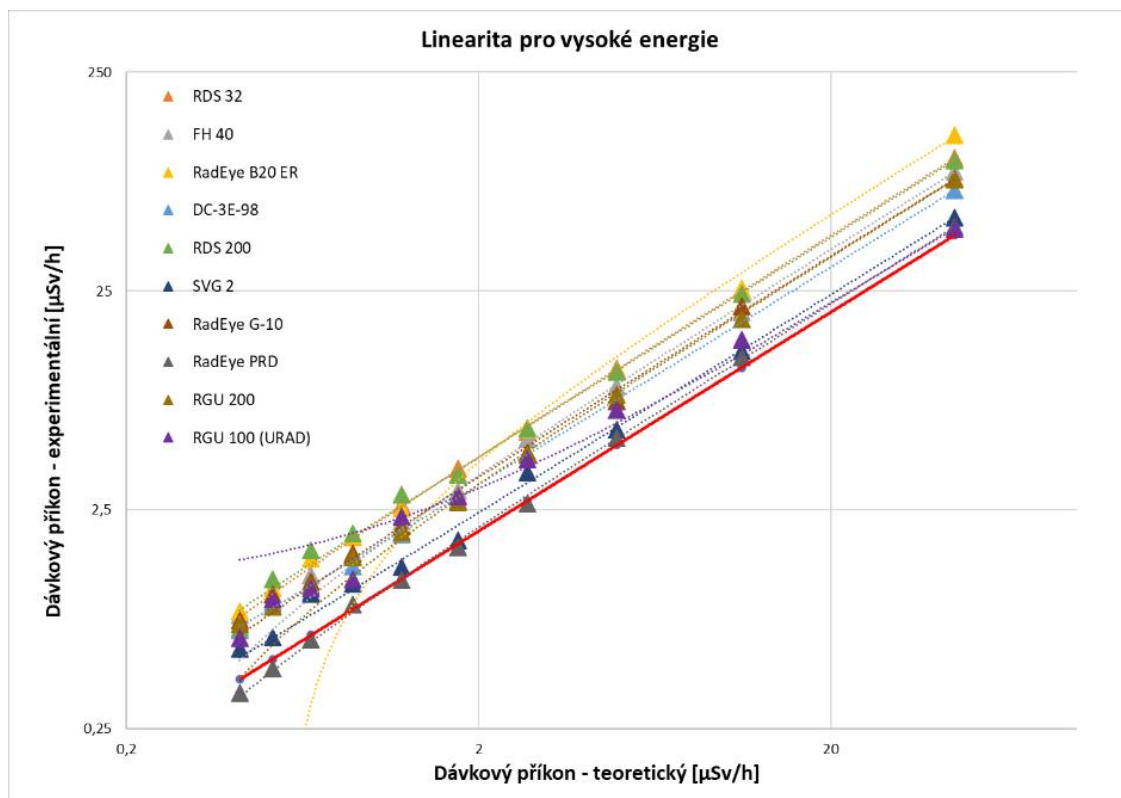
| Detektory záření - odchylky měření pro střední energie za použití radionuklidového zdroje <sup>60</sup> Co o aktivitě 0,59 GBq |                                   |              |       |        |          |         |       |       |        |         |                |
|--|-----------------------------------|--------------|-------|--------|----------|---------|-------|-------|--------|---------|----------------|
| Vzdálenost [m]   | Vypočítaný dávkový příkon [μSv/h] | Odchylka [%] |       |        |          |         |       |       |        |         |                |
|  |                                   | RDS-32       | FH 40 | B20-ER | DC-3E-98 | RDS 200 | SVG-2 | G-10  | PRD-ER | RGU-200 | RGU 100 (URAD) |
| 20   | 0,42                              | 79,37        | 97,62 | 105,56 | 68,25    | 72,22   | 38,89 | 86,51 | -13,49 | 78,57   | 54,76          |
| 18   | 0,52                              | 96,79        | 83,33 | 110,90 | 78,85    | 132,69  | 25,64 | 98,08 | -9,62  | 73,08   | 87,82          |
| 16   | 0,67                              | 88,06        | 87,56 | 124,38 | 58,71    | 143,78  | 54,73 | 75,62 | -4,48  | 69,15   | 63,68          |
| 14   | 0,88                              | 113,26       | 75,00 | 114,39 | 56,82    | 122,73  | 31,06 | 80,68 | 5,30   | 73,48   | 37,12          |
| 12   | 1,21                              | 117,36       | 84,02 | 110,47 | 59,50    | 143,53  | 13,22 | 73,28 | -0,83  | 63,91   | 92,29          |
| 10   | 1,75                              | 120,00       | 75,05 | 108,95 | 58,86    | 106,67  | 3,43  | 65,90 | -3,05  | 54,86   | 65,33          |
| 8  | 2,75                              | 107,03       | 92,12 | 113,82 | 62,30    | 114,30  | 35,39 | 66,42 | -3,27  | 61,70   | 54,79          |
| 6  | 4,94                              | 123,68       | 86,44 | 118,89 | 58,50    | 116,19  | 18,22 | 59,11 | 8,16   | 70,18   | 44,53          |
| 4  | 11,18                             | 127,79       | 78,41 | 130,29 | 66,49    | 117,77  | 18,49 | 91,23 | 11,33  | 67,08   | 34,29          |
| 2  | 45,03                             | 124,53       | 95,23 | 185,47 | 60,37    | 120,18  | 20,47 | 80,58 | 9,36   | 80,21   | 6,33           |

Na obrázku 13 lze pozorovat, že s rostoucí energií záření se odchylky měření od reálného stavu opět zvětšují. Ideální průběh je opět označen červenou plnou čarou. Na první pohled je patrné, že většina detektorů hodnotu dávkového příkonu vysokoenergetického fotonového záření značně nadhodnocuje.



Obrázek 13 - Závislost experimentálního měření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

Křivky linearity odezvy detektorů záření pro vysoké energie je možné pozorovat na obrázku 14. Na základě tvarů křivek linearity odezvy jednotlivých detektorů lze konstatovat, že při vysoké energii fotonového záření gama se linearita odezvy výrazně zhoršuje, a to u naprosté většiny testovaných detektorů záření. Největší chyby však vykazují zejména detektory RGU 100 a RDS 200.



Obrázek 14 - Linearita odezvy detektorů záření pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

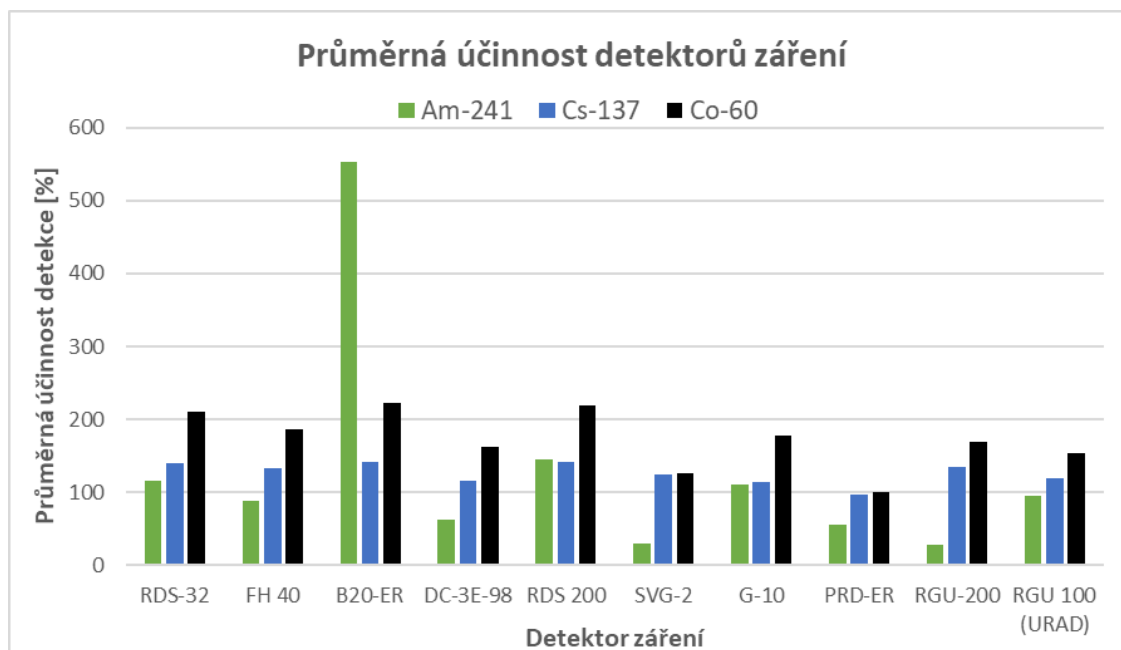
Tabulka 6 obsahuje vypočítané detekční účinnosti pro vysokoenergetické záření gama. Jediný z testovaných detektorů, který se pohybuje na hranici možné detekční účinnosti je RadEye PRD-ER, ten dosahuje průměrné účinnosti detekce 99,9 %. Všechny ostatní detekční přístroje se pohybují vysoko na 100 %. Naprosto nejhorší výsledky vykazují zejména RadEye B20-ER (222 %), RDS 200 (219 %) a RDS-32 (210 %). Tyto přístroje vykazují více než dvojnásobnou hodnotu dávkového příkonu, než je hodnota reálná. Jak již bylo konstatováno, nejlepší detekční účinnost vykazoval RadEye PRD-ER sestupně následován detektory SVG-2 (126 %), RGU 100 (154 %), DC-3E-98 (163 %), RGU 200 (169 %), RadEye G-10 (178 %) a FH 40 (186 %).

Tabulka 6 - Detektory záření – tabulka účinnosti detekce pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

| Detektory záření - odchylky měření pro střední energie za použití radionuklidového zdroje <sup>60</sup> Co o aktivitě 0,59 GBq |                                   |                      |        |        |          |         |        |        |        |         |                |
|--|-----------------------------------|----------------------|--------|--------|----------|---------|--------|--------|--------|---------|----------------|
| Vzdálenost [m]   | Vypočítaný dávkový příkon [μSv/h] | Účinnost detekce [%] |        |        |          |         |        |        |        |         |                |
|  |                                   | RDS-32               | FH 40  | B20-ER | DC-3E-98 | RDS 200 | SVG-2  | G-10   | PRD-ER | RGU-200 | RGU 100 (URAD) |
| 20   | 0,42                              | 179,37               | 197,62 | 205,56 | 168,25   | 172,22  | 138,89 | 186,51 | 86,51  | 178,57  | 154,76         |
| 18   | 0,52                              | 196,79               | 183,33 | 210,90 | 178,85   | 232,69  | 125,64 | 198,08 | 90,38  | 173,08  | 187,82         |
| 16   | 0,67                              | 188,06               | 187,56 | 224,38 | 158,71   | 243,78  | 154,73 | 175,62 | 95,52  | 169,15  | 163,68         |
| 14   | 0,88                              | 213,26               | 175,00 | 214,39 | 156,82   | 222,73  | 131,06 | 180,68 | 105,30 | 173,48  | 137,12         |
| 12   | 1,21                              | 217,36               | 184,02 | 210,47 | 159,50   | 243,53  | 113,22 | 173,28 | 99,17  | 163,91  | 192,29         |
| 10   | 1,75                              | 220,00               | 175,05 | 208,95 | 158,86   | 206,67  | 103,43 | 165,90 | 96,95  | 154,86  | 165,33         |
| 8  | 2,75                              | 207,03               | 192,12 | 213,82 | 162,30   | 214,30  | 135,39 | 166,42 | 96,73  | 161,70  | 154,79         |
| 6  | 4,94                              | 223,68               | 186,44 | 218,89 | 158,50   | 216,19  | 118,22 | 159,11 | 108,16 | 170,18  | 144,53         |
| 4  | 11,18                             | 227,79               | 178,41 | 230,29 | 166,49   | 217,77  | 118,49 | 191,23 | 111,33 | 167,08  | 134,29         |
| 2  | 45,03                             | 224,53               | 195,23 | 285,47 | 160,37   | 220,18  | 120,47 | 180,58 | 109,36 | 180,21  | 106,33         |
| Průměrná účinnost detekce  |                                   | 209,79               | 185,48 | 222,31 | 162,86   | 219,01  | 125,95 | 177,74 | 99,94  | 169,22  | 154,09         |

Souhrnné porovnání průměrných detekčních účinností jednotlivých testovaných detektorů záření na nízkých, středních i vysokých energiích zobrazuje obrázek 15.





