



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## **NÁVRH A OPTIMALIZACE ZAŘÍZENÍ NA CHARAKTERIZACI A RECYKLACI PLASTOVÉHO RADIOAKTIVNÍHO ODPADU**

DESIGN AND OPTIMIZATION OF DEVICE FOR CHARACTERIZATION AND RECYCLING OF PLASTIC

RADIOACTIVE WASTE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Hrbáček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.**

**BRNO 2024**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Tomáš Hrbáček

**ID:** 211453

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh a optimalizace zařízení na charakterizaci a recyklaci plastového radioaktivního odpadu

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Zpracujte přehled a množství radioaktivního odpadu produkovaného na českých jaderných elektrárnách.
- Ve spolupráci s vedoucím a konzultanty práce navrhnete zařízení na měření aktivity kontaminovaných plastových folií.
- Navrhnete hledání hot-spotů pomocí dostupných detektorů ionizujícího záření; navrhnete možnosti automatizace tohoto měření.
- Zpracujte model navrhovaného zařízení a pomocí citlivostní analýzy optimalizujte jeho parametry.
- Zjednodušený model zařízení zkonstruuje a v laboratorních podmínkách realizujete detekční část a provedte měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího a konzultantů závěrečné práce

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 20.5.2024

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Michal Kazda, MSc., MIFRE ENERGY, s.r.o., Ing. Lukáš Nesvadba

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vzniku, nakládání a monitorování radioaktivního odpadu v jaderných elektrárnách v České republice. Po druhé světové válce, s rozvojem jaderné energetiky a zbrojení, se nakládání s radioaktivními odpady stalo důležitým oborem. Hlavními zdroji odpadu jsou jaderný palivový cyklus a různé průmyslové, výzkumné a medicínské činnosti. Práce se zaměřuje na detekci gama záření na plastových fóliích, které jsou používány například jako ochrana během odstávek reaktorů. Cílem je přispět k efektivnějšímu nakládání s odpady a podpořit recyklaci materiálů v jaderných elektrárnách se spoluprací s firmou MIFRE s.r.o.

## **Klíčová slova**

Radioaktivní odpad, jaderné elektrárny, nakládání s odpady, monitorování, detekce gama záření, přístroj pro měření aktivity, faktory pohledu, modelování interakcí záření, pásový dopravník.

## **Abstract**

This thesis focuses on the generation, management and monitoring of radioactive waste in nuclear power plants in the Czech Republic. After the Second World War, with the development of nuclear power and armaments, radioactive waste management became an important field. The main sources of waste are the nuclear fuel cycle and a variety of industrial, research and medical activities. This work focuses on the detection of gamma radiation on plastic foils that are used as protection during reactor maintenance shutdowns. The objective is to contribute to more efficient waste management and to promote the recycling of materials in nuclear power plants with the collaboration with the company MIFRE s.r.o.

## **Keywords**

Radioactive waste, nuclear power plants, waste management, monitoring, gamma radiation detection, activity measurement instrument, view factors, radiation interaction modelling, conveyor system.

## **Bibliografická citace**

HRBÁČEK, Tomáš. Návrh a optimalizace zařízení na charakterizaci a recyklaci plastového radioaktivního odpadu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2024. 89 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Bc. Tomáš Hrbáček

**VUT ID studenta:** 211453

**Typ práce:** Diplomová práce

**Akademický rok:** 2023/24

**Téma závěrečné práce:** *Návrh a optimalizace zařízení na charakterizaci a recyklaci plastového radioaktivního odpadu*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

-----  
podpis autora

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Katovskému, Ph.D., za odborné vedení, podporu a trpělivost při vytváření této práce. Děkuji také Ing. Michalu Kazdovi, MSc a Ing. Františku Vágnerovi z MIFRE energy s.r.o., Ing. Lukáši Nesvadbovi, Ing. Štěpánu Foralovi, Ph.D., Ing. Tomáši Grísovi, Ph.D., Martinu Mandátovi a Michalu Řiháčkovi za poskytnutí scintilátorů, literatury, dalších podkladů a materiálů k tomuto tématu, možnost konzultací a osobních setkání za účelem diskuse o řešeném problému. Mé poděkování patří také všem respondentům, kteří mi věnovali svůj čas a umožnili nahlédnout do jejich osobních životů a zkušeností.

V Brně dne:

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD .....	12
<b>1 VZNIK A KLASIFIKACE RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ.....</b>	<b>13</b>
1.1 PŮVOD RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ .....	13
1.2 KLASIFIKACE RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ .....	14
1.3 DOPORUČENÉ KLASIFIKACE RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ .....	16
<b>2 CYKLUS NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY.....</b>	<b>19</b>
2.1 POPIS CYKLU NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍM ODPADEM.....	19
<b>3 SKLADOVÁNÍ A MNOŽSTVÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ.....</b>	<b>22</b>
3.1 INVENTÁŘ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ A VYHOŘELÉHO PALIVA .....	23
3.1.1 <i>Inventář skladovaných odpadů pro přípovrchová úložiště.....</i>	<i>23</i>
3.1.2 <i>Skladované radioaktivní odpady určené k uložení v hlubinném úložišti .....</i>	<i>24</i>
3.1.3 <i>Skladované vyhořelé jaderné palivo.....</i>	<i>25</i>
3.2 ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ .....	25
3.2.1 <i>Přípovrchové úložiště radioaktivních odpadů v Dukovanech .....</i>	<i>26</i>
3.2.2 <i>Podzemní úložiště radioaktivních odpadů Richard u Litoměřic.....</i>	<i>28</i>
3.2.3 <i>Úložiště Bratrství v Jáchymově .....</i>	<i>30</i>
3.2.4 <i>Úložiště Hostim u Berouna.....</i>	<i>31</i>
3.3 ODHAD BUDOUCÍHO MNOŽSTVÍ ODPADŮ A VYHOŘELÉHO PALIVA .....	31
3.3.1 <i>Odhad budoucího množství nízko a středněaktivních odpadů pro přípovrchová úložiště.....</i>	<i>32</i>
3.3.2 <i>Odhad budoucího množství nízko, středně a vysoce aktivních určených do hlubinného úložiště.....</i>	<i>33</i>
<b>4 ZDROJE ZÁŘENÍ .....</b>	<b>34</b>
4.1 ÚČINKY IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ .....	35
4.1.1 <i>Ionizační procesy.....</i>	<i>36</i>
<b>5 DRUHY DETEKTORŮ GAMA ZÁŘENÍ.....</b>	<b>37</b>
5.1 IONIZAČNÍ KOMORA.....	37
5.2 PROPORCIONÁLNÍ DETEKTORY .....	37
5.2.1 <i>Užití proporcionálních detektorů na zdroje rentgenového a gama záření .....</i>	<i>38</i>
5.3 GEIGER-MÜLLEROVY ČÍTAČE.....	39
5.3.1 <i>Účinnost při gama záření .....</i>	<i>40</i>
5.4 SCINTILAČNÍ DETEKTORY .....	42
5.4.1 <i>Radiační spektrometrie se scintilátory .....</i>	<i>44</i>
5.4.2 <i>Přednosti scintilačního detektoru.....</i>	<i>44</i>
5.4.3 <i>Organické scintilátory.....</i>	<i>45</i>
5.5 POLOVODIČOVÉ DETEKTORY .....	46
<b>6 FYZIKÁLNÍ A PŘÍSTROJOVÉ VLIVY PŘI DETEKCI A SPEKTROMETRII.....</b>	<b>47</b>

6.1	DETEKČNÍ ÚČINNOST A CITLIVOST .....	47
6.1.1	<i>Absolutní detekční účinnost měření</i> .....	47
6.1.2	<i>Vnitřní detekční účinnost <math>\eta</math> detektoru</i> .....	47
6.2	ČASOVÉ ROZLIŠENÍ A MRTVÁ DOBA .....	48
6.3	POZADÍ DETEKTORU .....	48
<b>7</b>	<b>NÁVRH PŘÍSTROJE</b> .....	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>ANALYTICKÁ METODA VÝPOČTU</b> .....	<b>52</b>
8.1	DEFINICE FAKTORU POHLEDU .....	52
8.2	ALGEBRA FAKTORŮ POHLEDU .....	54
8.3	METODY APLIKACE VÝPOČTŮ FAKTORŮ .....	54
8.3.1	<i>Faktory pohledu s dvojrozměrnými objekty</i> .....	54
8.3.2	<i>Faktory pohledu s uzavřením do trojúhelníku</i> .....	55
8.3.3	<i>Metoda zkrřížených strun</i> .....	56
8.3.4	<i>Metoda jednotkové koule a metoda hemicube</i> .....	56
8.4	KONFIGURAČNÍ FAKTORY PRO VÝPOČET PRÁCE S PLASTOVÝMI SCINTILÁTORY .....	58
8.5	VÝSLEDKY KONFIGURAČNÍCH FAKTORŮ Z PROGRAMU MATLAB .....	61
<b>9</b>	<b>SESTAVA A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ</b> .....	<b>63</b>
9.1	POPIS SESTAVY PRO MĚŘENÍ .....	63
9.2	ZDROJE ZÁŘENÍ A VÝPOČET AKTIVITY .....	65
9.3	POPIS MĚŘENÍ A VÝSLEDKY .....	66
9.3.1	<i>Princip detektoru 1</i> .....	67
9.3.2	<i>Princip detektoru 2</i> .....	70
9.3.3	<i>Princip detektoru 3</i> .....	77
9.3.4	<i>Vyhodnocení výsledků navržené konfigurace z laboratorního měření</i> .....	80
9.4	VÝSLEDKY SPEKTROMETRIE PLASTOVÝCH SCINTILÁTORŮ .....	81
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>83</b>
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>85</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>88</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Koncept klasifikace a ukládání radioaktivního odpadu podle MAAE [3].....	18
2	Cyklus radioaktivních odpadů [1].....	21
3	Ukládání odpadů v číslech [8].....	27
4	Ukládání odpadů v číslech [10].....	28
5	Ukládání odpadů v číslech [11].....	30
6	Maticce interakce záření [13].....	35
7	Ilustrace ionizačních procesů [12].....	36
8	Pravděpodobnost pohlcení záření v 5 cm argonu, kryptonu a xenonu při standardní teplotě a tlaku [18].....	38
9	Hlavní mechanismus, kterým jsou čítače plněné plynem citlivé na záření gama [17].....	41
10	Symbolické znázornění mechanismu vzniku scintilací v anorganických a organických látkách [16].....	43
11	Scintilační spektrum [16].....	44
12	Půdorys přístroje na měření kontaminace fólií [20].....	50
13	Alternativní konfigurace detektorů přístroje [20].....	50
14	3D návrh pomocí programu Tinkercad.....	51
15	Alternativní konfigurace pomocí programu Tinkercad.....	51
16	Geometrie pro definici faktorů pohledu [22].....	53
17	Geometrie pro faktor pohledu mezi dvěma políčky v paralelních pásech a) 3D náčrt b) pohled z profilu [22].....	54
18	Geometrie pro faktor pohledu s uzavřením do trojúhelníku [22].....	55
19	Náčrt použitý k odvození F12 v obecném případě dvou nekonečně dlouhých pásů [22].....	56
20	a) Metoda jednotkové koule a b) srovnání s metodou hemicube [22].....	57
21	Konfigurace C-13, obdélník proti obdélníku [23].....	58
22	Konfigurace C-41, disk na paralelní disk o rozdílném poloměru [23].....	60
23	Závislost F12 na rozměrech detektoru (d pro kruhový detektor, a pro čtvercový detektor).....	61
24	Závislost procentuálního zachytu záření při pohybu zdroje.....	62
25	Vypůjčené detektory z Nuvia a.s., pro laboratorní měření, vlevo válcový typ, vpravo kvádrový typ.....	63
26	Digitální analyzátor model MCB [26].....	64
27	Pásový dopravník s konstrukcí pro uchycení detektoru kvádrového typu (vlevo) a válcového typu (vpravo).....	64
28	3D konfigurace sestavy pro laboratorní měření v programu Tinkercad.....	66
29	Závislost F12 na vzdálenosti detektoru od zdroje se skutečnými rozměry.....	67
30	Závislost F12 na vzdálenosti od středu detektoru při natočení detektoru 1 v sestavě jako na obr. 28, vzdálenost od pásu 4 cm.....	68
31	Závislost F12 na vzdálenosti od středu detektoru při natočení detektoru 1 stejně jako detektor 3, vzdálenost od pásu 4 cm.....	68
32	Závislost F12 na vzdálenosti detektoru od zdroje se skutečnými rozměry.....	69
33	Měření konfigurace detektoru 2 (varianta 2).....	70
34	Zjednodušený vývojový diagram výpočtu vzdálenosti od detektoru 2 pomocí programu draw.io...	71
35	Závislost F12 na vzdálenosti detektoru (varianta 1).....	72
36	Závislost relativní chyby na vzdálenosti detektoru (varianta 1).....	73
37	Závislost F12 na vzdálenosti detektoru (varianta 2).....	74
38	Závislost relativní chyby na vzdálenosti detektoru (varianta 2).....	74
39	Závislost F12 na vzdálenosti detektoru (varianta 3).....	75

40	Závislost relativní chyby na vzdálenosti detektoru (varianta 3).....	76
41	Alternativní metoda pro určení místa kontaminace po šířce pásu .....	76
42	Měření konfigurace detektoru 3 (kvádrový typ).....	77
43	Měření konfigurace detektoru 3 (válcový typ).....	77
44	Měření konfigurace detektoru 3 (kvádrový typ).....	78
45	Měření konfigurace detektoru 3 (válcový typ).....	79
46	Scintilační spektrum <sup>241</sup> Am .....	81
47	Scintilační spektrum <sup>137</sup> Cs.....	82

## SEZNAM TABULEK

1	Členění radioaktivních odpadů podle radiačních charakteristik [1] .....	15
2	Členění radioaktivních odpadů podle fyzikálních vlastností [1] .....	15
3	Klasifikace RAO podle doporučení MAAE [3] .....	16
4	Přehled již uložených RAO [4] .....	23
5	Objem skladovaných RAO [4] .....	24
6	Aktivita limitovaných radionuklidů [9] .....	27
7	Přehled aktivit v uložených obalových souborech s RAO v ÚRAO Richard [9] .....	29
8	Přehled aktivit obalových souborů s RAO přijatých do procesu skladování [9] .....	29
9	Počty obalových souborů od jednotlivých původců [9] .....	29
10	Přehled aktivit uložených RAO v ÚRAO Bratrství [9] .....	30
11	Bilance nízko a středně aktivních upravených odpadů splňujících podmínky přijatelnosti do přípovrchových úložišť (konzervativní odpad) [4] .....	32
12	Bilance odpadů nepřijatelných do přípovrchových úložišť [4] .....	33
13	Tabulka hodnot pro výpočet aktivity ke dni 30. 04. 2024 .....	65

# ÚVOD

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku vzniku radioaktivního odpadu, jeho nakládání a monitorování, zejména v kontextu jaderných elektráren v České republice.

Nakládání s radioaktivními odpady je relativně novým oborem, který nabyl na významu po druhé světové válce. Ionizující záření se začalo široce využívat nejen pro vojenské, ale také pro energetické, výzkumné a medicínské účely. Tyto činnosti vedou ke vzniku materiálů kontaminovaných radioaktivními látkami, které je nutné bezpečně zneškodnit.

Systematické základy pro nakládání s radioaktivními odpady byly formulovány na První mezinárodní konferenci o mírovém využívání jaderné energie v Ženevě v roce 1955. Od té doby se principy a postupy soustavně zdokonalují. Radioaktivní odpady vznikají především v rámci jaderného palivového cyklu, který zahrnuje těžbu a zpracování radioaktivních surovin, obohacování, výrobu paliva, provoz jaderných elektráren, přepracování paliva a vyřazování jaderných zařízení. Tyto odpady tvoří většinu radioaktivního odpadu. Dalšími zdroji jsou odpady z průmyslu, výzkumu, zemědělství a zdravotnictví. [1]

Odpady jsou klasifikovány podle fyzikálních a chemických vlastností, místa vzniku a radiačních charakteristik. Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) rozlišuje odpady potenciálně uváděné do životního prostředí, nízko a středně aktivní odpady a vysoce aktivní odpady. Každá kategorie má doporučený typ úložiště, například přípovrchové úložiště pro nízko a středně aktivní odpady a hlubinné úložiště pro vysoce aktivní odpady.

V České republice se skladování a zneškodňování radioaktivních odpadů realizuje v několika specializovaných úložištích. Přípovrchové úložiště Dukovany slouží pro odpady z jaderných elektráren a institucionální odpady. Podzemní úložiště Richard u Litoměřic přijímá odpady z průmyslu, výzkumu a zdravotnictví. Úložiště Bratrství v Jáchymově je určeno pro odpady s přírodními radionuklidy.

Tato práce se zaměřuje na problematiku detekce a spektrometrie ionizujícího záření, konkrétně na návrh a ověření přístroje pro detekci gama záření na plastových fóliích používaných v jaderných elektrárnách. Návrh byl sestaven ve spolupráci s konzultanty MIFRE energy s.r.o. a odborníky z oboru detekce a měření radiace. Plastové fólie se v jaderných elektrárnách používají především během odstávek reaktorů, kdy slouží jako ochranné vrstvy proti kontaminaci. Po použití však bývají často kontaminovány radioaktivními látkami a klasifikovány jako radioaktivní odpad, což představuje významný problém z hlediska množství generovaného odpadu a nákladů na jeho zneškodnění. Cílem této práce je přispět k efektivnějšímu nakládání s radioaktivními odpady v jaderných elektrárnách a podpořit udržitelné a ekonomicky výhodné postupy recyklace materiálů.

# 1 VZNIK A KLASIFIKACE RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ

Od druhé světové války, kdy se začalo s intenzivním rozvojem jaderného zbrojení a energetiky, se nakládání s radioaktivními odpady stalo důležitým a rychle se rozvíjícím oborem. Radionuklidy produkované ve výzkumných reaktorech a urychlovačích se využívají v medicíně, výzkumu, zemědělství a průmyslu. Tyto činnosti vedou ke vzniku materiálů kontaminovaných radioaktivními látkami, které je nutné bezpečně zneškodňovat. Systematické základy byly formulovány v roce 1955 na konferenci v Ženevě a od té doby se postupy neustále zdokonalují. [1]

Úvodní část kapitoly představí původ radioaktivních odpadů, následně bude popsána možná klasifikace radioaktivních odpadů. Poté bude uvedena doporučená klasifikace podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii a také upravená klasifikace, kterou se řídí Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO).

## 1.1 Původ radioaktivních odpadů

Mezi původce patří jaderné elektrárny, výzkumné a školní reaktory i pracoviště se zdroji ionizujícího záření ve zdravotnictví, výzkumu a průmyslu.

Radioaktivní odpad vzniká z mnoha činností, přičemž jedním z hlavních zdrojů je jaderný palivový cyklus. Tento odpad zahrnuje materiály z těžby a zpracování radioaktivních surovin, obohacování, výrobu jaderného paliva, provoz jaderných elektráren, přepracování paliva a vyřazování jaderných zařízení. Tyto odpady tvoří až devadesát procent celkového množství radioaktivního odpadu.

Dalšími zdroji jsou institucionální odpady z průmyslu, výzkumu, zemědělství a zdravotnictví, které mohou obsahovat přírodní nebo uměle vytvořené radionuklidy. Tyto odpady jsou ukládány do specifických úložišť podle jejich složení; například odpady s přírodními radionuklidy do úložiště Bratrství u Jáchymova a ostatní do úložiště Richard u Litoměřic. Jaderné elektrárny produkují provozní odpady, jako jsou kontaminované kapaliny a ochranné pomůcky, které jsou ukládány v úložišti Dukovany. Kromě toho se připravuje hlubinné úložiště pro dlouhodobé ukládání středně a vysokoaktivních odpadů. [2]

Významným, avšak omezeným zdrojem radioaktivního odpadu jsou také odpady z výroby jaderných zbraní, které produkuje jen několik zemí, přičemž podrobnosti o těchto odpadech jsou často utajované. [2]

V následujícím seznamu je stručný popis hlavních činností, při nichž vznikají radioaktivní odpady:

- Odpad z těžby a zpracování nerostů obsahující zvýšené hladiny přírodních radionuklidů,
- odpad z produkce jaderné energie,
- odpad z institucionálních činností,
- odpad z výroby jaderných zbraní,
- odpad z výrobních procesů z průmyslu. [3]

## **1.2 Klasifikace radioaktivních odpadů**

V literatuře je možné se setkat s několika způsoby, jak se klasifikují radioaktivní odpady. Stručně lze jejich členění uvést podle fyzikálních vlastností na odpady pevné, kapalné, plynné nebo na odpady lisovatelné a nelisovatelné apod. Podle chemických vlastností se dělí na odpady organické a anorganické, podléhající korozi nebo například na kyselé a neutrální. Odpady lze také klasifikovat podle jejich místa vzniku na odpady institucionální, což jsou odpady, které vznikají ve výzkumných střediscích při průmyslových a medicínských aplikacích. Jiným místem vzniku je jaderný palivový cyklus, který je co do množství a aktivity podstatně významnější. Sem patří odpady z těžby a zpracování radioaktivních surovin, z obohacování a výroby jaderného paliva, reaktorové odpady, odpady z přepracování vyhořelého paliva a konečně odpady z vyřazování jaderných zařízení. V zemích, které radioaktivní odpady produkují, tvoří tyto odpady devadesát a více procent z celkového množství odpadu. Některé ze způsobů členění jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2. [1]

Tabulka 1 Členění radioaktivních odpadů podle radiačních charakteristik [1]

CHARAKTERISTIKA	ČLENĚNÍ NA ODPADY
doba životnosti radionuklidů	přechodně radioaktivní s poločasem rozpadu menším než 1 rok, krátkodobé s poločasem rozpadu od 1 do 30 let a dlouhodobé s poločasem rozpadu nad 30 let
obsah radionuklidů	nízko, středně a vysoce aktivní (orientační hranice jsou pro nízko aktivní odpady pod $10^9$ Bq/m <sup>3</sup> , pro středně aktivní $10^9 - 10^{14}$ Bq/m <sup>3</sup> a vysoce aktivní nad $10^{14}$ Bq/m <sup>3</sup> )
typ emitovaného záření	obsahující radionuklidy vyzařující alfa, což jsou většinou přírodní radionuklidy, beta a gama-aktivní s obsahem umělých radionuklidů
tepelný výkon	s významnou nebo nevýznamnou produkcí tepla (hranice mezi středně a vysoce aktivními odpady se doporučuje hodnota tepelného výkonu 2kW /m <sup>3</sup> )
Kritičnost	s obsahem štěpitelných materiálů
povrchové kontaminace radioaktivních odpadů	na silně, středně a slabě kontaminované odpady, resp. bez povrchové kontaminace
dávkové faktory relevantních radionuklidů	s nízkými či vysokými dávkovými faktory, což hraje roli při hodnocení bezpečnosti úložných systémů a jejich vlivu na člověka a životní prostředí

Tabulka 2 Členění radioaktivních odpadů podle fyzikálních vlastností [1]

CHARAKTERISTIKA	ČLENĚNÍ NA ODPADY
skupenství	pevné, kapalné a plynné
velikost a hmotnost	o malých, středních nebo velkých rozměrech a hmotnostech
lisovatelnost	lisovatelné a nelisovatelné
těkavost	těkavé, méně těkavé, netěkavé
hořlavost	spalitelné a nespalitelné
rozpustnost a mísitelnost	rozpustné a nerozpustné, resp. mísitelné a nemísitelné

Z uvedeného přehledu je zřejmé, že ve všech případech se spíše jedná o uznávanou kvalitativní charakteristiku než o přesné číselné vymezení. Bylo sice provedeno několik pokusů o stanovení konkrétních hranic, všechny však narazily na tzv. „hraniční efekt“. Těžko se dalo odůvodnit, proč určitá hodnota těsně nad stanoveným limitem má jiné dopady než hodnota těsně pod ním. [1]

Příkladem mohou být limity měrné aktivity pro přijetí radioaktivních odpadů do úložiště. Maximální hodnota přípustná pro jednotlivou obalovou jednotku zpravidla může být vyšší než povolený průměrný obsah radionuklidů v celém úložišti. [1]

### 1.3 Doporučené klasifikace radioaktivních odpadů

Klasifikací radioaktivních odpadů se zabývala Mezinárodní agentura pro atomovou energii již od šedesátých let a publikovala několik dokumentů. V současnosti je také platná kategorizace radioaktivních materiálů, která je uvedena v tabulce 3. V tabulce se přiřazuje nejvhodnější způsob uložení. [3]

Tabulka 3 Klasifikace RAO podle doporučení MAAE [3]

KATEGORIE	CHARAKTERISTIKA	DOPORUČENÝ TYP ÚLOŽIŠTĚ
1. odpady potenciálně uváděné do životního prostředí	roční dávka připadající na vrub ozáření jednoho obyvatele z obyvatelstva musí být nižší nebo rovna efektivní dávce 0.01 mSv	žádné omezení
2. nízko a středně aktivní odpad	aktivita radionuklidů je natolik nízká, že při jejich ukládání není nutno brát v úvahu vznik rozpadového tepla	přípovrchové
2a. nízko a středně aktivní odpady krátkodobé	obsahují radionuklidy o poločasu přeměny menším než 30 let a měrná aktivita dlouhodobých radionuklidů nepřesahuje 4000 Bq/g v jednotlivé obalové jednotce, resp. 400 Bq/g jako průměr pro celé úložiště	přípovrchové
2b. nízko a středně aktivní odpady dlouhodobé	měrná aktivita dlouhodobých radionuklidů přesahuje limity uvedené v 2a	hlubinné
vysoce aktivní odpad	aktivita radionuklidů je tak vysoká, že při jejich ukládání je třeba brát v úvahu vznik přeměnového tepla. Hranicí je hodnota tepelného výkonu $2\text{kW/m}^3$	hlubinné



Nejnovější dokument Mezinárodní atomové agentury zachovává principy dřívějších schémat a současně vnáší některé modifikace, neboť výstavba, provoz a hodnocení bezpečnosti úložišť doznaly určitých změn. Výsledným rozdělením je šest tříd, které jsou užívány jako základní schéma pro klasifikaci radioaktivního odpadu. Podrobnější stanovení mezních podmínek se ponechává na odpovědných orgánech.

Klasifikace radioaktivního odpadu:

- odpady, splňující kritérium pro uvolnění do prostředí – Exempt waste (EW),
- velmi krátkodobé odpady – Very short lived waste (VSLW),
- velmi nízko aktivní odpady – Very low level waste (VLLW),
- nízko aktivní odpady – Low level waste (LLW),
- středně aktivní odpady – Intermediate level waste (ILW),
- vysoce aktivní odpady – High level waste. (HLW) [1] [2]

Konceptuální ilustrace klasifikace radioaktivního odpadu je zobrazena na obrázku 1. Vertikální osa reprezentuje aktivitu odpadu (rozumí se tím koncentrace aktivity v odpadu, aktivitu konkrétního radionuklidu a celkovou aktivitu) a horizontální osa reprezentuje poločas rozpadu radionuklidu obsaženého v odpadu. Úroveň aktivity odpadu se na vertikální ose pohybuje od zanedbatelně nízké až po aktivitu velmi vysokou. Čím vyšší aktivita je, tím vyšší je potřeba izolovat odpad od životního prostředí. Poločas radionuklidu na horizontální ose začíná na velmi krátkém rozpadu, několik vteřin, až po milióny let. V terminologii bezpečnosti radioaktivního odpadu se rozumí jako krátkodobý odpad takový odpad, který obsahuje radionuklid s poločasem rozpadu menším než 30 let. Tato kategorizace je výhodná z toho důvodu, že po dobu několika málo stovek let se radiační riziko výrazně snižuje díky krátkému poločasu rozpadu. [3]

Podobnou klasifikací se řídí také Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), která je řízena Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR. Ta rozděluje radioaktivní odpad podle aktivity na: [2]

- Přechodně aktivní odpady,
- velmi nízkoaktivní odpady,
- nízkoaktivní odpady
- středněaktivní odpady
- vysokoaktivní odpady.

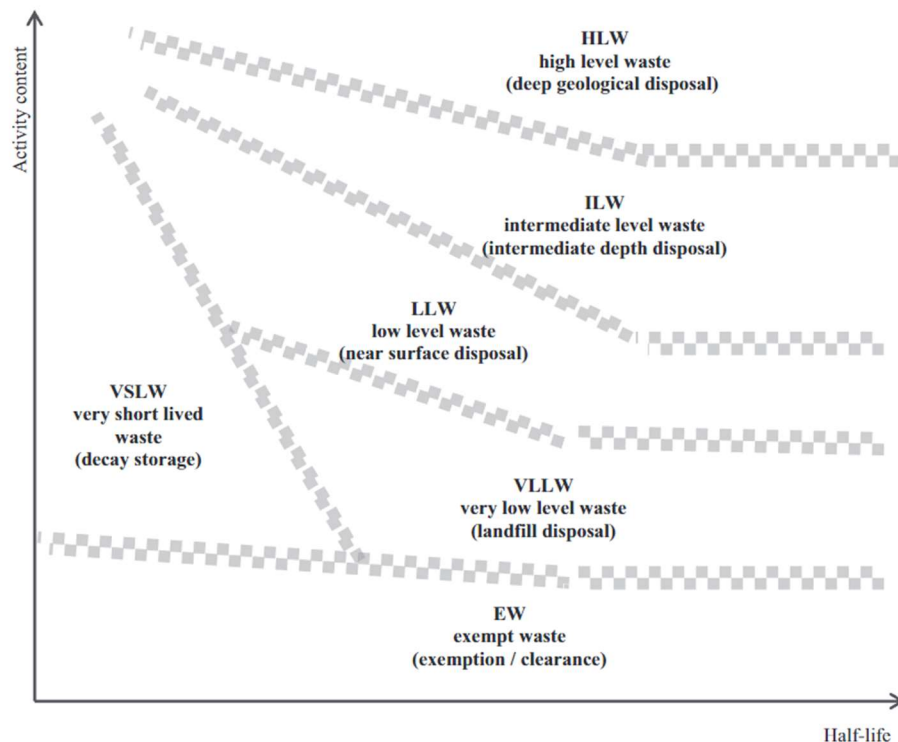
U přechodně aktivních odpadů po maximálně 5 letech skladování v tzv. vymíracích komorách jejich aktivita klesne na úroveň okolního prostředí, takže mohou být nakládány jako komunální odpad. Patří sem odpady z nemocnic, jako jsou pleny nebo buničina, vznikající při aplikaci radiofarmak nebo radiodiagnostických metod, a některé

energetické odpady, například ochranné pomůcky. Nízkoaktivní odpady mají vyšší aktivitu než přechodné odpady, ale nevyžadují speciální opatření při uložení.

Středněaktivní odpady obsahují významné množství dlouhodobých radionuklidů, a proto vyžadují vyšší stupeň izolace než nízkoaktivní odpady a mohou být ukládány pouze do podzemních úložišť. Vysokoaktivní odpady obsahují velké množství radionuklidů, které generují zbytkové teplo. Tyto odpady budou společně s vyhořelým jaderným palivem ukládány v hlubinném úložišti. Nízkoaktivní a středněaktivní odpady tvoří většinu radioaktivních odpadů v České republice, přičemž radionuklidy v nich obsažené mají poločasy rozpadu v řádech desítek až stovek let. [2]

Dále je radioaktivní odpad dělen podle izolace na: [2]

- Krátkodobé odpady:
  - radionuklidy s nižším poločasem rozpadu, například tritium ( $^3\text{H}$ ) s poločasem 12 let nebo cesium-137 s poločasem 30 let.
- Dlouhodobé odpady:
  - obsahují radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, například uran-238 s poločasem 4,5 miliardy let.



Obrázek 1 Koncept klasifikace a ukládání radioaktivního odpadu podle MAAE [3]

## 2 CYKLUS NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY

### 2.1 Popis cyklu nakládání s radioaktivním odpadem

Radioaktivní odpady procházejí během své existence několika fázemi. Po vzniku odpadu, o kterém byla zmínka v předešlé kapitole, nastává fáze shromažďování a třídění, což jsou procesy, během nichž se provádí charakterizace odpadů, rozčlenění do příslušných skupin a umístění na místa, kde se odpady dočasně skladují, než jsou postoupeny ke zpracování. Stranou se přitom shromažďují odpady, které je možné recyklovat. Při charakterizaci se bere v úvahu jejich vzhled a forma, avšak hlavně radioaktivita neboli příkon efektivní dávky na povrchu pevného nebo nádoby kapalného odpadu. Hodnota uvolnění odpadu do životního prostředí je charakterizována jako roční dávka připadající na vrub ozáření jednoho obyvatele z obyvatelstva, která musí být nižší nebo rovna efektivní dávce 0,01 mSv. Tato charakteristika je také uvedena v tabulce 3 v předešlé kapitole.

Následují fáze zpracování a úpravy odpadu do formy vhodné pro konečné uložení. Výsledný produkt se před uložením obvykle umísťuje do skladu, kde čeká na přepravu do úložiště. Pokud se v odpadech prokáže přítomnost krátkodobých radionuklidů, lze je umístit do tzv. vymíracích skladů, kde přetrvávají do doby, kdy jejich aktivita klesne pod uvolňovací mez a mohou se vypustit do životního prostředí.

Zpracování RAO zahrnuje procesy, které mají za úkol snížení objemu zpracovávaného odpadu. Kapalné odpady se podrobují odpařování, čištění na iontoměničích nebo chemické úpravě založené na spolusrážení a zachytu některých radionuklidů podle chemického složení odpadů. Postupy zpracování pevných odpadů lze podle principu používaných metod rozdělit na mechanické (lisování, fragmentace), termické (spalování, tavení, termický rozklad), chemické a biologické. Plynné odpady zpravidla obsahují nízké aktivity radionuklidů, což umožňuje jejich kontrolované vypouštění do atmosféry. Exhaláty obsahují vedle radioaktivních plynů také aerosoly, které se zachytávají ve filtračních zařízeních a je s nimi zacházeno jako s pevným či kapalným odpadem, pokud se filtry vypírají. Plyny vznikající ve velkém množství se ukládají do tlakových lahví a skladují se do rozpadu příslušného izotopu.

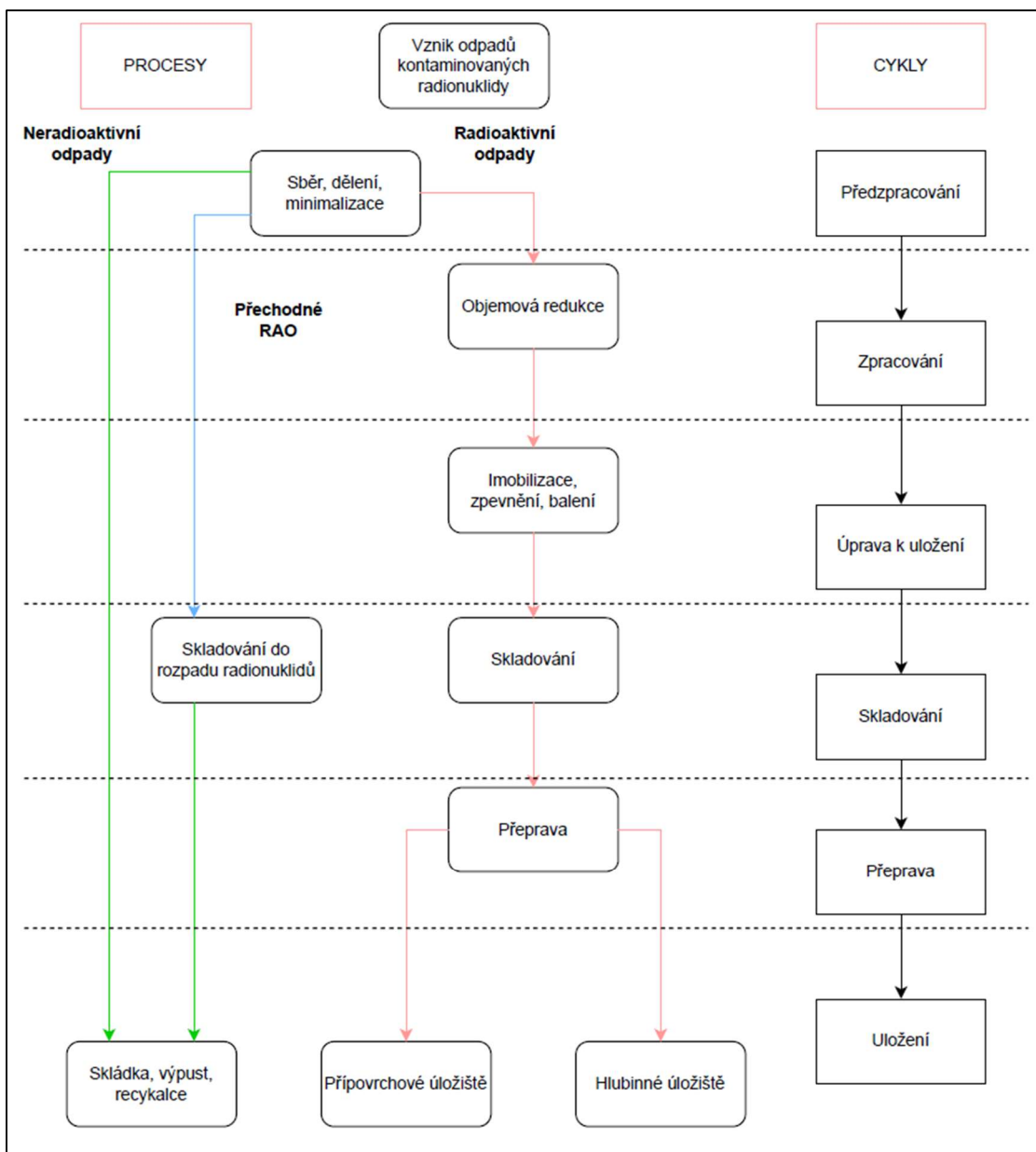
Cílem další úpravy odpadů je stabilizovat zpracované odpady a převádět je do formy vhodné pro přepravu, skladování a popřípadě konečné uložení. Toto se týká především koncentrátů z výparek, vysycených iontoměničů, vzduchotechnických filtrů a celé řady pevných odpadů. Jako technologie se používají cementace a bitumentace, což je zpevnění odpadu ztužidlem. Součástí úpravy je balení upravených odpadů do vhodných obalových materiálů. Pro nízko a středně aktivní odpad se k tomuto účelu používají sudy o objemu 200 litrů, u pevných odpadů větších rozměrů se používají betonové obalové soubory. [1]

Následuje přeprava a umístění zpevněného odpadu do skladu, kde se krátkodobý odpad ponechává po dobu potřebnou pro uvolnění do životního prostředí. Ostatní odpady se připravují ke konečnému uložení. Existují však odpady, které nesplňují podmínky přijatelnosti do provozovaných úložišť a bude je třeba umístit do hlubinného úložiště, které má být zprovozněno až ve druhé polovině tohoto století. V České republice se to týká některých vysoce aktivních odpadů, odpadů s dlouhodobými radionuklidy, použitých radionuklidových zářičů a především vyhořelého jaderného paliva. V dnešní době předchází konečnému uložení těchto materiálů dlouhodobé skladování. Kvůli získání času a potřebných finančních prostředků zajistí také například padesátileté skladování snížení celkové radioaktivity vyhořelého paliva o 75 % a pokles tepelného výkonu o 80 %. [1]

Odpady nepřijatelné do přípovrchových úložišť se nyní skladují u původců či v úložišti Richard. [4]

Vyhořelé jaderné palivo se vkládá do hermeticky uzavřených obalových souborů, v nich se poté umísťují do skladů nebo úložiště.

Poslední fází životního cyklu je institucionální dohled nad úložištěm. Je to období po jeho uzavření, kdy se nejprve provádí aktivní a později pasivní dohled. Toto období je ukončeno uvolněním lokality úložiště k neomezenému využití. Například u povrchových úložišť se jedná o období 300-500 let, u hlubinných pouze po dobu, než budou odstraněny všechny povrchové stavby, tj. několik desítek let. Na obrázku 2 je znázorněn životní cyklus radioaktivních odpadů a návaznosti mezi jednotlivými fázemi. [1]



Obrázek 2 Cyklus radioaktivních odpadů [1]

### 3 SKLADOVÁNÍ A MNOŽSTVÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ

Skladované odpady lze dělit na radioaktivní odpady, které mohou být uloženy do stávajících přípovrchových úložišť, a na odpady, které budou muset být uloženy do připraveného úložiště hlubinného. Odpady skladované v jaderných elektrárnách v nádržích koncentrátu, nádržích vysycených ionexů a skladech pevných odpadů jsou průběžně zpracovány a upravovány do formy vhodné k uložení a předávány na ÚRAO Dukovany. Institucionální odpady jsou skladovány převážně v ÚJV Řež, a. s. Jedná se o odpad pocházející ze starých ekologických zátěží, o RAO vznikající při činnostech v rámci ÚJV Řež a o odpady, které jsou přijímány od jiných původců RAO a průběžně zpracovávány. Skladované odpady jsou průběžně zpracovávány a upravovány do formy vhodné k uložení, množství skladovaných odpadů se tedy každoročně mění. [4]

Pro skladování musí být především splněny tyto požadavky:

- Je třeba uchování integrity při všech běžných operacích, jež ve skladu probíhají.
- Radiační bezpečnost personálu musí vyhovovat předpisům.
- Odpady musí být ve skladu rozmístěny tak, aby je bylo možné vyjmout pro další manipulace.
- Skladované odpady musí být umístěny ve vhodných obalech pro snadnou dekontaminaci, rovněž povrchy úložiště musí být snadno omyvatelné.
- V případě skladování hořlavých odpadů je nutno vybavit sklad požárními hlásiči i hasicími přístroji.
- Je nutné věnovat pozornost konstrukčním materiálům, jejichž minimální životnost by měla překračovat plánovanou dobu skladování.
- Skladované odpady jsou na povrchu obalu jednoznačně označeny.
- Kapalné odpady musí být skladovány tak, aby při případném úniku bylo možno zachytit odpad kvantitativně a bez kontaminace okolního životního prostředí. [1]

### 3.1 Inventář radioaktivních odpadů a vyhořelého paliva

Radioaktivní odpady pocházející z energetiky a z využití zdrojů ionizujícího záření (institucionální odpady) jsou v ČR (dříve ČSR) ukládány již od roku 1959. Tyto radioaktivní odpady jsou evidovány u původců, zpracovatelů či v SÚRAO a jsou pravidelně publikovány informace o jejich množství, které je určeno ke skladování a k uložení. Jak už bylo zmíněno skladované odpady lze rozdělit na odpady, které mohou být uloženy do existujících přípovrchových úložišť, a na odpady, které budou muset být uloženy do připravovaného hlubinného úložiště. [4]

#### 3.1.1 Inventář skladovaných odpadů pro přípovrchová úložiště

V následující tabulce je přehled již uložených radioaktivních odpadů, které mají převážně charakter nízko a středně aktivních odpadů.

Tabulka 4 Přehled již uložených RAO [4]

Úložiště	Objem úložných prostor [m <sup>3</sup> ]	Objem uložených RAO [m <sup>3</sup> ]	Zaplněný objem [m <sup>3</sup> ]	Využitelná kapacita pro RAO [m <sup>3</sup> ]	Celkový volný objem [m <sup>3</sup> ]	Zaplněný objem [%]
Dukovany	55000	7639	11514	28991	43486	20,9
Richard	10249	2962	7405	1137	2844	72,3
Bratrství	1200	371	927	102	273	77,3
Hostim	1690	320	1690	uzavřeno	uzavřeno	

V tabulce 5 je uveden celkový objem radioaktivních odpadů (RAO) skladovaných v jaderných elektrárnách. Tyto odpady jsou uchovávány v nádržích koncentrátu, nádržích s vysycenými ionexy a ve skladech pevných odpadů. Průběžně se tyto odpady zpracovávají a upravují do podoby vhodné k uložení a následně se předávají na úložiště radioaktivních odpadů (ÚRAO) Dukovany. Kapalné odpady se zpevňují do bitumenové nebo aluminosilikátové matrice. Pro úpravu pevných odpadů se používá hlavně technologie nízkotlakého lisování, ale využívají se i zahraniční technologie vysokotlakého lisování, tavení kovů a spalování.

Institucionální odpady jsou skladovány převážně v ÚJV Řež, a. s. Tyto odpady pocházejí ze starých ekologických zátěží, z činností prováděných v rámci ÚJV Řež, a. s., a od jiných původců RAO. Průběžně se zpracovávají a upravují do formy vhodné k uložení, takže množství skladovaných RAO se každoročně mění. [4]

Tabulka 5 Objem skladovaných RAO [4]

Provozní odpady	Odpady JE	Institucionální odpady
Kapalné provozní odpady (koncentrát) – kapalné	1327,5 m <sup>3</sup>	404,1 m <sup>3</sup>
Iontoměniče a kaly – iontoměniče	111,3 m <sup>3</sup>	
Pevné provozní odpady – pevné	304 t	

### 3.1.2 Skladované radioaktivní odpady určené k uložení v hlubinném úložišti

Při provozu jaderných zařízení vzniká poměrně malé množství aktivovaných materiálů, jako jsou například měřicí čidla, termočlánky, vložené tyče, kazety svědčících vzorků a absorbatory. V současné době je tato odpadní materiál skladován na obou elektrárnách, kde se nachází přibližně 40 tun odpadu tohoto typu. Jeho zneškodnění bude probíhat současně s vyřazováním jaderné elektrárny. Předpokládá se, že určitá část bude třeba uložit do hlubinného úložiště.