Obrázek 15 - Průměrná účinnost detektorů záření pro nízké, střední a vysoké energie gama [vlastní výzkum]

Jednoznačně nejhorší účinnost detekce byla prokázána u detektoru RadEye B20-ER, který výrazně nadhodnocuje výsledky na všech úrovních energie fotonového záření gama. Z grafu je také patrné, že nejlepších účinností detekce testované detektory dosahují na středních energiích záření gama. Detektory s nejlepšími výsledky detekční účinnosti jsou RadEye PRD-ER, a to zejména pro střední a vysoké energie záření gama, a RadEye G-10, zejména pro nízké a střední energie záření gama. V oblasti nízkých a středních energií gama nevykazuje nejhorší výsledky ani detektor RGU 100. V rozsahu středních a vysokých energií gama pak detektor SVG-2.

### 5.1.2 Spektrometry

#### Linearita odezvy spektrometrických detektorů pro nízké energie gama

Podmínky měření i použitý zdroj záření jsou totožné s experimentálním měřením detektorů záření.

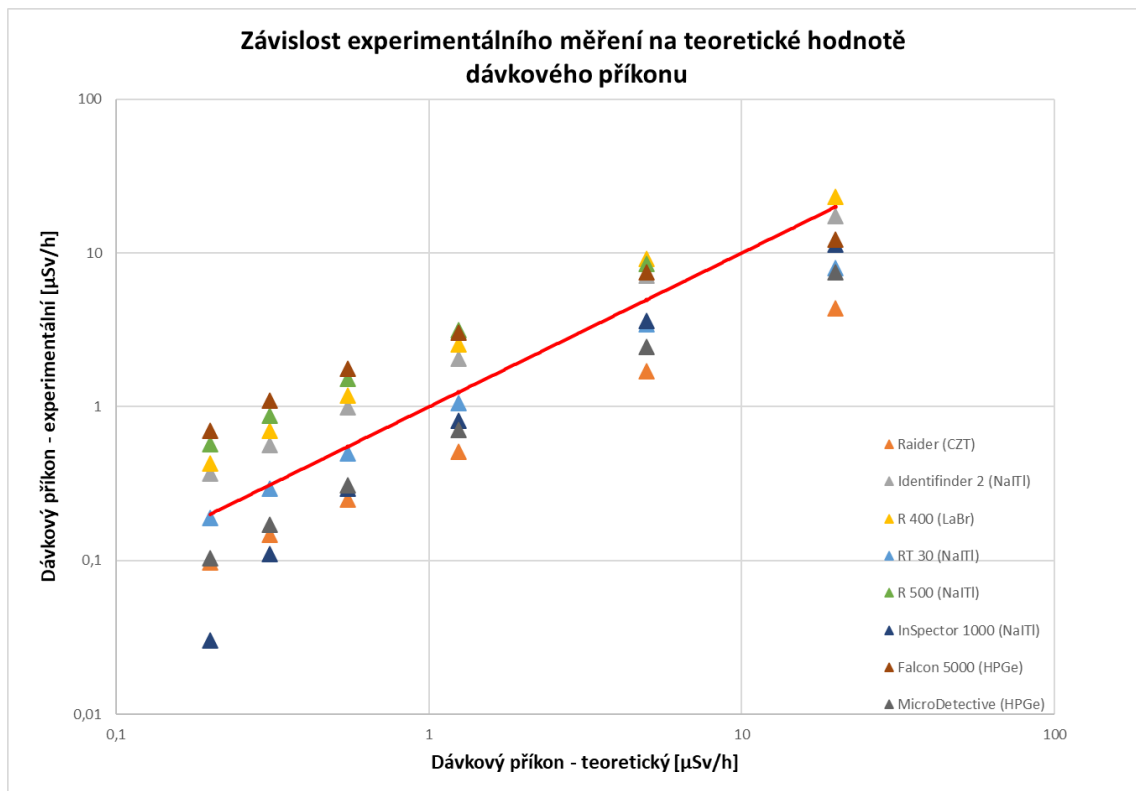
Tabulka 7 obsahuje vypočítané odchylky měření spektrometrických detektorů pro nízké energie záření gama. Červeným písmem jsou opět označeny odchylky přesahující 30 %. Jediný spektrometr, který má relativně solidní výsledky je

scintilační detektor RT 30. Naopak nejhorší výsledky vykazuje polovodičový detektor Falcon 5000, a to zejména při nízkých dávkových příkonech na úrovni dvoj až trojnásobku přírodního pozadí, poté se odchylky výrazně zmenšují. Obrovskou odchylku při měření nízkoaktivního záření gama vykazují také detektor R 500 a při nízkých dávkových příkonech detektor R 400.

Tabulka 7 - Spektrometrické detektory - tabulka odchylek měření pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

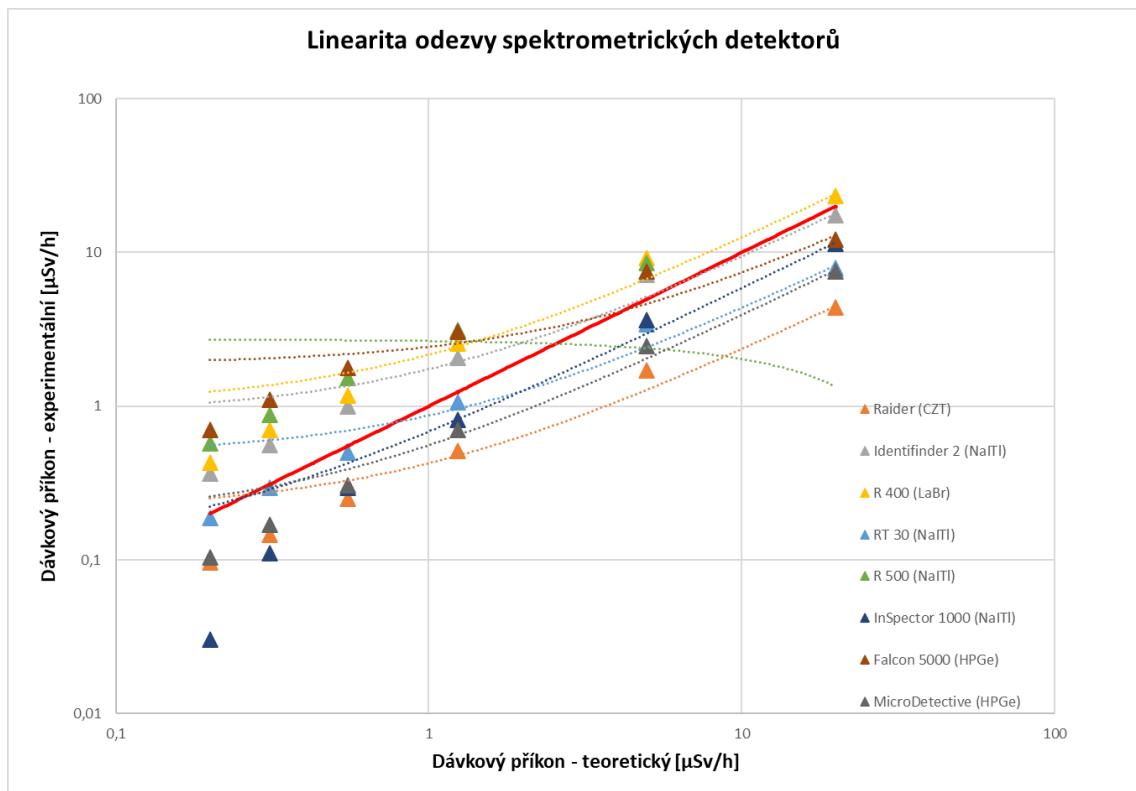
| Spektrometry - odchylky měření pro nízké energie za použití radionuklidového zdroje <sup>241</sup> Am o aktivitě 50,08 MBq |                                   |              |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|--|-----------------------------------|--------------|--------------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Vzdálenost [cm]  | Vypočítaný dávkový příkon [μSv/h] | Odchylka [%] |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|  |                                   | Raider (CZT) | Identifinder 2 (NaI(Tl)) | R 400 (Labr) | RT 30 (NaI(Tl)) | R 500 (NaI(Tl)) | InSpector 1000 | Falcon 5000 (HPGe) | MicroDetective (HPGe) |
| 100  | 0,2                               | -51,67       | 83,33                    | 114,00       | -5,67           | 186,17          | -84,83         | 250,17             | -48,17                |
| 80   | 0,31                              | -52,69       | 80,97                    | 125,48       | -4,95           | 182,47          | -64,41         | 254,95             | -45,05                |
| 60   | 0,55                              | -54,55       | 80,12                    | 114,42       | -9,39           | 176,79          | -46,61         | 221,27             | -44,18                |
| 40   | 1,24                              | -58,60       | 66,80                    | 106,10       | -14,22          | 152,74          | -34,38         | 144,65             | -43,25                |
| 20   | 4,96                              | -65,52       | 44,00                    | 84,54        | -30,84          | 71,19           | -26,74         | 51,89              | -50,53                |
| 10   | 19,87                             | -77,97       | -12,32                   | 17,38        | -59,92          | -100,67         | -42,63         | -38,77             | -62,12                |

Závislost experimentálně naměřeného dávkového příkonu na vypočítaném dávkovém příkonu znázorňuje obrázek 16. Červená čára značí ideální hodnoty dávkového příkonu vypočtené na základě vlastností použitého radionuklidového zdroje. Z grafu jsou krásně viditelné velké odchylky měření většiny testovaných detektorů. V případě detektorů Raider, RT 30, InSpector 1000 a MicroDetective jsou naměřené hodnoty oproti reálnému stavu podhodnocené. Naopak detektory Identifinder 2, R 400, R 500 a Falcon 5000 výsledky nadhodnocují.



Obrázek 16 - Závislost experimentálního měření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

Obrázek 17 zobrazující linearitu odezvy testovaných spektrometrických detektorů pro nízkenergetické záření gama deklaruje již dříve zmíněné. Křivky lineární regrese jednotlivých detektorů by měly kopírovat referenční červenou přímku. Všeměrová zakřivení těchto přímek pak dokazují velmi špatnou linearitu odezvy těchto detektorů. Nejlepší míru linearitu odezvy v tomto případě vykazují detektory MicroDetective, InSpector 1000 a RT 30.



Obrázek 17 - Linearita odezvy detektorů záření pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

V tabulce 8 jsou uvedeny vypočítané hodnoty detekční účinnosti testovaných spektrometrů. Hodnoty přesahující hranici možných 100 % jsou označeny červeně. Nejlepší průměrnou detekční účinnost vykazuje scintilační detektor RT 30, jehož účinnost dosahuje hodnoty 79 %. Účinnosti okolo 50 % pak náleží detektorům InSpector 1000 a Micro Detective, téměř 40 % účinnost pak vykazuje přístroj Raider. Ostatní testované detektory vykazují účinnost nad 100 % - Identifinder 2 (157 %), R 400 (194 %), R 500 (212 %) a Falcon 5000 (247 %).