Institucionální odpady určené k uložení do hlubinného úložiště jsou zpravidla uzavřené zářiče. Nyní jsou tyto zářiče skladovány v úložišti Richard nebo u jejich původců. Ve skladu se jedná většinou o drobné a jednoduché zářiče typu vyřazených hlásičů požáru s <sup>241</sup>Am. Některé zářiče jsou významnými zdroji ionizujícího záření (vysokoaktivní zářiče), ale větší množství zářičů je skladováno u jejich původců. [4]

Celkově bylo ke konci roku 2016 evidováno 5756 uzavřených, samostatných nebo instalovaných v zařízeních radionuklidových zářičů, z toho 3161 bylo aktivně používáno, 1164 bylo v pracovních skladech a 1431 bylo skladováno před zneškodněním. Další odpad, což se týká přibližně 205 sudů, je nyní skladován v úložišti Richard. [5]



### 3.1.3 Skladované vyhořelé jaderné palivo

Vyhořelé jaderné palivo z jaderných elektráren je v současnosti skladováno v bazénech vyhořelého paliva hlavních výrobních bloků. Dále je uloženo v takzvaném suchém meziskladu vyhořelého paliva ve speciálních přepravních a skladovacích obalových souborech v areálech obou jaderných elektráren. Podle typu vyhořelého jaderného paliva jsou pro skladování použity obalové soubory typu CASTOR 440/84, CASTOR 440/84M, ŠKODA 440/84, CASTOR 1000/19 a ŠKODA 1000/19M.

K datu 31. 12. 2022 bylo v areálu jaderné elektrárny Dukovany skladováno v suchém meziskladu vyhořelého paliva 60 obalových souborů typu CASTOR 440/84 obsahujících 5040 palivových souborů. Jeho kapacita je dlouhodobě plně vytížena a na základě rozhodnutí z roku 2020 je provoz povolen na dobu neurčitou. Ve druhém suchém skladu vyhořelého paliva v areálu Dukovany bylo ke stejnému datu skladováno 52 obalových souborů typu CASTOR 440/84M a dva obalové soubory typu ŠKODA 440/84, které obsahovaly 4536 palivových souborů.

V jaderné elektrárně Temelín bylo v SVJP skladováno 48 obalových souborů typu CASTOR 1000/19 obsahujících 912 palivových souborů a sedm obalových souborů typu ŠKODA 1000/19M obsahujících 133 palivových souborů.

Sklad vysoce aktivního odpadu v areálu Ústavu jaderného výzkumu v Řeži může být využíván pro mokré i suché skladování vysoce aktivního odpadu vzniklého při provozu výzkumných reaktorů VVR-S a LVR-15. Ke dni 31. 12. 2022 bylo ve skladu skladováno 72 palivových souborů v jednom obalovém souboru typu ŠKODA VPVR/M. Mokřým způsobem nebylo skladováno žádné palivo. [5]

## 3.2 Úložiště radioaktivních odpadů

Doba potřebná k izolaci odpadů od člověka se může lišit podle typu odpadu. Podle klasifikace radioaktivních odpadů je třeba rozlišovat krátkodobé, nízko a středně aktivní odpady, které lze ukládat do přípovrchových úložišť, dlouhodobé odpady s alfa zářiči, patřící do podzemních úložišť ve středních hloubkách, a vysoce aktivní odpady, pro něž je nutné zřídit hlubinná, geologická úložiště.

V České republice jsou v provozu tři úložiště nízko a středně aktivních odpadů. Úložiště Richard se nachází v bývalém vápencovém dole Richard II u Litoměřic, Bratrství ve stejnojmenném uranovém dole u Jáchymova a úložiště Dukovany v areálu jaderné elektrárny. V Česku se nachází i jedno již uzavřené úložiště nedaleko Berouna s názvem Hostim. [1]

### 3.2.1 Přípovrchové úložiště radioaktivních odpadů v Dukovanech

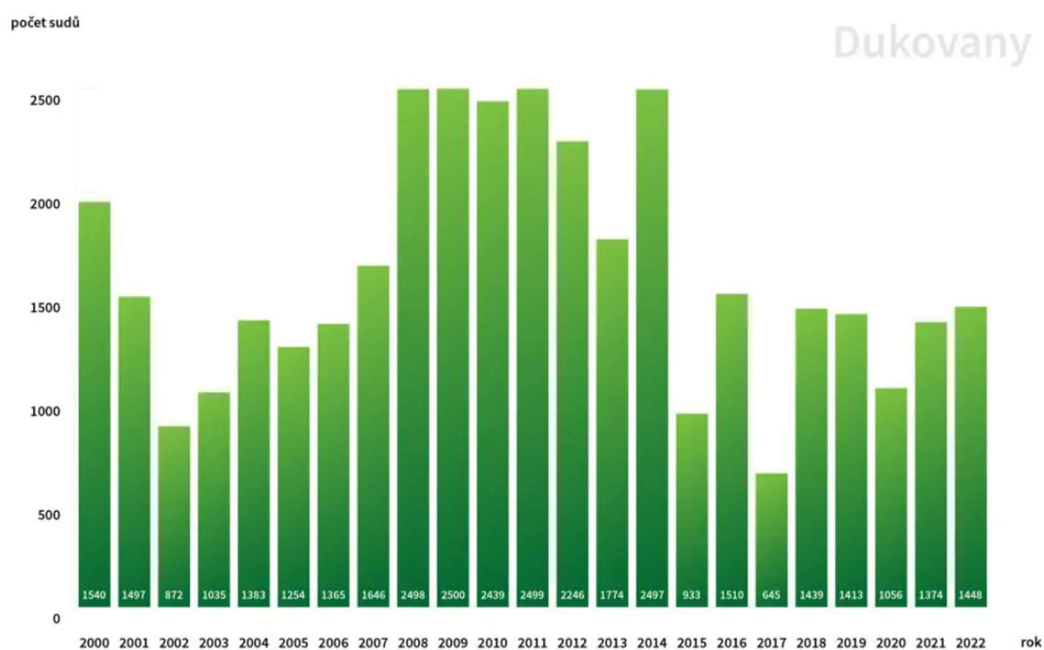
Úložiště Dukovany zabírá plochu 1,3 hektaru a sestává ze dvou dvouřadů železobetonových jímek vybudovaných na zpevněné ploše na povrchu země a izolovaných asfaltopropylénovým mikrobetonem. Pod každým dvouřadem je zdvojený drenážní systém odvádějící jednak případné úniky z jímek, jednak prosakující srážkovou vodu do nádrží, odkud jsou po kontrole buď vypouštěny, anebo v případě kontaminace odesílány ke zpracování jako druhotné radioaktivní odpady. [1]

Toto úložiště bylo vybudováno pro zneškodnění výhradně nízko a středně aktivních odpadů z jaderných elektráren Dukovany a Temelín. Od roku 2005 je možné ukládat i institucionální odpady zpracované v ÚJV Řež. [6] [7]

Ročně jsou do tohoto úložiště přivezeny a následně uloženy průměrně dva tisíce obalových souborů s odpady. Obsahují především kontaminované ochranné pomůcky, textilie, papíry, stavební suť, elektroinstalační materiály. Druhá část pochází z vodního hospodářství elektrárenských provozů a jedná se o odpadní vody, kaly nebo ionexy. Ukládání kapalných odpadů je zakázáno, a proto je nutné tento typ odpadů zpracovat speciálními technologiemi. Celkový objem úložných prostor činí 55 000 m<sup>3</sup>, jeho kapacita je dostatečná pro ukládání po celou dobu životnosti jaderných elektráren i v případě, že dojde k dostavbě nových bloků. [8]

V roce 2022 bylo do přípovrchového úložiště uloženo celkem 1448 obalových souborů, především sudy o objemu 200 litrů, celková hmotnost činila 411 tun a objem 318,7 m<sup>3</sup>. Z tohoto množství pocházelo 318 tun a 237,6 m<sup>3</sup> z JE Dukovany, z toho 159 obalových souborů s nezpevněným odpadem, 459 obalových souborů s použitými ionexy a kaly zpevněnými do aluminosilikátové matrice a 466 obalových souborů s bitumenovým produktem. Z JE Temelín bylo uloženo 277 obalových souborů s odpadem, což ve výsledku dává objemové množství 64,6 t a 61,2 m<sup>3</sup>, z toho 215 obalových souborů s bitumenovým produktem, 60 obalových souborů s nezpevněným odpadem a 2 obalové soubory s použitými ionexy a kaly zpevněnými do aluminosilikátové matrice. [9]

ÚJV Řež, a. s. dodal k uložení 87 obalových souborů s radioaktivním odpadem o hmotnosti 28,2 tun a objemu 19,3 m<sup>3</sup>. Z tohoto množství bylo 4 nestandardních obalových souborů s nezpevněným radioaktivním odpadem a 83 obalových souborů s radioaktivním odpadem zpevněnými cementovou matricí. [9]



Obrázek 3 Ukládání odpadů v číslech [8]

Tabulka 6 Aktivita limitovaných radionuklidů [9]

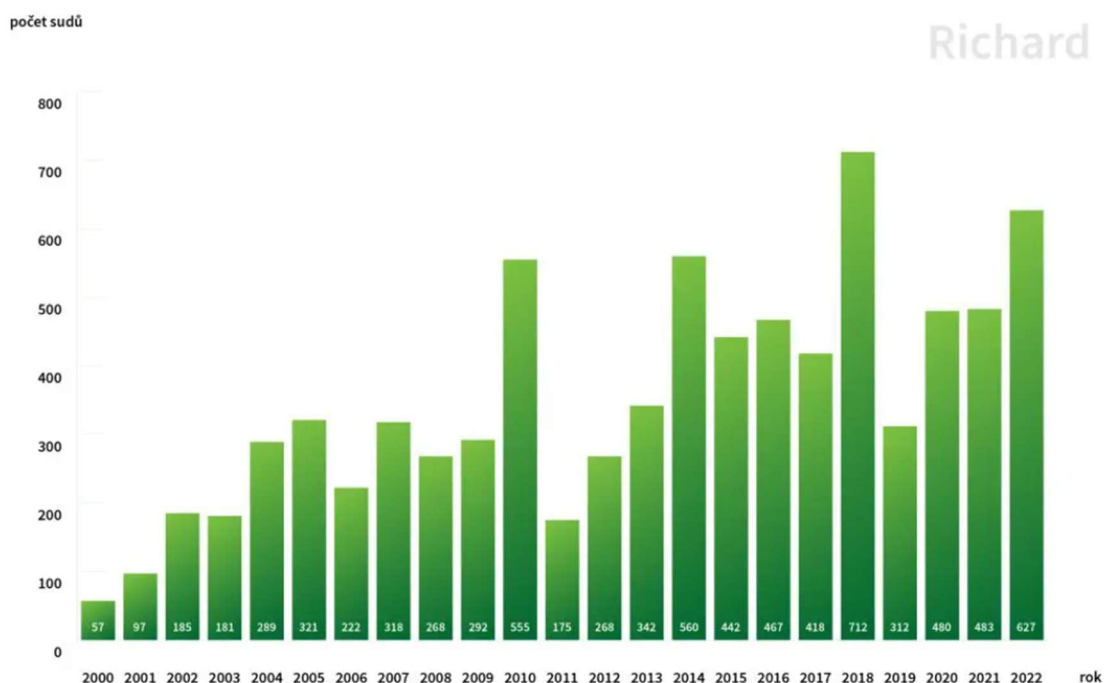
Radionuklid	Aktivita uložená v roce 2022 [Bq]	Celková aktivita [Bq]
$^{14}\text{C}$	$2,05 \cdot 10^{10}$	$2,98 \cdot 10^{11}$
$^{41}\text{Ca}$	$7,03 \cdot 10^2$	$3,97 \cdot 10^8$
$^{59}\text{Ni}$	$6,38 \cdot 10^8$	$1,09 \cdot 10^{10}$
$^{63}\text{Ni}$	$1,14 \cdot 10^{11}$	$1,66 \cdot 10^{12}$
$^{90}\text{Sr}$	$4,93 \cdot 10^8$	$1,15 \cdot 10^{11}$
$^{94}\text{Nb}$	$3,74 \cdot 10^8$	$4,52 \cdot 10^9$
$^{99}\text{Tc}$	$1,45 \cdot 10^4$	$1,63 \cdot 10^9$
$^{129}\text{I}$	$1,63 \cdot 10^1$	$5,6 \cdot 10^8$
$^{137}\text{Cs}$	$1,31 \cdot 10^{12}$	$2,16 \cdot 10^{13}$
$^{139}\text{Pu}$	$3,69 \cdot 10^6$	$2,11 \cdot 10^8$
$^{241}\text{Am}$	$1,71 \cdot 10^7$	$8,29 \cdot 10^8$

### 3.2.2 Podzemní úložiště radioaktivních odpadů Richard u Litoměřic

Toto úložiště, které se nachází nedaleko Litoměřic a leží v podzemním komplexu bývalého vápencového dolu Richard II, bylo uvedeno do provozu v roce 1964 a dodnes slouží k ukládání institucionálních odpadů. Po převzetí Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) byla provedena šetření geologických a hydrogeologických podmínek na lokalitě a aktualizace bezpečnostních rozborů. Zajímavostí úložiště je zkušebna obalových souborů, která je součástí úložiště a je jediná na území České republiky. Celkový objem úložiště byl navýšen o další komunikační chodbu a pět nových ukládacích komor. Kapacita ukládacích komor je nyní 12 500 m<sup>3</sup> a volné místo dostačuje pro dalších 10 let provozu úložiště. [10]

Úložiště Richard přijímá institucionální odpady, zejména z užití radioizotopů ve zdravotnictví, průmyslu a výzkumu. Odděleně od ukládaného radioaktivního odpadu (RAO) je v úložišti také skladován RAO, který zatím není vhodný k trvalému uložení. Tento odpad, který zahrnuje především použité uzavřené radionuklidové zariadení, shromážděné zdroje z požárních hlásičů a jaderné materiály nesplňující podmínky pro uložení, je uchováván do doby, než bude možné jej bezpečně uložit v příslušném úložišti. [6]

V roce 2022 bylo do ÚRAO Richard uloženo 627 obalových jednotek, což představuje 135,6 m<sup>3</sup> radioaktivního odpadu o celkové hmotnosti 184 tun a celkové aktivitě 27,3 TBq. Do procesu ukládání bylo v roce 2022 přijato 40 obalových souborů s radioaktivním odpadem. [9]



Obrázek 4 Ukládání odpadů v číslech [10]

Tabulka 7 Přehled aktivit v uložených obalových souborech s RAO v ÚRAO Richard [9]

Radionuklid	Aktivita uložená v roce 2022 [Bq]	Celková aktivita [Bq]
<sup>3</sup> H	$2,61 \cdot 10^{13}$	$5,21 \cdot 10^{13}$
<sup>14</sup> C	$2,81 \cdot 10^8$	$1,05 \cdot 10^{13}$
<sup>36</sup> Cl	$1,32 \cdot 10^6$	$9,06 \cdot 10^9$
<sup>90</sup> Sr	$4,49 \cdot 10^9$	$6,86 \cdot 10^{12}$
<sup>99</sup> Tc	$1,00 \cdot 10^4$	$4,35 \cdot 10^9$
<sup>129</sup> I	$3,00 \cdot 10^4$	$2,13 \cdot 10^7$
<sup>137</sup> Cs	$1,20 \cdot 10^{12}$	$2,99 \cdot 10^{14}$
<sup>139</sup> Pu	$4,35 \cdot 10^8$	$1,02 \cdot 10^{13}$
<sup>241</sup> Am	$4,00 \cdot 10^5$	$3,78 \cdot 10^{12}$
Celková aktivita ostatních radionuklidů alfa	$8,64 \cdot 10^6$	$1,11 \cdot 10^{12}$

Tabulka 8 Přehled aktivit obalových souborů s RAO přijatých do procesu skladování [9]

Radionuklid	Aktivita uložená v roce 2022 [Bq]	Celková aktivita [Bq]
<sup>241</sup> Am	0	$1,19 \cdot 10^{12}$
Ostatní nuklidy	$3,7 \cdot 10^{10}$	$3,07 \cdot 10^{11}$

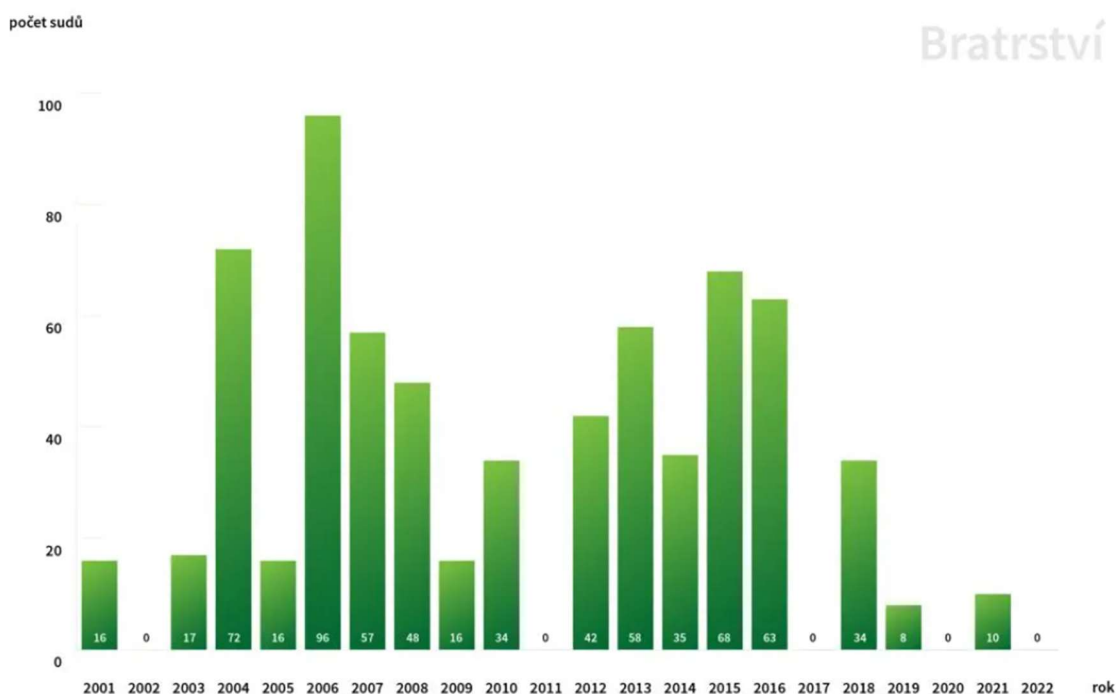
Tabulka 9 Počty obalových souborů od jednotlivých původců [9]

	Původce	Počet jednotek
Převzaté k uložení	ÚJV Řež, a. s.	623
	ZAM SERVIS s.r.o.	3
	ISOTREND s.r.o.	1
Převzaté do procesu	UJP PRAHA a.s.	40

### 3.2.3 Úložiště Bratrství v Jáchymově

Úložiště Bratrství se nachází v části bývalého uranového dolu stejného jména poblíž Jáchymova. Od roku 1974 slouží výhradně k ukládání odpadů pocházejících ze zdravotnictví, průmyslu či výzkumu, které obsahují přírodní radionuklidy. Vzhledem k poloze v lokalitě bývalého uranového dolu se ve vodách a okolí vždy nachází určité množství radionuklidů bez ohledu na uložené odpady. Tato situace je brána v úvahu při vyhodnocování výsledků monitoringu.

Toto úložiště je určeno výhradně pro odpady obsahující přírodní radionuklidy. [6] Celkový objem úložných prostor je 1200 m<sup>3</sup>, z čehož asi 900 m<sup>3</sup> je využitelných pro ukládání. Limit objemu a aktivity ukládaných odpadů byl především formován praxí z let 1975-1999. Během posledních let byly přírůstky do úložiště minimální, což potvrzuje obrázek 5 ukládání odpadů. [11]



Obrázek 5 Ukládání odpadů v číslech [11]

Tabulka 10 Přehled aktivit uložených RAO v ÚRAO Bratrství [9]

Radionuklid	Aktivita uložená v roce 2022 [Bq]	Celková aktivita [Bq]
<sup>226</sup> Ra	0	$1,36 \cdot 10^{12}$
<sup>232</sup> Th	0	$3,20 \cdot 10^9$
U	0	$6,38 \cdot 10^{11}$
Ostatní alfa	0	$2,04 \cdot 10^{12}$

### 3.2.4 Úložiště Hostim u Berouna

V České republice existuje jedno již uzavřené úložiště. Toto úložiště sloužilo k ukládání nízké a středně aktivních odpadů z Ústavu jaderného výzkumu v Řeži a z Ústavu pro výzkum, vývoj a využití radioizotopů v letech 1959–1964. V vápencovém lomu byly zprovozněny dvě vytěžené štoly o celkovém objemu 1690 m<sup>3</sup>, do nichž byly ukládány odpady zejména z těchto dvou organizací. [6]

Po odstranění části odpadů byla vybudována dostatečná bezpečnostní opatření a chodby byly zaplněny betonovou směsí. V současné době se v úložišti nachází 360 m<sup>3</sup> odpadů

s aktivitou nižší než 0,01 TBq. Úložiště je v současnosti ve fázi aktivního institucionálního dohledu a výsledky jsou každý rok předávány Správě úložišť jaderného odpadu (SÚJB). [12]

## 3.3 Odhad budoucího množství odpadů a vyhořelého paliva

V současné době vzniká ročně přibližně 30 až 50 m<sup>3</sup> institucionálních odpadů, a očekává se, že i v budoucnosti bude jejich produkce zhruba stejná. V následujících pěti až deseti letech se počítá s nárůstem odpadu na 100 až 200 m<sup>3</sup> ročně v důsledku likvidace ekologických škod Ústavu jaderného výzkumu Řež, a.s. V dlouhodobějším horizontu je také potřeba zohlednit vyřazování výzkumných zařízení CV Řež s. r. o. (reaktory LVR-15 a LR-0), reaktor VR-1 (FJFI v Praze) a výzkumných zařízení provozovaných Ústavem jaderného výzkumu Řež, a.s. (pracoviště obj. 250 Radiochemie a obj. 241 Velké zbytky).