Tabulka 8 - Spektrometrické přístroje - tabulka účinnosti detekce pro nízké energie gama [vlastní výzkum]

| Spektrometry - odchylky měření pro nízké energie za použití radionuklidového zdroje $^{241}\text{Am}$ o aktivitě 50,08 MBq |  |                      |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|--|--|----------------------|--------------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Vzdálenost [cm]  | Vypočítaný dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ] | Účinnost detekce [%] |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|  |  | Raider (CZT)         | Identifinder 2 (NaI(Tl)) | R 400 (Labr) | RT 30 (NaI(Tl)) | R 500 (NaI(Tl)) | InSpector 1000 | Falcon 5000 (HPGe) | MicroDetective (HPGe) |
| 100  | 0,2  | 48,33                | 183,33                   | 214,00       | 94,33           | 286,17          | 15,17          | 350,17             | 51,83                 |
| 80   | 0,31   | 47,31                | 180,97                   | 225,48       | 95,05           | 282,47          | 35,59          | 354,95             | 54,95                 |
| 60   | 0,55   | 45,45                | 180,12                   | 214,42       | 90,61           | 276,79          | 53,39          | 321,27             | 55,82                 |
| 40   | 1,24   | 41,40                | 166,80                   | 206,10       | 85,78           | 252,74          | 65,62          | 244,65             | 56,75                 |
| 20   | 4,96   | 34,48                | 144,00                   | 184,54       | 69,16           | 171,19          | 73,26          | 151,89             | 49,47                 |
| 10   | 19,87  | 22,03                | 87,68                    | 117,38       | 40,08           | -0,67           | 57,37          | 61,23              | 37,88                 |
| Průměrná účinnost detekce  |  | 39,83                | 157,15                   | 193,65       | 79,17           | 211,45          | 50,07          | 247,36             | 51,12                 |

### Linearita odezvy spektrometrických detektorů pro střední energie gama

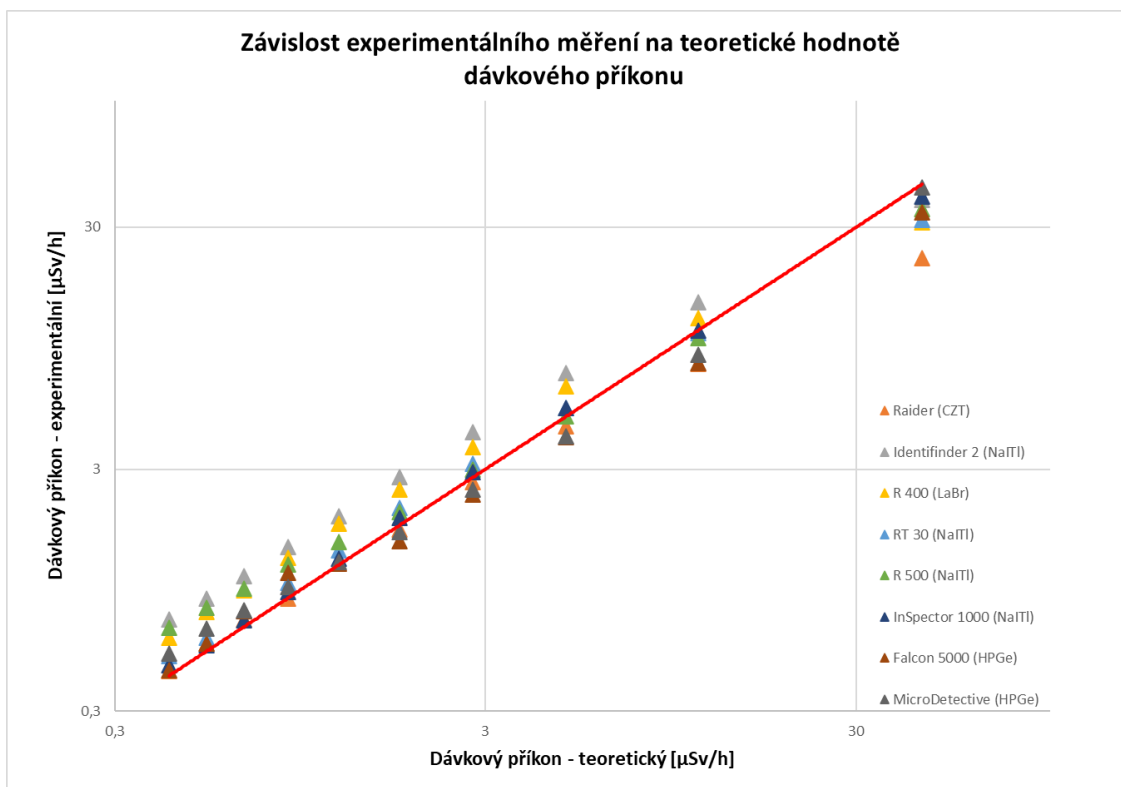
Podmínky měření i použitý zdroj jsou totožné jako u experimentálního měření detektorů záření.

Hodnoty odchylek měření spektrometrických detektorů pro střední energie záření gama uvádí tabulka 9. Červeně jsou opět označeny hodnoty přesahující 30 %. Nejmenších odchylek měření v tomto případě dosahují detektory Raider, InSpector 1000, RT 30, Falcon 5000 a Micro Detective. V případě scintilačních detektorů Identifinder 2, R 400 a při nižších dávkových příkonech i R 500 dochází opět k výraznému nadhodnocování výsledků.

Tabulka 9 - Spektrometrické detektory - tabulka odchylek měření pro střední energie gama [vlastní výzkum]

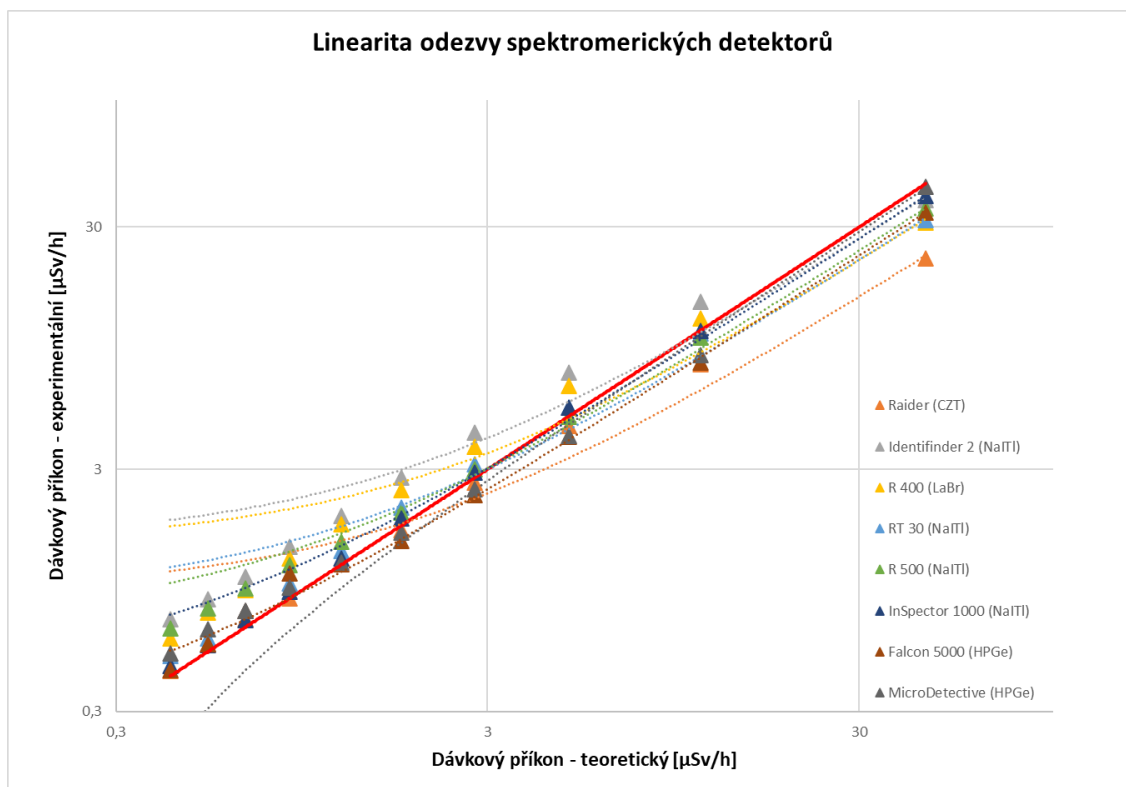
| Spektrometry - odchylky měření pro střední energie za použití radionuklidového zdroje <sup>137</sup> Cs o aktivitě 2,39 GBq |                                   |              |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|---|-----------------------------------|--------------|--------------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Vzdálenost [m]  | Vypočítaný dávkový příkon [μSv/h] | Odchylka [%] |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|   |                                   | Raider (CZT) | Identifinder 2 (NaI(Tl)) | R 400 (Labr) | RT 30 (NaI(Tl)) | R 500 (NaI(Tl)) | InSpector 1000 | Falcon 5000 (HPGe) | MicroDetective (HPGe) |
| 20  | 0,42                              | 4,76         | 71,51                    | 43,10        | 21,03           | 57,62           | 10,32          | 5,56               | 23,81                 |
| 18  | 0,53                              | 7,55         | 64,59                    | 44,97        | 13,77           | 50,94           | 6,29           | 7,55               | 23,90                 |
| 16  | 0,67                              | 7,46         | 61,34                    | 41,89        | 16,22           | 44,18           | 6,47           | 16,42              | 16,92                 |
| 14  | 0,88                              | -0,38        | 62,80                    | 46,52        | 15,53           | 37,39           | 6,06           | 26,89              | 10,98                 |
| 12  | 1,21                              | 0,55         | 58,76                    | 47,52        | 14,33           | 24,38           | 6,06           | 0,55               | 2,20                  |
| 10  | 1,76                              | -4,36        | 58,18                    | 40,00        | 18,37           | 13,05           | 7,01           | -13,83             | -6,44                 |
| 8   | 2,77                              | -4,33        | 53,66                    | 34,15        | 13,72           | 8,16            | 5,29           | -15,16             | -10,71                |
| 6   | 4,96                              | -8,94        | 51,55                    | 33,47        | 8,53            | -0,02           | 8,53           | -17,67             | -17,00                |
| 4   | 11,24                             | -27,49       | 30,93                    | 12,13        | -2,58           | -6,88           | -0,50          | -26,60             | -20,82                |
| 2   | 45,3                              | -50,66       | -14,06                   | -30,84       | -28,96          | -21,19          | -11,22         | -23,73             | -2,98                 |

Obrázek 18 znázorňuje závislost měřeného dávkového příkonu na vypočítaném. Z grafu je patrné, že oproti nízkoenergetickému záření gama se odchylky měření výrazně zmenšily, a to u všech testovaných detektorů.



Obrázek 18 - Závislost experimentálního měření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu pro střední energie gama [vlastní výzkum]

Obrázek 19 znázorňuje linearitu odezvy testovaných spektrometrů při detekci záření gama o střední energii. Většina spektrometrů se výrazně blíží ideálnímu průběhu. Nejlepší linearitu odezvy dosahuje scintilační detektor InSpector 1000 následovaný polovodičovými detektory Falcon 5000 a MicroDetective. Velmi dobrých výsledků dosahuje i CZT detektor Radier, avšak při vyšších dávkových příkonech jeho účinnost výrazně klesá.



Obrázek 19 - Linearita odezvy detektorů záření pro střední energie gama [vlastní výzkum]

Tabulka 10 znázorňuje přehled vypočítaných detekčních účinností testovaných spektrometrů pro střední energie fotonového gama záření. Průměrné hodnoty detekčních účinností scintilačních detektorů InSpector 1000, RT 30 a R 500 se pohybují okolo hranice 100 %, přičemž chyby v účinnosti odezvy tyto detektory získaly při měření nízkých úrovní dávkového příkonu, se stoupajícím dávkovým příkonem se jejich účinnost zlepšovala. Polovodičové detektory Falcon 5000, MicroDetective a CZT detektor Raider dosahují velmi dobrých účinností okolo 85 %. Nejhorší účinnost náleží scintilačním detektorům Identifinder 2 a R 400.