Pro stanovení přesnějších odhadů budoucího množství radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva pocházejících z jaderných zdrojů je do určité míry nejistým prvkem množství produkce RAO z nových jaderných zdrojů. Je tedy třeba aktualizovat hodnoty radioaktivních odpadů. První aktualizace hodnot by měla být provedena po určení dodavatele nových jaderných zdrojů. Dále vznikne relativně objemné množství odpadů vyřazováním jaderných zdrojů z provozu. Bilance odpadů vzniklých z vyřazování jaderných zdrojů jsou pravidelně aktualizovány v pětiletých intervalech. [4]

### 3.3.1 Odhad budoucího množství nízko a středněaktivních odpadů pro přípovrchová úložiště

Odhad množství nízko a středně aktivních odpadů včetně odhadů odpadů, které by mohly vzniknout z nových jaderných zdrojů, je prezentován v tabulce 11. Tato tabulka nezahrnuje odpady kontaminované přírodními radionuklidy, které mají původ ve starých ekologických zátěžích. Typicky se jedná o zbytky z vyřazených výrobních linek, opuštěná odkaliště z těžby uhlí či chemických provozů atp. Tyto odpady představují velké objemy kontaminované malou koncentrací přírodních radionuklidů. [4]

Tabulka 11 Bilance nízko a středně aktivních upravených odpadů splňujících podmínky přijatelnosti do přípovrchových úložišť (konzervativní odpad) [4]

Označení odpadu	Objem [m <sup>3</sup> ]
Provozní odpady z JE	
60 let životnost provozovaných JE	18300
60 let životnost NJZ	10200-23200*
Nízko a středně aktivní odpady z vyřazování jaderných elektráren z provozu	
60 let životnost provozovaných JE	10800**
60 let životnost NJZ	7200**
Institucionální odpady	
Provozní odpady (60 let)	2000
Odpady z ekologických škod a vyřazování jaderných zařízení	1500***

\*Odhad produkce odpadů z NJZ vychází z obecného požadavku pro pokročilé reaktory III. generace produkovat méně než 50 m<sup>3</sup> upravených RAO za rok na 1 GW instalovaného výkonu a z údajů, které potenciální dodavatelé NJZ uvádějí ve svých nabízených typových projektech.

\*\* Odhad produkce odpadů je srovnatelný pro všechny varianty vyřazování.

\*\*\* Zahrnuje odpady z vyřazování všech organizací s povolením nakládání s RAO, bilance odpadů z ekologických škod je uvažována konzervativně, bez případného uvolnění do ŽP. [4]



### 3.3.2 Odhad budoucího množství nízké, středně a vysoce aktivních určených do hlubinného úložiště

Během procesu vyřazování jaderných elektráren z provozu vzniknou odpady, které budou vyžadovat uložení v hlubinném úložišti. Důvodem pro jejich zařazení do hlubinného úložiště je překročení limitních hodnot objemových aktivit sledovaných radionuklidů aktivovaných v konstrukčních částech reaktorů po ukončení provozu. Těmito radionuklidy jsou zejména  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{59}\text{Ni}$  a  $^{94}\text{Nb}$  v návarech tlakové nádoby,  $^{14}\text{C}$  ve vnitroreaktorové části a  $^{41}\text{Ca}$  v serpentinových betonech a zásypech. Podrobný seznam těchto odpadů je uveden v tabulce 12. [4]

Tabulka 12 Bilance odpadů nepřijatelných do přípovrchových úložišť [4]

Označení odpadu	Hmotnost [t]
Provozní odpady, provozované JE a NJZ (60 let)	140
Odpady z vyřazování JE	
(provozované JE a NJZ)	4200
Institucionální odpady:	
Z vyřazování experimentálního reaktoru	20
Skladované v úložišti Richard	64 (189 ks sudů)

## 4 ZDROJE ZÁŘENÍ

Hlavní zdroje záření pocházejí z atomových nebo jaderných procesů, které lze rozdělit na čtyři hlavní typy:

- přímo ionizující:
  - rychlé elektrony,
  - těžké nabitě částice,
- nepřímo ionizující:
  - elektromagnetické záření,
  - neutronové záření.

Záření přímo ionizující zahrnuje kvanta s elektrickým nábojem, která vytrhávají Coulombickými silami elektrony z atomů, záření nepřímo ionizující neobsahuje nabitě částice a předává svou energii nabitým částicím, které pak ionizují látku. [13]

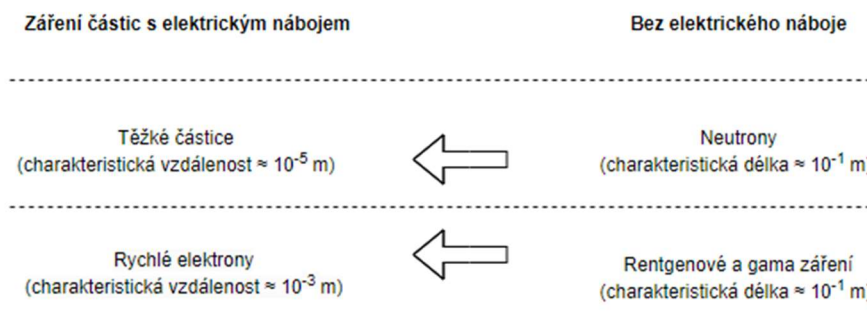
Rychlé elektrony zahrnují beta částice (kladně nebo záporně nabitě), které vznikají při jaderném rozpadu, a energetické elektrony z jiných procesů. Tyto energetické elektrony mají vysokou energii a schopnost ionizovat látky, se kterými se střetnou. Těžké nabitě částice zahrnují všechny energetické ionty s hmotností od jedné atomové hmotnosti nebo větší, jako jsou alfa částice, protony, štěpné produkty a produkty více jaderných reakcí. Tyto ionty mají vysokou kinetickou energii a dostatek energie na to, aby ionizovaly atomy v materiálu, kterým procházejí. [14]

Elektromagnetické záření zahrnuje rentgenové záření a gama záření, které vznikají při přeskupování elektronů v atomech nebo při přechodech v jádrech. Poslední hlavní kategorii tvoří neutrony vznikající při různých jaderných reakcích. Tato kategorie se často dále dělí na pomalé a rychlé neutrony. [17]

Tato práce se zaměřuje především na elektromagnetické záření, včetně gama záření po rozpadu beta, anihilačního záření, gama záření po jaderných reakcích a dalších.

## 4.1 Účinky ionizačního záření

Funkce každého detektoru záření závisí na způsobu, jakým interaguje s materiálem detektoru. Porozumění reakce konkrétního typu detektoru vyžaduje znalost základního mechanismu interakce záření s hmotou a jeho ztráty energie. Pro účely této diskuse je užitečné rozdělit záření do čtyř hlavních kategorií, jak bylo představeno v předchozí kapitole. [17]



Obrázek 6 Matice interakce záření [13]

V levém sloupci jsou položky reprezentující záření nabitých částic. Tato záření interagují s elektrony v okolí díky svému elektrickému náboji, což je způsobeno Coulombovskou silou.

Záření v pravém sloupci je nenabitě a není silou ovlivněno. Musí nejprve projít katastrofickou interakcí, která mění vlastnosti dopadajícího záření. V každém případě tato interakce přenáší energii záření na elektrony, jádra atomů nebo nabitě částice vzniklé jadernými reakcemi. Pokud nedojde k interakci uvnitř detektoru, může toto nenabitě záření (např. neutrony nebo gama záření) zcela projít objemem detektoru bez interakce.

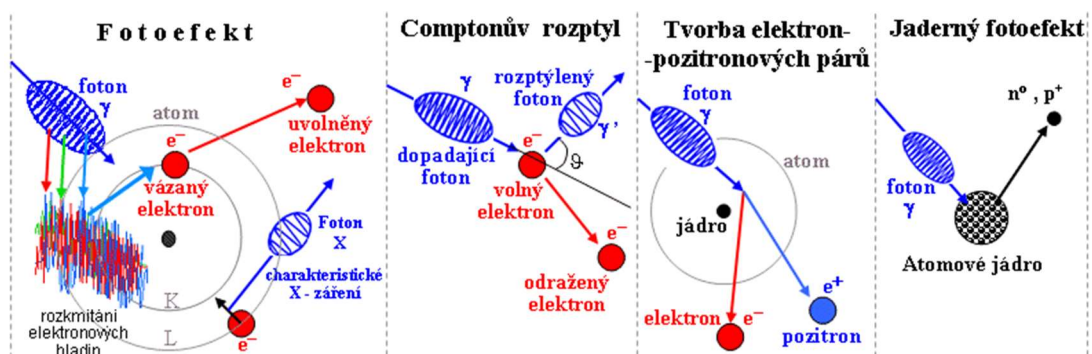
Vodorovné šipky na obrázku znázorňují výsledky těchto zásadních interakcí. Rentgenové nebo gama záření může předat celou nebo část své energie elektronům, čímž vzniknou sekundární elektrony podobné záření rychlých elektronů (např. beta částic). Detektory určené k detekci gama záření jsou navrženy tak, aby podporovaly tyto interakce a úplně zastavily výsledné sekundární elektrony, čímž zajišťují, že se celá energie elektronů podílí na výstupním signálu. Naopak neutrony mohou interagovat tak, že produkují sekundární těžké nabitě částice, které slouží jako základ signálu detektoru. [17]

Charakteristická vzdálenost v levém sloupci udává typickou dráhu, kterou urazí částice (těžké částice a rychlé elektrony) v materiálu, než ztratí svou energii. Kratší vzdálenosti znamenají intenzivnější interakce na kratší dráze. Charakteristická délka se používá pro částice bez náboje a udává, jak hluboko mohou tyto částice proniknout do materiálu před tím, než dojde k významné interakci. [14] [15]

#### 4.1.1 Ionizační procesy

Přestože existuje mnoho interakcí známých pro záření gama, při měřeních záření jsou klíčové pouze tři hlavní typy: fotoelektrická absorpce, Comptonův rozptyl a párová produkce (elektron – pozitronové páry). Všechny tyto procesy vedou k částečnému nebo úplnému přenosu energie fotonů záření gama na energii elektronů, což má za následek náhlé a prudké změny fotonu záření gama, při kterých může foton zcela zmizet nebo být rozptýlen pod velkým úhlem. Tento jev je odlišný od chování nabitých částic, které postupně ztrácejí rychlost v důsledku nepřetržitých interakcí s mnoha atomy a molekulami v tomto materiálu. [17]

Tyto interakce způsobují ztrátu energie částic, což je proces známý jako "Bremsstrahlung" (brzdné záření) nebo ztráta energie v důsledku ionizace a excitace. Tyto ztráty energie jsou méně dramatické než interakce fotonů gama záření, ale probíhají kontinuálně po celé dráze částice. [15]



Obrázek 7 Ilustrace ionizačních procesů [12]

## 5 DRUHY DETEKTORŮ GAMA ZÁŘENÍ

### 5.1 Ionizační komora

Několik z nejstarších a nejrozšířenějších typů detektorů záření využívá efekt průchodu nabitě částice plynem. Primárními způsoby interakce jsou ionizace a excitace molekul plynu podél dráhy částice. I když se excitované molekuly občas využívají k odvození vhodného signálu, většina detektorů plněných plynem je založena na přímé ionizaci způsobené průchodem záření. Detektory, o kterých bude pojednáno v následujících kapitolách (iontové komory, proporcionální detektory, Geigerovy trubice), generují různé elektronické výstupní signály vytvořené iontovými páry uvnitř detektoru naplněného plynem.

Iontové komory jsou základní formou detektorů plněných plynem. Jejich provoz běžně spočívá ve snímání všech změn vnitřní ionizace v plynu pomocí elektrického pole. Podobně jako u ostatních detektorů mohou být iontové komory provozovány buď v režimu proudu, nebo pulzně. Ve většině aplikací jsou iontové komory využívány jako stejnosměrná zařízení v režimu proudu, ačkoli existují příklady, kdy jsou využívány v režimu pulzním. Naopak proporcionální čítače a Geigerovy trubice jsou téměř výhradně používány v režimu pulzním.

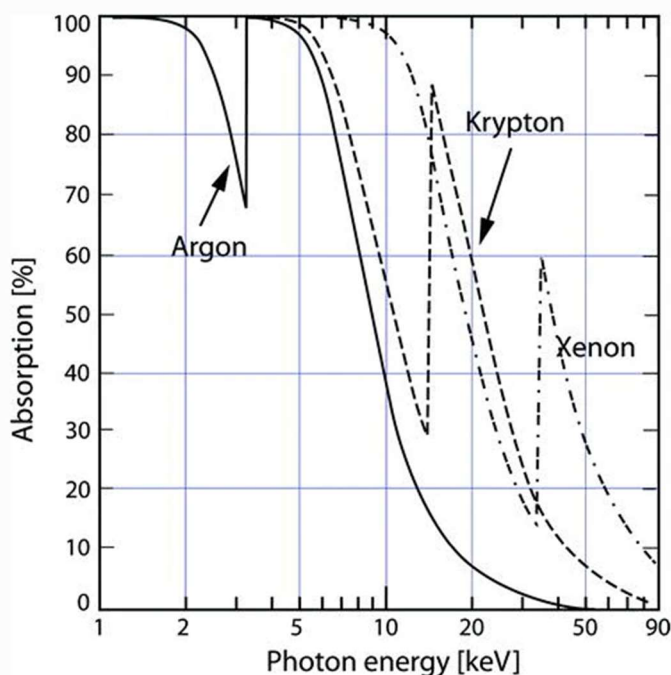
Termín "ionizační komora" byl tradičně používán pouze pro typ detektoru, kde jsou iontové páry z plynu shromažďovány. Proces podobný tomuto v pevných látkách je zaznamenávání párů elektron-díra v polovodičových detektorech. Přímá ionizace v kapalinách se využívá jen výjimečně. [17]

### 5.2 Proporcionální detektory

Proporcionální detektory jsou typem detektorů plněných plynem, které byly vyvinuty koncem 40. let 20. století. Podobně jako Geigerovy-Müllerovy trubice, i proporcionální trubice obvykle pracují v pulzním režimu a využívají jev násobení plynu k zesílení původních iontových párů vytvořených v plynu. Impulzy, které vznikají, jsou výrazně větší než impulzy z iontových komor, které fungují za stejných podmínek. V situacích, kde počet iontových párů vytvořených zářením není dostatečný pro adekvátní funkci iontových komor v pulzním režimu, lze využít proporcionální čítače. Jednou z klíčových aplikací proporcionálních čítačů je detekce a spektrometrie nízkoenergetického rentgenového záření. Proporcionální čítače se také často využívají při detekci neutronů. [17]

### 5.2.1 Užití proporcionálních detektorů na zdroje rentgenového a gama záření

Proporcionální čítače lze použít k detekci a spektrometrii měkkého rentgenového nebo gama záření, jehož energie je dostatečně nízká na to, aby s přiměřenou účinností interagovala s plynem v čítači. Obrázek 8 ukazuje pravděpodobnost interakce v 5,08 cm tloušťce běžných proporcionálních plynů s vysokým atomovým číslem při standardní teplotě a tlaku. Jsou zde zřetelně viditelné absorpční hrany plynu. U xenonu lze pozorovat rozšíření odezvy nad energií fotonů 100 keV. Spektrometrie nízkoenergetického rentgenového záření je jedním z hlavních využití proporcionálních čítačů a je založena na plném pohlcení fotoelektronů vytvořených interakcemi fotonů v plynu. [17]



Obrázek 8 Pravděpodobnost pohlcení záření v 5 cm argonu, kryptonu a xenonu při standardní teplotě a tlaku [18]

Při vyšších energiích fotonů, které jsou obvyklejší pro gama záření, proporcionální čítače přestávají být užitečnými detektory. Účinnost měření se stává velmi nízkou, protože pravděpodobnost přímé interakce fotonů s plynem rychle klesá s energií. Zbývající citlivost na gama záření vzniká z interakcí fotonů se stěnami čítače, přičemž výsledné sekundární elektrony pronikají do plynu čítače. Tento proces má za následek účinnost kolem jednoho procenta a nelze jej použít pro měření energie, protože energie elektronů se proměnlivě ztrácí před dosažením plynu. Pokud jsou proporcionální čítače používány k detekci gama záření, častěji se využívají v oblasti Geigerových-Müllerových detektorů kvůli jednoduchosti jejich funkce. [17]

### 5.3 Geiger-Müllerovy čítače

Geigerův-Müllerův čítač (běžně označovaný jako G-M čítač nebo jednoduše Geigerova trubice) je jedním z nejstarších a nejpoužívanějších typů detektorů záření, který byl představen Geigerem a Müllerem v roce 1928. Díky své jednoduchosti, nízké ceně a snadné obsluze zůstávají tyto detektory populární dodnes.

Geiger-Müllerovy čítače tvoří třetí kategorii detektorů plněných plynem na bázi ionizace, vedle iontových komor a proporcionálních čítačů. Stejně jako proporcionální čítače, i G-M čítače využívají násobení plynu, což zvyšuje náboj reprezentovaný původními iontovými páry vytvořenými podél dráhy záření. Nicméně proces násobení probíhá zcela odlišným způsobem. V proporcionálním čítači každý původní elektron spouští lavinu, která je prakticky nezávislá na ostatních lavinách vytvořených jinými elektrony spojenými s původní ionizační událostí. Na druhou stranu v Geigerově-Müllerově trubici se vytvářejí vyšší elektrická pole, která zvyšují intenzitu každé laviny. Za určitých podmínek může jedna lavina vyvolat další lavinu na jiném místě v trubici. Při kritické hodnotě elektrického pole může každá lavina vytvořit další lavinu a vzniká samošířící se řetězová reakce. Jakmile dosáhne Geigerův výboj určité velikosti, kolektivní účinky všech lavin ukončí řetězovou reakci. To vede k tomu, že všechny impulsy z Geigerovy trubice mají stejnou amplitudu bez ohledu na počet původních iontových párů, které proces iniciovaly.

Geiger-Müllerova trubice tedy může fungovat pouze jako jednoduchý čítač událostí vyvolaných zářeními, a nelze ji použít k přímé radiační spektrometrii, protože veškerá informace o energii odevzdané dopadajícím zářením se ztrácí. o množství energie odevzdané dopadajícím zářením se ztrácí.

Typický impuls z Geigerovy trubice obsahuje obvykle obrovské množství nashromážděného náboje. Během výboje se vytvoří přibližně  $10^9$ - $10^{10}$  iontových párů, což vysvětluje vysokou amplitudu výstupního impulsu (obvykle v řádu voltů). Tento vysoký signál umožňuje značně zjednodušit související elektroniku a často zcela eliminovat potřebu externího zesílení. Díky relativně nízkým nákladům na samotné čítače jsou Geiger-Müllerovy čítače často nejlepší volbou, pokud je zapotřebí jednoduchý a ekonomický počítačový systém.

Kromě nedostatku informací o energii mají Geiger-Müllerovy čítače také hlavní nevýhodu v podobě jejich neobvykle dlouhé mrtvé doby, která výrazně překračuje dobu mrtvého času jakéhokoli jiného běžně používaného detektoru záření. Tato vlastnost omezuje tyto detektory na relativně nízké rychlosti počítání. V situacích, kdy by jinak byla požadována vyšší rychlost počítání (například několik stovek impulsů za sekundu), je třeba použít korekci pro mrtvou dobu. Navíc některé typy Geigerových trubic mají omezenou životnost a po dosažení určitého počtu celkových impulsů mohou začít selhávat. [17]

### 5.3.1 Účinnost při gama záření

Pro fotonové záření X a zejména gama je detekční účinnost samotného plynového náplně velmi nízká kvůli jeho malé absorpci v plynu. Většina gama fotonů projde citlivým objemem plynu bez interakce. Fotony s vyšší energií mohou být detekovány plynovým detektorem téměř výhradně tehdy, pokud interagují s materiálem stěny detekční trubice. [13]

Účinnost při měření gama záření tak závisí na dvou nezávislých faktorech:

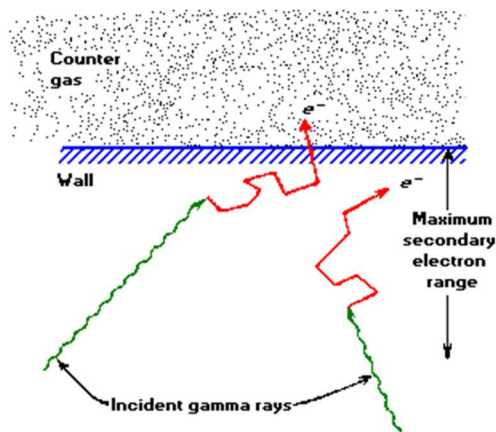
- Pravděpodobnost, že dopadající záření gama interaguje ve stěně a vytvoří sekundární elektron,
- Pravděpodobnost, že sekundární elektron dosáhne plynu před koncem své dráhy.

Stěna detektoru je klíčová pro detekci gama záření, protože poskytuje materiál, ve kterém gama záření může vytvářet sekundární elektrony. Tyto elektrony pak mohou ionizovat plyn uvnitř detektoru, což vede k detekci záření. [15]

Pokud interakce probíhá dostatečně blízko vnitřního povrchu stěny, aby sekundární elektron vytvořený během interakce mohl dosáhnout plynu a vytvořit ionty, dojde k vzniku pulsu. Stačí pouze jeden iontový pár, aby sekundární elektron mohl generovat impuls z Geigerovy trubice. Sekundární elektron nemusí opustit stěnu daleko od konce své dráhy, aby mohl generovat impuls z Geigerovy trubice, protože stačí, aby dosáhl plynu.

Příspěním sekundárních elektronů se podílí pouze nejvnitřnější vrstva stěny, která se nachází v bezprostřední blízkosti plynu. Tato oblast má tloušťku odpovídající maximálnímu dosahu sekundárních elektronů, což obvykle činí pouze jeden nebo dva milimetry. Tloušťka stěny větší než tato hodnota k účinnosti nijak nepřispívá, protože elektrony vytvořené v oblastech stěny vzdálenějších od plynu nemají šanci dosáhnout plynu před zastavením. [17]





Obrázek 9 Hlavní mechanismus, kterým jsou čítače plněné plynem citlivé na záření gama [17]

Pravděpodobnost interakce záření gama v této rozhodující vrstvě obecně roste s atomovým číslem materiálu stěny, protože materiály s vyšším atomovým číslem mají větší schopnost interagovat s gama paprsky. Z tohoto důvodu je účinnost Geigerových trubíc v oblasti záření gama nejvyšší u trubíc, které mají stěnu katody vyrobenou z materiálu s vysokým atomovým číslem ( $Z$ ). G-M trubice s katodami z bismutu ( $Z = 83$ ) byly široce používány pro detekci záření gama.

Navzdory tomu, že pravděpodobnost interakce uvnitř citlivé vrstvy stěny zůstává i u materiálů s vysokým protonovým číslem nízká, vedlo to k typické účinnosti při počítání gama záření, jež zřídka přesahuje několik procent. V případě dostatečně nízké energie fotonu nemusí být přímá interakce gama záření ve výplňovém plynu trubice zanedbatelná.

Zvýšení účinnosti počítání pro nízkoenergetické gama záření a rentgenové záření lze dosáhnout použitím plynů s vysokým atomovým číslem při co nejvyšším tlaku. Běžně volené v těchto aplikacích jsou xenon a krypton, a dosahuje se účinnosti počítání téměř 100 % při fotonových energiích nižších než přibližně 10 keV. (viz Obrázek 9). [17]

## 5.4 Scintilační detektory

Scintilační detektory se řadí mezi jednu z nejstarších technik detekce ionizujícího záření, využívající světlo (scintilace), které vzniká v určitých materiálech po interakci s ionizujícím zářením. Moderní scintilační detektory se skládají ze senzorů, jako jsou fotonásobiče a fotodiody, které převádějí vzniklé světlo na elektrický signál.

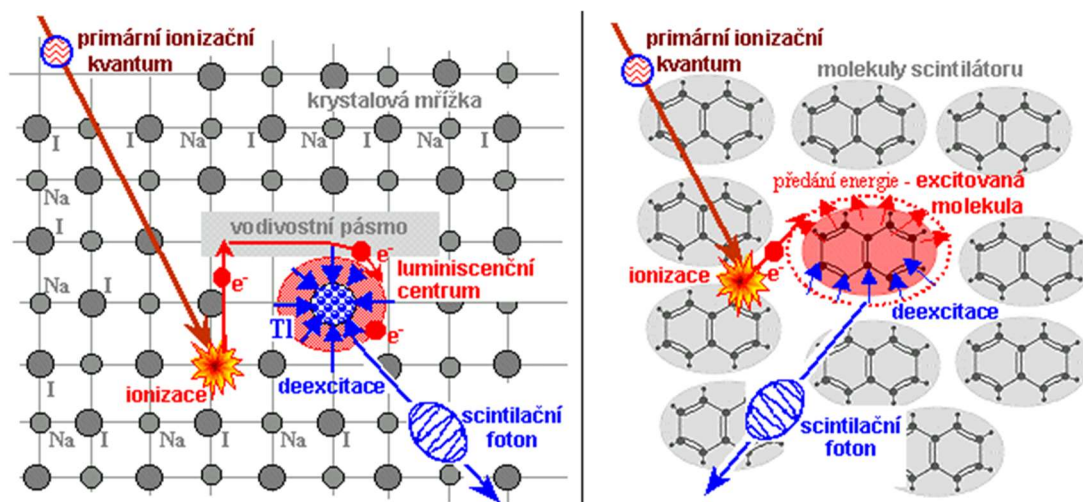
Ideální scintilační materiál by měl mít následující vlastnosti:

- Měl by přeměňovat kinetickou energii nabitých částic na detekovatelné světlo se scintilační účinností.
- Tato přeměna by měla být lineární – světelný tok by měl být úměrný vložené energii v co nejširším rozsahu.
- Prostředí by mělo být transparentní pro vlnovou délku vlastní emise, pro dobrý sběr světla.
- Doba rozpadu indukované luminiscence by měla být krátká, aby bylo možné generovat rychlé signální impulsy.
- Materiál by měl mít dobrou optickou kvalitu a měl by se dát vyrábět v dostatečně velkých rozměrech, aby byl zajímavý jako praktické užití.
- Jeho index lomu by měl být blízko indexu lomu skla, aby umožnil účinné spojení scintilačního světla s fotonásobičem nebo jiným světelným senzorem.

Žádný materiál nesplňuje všechna tato kritéria a volba konkrétního scintilátoru je vždy kompromisem mezi těmito a dalšími faktory. Mezi nejrozšířenější scintilátory patří anorganické krystaly halogenidů alkalických kovů, z nichž nejoblíbenější je jodid sodný, kapaliny a plasty na organické bázi. Anorganické látky mají obvykle nejlepší světelný výkon a linearitu, ale až na několik výjimek jsou relativně pomalé ve své odezvě. Organické scintilátory jsou obecně rychlejší, ale vydávají méně světla. [17]

Na výběr scintilátoru má velký vliv také zamýšlená aplikace. Vysoká hodnota  $Z$  (protonového čísla) složek a vysoká hustota anorganických krystalů upřednostňují jejich volbu pro spektrometrii záření gama, zatímco organické látky jsou často preferovány pro spektrometrii beta a detekci rychlých neutronů (kvůli obsahu vodíku).

Proces fluorescence označuje okamžité vyzařování viditelného světla z látky, která byla excitována nějakým způsobem. Existuje několik dalších procesů, které mohou také způsobit vyzařování viditelného světla. Mezi ně patří fosforescence, která vykazuje emisi světla s delší vlnovou délkou než fluorescence a charakteristickým časem, obvykle mnohem delším. Opožděná fluorescence pak vyvolává stejné emisní spektrum jako rychlá fluorescence, ale vyznačuje se podstatně delší dobou vyzařování po excitaci. Aby byl materiál efektivním scintilátorem s praktickými vlastnostmi, měl by přeměnit co největší část dopadající energie záření do rychlé fluorescence a zároveň minimalizovat obecně nežádoucí příspěvky fosforescence a opožděné fluorescence. [17]



Obrázek 10 Symbolické znázornění mechanismu vzniku scintilací v anorganických a organických látkách [16]

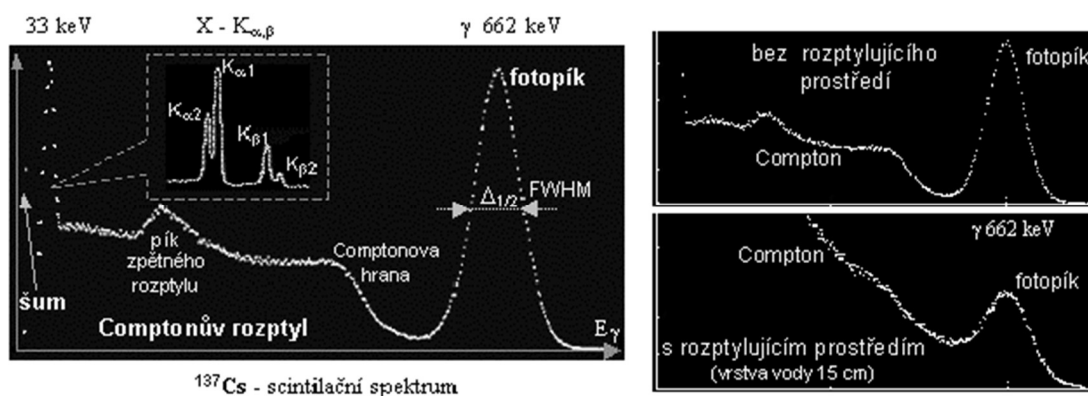
Na obrázku 10 je symbolicky znázorněn mechanismus vzniku scintilace v anorganických a organických látkách. V levé části je zobrazen mechanismus scintilace anorganických scintilátorů, zatímco v pravé části jsou scintilátory organické. U organických scintilátorů vznikají scintilace (záblesky) deexcitací vzbuzených molekul, zatímco u anorganických vznikají scintilační fotony při přesycení elektronů zachycených na vyšších hladinách luminiscenčních center tvořených poruchami v krystalové mřížce scintilátoru (například krystalická mřížka NaI s aktivátorem Tl). [16]

### 5.4.1 Radiální spektrometrie se scintilátory

Scintilační detektory, především anorganické scintilátory, jsou nejčastěji využívány pro detekci záření gama. Fotony záření gama interagují se scintilátorem buď fotoefektem, nebo Comptonovým rozptylem, přičemž předávají elektronu část své energie a při vysokých energiích mohou vytvářet i elektron-positronové páry.

Sekundární elektrony vzniklé touto interakcí pak postupně ztrácejí svou energii v materiálu detektoru během sérií kolizí, dokud se zcela nezabrdí. Amplituda signálu na výstupu fotonásobiče je vždy úměrná energii, kterou foton gama ztratí v krystalu.

Pokud zaznamenané na svislé ose grafu počet impulsů  $n$  s amplitudou  $A$  výstupních impulsů z fotonásobiče a na vodorovné ose označíme amplitudy tak, aby dílky odpovídaly energii detekovaného záření v keV, získáme spektrum, jak je znázorněno na Obrázku 11. Toto spektrum scintilačního gama záření se skládá z fotonásobiče a Comptonova spektra. Podrobnosti o těchto ionizačních procesech jsou zobrazeny na pravé části Obrázku 11. [16]



Obrázek 11 Scintilační spektrum [16]

### 5.4.2 Přednosti scintilačního detektoru

Scintilační detektory mají ve srovnání s G.-M. detektory tři zásadní přednosti:

- Vysoká detekční účinnost (citlivost): Ve scintilačním krystalu (anorganických scintilátorech) o poměrně vysoké hustotě a protonovém čísle se účinně absorbuje podstatně větší část záření gama v porovnání s plynem v Geigerově-Müllerově trubici. Scintilační detektory tedy mají vysokou detekční účinnost, která se často blíží 100 %.
- Krátká mrtvá doba: Mrtvá doba scintilačních detektorů je krátká, což umožňuje vysokou rychlost detekce a snímání.
- Spektrometrické vlastnosti: Scintilační detektory poskytují detailní informace o energii a rozložení záření, což umožňuje spektrometrickou analýzu s vysokou přesností a citlivostí.[16]

Doba trvání scintilace v krystalu je neobyčejně krátká, přibližně  $10^{-9}$  sekundy. Elektrony, které procházejí krystalem a násobí se ve fotonásobiči, potřebují přibližně  $10^{-8}$  sekundy. Následná doba formování a zpracování elektrického impulsu v zesilovači a analyzátoru moderní elektroniky trvá kolem  $10^{-6}$  sekundy. Tato doba je nejdelší v celém řetězci a určuje celkovou odezvu detektoru. V porovnání s Geigerovým-Müllerovým detektorem mají scintilační detektory mrtvou dobu přibližně 1 ms, což je téměř 100krát kratší než u Geigerových-Müllerových detektorů. [16]

### 5.4.3 Organické scintilátory

Organické scintilátory jsou obecně užitečné pro přímou detekci beta nebo alfa částic a jsou také snadno přizpůsobitelné detekci rychlých neutronů pomocí procesu zpětného rázu protonů. Nicméně kvůli nízké hodnotě atomového čísla jejich složek (vodík, uhlík a kyslík) prakticky nedochází k fotoelektrickému průřezu pro gama paprsky s běžnými energiemi. V důsledku toho typické organické scintilátory neprojevují fotopíky a vytvářejí pouze Comptonovo kontinuum ve svém pulzním gama spektru.

Pro zajištění určité míry fotoelektrické konverze gama paprsků byly provedeny pokusy o přidání prvků s vysokým atomovým číslem. Nejběžnější formou příměsí je přidání olova nebo cínu do běžných plastových scintilátorů až do 10% hmotnostní koncentrace. Bylo také prokázáno, že cín může být přidán do tekutých organických scintilátorů do koncentrace až 54% hmotnosti při zachování slabého scintilačního světelného výkonu. Tím lze dosáhnout relativně vysoké účinnosti fotopíky těchto materiálů až do nízkých energií záření gama. Jejich dalšími výhodami jsou rychlá odezva a nízká cena ve srovnání s konvenčními scintilátory gama záření. Bohužel přidavek těchto prvků vede nevyhnutelně ke snížení světelného výkonu a energetického rozlišení, což je podstatně horší než u anorganických scintilátorů. Další příklady příměsí organických scintilátorů se objevují v souvislosti s detekcí neutronů. Kapalné nebo plastové scintilátory lze osadit některým z prvků s vysokým průřezem pro neutrony, jako je bór, lithium nebo gadolinium. [17]

I když plastové scintilátory vykazují značnou nelinearitu světelného výstupu (což znemožňuje získání spektrální informace z gama záření), pro nespektrometrické účely s detekcí gama jsou plastové scintilátory vhodnější než anorganické scintilátory. [19]

## 5.5 Polovodičové detektory

Polovodičové detektory představují účinný nástroj pro detekci ionizujícího záření. Principem fungování polovodičového detektoru je využití ionizačních účinků záření k vytvoření elektron-děrových párů v polovodičovém materiálu. Podobně jako u ionizační komory je citlivým médiem polovodičového detektoru polovodičový materiál, avšak v tomto případě není použit plyn, nýbrž vhodný polovodič.

Z elektronického hlediska je polovodičový detektor v podstatě dioda zapojená v elektrickém obvodu s vysokým napětím a velkým ohmickým odporem v závěrném směru. Když kvantum ionizujícího záření vstoupí do aktivní vrstvy detektoru, v polovodiči se vytvoří elektron-děrové páry, které jsou následně shromážděny a vytváří elektrický impuls. Tento impuls, jehož amplituda je přímo úměrná energii detekovaného záření, je analyzován pomocí amplitudové analýzy výstupních impulsů.

Polovodičové detektory mají vynikající energetickou rozlišovací schopnost, obvykle lepší než 1 keV, což je asi 30-krát lepší než detektory scintilační. Tento významný výkon polovodičových detektorů je důsledkem dokonalého sběru náboje vytvořeného ionizací a nízké energie potřebné k vytvoření jednoho elektron-děrového páru v polovodiči. Tyto detektory jsou hojně využívány v oblastech vyžadujících vysokou energetickou rozlišovací schopnost, jako je jaderná fyzika, neutronová aktivační analýza a rentgen-fluorescenční analýza.

Rozdíly mezi spektry měřenými pomocí scintilačních a polovodičových detektorů jsou značné. Zatímco scintilační spektra mají obvykle rozmazané a rozšířené fotopíky s výraznou spojitou složkou Comptonovsky rozptýleného záření, spektra polovodičových detektorů jsou charakterizována ostrými a úzkými píky s potlačenou spojitou složkou. Tyto rozdíly způsobují, že polovodičové detektory mají lepší energetickou rozlišovací schopnost a vyšší poměr fotopíku ke spojitému Comptonovskému pozadí ve srovnání se scintilačními detektory.

Použití polovodičových detektorů má několik nevýhod oproti anorganickým plastovým scintilačním detektorům při průmyslovém využití. Polovodičové detektory jsou citlivé na teplotní změny a vyžadují stabilní teplotní podmínky pro optimální výkon, což může být obtížné zabezpečit. Jsou také dražší ve srovnání s plastovými scintilačními detektory a vyžadují stabilní napájecí napětí pro správnou funkci. Navíc mají omezenou energetickou rozlišovací schopnost a menší objem, což může být nevýhodou při práci s velkými objemy vzorků nebo při požadavku na vyšší statistickou spolehlivost naměřených dat. [16]

## 6 FYZIKÁLNÍ A PŘÍSTROJOVÉ VLIVY PŘI DETEKCI A SPEKTROMETRII

Úkolem detekce a spektrometrie záření je objektivní měření počtu kvant, energií, intenzit a dalších charakteristik ionizujícího záření. Zcela přesné měření se 100 % účinností je však pouze předpoklad. Při reálných podmínkách se v měřicím procesu projevuje několik vlivů, fyzikálních i technických, které omezují nebo zkreslují výsledky měření. Tyto vlivy budou v této kapitole zmíněny a budou diskutovány zejména pro obecný případ spektrometrie. [16]

### 6.1 Detekční účinnost a citlivost

Jak bylo v předchozím odstavci zmíněno, úkolem detekčních přístrojů je měření intenzity záření či počtu jeho kvant v daném místě nebo emitovaných z radioaktivního zářiče. Ideální situace se 100% účinností, kdy každé kvantum zářiče bude radiometrem detekováno, je splněna málokdy a určitá část tohoto záření není radiometrem detekována. Důležitým parametrem radiometru je jeho detekční účinnost, někdy nazývaná citlivostí přístroje. Rozeznáváme dva druhy detekční účinnosti. [16]

#### 6.1.1 Absolutní detekční účinnost měření

Absolutní detekční účinnost je poměr počtu impulsů zaznamenaných detektorem vůči počtu kvant vyzařených zdrojem za určitý čas. Tato celková detekční účinnost závisí na geometrickém uspořádání zdroje a detektoru (geometrie  $2\pi$ ,  $4\pi$ ), na případné absorpci záření v prostředí mezi zdrojem a detektorem a také na vlastní vnitřní účinnosti použitého detektoru. [16]

#### 6.1.2 Vnitřní detekční účinnost $\eta$ detektoru

Vnitřní detekční účinnost je dána pravděpodobností registrace kvant záření procházejících citlivou oblastí detektoru. Vyjadřuje se jako poměr počtu impulsů zaznamenaných detektorem k počtu kvant druhu záření, které vstoupily do detektoru, a je stanovena v procentech ( $0\% < \eta < 100\%$ ). Především je to účinný průřez interakce kvant s materiálem detektoru a velikost citlivého objemu absorpční vlastnosti konstrukčních materiálů (vstupního okénka).

Při většině aplikací volíme nejlepší detekční účinnost, ale nastávají situace například při vysokých intenzitách, kdy uměle detekční účinnost snižujeme, aby nedocházelo k zahlcení a poškození detektoru. Taková opatření jsou kolimace, filtrace a zvětšení vzdáleností mezi detektorem a zdrojem. [16]

## 6.2 Časové rozlišení a mrtvá doba

Mezi okamžikem interakce kvanta záření v citlivém objemu detektoru a elektrickým impulsem na výstupu detektoru existuje jisté časové zpoždění. Je způsobeno především dvěma faktory:

- Fyzikálními procesy v samotném detektoru – předávání energie, vznik ionizace, šíření elektronů a iontů v materiálu detektoru, sběr náboje elektrodami atp. Rozhoduje velikost detektorů, konstrukční řešení a jiné. Doba se pohybuje u Geigerových trubic v řádu mikrosekund a u scintilačních detektorů v nanosekundách.
- Elektrickými procesy v elektronických obvodech – tyto procesy jsou u moderních detektorů rychlé a doba se pohybuje v oblasti nanosekund.

Kvanta záření vstupují do detektoru nepravidelně a při vyšší intenzitě záření přicházejí částice velmi rychle za sebou. Detektory mají konečnou časovou rozlišovací schopnost a vysoká intenzita může vést k výrazným chybám v měřících procedurách.

- Časové rozlišení – je čas, který detektor potřebuje ke zpracování a registraci odezvového signálu od jednoho kvanta záření.
- Mrtvá doba detektoru je časový interval od detekce jednoho kvanta, po kterou detektor není schopen správně detekovat další kvanta. Vzniká nelinearita a snižuje se účinnost měření. [16]

## 6.3 Pozadí detektoru

U každého reálného měřícího zařízení, a tedy i radiometru, se přes měřený signál překládá tzv. pozadí. Pozadí radiometrického detekčního přístroje má obecně trojí původ:

- vnější záření z okolního prostoru,
- vnitřní radioaktivita materiálu detektoru,
- elektrický šum přístroje.

Pro správné měření se musí pozadí odečíst od výsledných měřených hodnot. Problémy nastávají při slabém měřeném záření. Toto pozadí snižuje citlivost detekce. [16]



## 7 NÁVRH PŘÍSTROJE

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout přístroj pro snímání gama záření z plastových fólií využívaných při provozu jaderných elektráren, zejména při odstávce. Tento návrh má snížit objem nízko a středně aktivních odpadů z elektráren a umožnit recyklaci nebo znovupoužití fólií a byl navrhnout ve spolupráci s konzultanty s praxí v oboru detekce a měření radiace a také s firmou MIFRE energy s.r.o.

Při návrhu byly využity plastové scintilátory, které jsou běžně používány například firmou VF Nuclear pro měření kontaminace prádla. I přes nedostatky popsané v předchozí kapitole jsou tyto radiometry rozsáhle využívány díky své variabilitě a snadné výrobě.

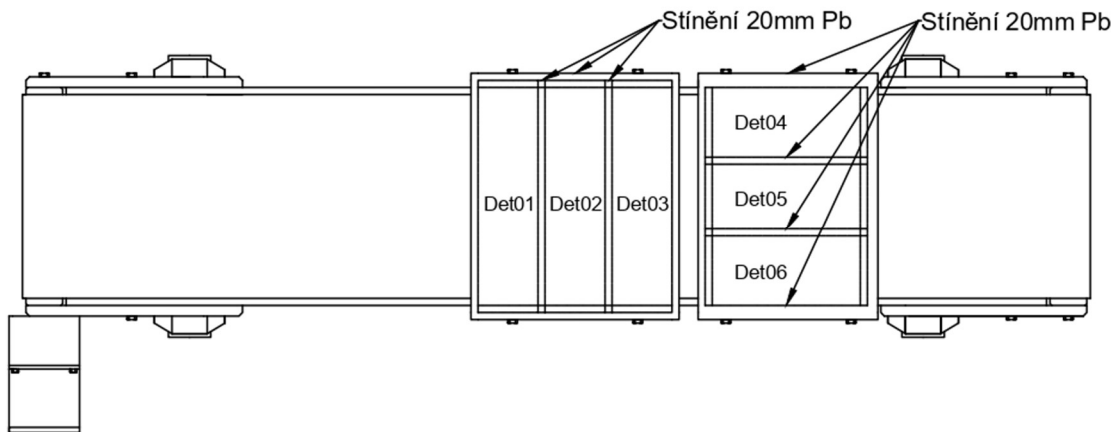
Plastové scintilátory jsou komerčně dostupné v různých velikostech, což z nich činí praktickou volbu pro měření. Při potřebě velkých objemů pevných scintilátorů, jako je měření fólií, je tato volba kompromisem mezi kvalitou a cenou.

Samotné měření kontaminace probíhá ve skokovém nebo kontinuálním režimu. Optická a akustická signalizace je spuštěna při překročení stanovených signalizačních úrovní. Navržený způsob rozmístění detektorů je znázorněn na obrázku 12. První trojice detektorů urychluje proces měření ve skokovém režimu a zvětšuje plochu detekce v kontinuálním provozu. Druhá trojice detektorů slouží ke kontrolnímu měření a lokalizaci místa kontaminace fólie, které může být odděleno od nekontaminované části. Pro zúžení místa kontaminace je možné upravit konfiguraci detektorů podle obrázku 13.