Tabulka 10 - Spektrometrické přístroje - tabulka účinnosti detekce pro střední energie gama [vlastní výzkum]

| Spektrometry - odchylky měření pro střední energie za použití radionuklidového zdroje <sup>137</sup> Cs o aktivitě 2,39 GBq |  |                      |                             |                 |                    |                    |                   |                       |                           |
|---|--|----------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|
| Vzdálenos<br>t [m]  | Vypočítaný<br>dávkový<br>příkon<br>[μSv/h] | Účinnost detekce [%] |                             |                 |                    |                    |                   |                       |                           |
|   |  | Raider<br>(CZT)      | Identifinder 2<br>(NaI(Tl)) | R 400<br>(Labr) | RT 30<br>(NaI(Tl)) | R 500<br>(NaI(Tl)) | InSpector<br>1000 | Falcon 5000<br>(HPGe) | MicroDetectiv<br>e (HPGe) |
| 20  | 0,42                                       | 104,76               | 171,51                      | 143,10          | 121,03             | 157,62             | 110,32            | 105,56                | 123,81                    |
| 18  | 0,53                                       | 107,55               | 164,59                      | 144,97          | 113,77             | 150,94             | 106,29            | 107,55                | 123,90                    |
| 16  | 0,67                                       | 107,46               | 161,34                      | 141,89          | 116,22             | 144,18             | 106,47            | 116,42                | 116,92                    |
| 14  | 0,88                                       | 99,62                | 162,80                      | 146,52          | 115,53             | 137,39             | 106,06            | 126,89                | 110,98                    |
| 12  | 1,21                                       | 100,55               | 158,76                      | 147,52          | 114,33             | 124,38             | 106,06            | 100,55                | 102,20                    |
| 10  | 1,76                                       | 95,64                | 158,18                      | 140,00          | 118,37             | 113,05             | 107,01            | 86,17                 | 93,56                     |
| 8   | 2,77                                       | 95,67                | 153,66                      | 134,15          | 113,72             | 108,16             | 105,29            | 84,84                 | 89,29                     |
| 6   | 4,96                                       | 91,06                | 151,55                      | 133,47          | 108,53             | 99,98              | 108,53            | 82,33                 | 83,00                     |
| 4   | 11,24                                      | 72,51                | 130,93                      | 112,13          | 97,42              | 93,12              | 99,50             | 73,40                 | 79,18                     |
| 2   | 45,3                                       | 49,34                | 85,94                       | 69,16           | 71,04              | 78,81              | 88,78             | 76,27                 | 97,02                     |
| Průměrná účinnost<br>detekce  |  | 84,13                | 139,84                      | 122,74          | 103,90             | 102,92             | 102,53            | 83,93                 | 90,71                     |

### Linearita odezvy spektrometrických detektorů pro vysoké energie gama

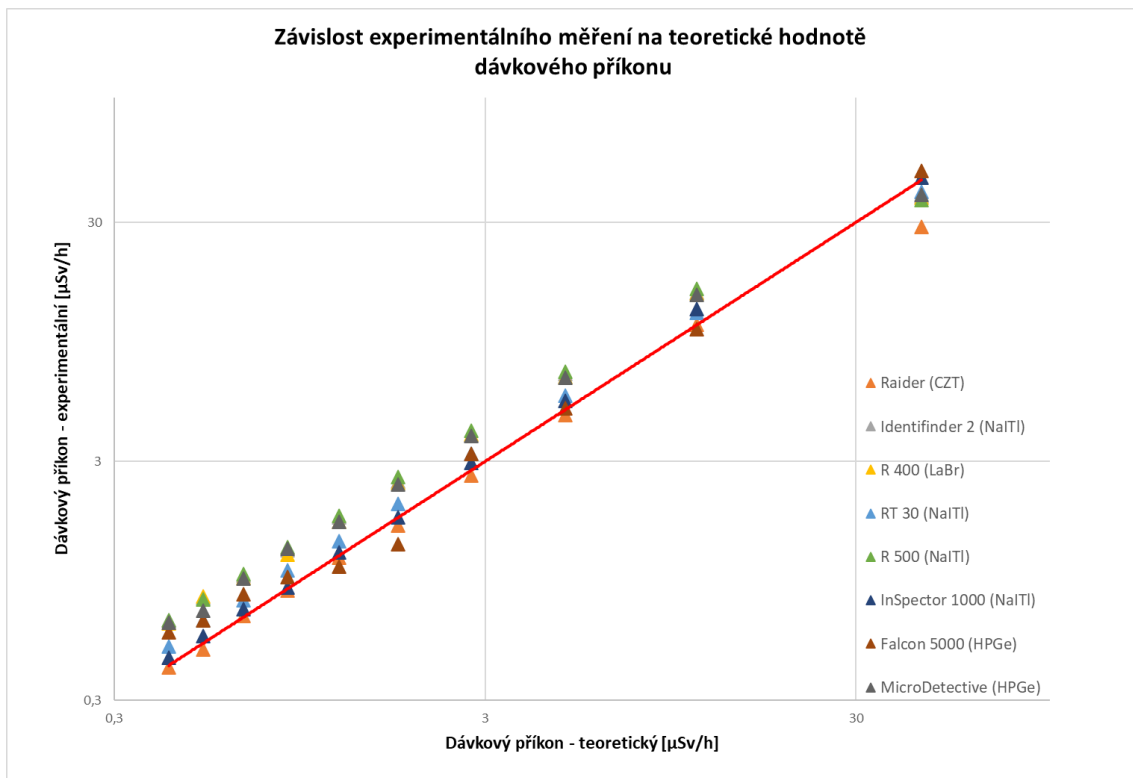
Podmínky měření i použitý zdroj jsou totožné jako u experimentálního měření detektorů záření.

Odchylky měření spektrometrických přístrojů pro vysokoenergetické fotonové záření gama jsou uvedeny v tabulce 11. Nejmenší odchylky měření náleží detektoru InSpector 1000, ty téměř v celém rozsahu měření nepřesáhly 10 %. Podobně je tomu u CZT detektoru Radier, kde se odchylka zvýšila až při vysokém dávkovém příkonu. Dobré výsledky vykazují také RT 30 a Falcon 5000, jejichž odchylky se téměř v celém rozsahu pohybovaly do 30 %.

Tabulka 11 - Spektrometrické detektory - tabulka odchylek měření pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

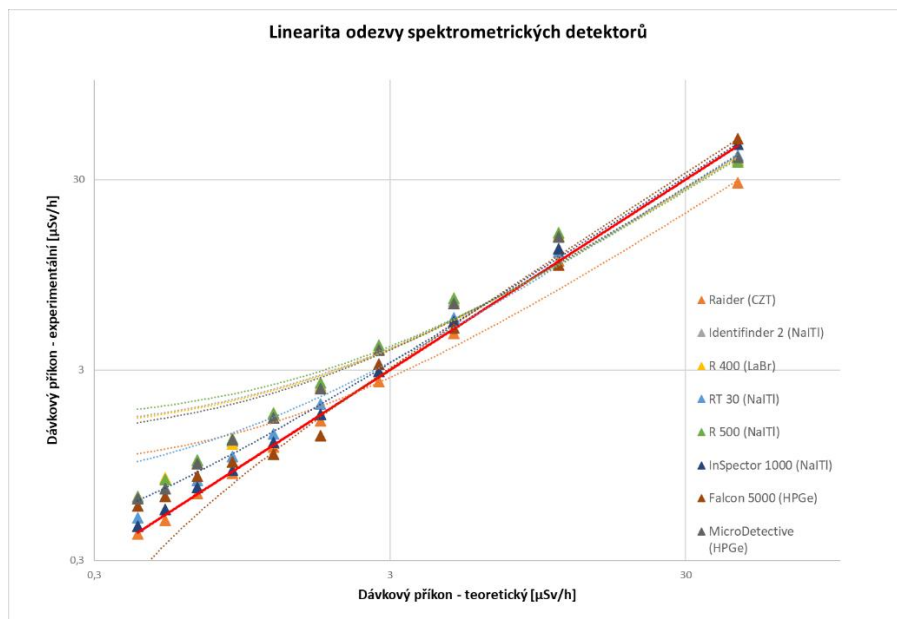
| Spektrometry - odchylky měření pro vysoké energie za použití radionuklidového zdroje $^{60}\text{Co}$ o aktivitě 0,59 GBq |  |              |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|---|--|--------------|--------------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Vzdálenost [m]  | Vypočítaný dávkový příkon [ $\mu\text{Sv/h}$ ] | Odchylka [%] |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|   |  | Raider (CZT) | Identifinder 2 (NaI(Tl)) | R 400 (Labr) | RT 30 (NaI(Tl)) | R 500 (NaI(Tl)) | InSpector 1000 | Falcon 5000 (HPGe) | MicroDetective (HPGe) |
| 20  | 0,42   | -1,59        | 55,08                    | 50,56        | 20,08           | 54,37           | 7,94           | 38,10              | 50,79                 |
| 18  | 0,52   | -5,77        | 55,38                    | 56,92        | 25,00           | 52,76           | 7,05           | 25,00              | 37,18                 |
| 16  | 0,67   | 1,00         | 49,55                    | 45,57        | 17,71           | 51,34           | 7,96           | 24,38              | 44,78                 |
| 14  | 0,88   | -1,89        | 45,00                    | 39,24        | 19,70           | 48,75           | 1,52           | 12,12              | 46,97                 |
| 12  | 1,21   | -1,93        | 45,15                    | 39,09        | 14,60           | 47,22           | 3,58           | -10,19             | 38,84                 |
| 10  | 1,75   | -7,43        | 41,45                    | 39,14        | 13,52           | 47,16           | 0,19           | -22,67             | 37,14                 |
| 8   | 2,75   | -4,73        | 40,10                    | 41,33        | 17,09           | 46,85           | 7,39           | 17,09              | 39,52                 |
| 6   | 4,94   | -5,13        | 40,86                    | 36,63        | 14,44           | 44,30           | 9,04           | 0,94               | 36,03                 |
| 4   | 11,18  | 0,36         | 36,23                    | 35,66        | 12,28           | 40,97           | 16,46          | -4,41              | 33,84                 |
| 2   | 45,03  | -36,00       | -14,62                   | -15,51       | -10,53          | -17,28          | 2,49           | 9,38               | -12,83                |

Obecně velmi dobré výsledky měření jsou patrné ze závislosti experimentálního dávkového příkonu na vypočítaném (Obrázek 20). Naměřené hodnoty všech detektorů se pohybují ve velmi malých odchylkách od ideálních hodnot znázorněných červenou plnou čarou.



Obrázek 20 - Závislost experimentálního měření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

Obrázek 21 znázorňuje linearitu odezvy spektrometrických přístrojů pro vysokoenergetické záření gama. Na obrázku 21 jsou dobře viditelné chyby některých detektorů při měření nízkých úrovní dávkového příkonu. Nejlepší linearitu odezvy dosahují detektory InSpector 1000, Falcon 5000 a Radier.



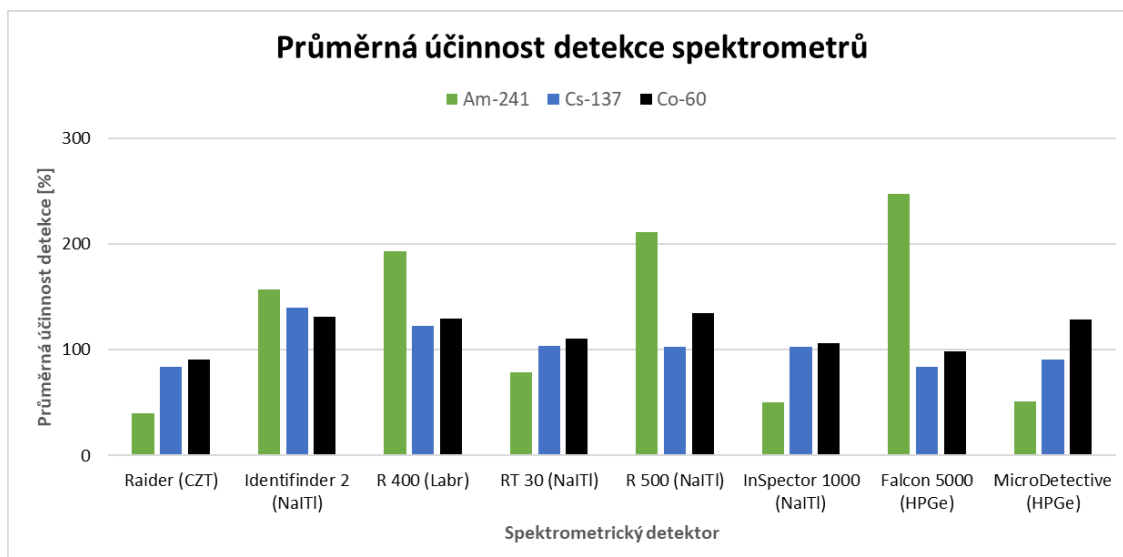
Obrázek 21 - Linearita odezvy detektorů záření pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

Nejlepší průměrné účinnosti, jak popisuje tabulka 12, dosáhl Falcon 5000 (98 %), následuje Inspector 1000 (107 %) a Raider (91 %). Ostatní detektory své výsledky nadhodnocují o téměř 30 %.