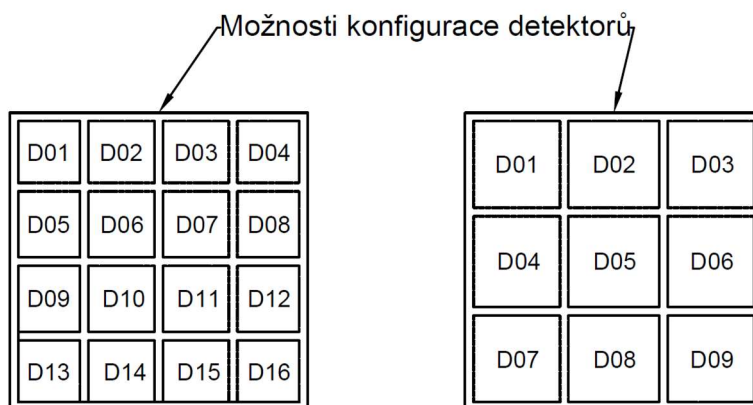
Pro zvýšení efektivity detekce gama záření je navržená konfigurace doplněna dvěma dalšími dopravníky. První dopravník slouží k detekci středních až vysokých aktivit fólií, druhý k detekci nízkých aktivit a třetí k dodatečné kontrole a zajištění spolehlivosti měření.

Plastové scintilátory jsou nastaveny na vysokou citlivost, a proto je nutné odstínit detektory od radiačního pozadí, aby reagovaly pouze na zvýšené hodnoty plastových fólií. To je zajištěno odstíněním detektorů olovem, které absorbuje vnější záření a zvyšuje přesnost měření. Rozmístění odstínění je patrné z obrázku 12. Kvůli dodržení optimální geometrie detektorů jsou detektory vybaveny nastavitelnou výškou, jelikož se s vzdáleností účinnost záchytu záření snižuje.

Návrh přístroje byl také pro snadnější představu i s alternativní konfigurací vykreslen ve 3D programu Tinkercad Tyto 3D vizualizace jsou znázorněny na obrázcích 14 a 15. [21].

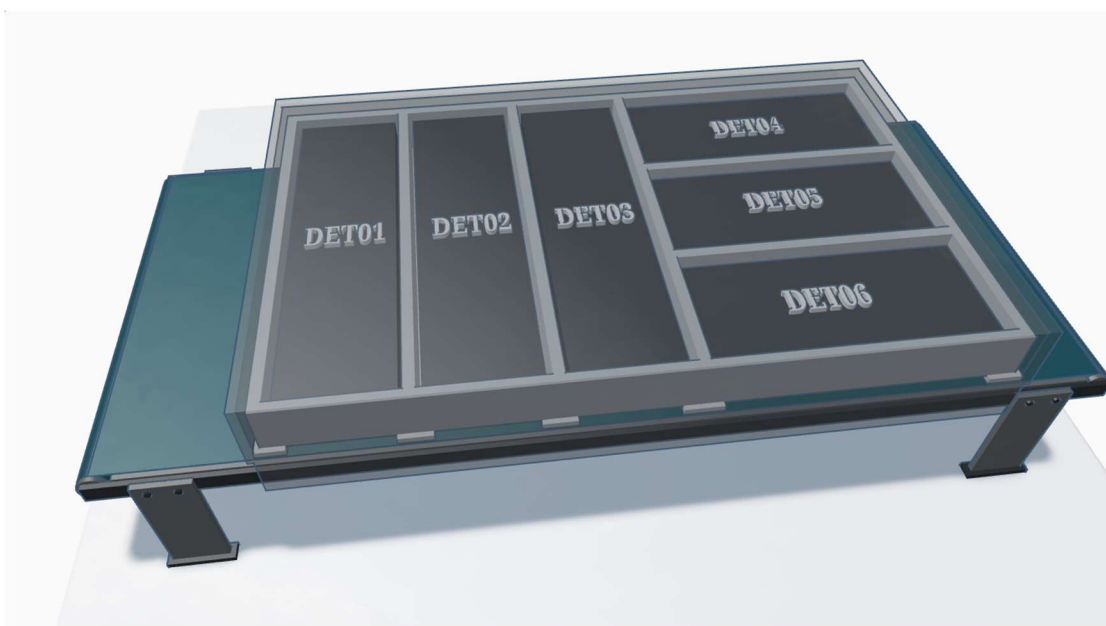


Obrázek 12 Půdorys přístroje na měření kontaminace fólií [20]

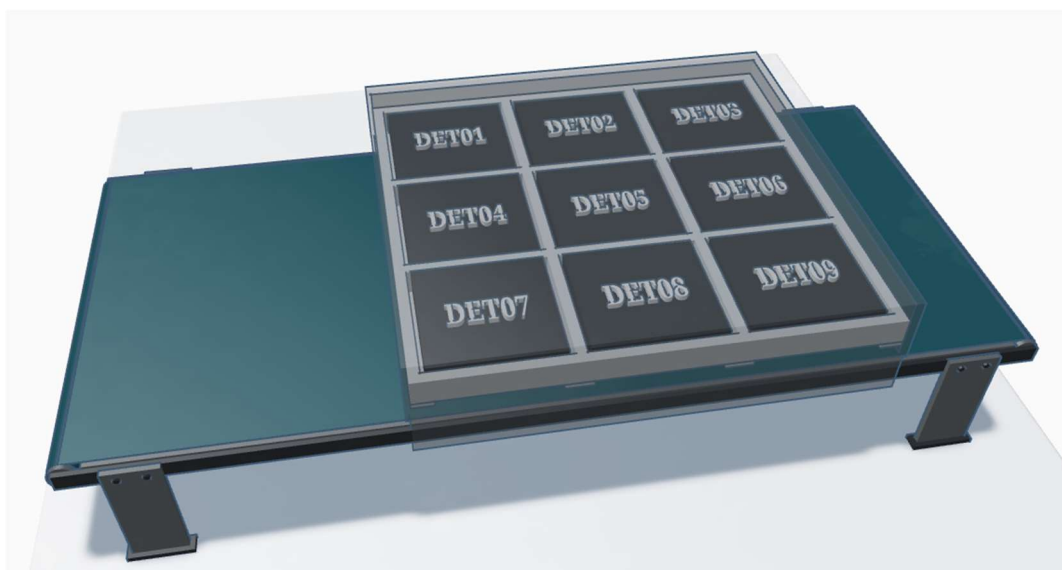


Obrázek 13 Alternativní konfigurace detektorů přístroje [20]

Kromě toho je důležitá diskuse o kalibraci přístroje, která je klíčová pro zajištění přesnosti a spolehlivosti měření, zejména s ohledem na použití plastových scintilátorů. Různé typy scintilátorů a detektorů mohou mít odlišné charakteristiky odezvy, a proto je důležité provést kalibraci specifickou pro použité plastové scintilátory a měřené podmínky, jako je tloušťka fólií a typ záření. Pravidelná opakování kalibrace jsou nezbytná pro zajištění stálé přesnosti měření a detekci případných změn v chování přístroje.



Obrázek 14 3D návrh pomocí programu Tinkercad



Obrázek 15 Alternativní konfigurace pomocí programu Tinkercad

## 8 ANALYTICKÁ METODA VÝPOČTU

V této kapitole bude blíže rozepsána výpočetní metoda, kterou využívá diplomová práce s plastovými scintilátory. Jako vhodná pro výpočty byla vybrána metoda Radiative view factors, též známá jako metoda výměny záření mezi povrchy.

Ta se často používá v oblastech jako je tepelné inženýrství, aerodynamika a astrofyzika a pomáhá při modelování a predikci tepelného chování systémů. Základní principy metody spočívají v určení, jak velká část záření emitovaného jedním povrchem je absorbována nebo odražena jinými povrchy v systému.

I když se může zdát, že tato metoda není přímo zaměřena na práci s plastovými scintilačními detektory a výpočet zachycení gama záření, může být použita pro analýzu a modelování interakcí záření s povrchy detektorů.

### 8.1 Definice faktoru pohledu

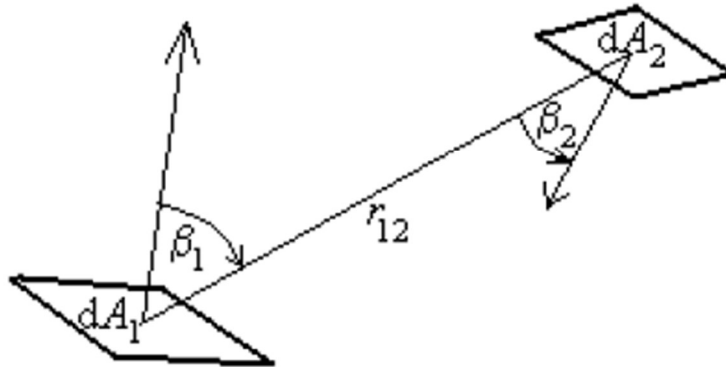
Činitel pohledu  $F_{12}$  je podíl energie vystupující z izotermického, neprůhledného a difúzního povrchu 1 vyzařováním nebo odrazem, která přímo dopadá na povrch 2 a je pohlcena, odražena nebo propouštěna. Faktory závisí pouze na geometrii.

V následujícím textu jsou uvedeny činitele pohledu, které mají analytické vyjádření. Dílčí indexy  $F_{12}$  budeme používat bez oddělovače, ačkoli by bylo možné použít explicitnější verze.

Z výše uvedené definice faktorů pohledu získáme explicitní geometrickou závislost takto. Jsou uvažovány dvě nekonečně malé plošné oblasti  $dA_1$  a  $dA_2$  (obr. 16) v libovolné poloze a orientaci, definované jejich vzdáleností  $r_{12}$  a jejich příslušným sklonem vzhledem ke středové čáře  $\beta_1$  a  $\beta_2$ , přičemž  $0 \leq \beta_1 \leq \pi/2$  a  $0 \leq \beta_2 \leq \pi/2$ , takže se vzájemně vidí.

Výraz pro  $dF_{12}$  (byl použit diferenciální symbol „d“, aby odpovídal nekonečně velkým řádům, protože část záření z povrchu 1, která dosáhne povrchu 2, je úměrná  $dA_2$ ), z hlediska těchto geometrických parametrů je následující. Výkon záření zachyceného povrchem  $dA_2$  přicházejícího přímo z difúzního povrchu  $dA_1$  je součinem jeho zářivosti  $L_1 = M_1 / \pi$ , krát jeho kolmá plocha  $dA_{1\perp}$ , krát tělesový úhel svíraný  $dA_2$ ,  $d\Omega_{12}$ :  $d^2\Phi_{12} = L_1 dA_{1\perp} d\Omega_{12} = L_1 (dA_1 \cos(\beta_1)) dA_2 \cos(\beta_2) / r_{12}^2$ . Z toho vyplývá, že : [22]

$$\begin{aligned} F dF_{12} &= \frac{d^2\Phi_{12}}{M_1 dA_1} = \frac{L_1 d\Omega_{12} dA_1 \cos(\beta_1)}{M_1 dA_1} = \frac{\cos(\beta_1)}{\pi} d\Omega_{12} \\ &= \frac{\cos(\beta_1)}{\pi} \frac{dA_2 \cos(\beta_2)}{r_{12}^2} \\ &= \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi r_{12}^2} dA_2 \end{aligned} \quad (1)$$



Obrázek 16 Geometrie pro definici faktorů pohledu [22]

Pokud jsou zapojeny konečné plochy, výpočet faktorů pohledu se stává pouze problémem matematické integrace (nikoliv triviálním, kromě jednoduchých příkladů). Za zmínku stojí povšimnutí, že činitel pohledu z políčka  $dA_1$  na konečnou plochu  $A_2$  je pouze součtem elementárních členů, zatímco pro konečný zdroj  $A_1$  je celkový činitel pohledu, který je zlomkem, průměrem elementárních členů, tj. činitel pohledu mezi konečnými plochami  $A_1$  a  $A_2$  je: [22]

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \left( \int_{A_2} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi r_{12}^2} dA_2 \right) dA_1 \quad (2)$$

Vyzařující povrch (obecně vycházející) musí být izotermický, neprůhledný a lambertovský (dokonalý difuzor pro vyzařování a odraz), a aby bylo možné použít algebru činitele viditelnosti, musí být všechny povrchy izotermické, neprůhledné a lambertovské. Nakonec si všimněme, že  $F_{12}$  je úměrný  $A_2$ , ale ne  $A_1$ . [22]

## 8.2 Algebra faktorů pohledu

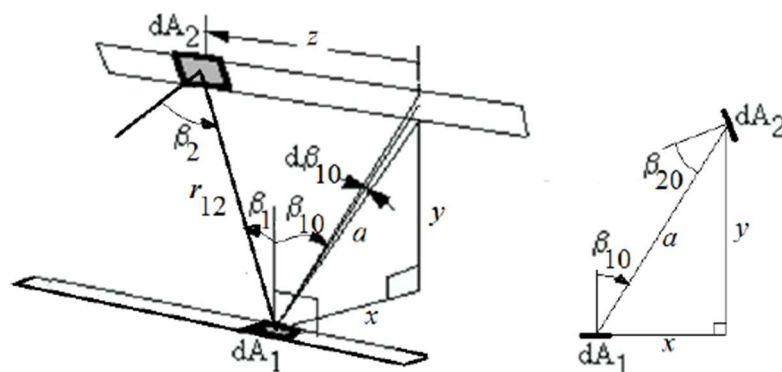
Při zohlednění všech povrchů viditelných z daného povrchu (necht' uzavření má  $N$  různých povrchů, všechny neprůhledné, izotermické a difúzní) lze stanovit několik obecných vztahů mezi  $N^2$  možnými faktory pohledu  $F_{ij}$ , které se nazývají jako algebra faktorů pohledu:

- Vázání. Faktory pohledu jsou podle definice omezeny na  $0 \leq F_{ij} \leq 1$  (faktor pohledu  $F_{ij}$  je podíl energie vystupující z povrchu  $i$ , který dopadá na povrch  $j$ ).
- Blížkost. Součet všech faktorů pohledu z daného povrchu v uzavření, včetně možného faktoru samo pohledu pro konkávní povrchy,  $\sum_j F_{ij} = 1$ , protože stejné množství záření emitované povrchem musí být absorbováno.
- Reciprocita. Z výše uvedené rovnice vyplývá, že  $dA_i dF_{ij} = dA_j dF_{ji} = \left( \cos \beta_1 \cos \beta_j / (\pi r_{ij}^2) \right) dA_1 dA_j$  je odvozen, že  $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ .
- Rozložení. Když jsou současně zvažovány dva cílové povrchy ( $j$  a  $k$ ),  $F_{i,j+k} = F_{ij} + F_{ik}$ , odpovídá na základě aditivnosti ploch.
- Kompozice. Na základě reciprocity a rozložení, když jsou dvě zdrojové oblasti zvažovány současně,  $F_i = (A_i F_{ik} + A_j F_{jk}) / (A_i + A_j)$ . [22]

## 8.3 Metody aplikace výpočtů faktorů

V této části jsou uvedeny vztahy a metody pro aplikaci faktorů pohledu v konkrétních geometrických uspořádáních, jako jsou výpočty faktorů pohledu mezi nekonečnými pásy, ve tvaru trojúhelníkového uzavření a mezi dlouhými válcovými pásy. Tyto různé metody přesněji určují faktory pohledu a usnadňují porozumění aplikacím v různých situacích. [22]

### 8.3.1 Faktory pohledu s dvojrozměrnými objekty



Obrázek 17 Geometrie pro faktor pohledu mezi dvěma poličky v paralelních pásách a) 3D náčrt b) pohled z profilu [22]

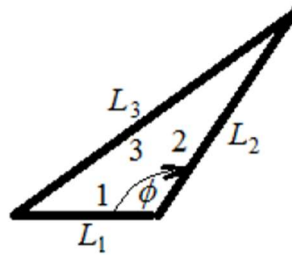
Vyjádření pomocí 2D parametrů zobrazených na obr. 17 b) ze vztahu 1: [22]

$$\begin{aligned} dF_{12} &= \frac{\cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi r_{12}^2} dA_2 = \frac{a^2 \cos(\beta_{10}) \cos(\beta_{20})}{\pi r_{12}^4} dA_2 \\ &= \frac{a^2 \cos(\beta_{10}) \cos(\beta_{20})}{\pi(a^2 + z^2)} dA_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Vyjádření faktorů pohledu z políčka  $dA_1$  na celý pás od  $z = -\infty$  do  $z = +\infty$ , čehož dosáhneme integrací předchozího vztahu: [22]

$$\begin{aligned} d^2F_{12} &= \frac{a^2 \cos(\beta_{10}) \cos(\beta_{20})}{\pi(a^2 + z^2)} dw dz \Rightarrow dF_{12} \int_{-\infty}^{\infty} d^2F_{12} dz \\ &= \frac{\cos(\beta_{10}) \cos(\beta_{20})}{2a} dw = \frac{\cos(\beta_{10})}{2} d\beta_{10} \end{aligned} \quad (4)$$

### 8.3.2 Faktory pohledu s uzavřením do trojúhelníku

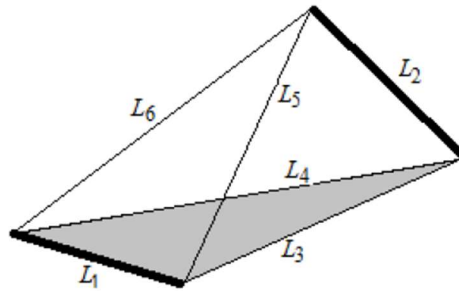


Obrázek 18 Geometrie pro faktor pohledu s uzavřením do trojúhelníku [22]

Výpočet pomocí aplikace algebry faktorů pohledu  $\sum_j F_{ij} = 1$  s vynásobením jejich ploch ( $L_1, L_2, L_3$ ) a s využitím vztahu pro reciprocitu  $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ : [22]

$$\begin{aligned} 0 + F_{12} + F_{13} &= 1 \rightarrow L_1 F_{12} + L_1 F_{13} = L_1 \\ 0 + F_{12} + F_{13} &= 1 \rightarrow L_1 F_{12} + L_1 F_{13} = L_1 \\ 0 + F_{12} + F_{13} &= 1 \rightarrow L_1 F_{12} + L_1 F_{13} = L_1 \\ (5 + 6 - 7) &= 2L_1 F_{12} = L_1 + L_2 - L_3 = F_{12} = \frac{L_1 + L_2 - L_3}{2L_1} \end{aligned} \quad (5)$$

### 8.3.3 Metoda zkřížených strun



Obrázek 19 Náčrt použitý k odvození  $F_{12}$  v obecném případě dvou nekonečně dlouhých pásů [22]

Rozšířený vztah, z předchozí metody uzavřeného trojúhelníku: [22]

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{L_4 + L_5 - L_3 - L_6}{2L_1} \\ &= \frac{\Sigma \text{zkřížené struny} - \Sigma \text{nezkřížené struny}}{2 \cdot (\text{zdrojová struna})} \end{aligned} \quad (6)$$

### 8.3.4 Metoda jednotkové koule a metoda hemicube

Tato metoda je vhodná pro výpočet faktoru zobrazení z nekonečně malé plochy  $dA_1$  na plochu s konečnými rozměry  $A_2$ . [22]

#### Metoda jednotkové koule

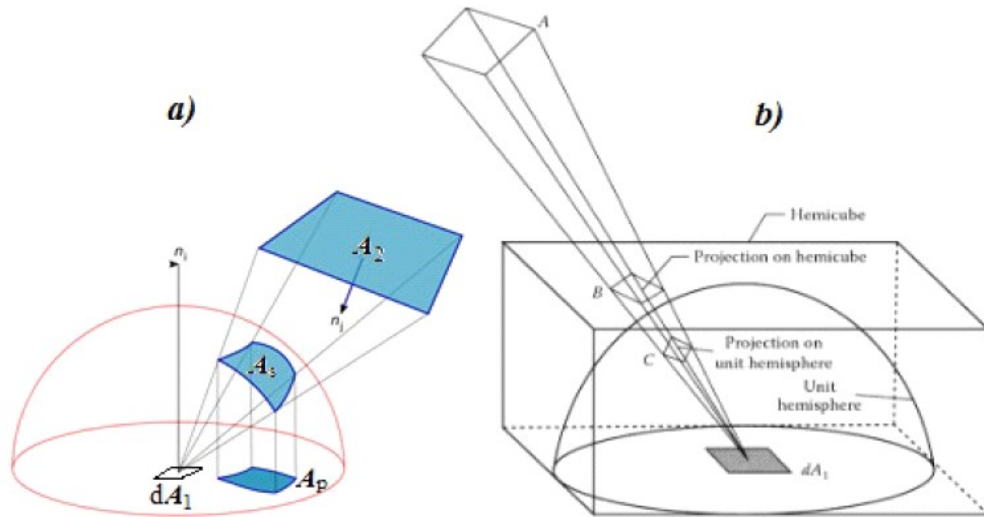
Při této metodě se hledá kuželový průmět  $A_2$  na kouli o libovolném poloměru  $r$  se středem  $dA_1$ . Tento kuželový průmět je poté promítnut na základní rovinu  $dA_1$ . Faktor zobrazení  $F_{12}$  je podíl kružnice, která zabírá tato projekce na rovině  $dA_1$ , tedy: [22]

$$F_{12} = A_p / \pi r^2 \quad (7)$$



### Metoda hemicube

Tato metoda využívá mezilehlý šestistěn nebo krychli se středem  $dA_1$ , což umožňuje zjednodušení výpočtu. Polokoule nad  $dA_1$  je rozdělena na  $2\pi$  steradiánů, což odpovídá obsahu vepsané kružnice jednotkové kouli. Každý plošný prvek hemicube reprezentuje určitý úhel pohledu  $dA_1$  na  $A_2$ , a tím umožňuje výpočet faktoru zobrazení. [22]



Obrázek 20 a) Metoda jednotkové koule a b) srovnání s metodou hemicube [22]

## 8.4 Konfigurační faktory pro výpočet práce s plastovými scintilátory

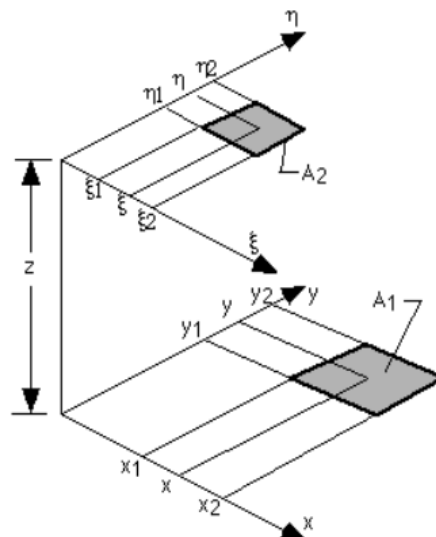
Základní definující rovnice (1), (2) a (3) nejsou pro danou geometrii nejvhodnější. Pro účely výpočtu je žádoucí mít algebraický vztah nebo grafické či numerické výsledky, které spojují konfigurační faktor se souborem jednoduchých parametrů popisujících danou geometrii. Poskytnutí takových vztahů je hlavním cílem katalogu, ze kterého čerpá tato diplomová práce. [23]

Katalog, podle kterého se vybíral vhodný výpočet záchytu gama záření scintilačním detektorem, je rozdělen do tří částí. Oddíl A obsahuje faktory mezi diferenciálními prvky tvaru dFd1-d2, oddíl B obsahuje faktory z diferenciální oblasti do konečné oblasti, Fd1-2 a oddíl C poskytuje faktory mezi konečnými oblastmi, F<sub>1-2</sub>.