Tabulka 12 - Spektrometrické přístroje - tabulka účinnosti detekce pro vysoké energie gama [vlastní výzkum]

| Spektrometry - odchylky měření pro střední energie za použití radionuklidového zdroje <sup>60</sup> Co o aktivitě 0,59 GBq |                                   |                      |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|--|-----------------------------------|----------------------|--------------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| Vzdálenost [m]   | Vypočítaný dávkový příkon [μSv/h] | Účinnost detekce [%] |                          |              |                 |                 |                |                    |                       |
|  |                                   | Raider (CZT)         | Identifinder 2 (NaI(Tl)) | R 400 (Labr) | RT 30 (NaI(Tl)) | R 500 (NaI(Tl)) | InSpector 1000 | Falcon 5000 (HPGe) | MicroDetective (HPGe) |
| 20   | 0,42                              | 98,41                | 155,08                   | 150,56       | 120,08          | 154,37          | 107,94         | 138,10             | 150,79                |
| 18   | 0,52                              | 94,23                | 155,38                   | 156,92       | 125,00          | 152,76          | 107,05         | 125,00             | 137,18                |
| 16   | 0,67                              | 101,00               | 149,55                   | 145,57       | 117,71          | 151,34          | 107,96         | 124,38             | 144,78                |
| 14   | 0,88                              | 98,11                | 145,00                   | 139,24       | 119,70          | 148,75          | 101,52         | 112,12             | 146,97                |
| 12   | 1,21                              | 98,07                | 145,15                   | 139,09       | 114,60          | 147,22          | 103,58         | 89,81              | 138,84                |
| 10   | 1,75                              | 92,57                | 141,45                   | 139,14       | 113,52          | 147,16          | 100,19         | 77,33              | 137,14                |
| 8  | 2,75                              | 95,27                | 140,10                   | 141,33       | 117,09          | 146,85          | 107,39         | 117,09             | 139,52                |
| 6  | 4,94                              | 94,87                | 140,86                   | 136,63       | 114,44          | 144,30          | 109,04         | 100,94             | 136,03                |
| 4  | 11,18                             | 100,36               | 136,23                   | 135,66       | 112,28          | 140,97          | 116,46         | 95,59              | 133,84                |
| 2  | 45,03                             | 64,00                | 85,38                    | 84,49        | 89,47           | 82,72           | 102,49         | 109,38             | 87,17                 |
| Průměrná účinnost detekce  |                                   | 90,86                | 131,53                   | 129,39       | 110,23          | 134,87          | 106,53         | 98,36              | 128,76                |

Obrázek 22 obsahuje souhrnné porovnání průměrných detekčních účinností jednotlivých testovaných spektrometrických detektorů na nízkých, středních i vysokých energiích.



Obrázek 22 - Průměrná účinnost spektrometrických detektorů pro nízké, střední a vysoké energie gama [vlastní výzkum]

Detektorem s nejlepší průměrnou detekční účinností na nízkých, středních i vysokých energiích je scintilační detektor RT 30. Solidní detekční účinnost vykazují též detektory InSpector 1000, Radider a Falcon 5000, avšak pouze na středních a vysokých energiích záření gama. Obecně lze na základě výše uvedeného konstatovat, že testované spektrometrické detektory mají výrazný problém s účinnou a spolehlivou detekcí nízkých energií záření gama.

## 5.2 Účinnost měření plošné kontaminace

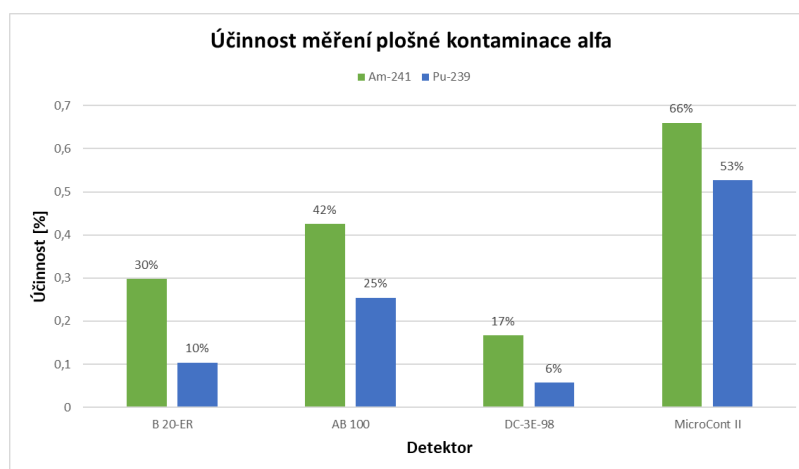
Detektory schopné měření plošné kontaminace byly testovány pomocí etalonů plošné kontaminace o známých plošných aktivitách. Toto jednoduché měření cílilo na porovnání detekčních schopností těchto přístrojů.

Tabulka 13 obsahuje údaje o detekční účinnosti detektorů plošné kontaminace. Etalony plošné alfa kontaminace byly velmi slabé, i proto jsou detekční účinnosti tak malé. Nejúčinnějším detektorem alfa kontaminace je z testovaných detektorů MicroCont II, který dosahuje účinnosti 66 % pro  $^{241}\text{Am}$  a 52 % pro  $^{239}\text{Pu}$ . Etalon plošné aktivity beta byl asi 10x silnější. Nejlepší účinnost detekce náleží detektoru RadEye AB 100 (126 %), i když je nadhodnocena. Nepoužitelných výsledků bylo dosaženo pomocí detektoru DC-3E-98.

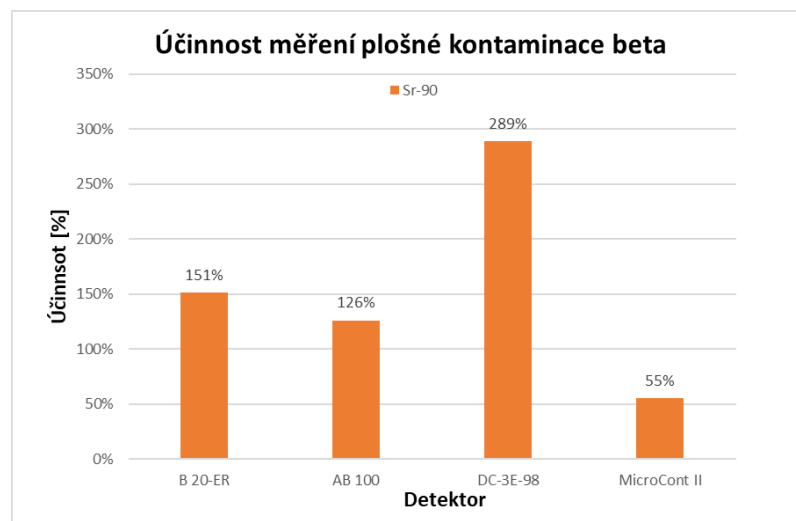
Tabulka 13 - Účinnost detektorů plošné kontaminace [vlastní výzkum]

|                   | Skutečná<br>plošná aktivita<br>[Bq/cm <sup>2</sup> ] | B 20-ER      | AB 100 | DC-3E-98 | MicroCont II |
|-------------------|--|--------------|--------|----------|--------------|
|                   |  | Účinnost [%] |        |          |              |
| <sup>241</sup> Am | 1,1  | 29,8         | 42,5   | 16,7     | 66,0         |
| <sup>239</sup> Pu | 1,2  | 10,4         | 25,4   | 5,8      | 52,7         |
| <sup>90</sup> Sr  | 10,7   | 151,4        | 126,0  | 288,8    | 55,2         |

Grafické znázornění účinnosti měření plošné aktivity pro alfa kontaminaci zobrazuje obrázek 23, beta kontaminaci pak obrázek 24.



Obrázek 23 - Účinnost měření plošné kontaminace alfa [vlastní výzkum]



Obrázek 24 - Účinnost měření plošné kontaminace beta [vlastní výzkum]

### 5.3 Identifikace radionuklidu

Byl proveden prostý test schopnosti identifikace vybraných radionuklidů emitujících fotonové záření gama. Použity byly slabé etalonové zdroje typu EG-3. Výsledky identifikace jsou uvedeny v tabulce 25.

|                        | <sup>241</sup> Am | <sup>137</sup> Cs | <sup>134</sup> Cs | <sup>109</sup> Cd | <sup>88</sup> Y | <sup>133</sup> Ba | <sup>57</sup> Co | <sup>60</sup> Co |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|
| <b>Identifinder 2</b>  | ANO               | ANO               | ANO               | NE                | NE              | ANO               | ANO              | ANO              |
| <b>Raider</b>          | ANO               | ANO               | ANO               | NE                | NE              | ANO               | ANO              | ANO              |
| <b>R400</b>            | ANO               | ANO               | ANO               | ANO               | NE              | ANO               | ANO              | ANO              |
| <b>R500</b>            | ANO               | ANO               | ANO               | NE                | NE              | ANO               | ANO              | NE               |
| <b>InSpector</b>       | ANO               | ANO               | NE                | NE                | NE              | ANO               | ANO              | ANO              |
| <b>Micro detective</b> | ANO               | ANO               | ANO               | ANO               | ANO             | ANO               | ANO              | ANO              |
| <b>Falcon</b>          | ANO               | ANO               | ANO               | ANO               | ANO             | ANO               | ANO              | ANO              |
| <b>RT 30</b>           | ANO               | ANO               | NE                | NE                | NE              | ANO               | ANO              | ANO              |

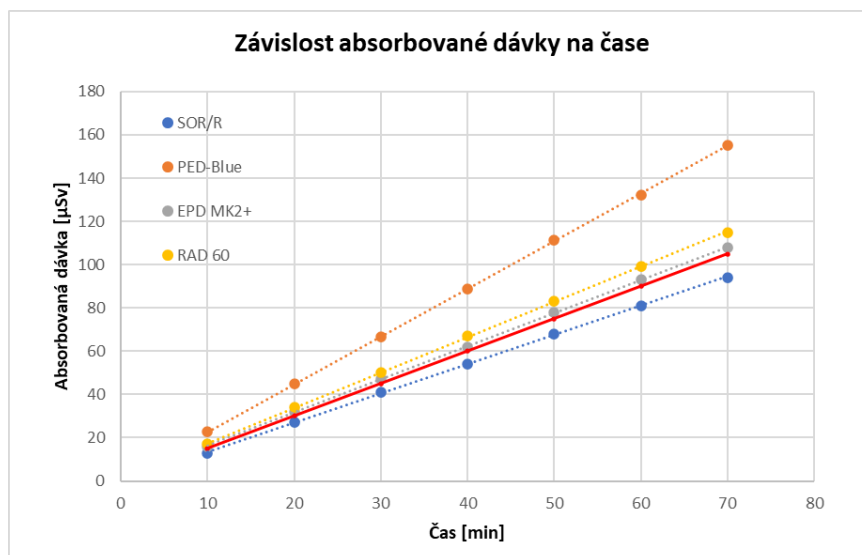
Obrázek 25 - Identifikace vybraných radionuklidů emitujících fotonové záření gama [vlastní výzkum]

Polovodičové detektory dle očekávání byly schopné identifikovat všechny vybrané radionuklidy. Nejčastěji neidentifikovanými radionuklidy byly <sup>88</sup>Y a <sup>109</sup>Cd. V případě detektorů InSpector 1000 a RT 30 nedošlo ani k identifikaci <sup>134</sup>Cs. Spektrometrický detektor R 500 nebyl schopen identifikovat <sup>60</sup>Co.