Z katalogu byly vybrány konfigurace z oddílu C, které nejvíce odpovídaly geometrickým vlastnostem detektorů, zdrojům záření a chování detekce při pohybu zdroje.

Jelikož byly z firmy Nuvia a.s. vypůjčeny detektory válcového a kvádrového tvaru, nejbližší konfigurace pro kvádrový typ byla vybrána konfigurace C-13. Ta je dále vhodná pro simulaci pohybu na pásovém dopravníku, který byl navržen v kapitole 7 a podle kterého bude konstruována laboratorní úloha, a pro simulaci záchytu záření na vzdálenosti od zdroje.

Všechny výpočty byly prováděny v softwaru MATLAB R2023b, který umožňuje úpravy vstupních parametrů grafickou vizualizací procentuálního zachycení záření při změnách vzdálenosti nebo polohy zdroje vůči detektoru a poskytuje informace o efektivitě detektoru. [23]



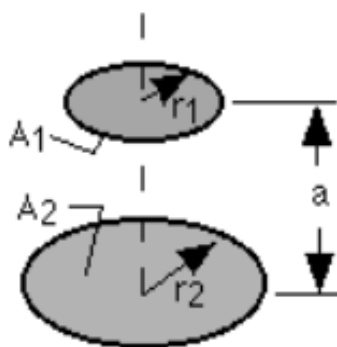
Obrázek 21 Konfigurace C-13, obdélník proti obdélníku [23]

Rovnice pro výpočet F12 z konfigurace C-13: [23]

$$F_{12} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_i, \eta_k, \xi_l) \quad (8)$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left\{ (y - \eta) [(x - \xi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{[(x - \xi)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \right. \\ + (x - \xi) [(y - \eta)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{[(y - \eta)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \\ \left. - \frac{z^2}{2} \ln[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2] \right\} \quad (9)$$

Pro válcový detektor byla vybrána konfigurace C-41, disk na paralelní disk s různými poloměry, který sice neumožňuje simulaci pohybu, jelikož disky musí mít vycentrovaný střed, ale umožňuje simulaci zachycení záření na různých vzdálenostech od zdroje záření. [23]



Obrázek 22 Konfigurace C-41, disk na paralelní disk o rozdílném poloměru [23]

Rovnice, podle které se stanoví výpočet  $F_{12}$  z konfigurace C-41: [23]

$$R = \frac{r}{a} \quad (10)$$

$$X = 1 + \frac{(1 + R_2^2)}{R_1^2} \quad (11)$$

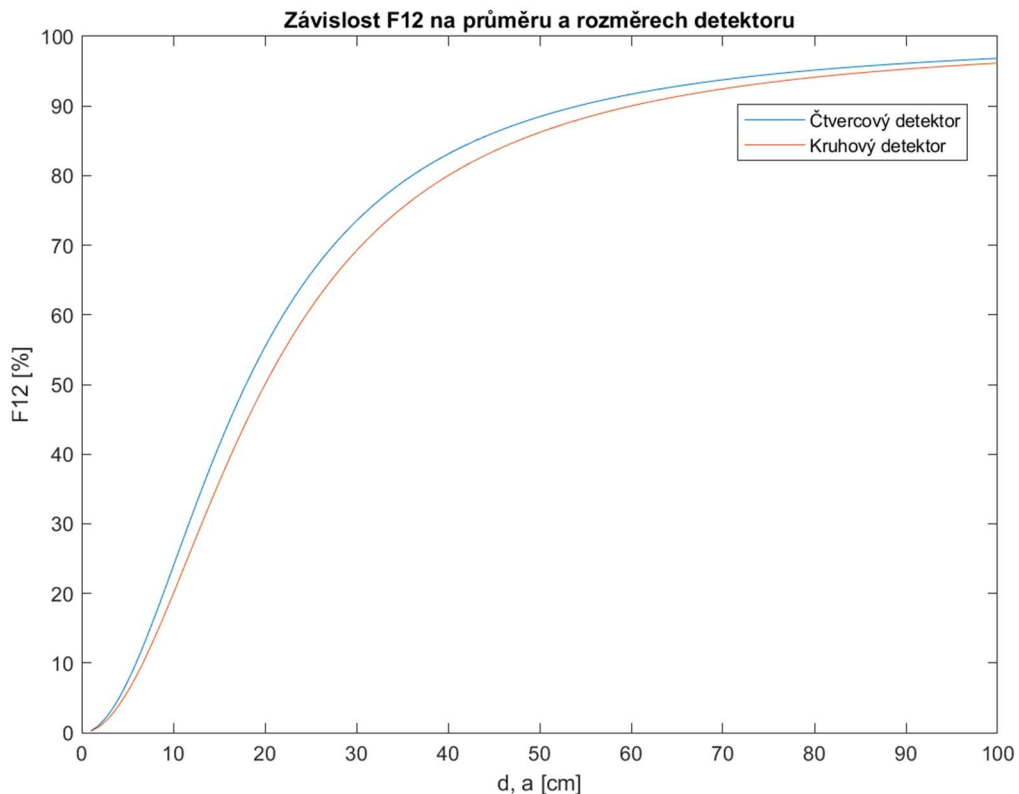
$$F_{12} = \frac{1}{2} \left\{ X - \left[ X^2 - 4 \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (12)$$

## 8.5 Výsledky konfiguračních faktorů z programu MATLAB

Cílem analýzy pomocí metody konfiguračních faktorů bylo navrhnout nejefektivnější rozvržení detektorů za účelem lépe porozumět významu rozměrů, vzdálenosti a geometrie detektorů v kontextu práce s gama zdroji. V této části budou prezentovány závislosti faktorů pohledu (F12), což je míra účinnosti záchytu záření z gama zdroje v závislosti na změnách vzdálenosti, pohybu a rozměrech detektoru vzhledem ke zdroji záření. V této kapitole budou uvedeny pouze obecné výsledky. Konkrétní parametry zdrojů, detektorů a podrobnější analýza faktorů budou uvedeny v následujících kapitolách práce.

Výsledky analýzy budou založeny na práci s typem planárních detektorů, které měří geometrii v  $2\pi$  úhlu (plný prostorový úhel  $360^\circ$  vyjádřený v radiánech představuje  $4\pi$ , jeho polovina  $180^\circ$  pak  $2\pi$ ). Z grafů vyplývá, že při dosažení 100 % záchytu je celková detekční účinnost pouze 50 %. Tato zjištění jsou klíčová pro optimalizaci návrhu detektorů pro účinnou detekci gama záření. [16]

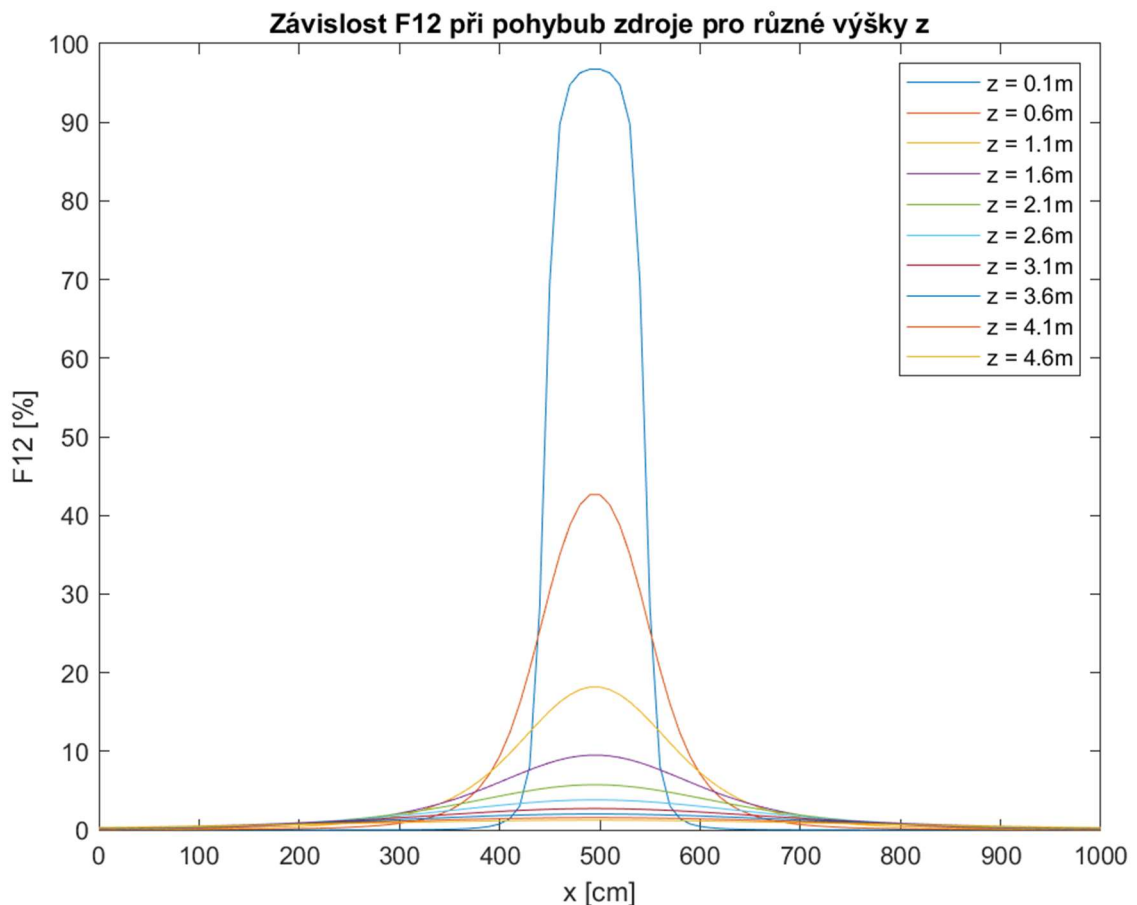
Jako první závislost (obr. 23) byla pomocí analytické metody a programu MATLAB vytvořena závislost faktorů pohledu na velikosti detektorů při stejných rozměrech zdroje a stálé vzdálenosti od zdroje záření. Byly stanoveny dvě křivky: jedna pro čtvercový detektor s použitím konfigurace C-13 a druhá pro kruhový detektor s konfigurací C-41. [24]



Obrázek 23 Závislost F12 na rozměrech detektoru (d pro kruhový detektor, a pro čtvercový detektor)

Jako stálé hodnoty byla určena vzdálenost 10 cm detektoru od zdroje a rozměry zdroje záření. Pro čtvercový zdroj byla zvolena strana délky 1 cm a pro kruhový zdroj o průměru 1 cm. Závislost jasně ukazuje, že čím větší je detektor ve srovnání se zdrojem záření, tím vyšší procento gama záření detektor zachycuje. To je hlavním důvodem použití detektorů s délkou až například 2 metry.

Jako druhá závislost, znázorněná na obrázku 24, byla vytvořena závislost pohybu zdroje záření po dopravním páse, který byl předmětem návrhu v kapitole 7. Tato závislost se zabývá většími rozměry, které by mohly být v praxi použity, a demonstruje změnu zachycení záření při pohybu a různých vzdálenostech od zdroje záření. Rozměr detektoru je u této závislosti čtverec se stranou 1 metr, zatímco rozměr zdroje činí 10 centimetrů. Pro vytvoření této závislosti byla použita konfigurace C-13, jelikož umožňuje geometrii, ve které není nutné mít vycentrované středy zdroje a detektoru. Závislost ukazuje, jak se mění zachycení záření při použití různých vzdáleností od detektoru, a od vzdálenosti 1 metru je záchyt záření pouze pětinnový. [24]



Obrázek 24 Závislost procentuálního záchytu záření při pohybu zdroje

## 9 SESTAVA A EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Pro ověření analytické metody, která byla představena v předchozí kapitole, byla provedena série laboratorních měření, jež měla za cíl experimentálně potvrdit nebo vyvrátit teoretické předpoklady.

Kapitola o měření se zaměřuje na aplikaci navrženého zařízení, které slouží k určení aktivity kontaminantu a jeho polohy vzhledem k délce a šířce pásového dopravníku. Tento přístroj byl vyvinut s cílem poskytnout spolehlivý nástroj pro analýzu a monitorování znečištění v průmyslových a laboratorních prostředích.

Úvodní část kapitoly představí základní komponenty sestavy a jejich vlastnosti. Následně je představena základní myšlenka zařízení, jeho principy a požadavky na měření. Dále bude následovat popis experimentálního postupu, který byl implementován pro ověření schopnosti zařízení vypočítat aktivitu zdroje kontaminantu a určení jeho polohy v rámci pásového dopravníku.

### 9.1 Popis sestavy pro měření

Pro experimentální měření byl zapůjčen pásový dopravník (viz obr. 25) se stejnosměrným motorem od SPŠ v Třebíči, na který byly upevněny nosné konstrukce pro plastové scintilační detektory poskytnuté firmou Nuvia a.s.

Z důvodu ověření geometrických vlastností byly použity plastové scintilační detektory dvou typů (viz obrázek 23). První typ je válcový s průměrem detektoru 9 cm a výškou 15 cm. Druhý typ je kvádrový s rozměry 10 x 5 x 20 cm (D x Š x V). Scintilátory se skládají ze směsi luminoforů rozpuštěných v polymerní matici potažených světlotěsnou fólií a doplněné o fotonásobič, na který je možné připojit digitální multikanálový analyzátor. [25]



Obrázek 25 Vypůjčené detektory z Nuvia a.s., pro laboratorní měření, vlevo válcový typ, vpravo kvádrový typ

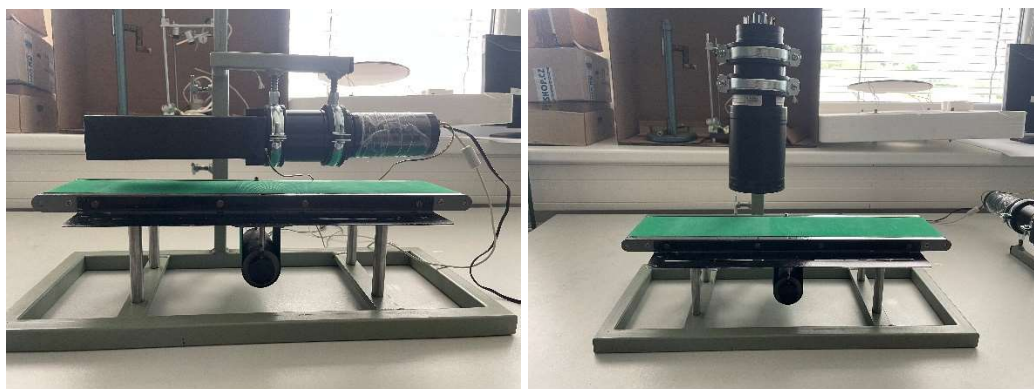
MCB digitální multikanálový analyzátor zobrazený na obrázku 26 je základní jednotkou MCA pro zpracování signálů, kterou lze přímo připojit k detektorům vybaveným 14pinovou, 10stupňovou fotomultiplikační trubicí. Analyzátor umožňuje zobrazení energických spekter fotonového záření detekovaného nejběžnějšími typy scintilačních detektorů, jako jsou NaI(Tl), LaBr<sub>3</sub>(Ce), plastové materiály a další. MCB zahrnuje zásuvku pro 14pinovou PMT, předzesilovač, zdroj vysokého napětí a jednotku řízení. MCB lze připojit k místní síti pomocí rozhraní Ethernet nebo k počítači pomocí rozhraní USB. [25]



Obrázek 26 Digitální analyzátor model MCB [26]

Software GAMWIN je určený pro komplexní analýzu a vyhodnocení dat získaných ze scintilačních detektorů. Je navržen pro operační systémy Windows a obsahuje funkce pro identifikaci a kvantifikaci nuklidů, vyhledávání a určování píků, přizpůsobení píků a odečítání pozadí. [25]

Tento software bude využíván pro spektrometrické vlastnosti detektorů (pouze Comptonovo kontinuum) a především pro měření impulzů ze zdrojů záření.



Obrázek 27 Pásový dopravník s konstrukcí pro uchycení detektoru kvádrového typu (vlevo) a válcového typu (vpravo)



## 9.2 Zdroje záření a výpočet aktivity

Jako zdroje gama záření jsou použity etalony pro kontrolu a kalibraci spektrometrů záření gama typu EG od Českého metrologického institutu. Celkem bylo k měření použito 6 etalonů z ČMI a jeden zářič  $^{241}\text{Am}$  o aktivitě 30kBq.

Protože některé použité zdroje jsou z nuklidů s krátkým poločasem rozpadu například  $^{134}\text{Cs}$ , bylo nutné pro použití měření tyto aktivity přepočítat na aktivitu aktuální.

Pro výpočet aktivity k datu 30. 04. 2024 byly použity tyto vzorce pro zákon radioaktivního rozpadu: [27]

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| \approx \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \quad (13)$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (14)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (15)$$

$N$  je počet jader ve vzorku,  $N_0$  je výchozí počet jader ve vzorku,  $\lambda$  je rozpadová konstanta a  $t$  je čas.  $T_{1/2}$  je poločas rozpadu, který charakterizuje příslušný izotop. Spojením těchto vztahů lze získat vztah charakterizující časový vývoj aktivity vzorku:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (16)$$

$A$  je současná aktivita,  $A_0$  je aktivita v čase  $t=0$ . [27]

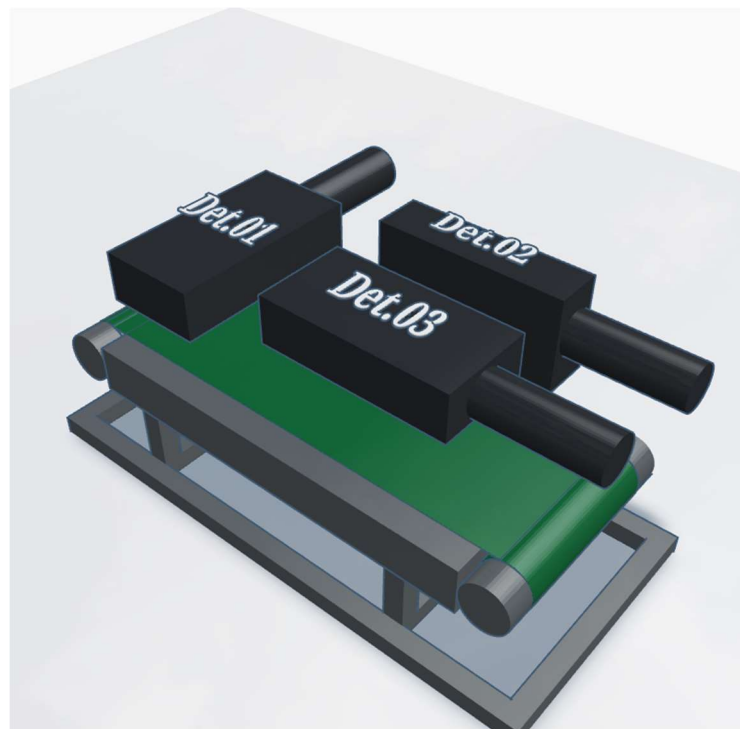
Pro samotný výpočet byl využit výpočetní program Matlab, výsledky a počáteční hodnoty z programu jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Tabulka hodnot pro výpočet aktivity ke dni 30. 04. 2024

Etalon/zářič	$N_0$ (kBq)	$t_0$ (dd.mm.rrrr)	$T_{1/2}$ (rok)	$N$ (kBq)
$^{241}\text{Am}$ (1)	467	01.02.2015	432,6	460,1285
$^{137}\text{Cs}$ (2)	307	30.12.2018	30	253,503
$^{134}\text{Cs}$	300,4	01.02.2015	2,0648	13,3972
$^{60}\text{Co}$ (2)	231,5	30.12.2018	5,2713	114,791
$^{241}\text{Am}$ (2)	30	14.07.2009	432,6	29,2965
$^{137}\text{Cs}$ (1)	16,63	01.02.2015	30	13,4483
$^{60}\text{Co}$ (1)	11,48	01.02.2015	5,2713	3,3881

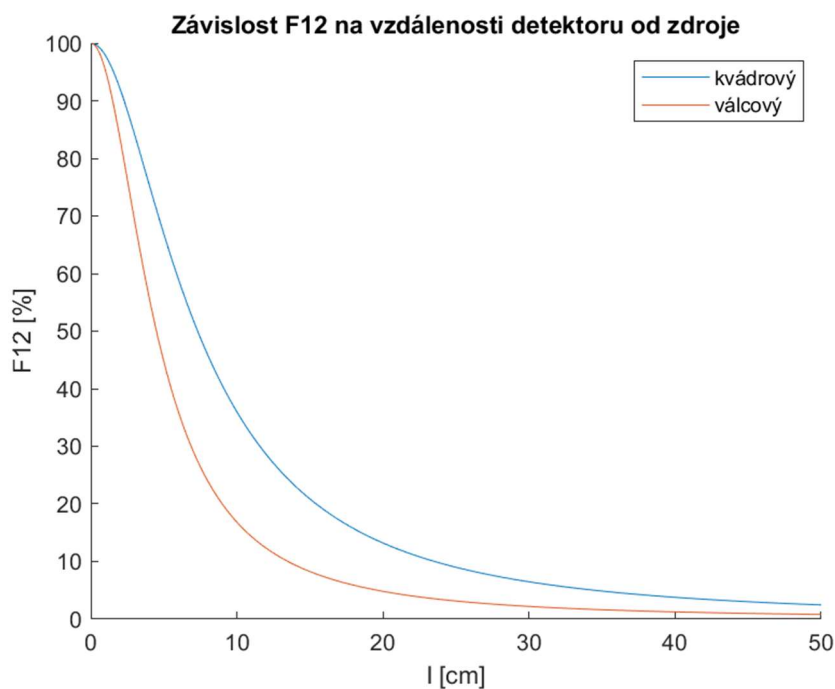
### 9.3 Popis měření a výsledky

Základní myšlenkou zařízení navrženého pro charakterizaci a recyklaci plastového radioaktivního odpadu je minimalizovat ztráty plastové fólie, která by jinak byla klasifikována jako nízkoaktivní až středněaktivní odpad. Tohoto cíle je dosaženo identifikací aktivity kontaminantu v plastové fólii a následným přesným určením jeho polohy. Pro tento účel byla vyvinuta konfigurace tří detektorů, jak je znázorněno na obrázku 28. Tímto způsobem by se výrazně snížil objem plastových odpadů a byla by možnost nakládat s fólií jako s komunálním odpadem nebo ji znovu použít. Pro jednodušší pochopení a představu byla sestava vykreslena ve 3D programu Tinkercad. [21]



Obrázek 28 3D konfigurace sestavy pro laboratorní měření v programu Tinkercad

V navržené sestavě byly zvoleny kvádrové detektory kvůli jejich vyšší účinnosti v zachycení záření ve stejné vzdálenosti od zdroje. Pro výpočet byla použita metoda faktorů pohledu, která byla popsána v předchozí kapitole. Graf procentuálního zachycení v závislosti na vzdálenosti je uveden na obrázku 29. Graf ukazuje, že kvádrový detektor dosahuje efektivnějších výsledků díky své větší detekční ploše. Má totiž plochu detekce  $200 \text{ cm}^2$ , což je více než plocha detektoru válcového  $127,234 \text{ cm}^2$ . [24]



Obrázek 29 Závislost F12 na vzdálenosti detektoru od zdroje se skutečnými rozměry

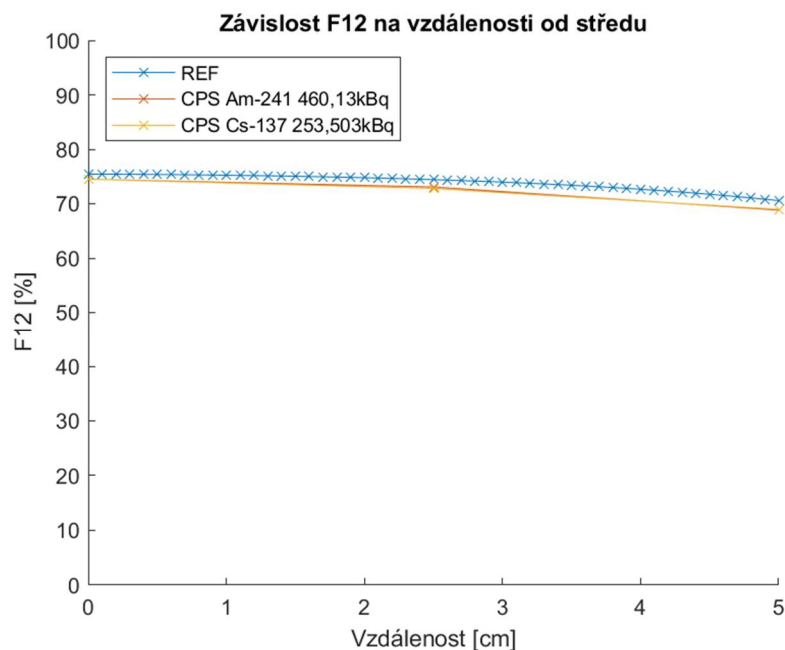
### 9.3.1 Princip detektoru 1

Detektor 1 v sestavě je umístěn v přední části návrhu ve vzdálenosti mezi 4 až 8 centimetry od povrchu pásu. První mezní hodnota je určena nedostatečnou spolehlivostí analytické metody v rozmezí od 0–4 centimetrů, zatímco druhá mezní hodnota souvisí s nižší rozlišitelností kontaminantů nízkých aktivit.