### 5.4 Linearita měření osobních dozimetrů

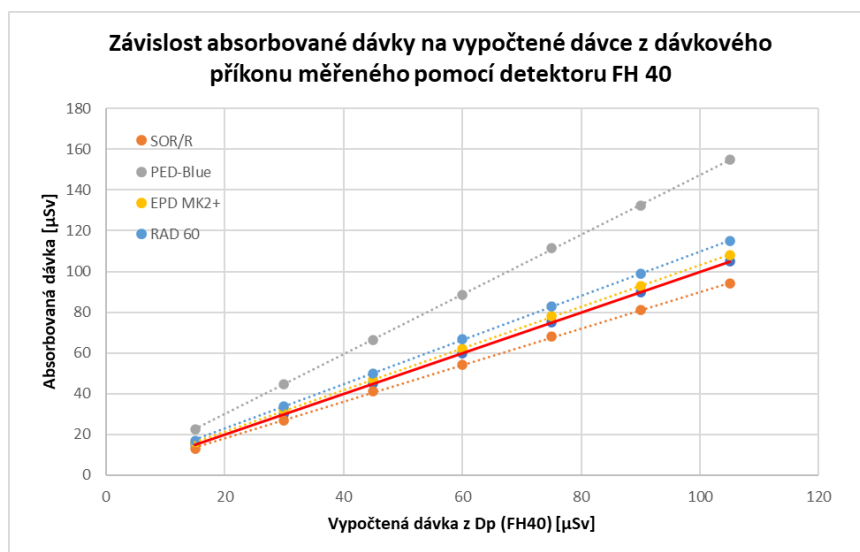
Osobní dozimetry byly ozařovány ze vzdálenosti 25 cm. Zkoumána byla linearita načítání dávky v čase, na základě měřené hodnoty dávkového příkonu a na základě vypočítané dávky.

Obrázek 26 popisuje závislost absorbované dávky osobních dozimetrů na uplynulém čase. Z tohoto pohledu se jeví nejvíce lineární průběh načítání absorbované dávky osobní dozimetr EPD MK2+. Naopak osobní dozimetr PED Blue dávku výrazně nadhodnocuje.



Obrázek 26 - Závislost absorbované dávky na čase [vlastní výzkum]

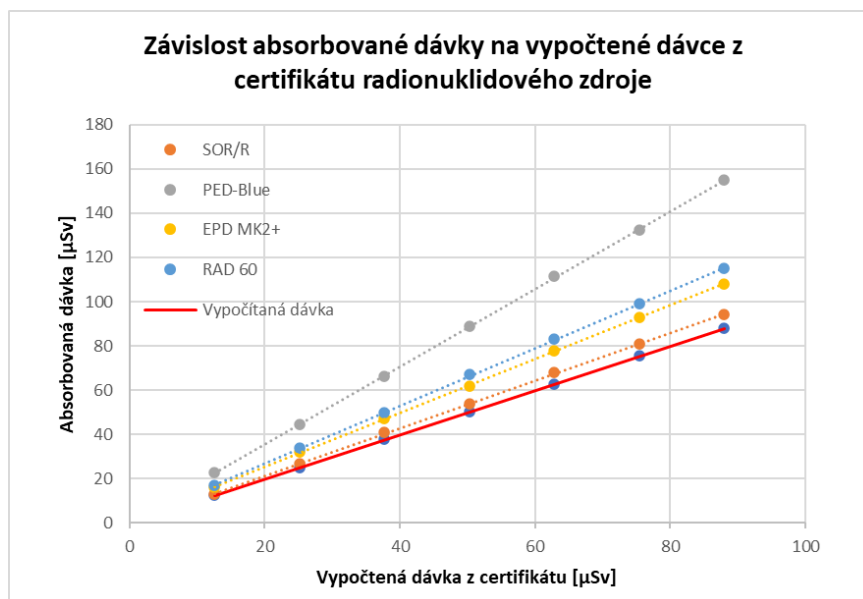
Obdobný výsledek byl získán po vztažení absorbované dávky k dávce vypočítané z dávkového příkonu měřeného pomocí detektoru FH 40 (obrázek 27).



Obrázek 27 - Závislost absorbované dávky na vypočítané dávce z dávkového příkonu měřeného pomocí FH 40 [vlastní výzkum]

Po vztažení absorbované dávky osobních dozimetrů k vypočítané dávce z certifikátu radionuklidového zdroje je nejbližší ideálnímu průběhu načítání dávky osobní dozimetr SOR/R (obrázek 28). Nejhorší výsledky stále vykazuje osobní dozimetr PED Blue.

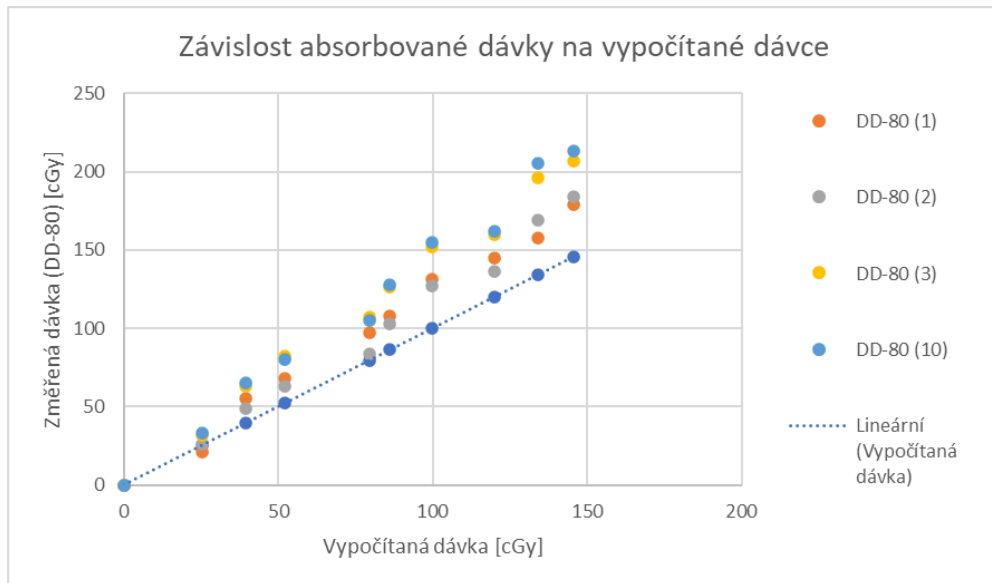




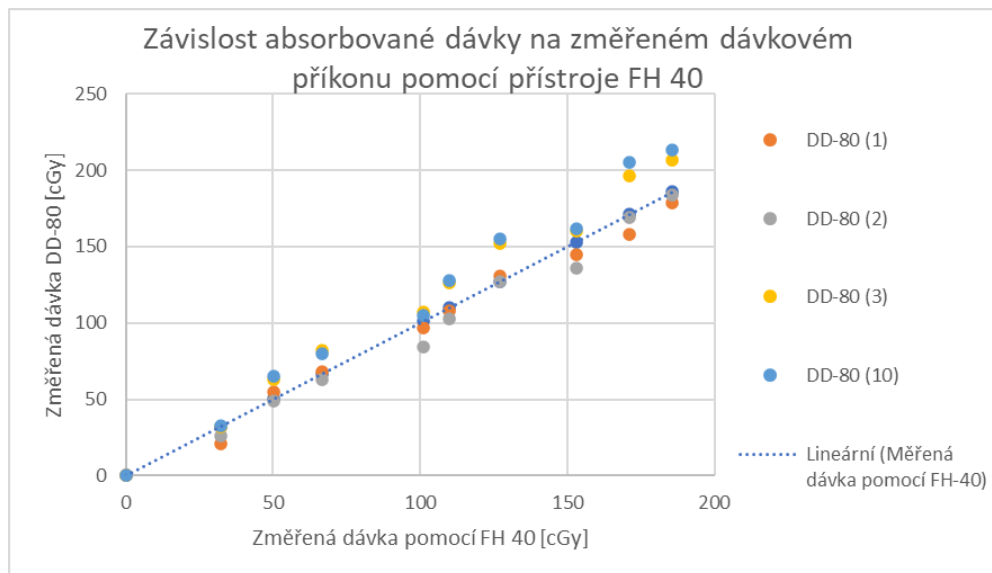
Obrázek 28 - Závislost absorbované dávky na vypočtené dávce z certifikátu radionuklidového zdroje [vlastní výzkum]

Zvláštní měření bylo věnováno ověření funkčnosti diagnostických dozimetrů DD-80. Tyto byly ozařovány od počátku jejich měřícího rozsahu (5 cGy) do překročení dvojnásobku prahové dávky pro člověka, tedy 1,5 Gy.

Ze závislosti absorbované dávky DD-80 na vypočtené dávce (Obrázek 29) je patrné, že dávka absorbovaná dozimetrou DD-80 je mírně nadhodnocena oproti vypočtené hodnotě. Velmi dobré výsledky vykazují DD-80 po vztažení jejich absorbované dávky k dávce vypočtené pomocí dávkového příkonu měřeného detektorem FH 40 (Obrázek 30). Hodnoty absorbované dávky DD-80 jen mírně oscilují okolo přímky lineární regrese dávky FH 40.



Obrázek 29 - DD-80 - závislost absorbované dávky na vypočítané dávce [vlastní výzkum]



Obrázek 30 - DD-80 - závislost absorbované dávky na dávce vypočítané z dávkového příkonu měřeného pomocí detektoru FH 40 [vlastní výzkum]

## 6 DISKUZE

Ke zhodnocení současného stavu problematiky přístrojového vybavení bezpečnostních sborů se lze propracovat pouze skrze analýzu nedávné historie České republiky. Do roku konce roku 1993 neslo za vnější i vnitřní bezpečnost v ohledu radiační ochrany a detekce ionizujícího záření odpovědnost ministerstvo obrany. V oblasti vnější bezpečnosti a ochrany vojsk se stav nezměnil, avšak oblast dřívější civilní obrany prošla značným vývojem. V roce 1993 se civilní obrana přetransformovala v civilní ochranu a docházelo postupnému zcivilnění celé oblasti. V roce 1997 přechází odpovědnost za civilní ochranu v míru, za mimořádných událostí, krizových situací a válečného stavu a státní správy na republikové úrovni na Ministerstvo vnitra ČR. S přijetím nových právních norem, zejména zákona č. 238/2000 Sb., *o Hasičském záchranném sboru České republiky a o změně některých zákonů*, zákona č. 239/2000 Sb., *o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů* a zákona č. 240/2000 Sb., *o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon)*, se stalo ministerstvo vnitra garantem civilní ochrany obyvatelstva a hlavním koordinátorem opatření ostatních rezortů v souvislosti s řešením mimořádných událostí a krizových situací.

Společně s převodem odpovědnosti za oblast, nyní již, ochrany obyvatelstva do gesce ministerstva vnitra, zejména Hasičského záchranného sboru České republiky, se přesunula i část infrastruktury, vybavení i odborného personálu, který danou problematiku řešil ve službách ministerstva obrany. Vybavení a pracovní postupy na počátku nové struktury vnitřní bezpečnosti v této oblasti byly tedy téměř totožné s vybavením vojenských protichemických jednotek, které tuto problematiku řeší. Tím ale kompatibilita mezi rezortem vnitra a obrany, co se vybavení v oblasti detekce ionizujícího záření týče, končí.

Vybavení jednotek HZS ČR je oproti přístrojovému vybavení jednotek Armády České republiky odlišné, avšak centralizované. Institut ochrany obyvatelstva při Generálním ředitelství HZS ČR, jakožto hlavní odborný garant této oblasti, je odpovědný taktéž za výběr vhodného přístrojového vybavení pro výjezdové jednotky. Tím je docíleno skutečnosti, že veškeré výjezdové jednotky, jednotky chemické služby i chemických laboratoří HZS ČR napříč územím České republiky disponují totožným přístrojovým vybavením.

V AČR je situace jiná. Mnoho jednotek je stále vybaveno zastaralým vybavením, které již mnoho let nevyhovuje. Jiné útvary se o modernizaci svého vybavení zasadily po vlastní ose. Jednotky chemického vojska byly částečně modernizovány průběžně, avšak chemické jednotky u bojových útvarů nikoliv. Z celého systému se v průběhu posledních let vytratila systematická koordinace. V současné době je v AČR zavedeno 37 různých dozimetrických detekčních prostředků, v mnohých případech však značně zastaralých. V souvislosti s rozsáhlejší modernizací průzkumných jednotek chemického vojska, která se v současné době realizuje, byly před několika lety vytipovány nevhodnější dozimetrické přístroje, kterými se budou systémově modernizovat veškeré jednotky AČR.

Pro účely této práce byly zvoleny dozimetrické přístroje, které jednotky AČR a HZS ČR používají nejvíce. Výjezdové jednotky HZS ČR disponují detektory záření RGU 100 (URAD), DC-3E-98 a osobní dozimetry SOR/R. Ekvivalentem těchto výjezdových jednotek, nechť jsou v případě chemického vojska průzkumné jednotky, které disponují detektory záření RDS 200, RadEye G-10, SVG-2, detektorem plošné kontaminace MicroCont II a nově též spektrometrickým detektorem FLIR R 400. V oblasti osobní dozimetrie využívají elektronické dozimetry RAD 60. Chemické laboratoře HZS ČR ke své činnosti využívají navíc spektrometrické scintilační detektory InInspector 1000 a RT 30,

polovodičový detektor Canberra Falcon 5000 a detektory plošné kontaminace FHT 111 Contamat a RadEye AB 100. Chemické laboratoře AČR disponují navíc multifunkčním detektorem záření RadEye B20-ER; detektory záření FH 40 a RadEye PRD-ER; spektrometrickými detektory Identifinder 2, FLIR R 500, FLIR Raider a MicroDetective a osobními dozimetry THERMO EPD MK2+.

Jednoduchý, kompaktní, spolehlivý, odolný, levný a hlavně, aby byl schopen měřit vše. Takto zní nejčastější definice ideálního dozimetrického přístroje. Je obtížné až nemožné objevit detektor, který by splňoval všechny zmíněné podmínky. Multifunkční detektory se na trhu objevují, avšak spolehlivost a citlivost u těchto přístrojů zákonitě klesá. Jedním z takových detektorů je RadEye B20-ER, který je díky plošnému Geiger-Müllerovu detektoru schopen detekovat s jistotou účinností záření alfa, beta i gama, a navíc měřit i plošnou kontaminaci. Tento typ detektoru je výbornou orientační a signalizační pomůckou, navíc není nikterak finančně nákladný.

Dalším častým požadavkem je odolnost detektoru vůči povětrnostním podmínkám, mechanickým poškozením a odolnost vůči chemikáliím. Toto je jedna ze základních podmínek modernizace detekčních přístrojů na vševojskové úrovni AČR. Takových přístrojů však na trhu nenajdeme příliš mnoho, požadovanou certifikaci odolnosti mají v současné době v podstatě jen dva detektory, jelikož její získání je nákladné. Jedná se o detektory SVG-2 a RGU 200. Ostatní detektory záření jsou běžně komerčně používané detekční prostředky fotonového záření gama.

Naprostá většina detektorů záření měří na principu Geiger-Müllerova detektoru. Jedná se o plynové elektronické detektory, které pro zachycení vstupujícího záření využívají ionizace inertního plynu v elektrickém poli o takovém napětí, aby byly sekundární ionty dostatečně urychlovány k realizaci

lavinové sekundární ionizace. Vysoké napětí, které je zapotřebí na elektrody detektoru připojit pro vytvoření ideálního detekčního prostředí, je závislé na intenzitě záření, které chceme detekovat. Nejvýznamnější rozsah energií fotonového gama záření je přibližně od 50 do 1 500 keV, tudíž pro zajištění detekce v celém rozsahu je zapotřebí vyšší napětí fokusovat na střed pole, nejčastěji na energii  $^{137}\text{Cs}$  (661,6 keV). Největší detekční účinnosti u takto nastavených detektorů záření gama by tedy mělo být dosahováno na středních energiích. Tento fakt je patrný i z výsledků měření tohoto porovnávacího experimentu. Všechny testované detektory dosahují více či méně na středních energiích fotonového záření gama nejpřesnějších detekčních účinností. Nicméně účinnost detekce fyzikálně nemůže překročit hranici 100 %, jelikož nelze zabezpečit detekci všech kvant záření procházejících detekčním prostředím natož kvant, které detektorem neprochází. Jelikož fyzikálně je detekční účinnost podílem počtu detekovaných kvant ku počtu emitovaných kvant, musí vždy nabývat hodnot 0 až 1. K přiblížení se ideální detekční účinnosti jsou proto ve vyhodnocovacích jednotkách aplikovány multiplikační algoritmy, které dopočítávají účinnost do 100 %. Směrem ke krajním mezím detekovatelného rozsahu energií se účinnost detekce snižuje, čímž dochází k mnohem větším chybám v dopočítávání výsledku detekce. Chybu také zvyšují falešné impulsy, které mohou nastávat vlivem různých okolností.

Z pohledu účinnosti detektorů záření bylo dosaženo dobrých výsledků u několika detektorů. Detektor RGU 100 (URAD) užívaný výjezdovými jednotkami HZS ČR dosahuje nejvyrovnanějších detekčních účinností v celém rozsahu a je proto nejuniverzálnějším testovaným detektorem. Velmi dobrou účinnost v celém měřícím rozsahu vykazují také RadEye G-10, částečně FH 40, následovaný detektory RDS 200 a RDS-32. Výtečných účinností dosahuje také detektor RadEye PRD-ER, avšak pouze pro střední a vysoké energie. V této oblasti se na vysoce dobré úrovni detekční účinnosti pohybuje i SVG-2, který

nízké energie detekuje obtížně pravděpodobně i kvůli svému odolnému plášti, který kvanta o této energii nemusí penetrovat. Nejhorších výsledků jednoznačně dosáhl multifunkční detektor RadEye B20-ER, který lze považovat opravdu jen za orientační a informativní prostředek.

Další významnou charakteristikou detektoru je linearita odezvy (měření) při různých úrovních intenzity záření. Z pohledu spolehlivosti není tak důležité, zda detektor ukazuje větší či menší odchylku od reálné hodnoty dávkového příkonu, jako zda je tato odchylka neměnná. Nejlepší míru linearity vykazoval mechanický, ručičkový detektor DC-3E-98, což je vcelku logické vzhledem k absenci složitější elektroniky. Z elektronických přístrojů pak RadEye G-10 nebo RGU-100.

Scintilační spektrometrické detektory se zpravidla kalibrují také na energetickou linku radionuklidu  $^{137}\text{Cs}$ , tedy na energii 661,6 keV. Kalibrační zdroj může být integrován přímo v těle detektoru, jako je tomu u detektorů firmy FLIR (Identifinder 2, R400, R500), nebo se musí kalibrovat zdroji externími (InSpector 1000, RT 30).

U přenosných elektricky chlazených polovodičových detektorů je to obdobné, kupříkladu ORTEC MicroDetective má v těle přístroje integrovaný cesiový zdroj, na který se kalibruje automaticky při každém spuštění. Lze ho však připojit k ovládacímu software a operovat s ním jako s běžným polovodičovým detektorem, vytvářet vlastní přesnější energetické i účinnostní kalibrace pro kvalitativní i kvantitativní stanovení gama kvant ve vzorku. Obdobně je tomu u detektoru Canberra Falcon 5000, který je ovládán pomocí tabletu s jednoduchým ovládacím software pro polní použití, avšak lze s ním operovat i na laboratorní úrovni.

Ruční scintilační spektrometry operují ve scintilačním režimu zpravidla do hranice 50  $\mu\text{Sv/h}$ , kdy dochází k výraznému zahlcení scintilačního krystalu a účinnost detekce vlivem vysoké mrtvé doby strmě klesá. Proto jsou tyto přístroje zpravidla vybaveny sekundárním detektorem v podobě klasické Geiger-Müllerovy trubice, které dokáží měřit do mnohem vyšších úrovní dávkového příkonu.

Obecně lze říci, že měření nízkých energií záření gama scintilačními detektory je obtížné a nepřesné, oproti tomu při středních a vysokých energiích vykazují výtečné hodnoty účinnosti detekce i linearity měření.

Nejlepších účinností a linearity měření na celém rozsahu dosáhl jednoznačně scintilační detektor RT-30, který jako jediný s poměrně vysokou účinností zvládl i nízké energie. V rozsahu středních a vysokých energií vykazoval výtečné vlastnosti také InSpector 1000. Poměrně velké odchylky měření a vysoce nadhodnocenou účinnost vykazovaly detektory Identifinder 2, R400 a R500.

Pro střední a vysoké energie vykazovaly dobré vlastnosti také všechny polovodičové detektory, jejich nevýhodou je však jejich velikost a hmotnost, proto jsou v praxi těžko využitelné. To však neplatí pro CZT detektory, v našem případě detektor Raider, který ručním scintilačním detektorům svými vlastnostmi dokáže konkurovat.

Další oblastí zájmu tohoto experimentu byly detektory plošné kontaminace, které byly podrobeny jednoduchému měření pomocí etalonů plošné aktivity. Účelem bylo zjistit účinnost detekce pro alfa a beta kontaminaci. Nejlepších výsledků měření dosahoval detektor MicroCont II, který je však náchylný na šetrnou manipulaci, a tak v polním použití značně poruchový. RadEye AB100 vykazoval sice horší výsledky, avšak je mnohem menší, snáze ovladatelný a bezporuchový. Tento detektor je v současné době používán chemickými



laboratořemi HZS i AČR, kde v obou případech nahradil nefunkční přístroje FHT 111 Contamat. Jako orientační detektor lze využít i již několikrát zmíněný multifunkční detektor RadEye B20-ER.

U spektrometrických detektorů byla testována schopnost identifikace radionuklidu i při relativně nízkých intenzitách záření gama. Polovodičové detektory byly dle očekávání schopné identifikovat všechny zvolené radionuklidy, avšak jako jediné. Konkrétně radionuklid  $^{88}\text{Y}$  nebyl identifikován žádným z ostatních detektorů, podobně jako radionuklid  $^{109}\text{Cd}$ , který kromě polovodičových detektorů identifikoval i LaBr scintilační detektor FLIR R400, který má lepší rozlišení než krystaly NaI(Tl). Detektory InInspector 1000 a RT 30 nebyly schopny identifikovat  $^{134}\text{Cs}$ , které je jedním z unikajících radionuklidů například při jaderné havárii. Není to však nedostatek detektorů ale interních knihoven, které spektrum tohoto radionuklidu neobsahují. Scintilační detektor R500 nedokázal identifikovat  $^{60}\text{Co}$ , avšak to bude nejspíš způsobeno závadou přístroje, jelikož i v průběhu ostatních měření nevykazoval normální vlastnosti.

Poslední oblastí měření byla linearita načítání absorbovaných dávek osobních dozimetrů. Pokud byla absorbovaná dávka vztažena na uplynulý čas, nejvíce lineární průběh vykazoval osobní dozimetr THERMO EPD MK2+. Stejněho výsledku bylo dosaženo při vztažení absorbované dávky k dávce vypočítané na základě měření dávkového příkonu pomocí detektoru FH 40. V obou případech nejhorší průběh vykazoval osobní dozimetr PED Blue, který hodnoty absorbované dávky výrazně nadhodnocoval. Při vztažení absorbované dávky k dávce vypočítané z certifikátu radionuklidového zdroje se k lineárnímu průběhu nejvíce přiblížil osobní dozimetr SOR/R.

Nejllepšími testovaným osobním dozimetrem jsou na základě srovnávacího měření dozimetry EPD MK2+ a SOR/R, jednoznačně nejhorší je pak dozimetr PED Blue.

## 7 ZÁVĚR

Z pohledu účinnosti detektorů záření bylo dosaženo dobrých výsledků u několika detektorů. Detektor RGU 100 (URAD) užívaný výjezdovými jednotkami HZS ČR dosahuje nejvyrovnanějších detekčních účinností v celém rozsahu a je proto nejuniverzálnějším testovaným detektorem. Velmi dobrou účinnost v celém měřicím rozsahu vykazují také RadEye G-10, částečně FH 40, následovaný detektory RDS 200 a RDS-32. Nejhorších výsledků jednoznačně dosáhl multifunkční detektor RadEye B20-ER, který lze považovat opravdu jen za orientační a informativní prostředek.

Nejlepších účinností a linearity měření na celém rozsahu dosáhl jednoznačně scintilační detektor RT-30, který jako jediný s poměrně vysokou účinností zvládl i nízké energie. V rozsahu středních a vysokých energií vykazoval výtečné vlastnosti také InInspector 1000. Poměrně velké odchylky měření a vysoce nadhodnocenou účinnost vykazovaly detektory Identifinder 2, R400 a R500.

U spektrometrických detektorů byla testována schopnost identifikace radionuklidu i při relativně nízkých intenzitách záření gama. Polovodičové detektory byly dle očekávání schopné identifikovat všechny zvolené radionuklidy, avšak jako jediné. Konkrétně radionuklid  $^{88}\text{Y}$  nebyl identifikován žádným z ostatních detektorů, podobně jako radionuklid  $^{109}\text{Cd}$ , který kromě polovodičových detektorů identifikoval i LaBr scintilační detektor FLIR R400. Detektory InInspector 1000 a RT 30 nebyly schopny identifikovat  $^{134}\text{Cs}$ , které je jedním z unikajících radionuklidů například při jaderné havárii. Není to však nedostatek detektorů ale interních knihoven, které spektrum tohoto radionuklidu neobsahují. Scintilační detektor R500 nedokázal identifikovat  $^{60}\text{Co}$ , avšak to bude nejspíš způsobeno závadou přístroje.

Nejlepších výsledků měření dosahoval detektor MicroCont II, který je však náchylný na šetrnou manipulaci, a tak v polním použití značně poruchový. RadEye AB100 vykazoval sice horší výsledky, avšak je mnohem menší, snáze ovladatelný a bezporuchový. Tento detektor je v současné době používán chemickými laboratořemi HZS i AČR, kde v obou případech nahradil nefunkční přístroje FHT 111 Contamat. Jako orientační detektor lze využít i již několikrát zmíněný multifunkční detektor RadEye B20-ER.

Nejlepšími testovaným osobním dozimetrem jsou na základě srovnávacího měření dozimetry EPD MK2+ a SOR/R, jednoznačně nejhorší je pak dozimetr PED Blue.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

HZS ČR – Hasičský záchranný sbor České republiky;

IZS – Integrovaný záchranný systém;

ČR – Česká republika;

AČR – Armáda České republiky;

CP 1 – Chicago Pile 1;

JEZ – jaderně energetické zařízení;

ICRP – International Commission of Radiological Protection;

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost;

SÚRO – Státní ústav radiační ochrany;

SÚJCHBO – Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany;

PIO – prostředky individuální ochrany;

PKO – prostředky kolektivní ochrany;

RMS – radiační monitorovací systém;

SVZ – síť včasného zjištění;

TDS – tele-dozimetrický systém;

RTG – rentgenové záření;

HPGe – High-Pure Germanium;

CZT – kadmium-zinek telurid.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *ATOM INFO.cz: Aktuálně o jádru* [online]. 2018 [cit. 2022-04-12].  
Dostupné z: <https://atominfo.cz/2018/02/technicke-opakovani-pocatky-atomoveho-veku/>
- [2] *ATOM INFO.cz: Aktuálně o jádru* [online]. České nukleární noviny: Aleš John, 2018 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z:  
<https://atominfo.cz/2018/02/technicke-opakovani-pocatky-atomoveho-veku-cast-2/>
- [3] KLENER, Vladislav. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
- [4] FREITINGER SKALICKÁ, Zuzana, Jiří HALAŠKA, Renata HAVRÁNKOVÁ et al. *Radiobiologie: Ochrana před účinky ionizujícího záření* [online]. Fakulta biomedicínského inženýrství [cit. 2022-04-12].  
Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/7-kapitola.html>
- [5] ČEZ, A. S., ÚTVAR 90E000210. *Radiační ochrana: Pro vybrané pracovníky* [online]. Brno, 2019 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z:  
[https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/skoleni/skoldohprac/z\\_oz\\_ro.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/skoleni/skoldohprac/z_oz_ro.pdf)
- [6] SÚJB: *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2022-04-25].  
Dostupné z: <https://www.sujb.cz/o-sujb/15-let-sujb/vznik-a-vyvoj-sujb>

- [7] SÚRO: *Státní ústav radiální ochrany, v.v.i.* [online]. [cit. 2022-04-25].  
Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/principy-radiacni-ochrany>
- [8] ULMANN, Vojtěch. *AstroNuklFyzika: Jaderná fyzika, ionizující záření* [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/>
- [9] LUKEŠ, Jan. *Zásah složek integrovaného záchranného systému při dopravní nehodě s výskytem zdroje ionizujícího záření*. Brno, 2010.  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Žilka.
- [10] FIŠEROVÁ, Lucie. *Charakterizace nové vyvinutých CdTe detektorů a porovnání jejich vlastností se scintilačními a polovodičovými detektory*. Vyškov, 2015. Diplomová práce. Univerzita obrany. Vedoucí práce Kpt. Ing. Jiří Janda, Ph.D.
- [11] *University of Guelph: Superallowed B Decay* [online]. [cit. 2022-05-08].  
Dostupné z: <https://www.physics.uoguelph.ca/superallowed-%CE%B2-decay>
- [12] VLK, Petr. *MOŽNOSTI VYUŽITÍ LABORATORNÍHO RTG PŘÍSTROJE PRO ANALÝZU VNÁŠENÍ PŘEDMĚTŮ DO JADERNÝCH ELEKTRÁREN*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Varmuža.

- [13] ŠTĚPÁNEK, Petr. *Polovodičové detektory ionizujícího záření*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Václav Kraus.
- [14] GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA. *Detektory ionizujícího záření*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04710-1.
- [15] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-193-4.
- [16] KNOLL, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 978-0-470-13148-0.
- [17] GERNDT, Josef. *Detektory ionizujícího záření*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01229-8.
- [18] *WikiSkripta: Ionizační komora* [online]. 2014 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Ioniza%C4%8Dn%C3%AD\\_komora](https://www.wikiskripta.eu/w/Ioniza%C4%8Dn%C3%AD_komora)
- [19] RODÁK, Martin. *Online detekce ionizujícího záření na neutronovém zdroji NG - 2*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
- [20] L'ANNUNZIATA, Michael F. *Handbook of radioactivity analysis*. 3rd ed. USA: Elsevier Inc., 2012. ISBN 978-0-12-384873-4.
- [21] LEO, William R. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,



1994 [cit. 2022-05-08]. ISBN 978-3-540-57280-0. Dostupné z:  
doi:10.1007/978-3-642-57920-2

- [22] WIKIMEDEA COMMONS: *Scintillation counter schematic* [online].  
2011 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scintillation\\_Counter\\_Schematic.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scintillation_Counter_Schematic.jpg)
- [23] OWENS, Alan. *Compound semiconductor radiation detectors*. Boca Raton: FL: Taylor p. cm, 2012. ISBN . ISBN 978-143-9873-120.
- [24] HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. 1. vyd. Brno: Konvoj, 1998. ISBN 80-85615-56-8.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1 Grafické znázornění beta přeměn [8]. .....   | 22 |
| Obrázek 2 Feynmanův diagram rozpadu beta mínus [11]. .....   | 22 |
| Obrázek 3 Princip vzniku brzdného (vlevo) a charakteristického (vpravo)<br>rentgenového záření [12]. .....                   | 24 |
| Obrázek 4 Základní schéma elektronického kontinuálního detektoru [8]. .....  | 29 |
| Obrázek 5 Základní schéma ionizačních detektorů [18]. .....  | 30 |
| Obrázek 6 Voltampérová charakteristika ionizačních detektorů [19]. .....   | 31 |
| Obrázek 7 Schéma scintilačního detektoru [22]. .....   | 34 |
| Obrázek 8 Princip polovodičového detektoru [10]. .....   | 37 |
| Obrázek 9 Graf závislosti experimentálního měření na vypočítané hodnotě<br>dávkového příkonu pro nízké energie gama. ....    | 47 |
| Obrázek 10 Linearita odezvy detektorů pro nízké energie gama. ....   | 47 |
| Obrázek 11 Graf závislosti experimentálního měření na vypočítané hodnotě<br>dávkového příkonu pro střední energie gama. .... | 50 |
| Obrázek 12 Linearita odezvy detektorů pro střední energie gama. ....   | 51 |
| Obrázek 13 Graf závislosti experimentálního měření na vypočítané hodnotě<br>dávkového příkonu pro vysoké energie gama. ....  | 54 |
| Obrázek 14 Linearita odezvy detektorů záření pro vysoké energie gama. ....   | 55 |
| Obrázek 15 Graf průměrné účinnosti detektorů záření pro nízké, střední a<br>vysoké energie gama. ....                        | 57 |
| Obrázek 16 Graf závislosti experimentálního měření na vypočítané hodnotě<br>dávkového příkonu pro nízké energie gama. ....   | 59 |
| Obrázek 17 Linearita odezvy detektorů záření pro nízké energie gama. ....  | 60 |
| Obrázek 18 Graf závislosti experimentálního měření na vypočítané hodnotě<br>dávkového příkonu pro střední energie gama. .... | 63 |
| Obrázek 19 Linearita odezvy detektorů záření pro střední energie gama. ....  | 64 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 20 Graf závislosti experimentálního měření na vypočítané hodnotě dávkového příkonu pro vysoké energie gama. ....     | 67 |
| Obrázek 21 Linearita odezvy detektorů záření pro vysoké energie gama. ....   | 67 |
| Obrázek 22 Graf průměrné účinnosti spektrometrických detektorů pro nízké, střední a vysoké energie gama. ....                | 69 |
| Obrázek 23 Graf účinnosti měření plošné kontaminace alfa. ....   | 70 |
| Obrázek 24 Graf účinnosti měření plošné kontaminace beta. ....   | 70 |
| Obrázek 25 Identifikace vybraných radionuklidů emitujících fotonové záření gama. ....  | 71 |
| Obrázek 26 Závislost absorbované dávky na čase. ....   | 72 |
| Obrázek 27 Závislost absorbované dávky na vypočítané dávce z dávkového příkonu měřeného pomocí FH 40. ....                   | 72 |
| Obrázek 28 Závislost absorbované dávky na vypočítané dávce z certifikátu radionuklidového zdroje. ....                       | 73 |
| Obrázek 29 DD-80 - závislost absorbované dávky na vypočítané dávce. ....   | 74 |
| Obrázek 30 DD-80 - závislost absorbované dávky na dávce vypočítané z dávkového příkonu měřeného pomocí detektoru FH 40. .... | 74 |

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1 Detektory záření - tabulka odchylek měření pro nízké energie gama.....               | 46 |
| Tabulka 2 Detektory záření - tabulka účinnosti detekce pro nízké energie gama.....             | 48 |
| Tabulka 3 Detektory záření - tabulka odchylek měření pro střední energie gama.....             | 49 |
| Tabulka 4 Detektory záření - tabulka účinnosti detekce pro střední energie gama.....           | 52 |
| Tabulka 5 Detektory záření - tabulka odchylek měření pro vysoké energie gama.....              | 53 |
| Tabulka 6 Detektory záření – tabulka účinnosti detekce pro vysoké energie gama.....            | 56 |
| Tabulka 7 Spektrometrické detektory - tabulka odchylek měření pro nízké energie gama.....      | 58 |
| Tabulka 8 Spektrometrické přístroje - tabulka účinnosti detekce pro nízké energie gama.....    | 61 |
| Tabulka 9 Spektrometrické detektory - tabulka odchylek měření pro střední energie gama.....    | 62 |
| Tabulka 10 Spektrometrické přístroje - tabulka účinnosti detekce pro střední energie gama..... | 65 |
| Tabulka 11 Spektrometrické detektory - tabulka odchylek měření pro vysoké energie gama.....    | 66 |
| Tabulka 12 Spektrometrické přístroje - tabulka účinnosti detekce pro vysoké energie gama.....  | 68 |
| Tabulka 13 Účinnost detektorů plošné kontaminace. ....   | 70 |