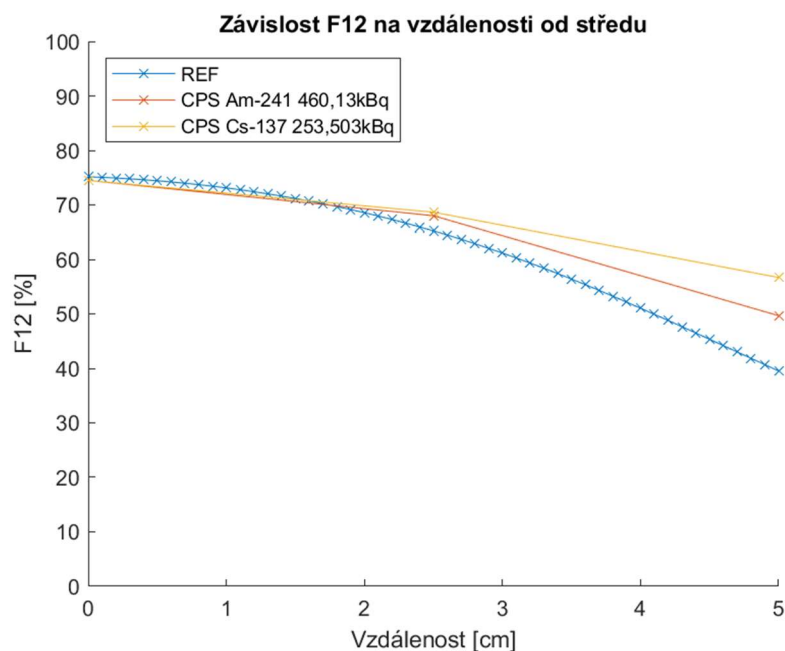
Hlavním účelem detektoru je identifikace a výpočet aktivity vzorku. V praxi při pohybu kontaminantu se tato aktivita stanoví z impulzů za sekundu pomocí rovnice křivky, která byla stanovena z laboratorního měření etalonů a zářiče. Závislost byla určena pro vzdálenost 6 centimetrů od dopravního pásu při šedesátisekundovém měření vzorku, s odečteným pozadím, které bylo měřeno po dobu 5 minut každých 30 minut. Dalším účelem detektoru je předávat informace o hodnotě aktivity v dané vzdálenosti detektoru 2, což je zásadní pro správnou funkci detektoru 2.

Detektor 1 je klíčový pro výpočet aktivity zdrojů, což zdůvodňuje jeho nutnost v sestavě, na rozdíl od možnosti použití pouze dvou detektorů, kde by za identifikaci aktivity mohl sloužit detektor 3. Tento důvod je podložen analýzou závislostí obr. 30 a obr. 31, které ukazují, že záchyt záření klesá při umístění vzorku od středu detektoru, kde je jeho účinnost nejvyšší. Na závislosti obr. 31 je patrné, že naměřené hodnoty klesají až k 50 %, zatímco na závislosti obr. 30 zůstávají hodnoty téměř konstantně na 75 %. [24]

V případě natočení detektoru, jak je znázorněno v závislosti obr. 31, by výskyt kontaminantu u hrany pásu vyvolal rozdíl oproti skutečné aktivitě až 25 %, což by vedlo k zvýšení chyby výpočtu aktivity. [24]

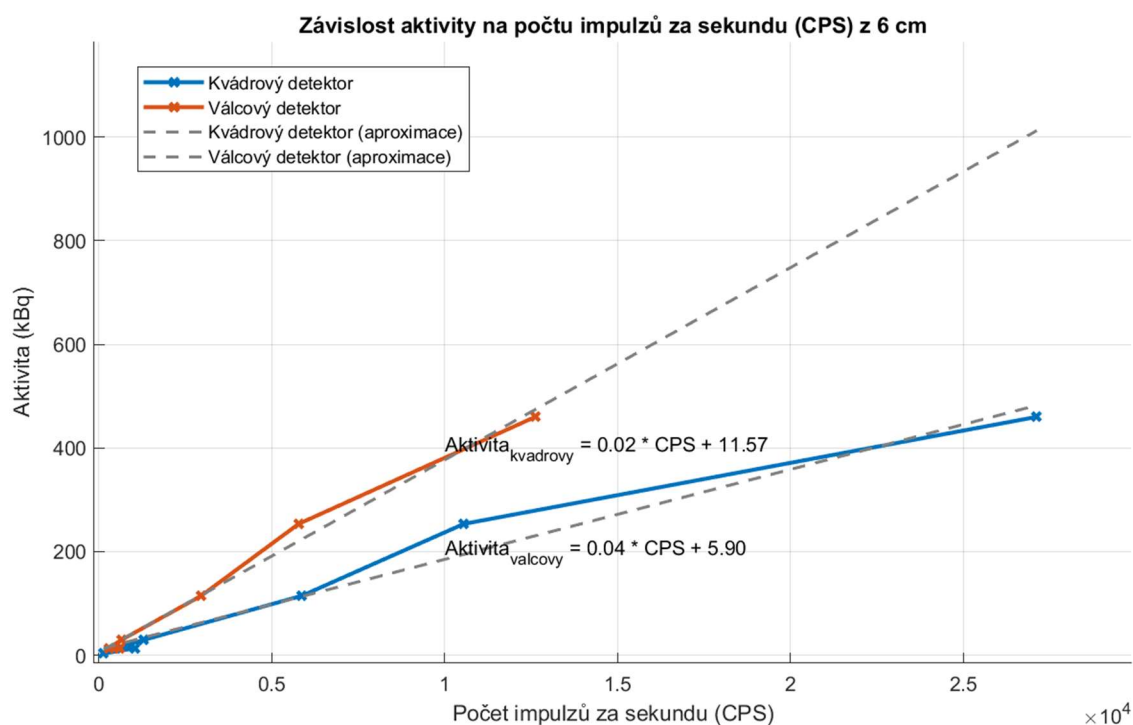


Obrázek 30 Závislost F12 na vzdálenosti od středu detektoru při natočení detektoru 1 v sestavě jako na obr. 28, vzdálenost od pásu 4 cm



Obrázek 31 Závislost F12 na vzdálenosti od středu detektoru při natočení detektoru 1 stejně jako detektor 3, vzdálenost od pásu 4 cm

Na obrázku 32 jsou znázorněny naměřené hodnoty a vepsaná aproximace křivky z dat pro kvádrový detektor se srovnáním s válcovým detektorem. Ze závislosti dat je patrné, že u nízkých aktivit je určitá nelinearita, která může být zapříčiněna fluktuací pozadí při měření. Odchylka u  $^{137}\text{Cs}$  (2) může být zapříčiněna několika různými faktory, jako je chyba měření například nesprávným nastavením detektoru, kontaminací, špatnou aproximací křivky anebo interakcí záření s detektorem. [24]



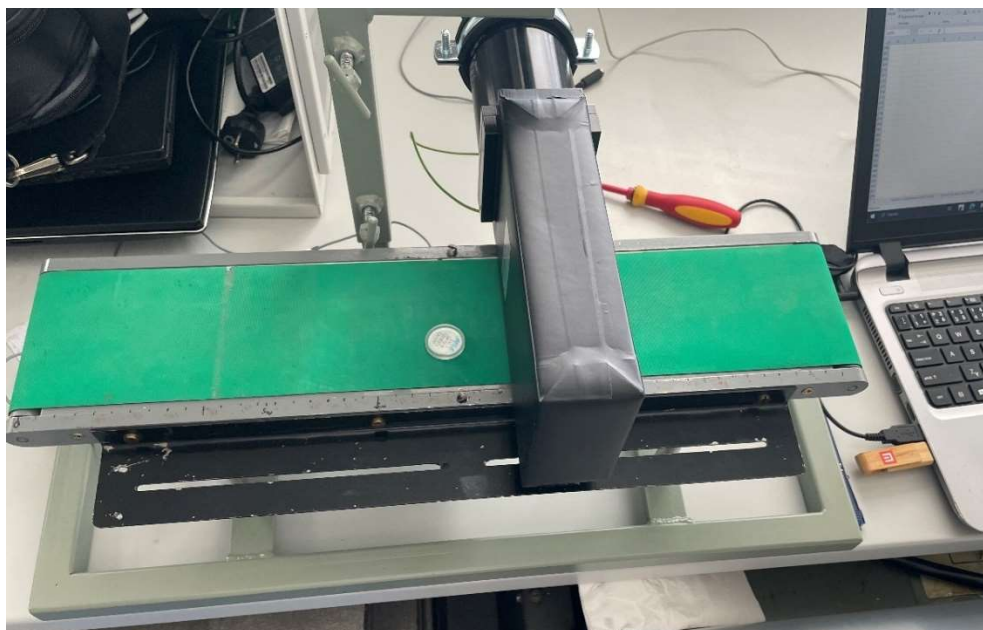
Obrázek 32 Závislost F12 na vzdálenosti detektoru od zdroje se skutečnými rozměry

Pro konkrétní identifikaci chyby je důležité provést další analýzy a zhodnotit uvedené faktory. I přes zmíněné chyby z měření závislost dokazuje, že plastové scintilátory v této konfiguraci mohou identifikovat a vyhodnotit aktivitu zdroje z počtu impulzů.

### 9.3.2 Princip detektoru 2

Detektor 2 je viditelný na obrázku 33. Na rozdíl od detektoru 3 je umístěn užší stranou směrem k pásu, což zajišťuje větší detekční plochu a citlivější snímání vzdálenosti zdroje od detektoru.

Účelem tohoto detektoru je vyhodnocovat informace poskytované detektorem 1 a stanovit, jak daleko je zdroj záření od detektoru. Tyto hodnoty byly určeny pomocí měření vzdálenosti od detektoru v rozsahu od 2 do 20 centimetrů při 60sekundovém měření. Pozadí bylo opětovně měřeno každých 30 minut po 5minutových intervalech a následně bylo odečteno od naměřených hodnot.



Obrázek 33 Měření konfigurace detektoru 2 (varianta 2)

Pro detektor 2 byly vytvořeny tři různé konfigurace s cílem zlepšit spolehlivost při vyhodnocování vzdálenosti zdroje záření.

První varianta využívala kvádrový detektor, jehož střed byl zarovnán s pásem dopravního pásu, což usnadnilo provedené výpočty. V této variantě byla použita stejná křivka zachycení záření jako u detektoru 1.

Druhá varianta pracovala s posunutým detektorem, takže hrana kvádrového detektoru byla zarovnána s pásem dopravníku. Pro výpočet této varianty bylo nutné přepočítat informace z detektoru 1 pomocí určitého koeficientu, který by odpovídal křivce zachycení záření v dané vzdálenosti, protože počet impulzů byl ve stejné vzdálenosti nižší než u varianty 1.

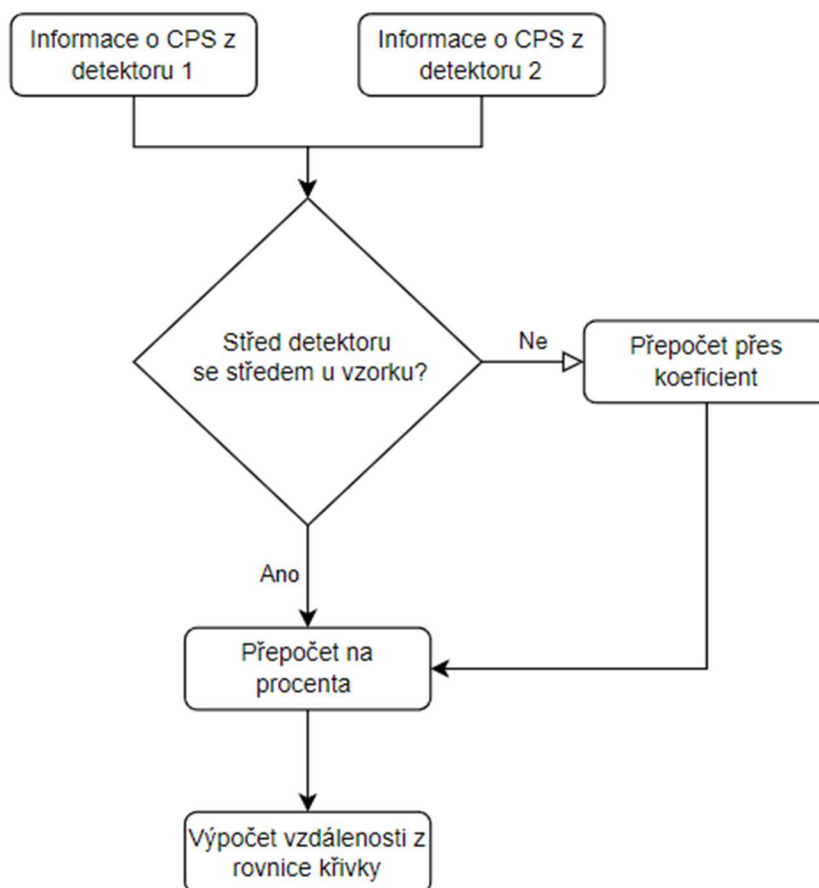
Poslední varianta spočívala v použití válcového typu detektoru místo kvádrového. I zde bylo nutné přepočítat hodnoty z detektoru 1 pomocí koeficientu, aby odpovídaly křivce pro válcový detektor.

Na obrázku 34 je zobrazen vývojový diagram, který pomáhá lépe porozumět výpočtu vzdálenosti od detektoru pomocí těchto různých konfigurací. [28]

Příklad výpočtu koeficientu pro variantu 2 u vzorku  $^{241}\text{Am}$  z 5 cm:

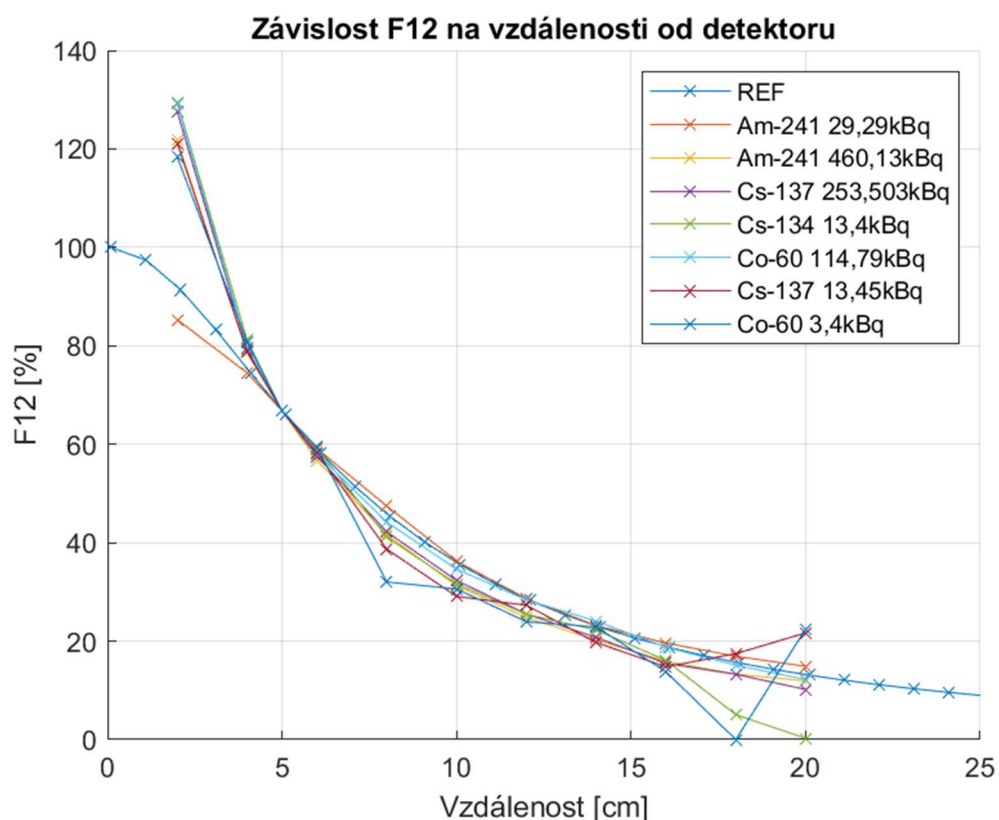
$$k_{Var2} = \frac{CPS_{Am-241\_Var2} - CPS_{pozadí\_Var2}}{CPS_{Am-2\_Var1} - CPS_{pozadí\_Var1}} \quad (9.1)$$

$$= \frac{20246,5 - 717,587}{32644,18 - 745,8} = 0,612$$



Obrázek 34 Zjednodušený vývojový diagram výpočtu vzdálenosti od detektoru 2 pomocí programu draw.io

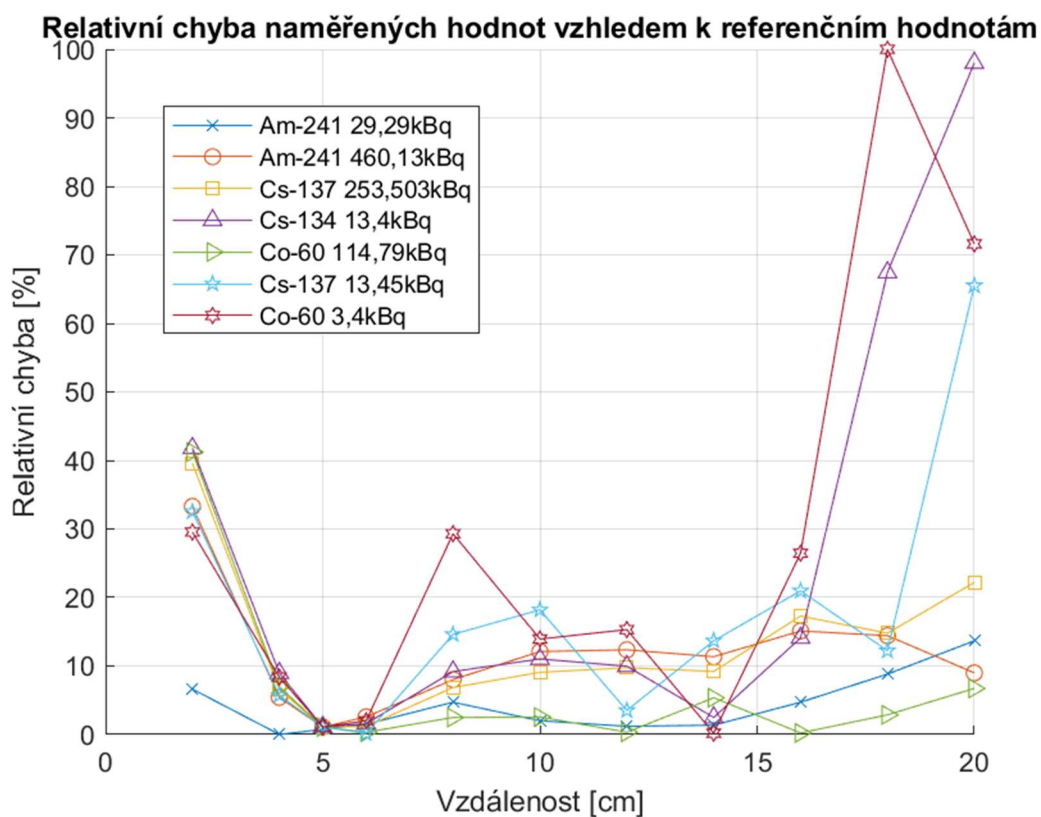
Určení závislosti mezi pravděpodobností zachycení záření a vzdáleností od detektoru, jak je znázorněno na obrázku 35, bylo komplikováno nejistými výsledky získanými z analytické metody (označené jako REF) ve srovnání s výsledky naměřenými. Z tohoto důvodu byla jako referenční hodnota zvolena hodnota získaná analytickou metodou při vzdálenosti 5 cm od detektoru. Pro kvádrový detektor to odpovídá 66,845 % zachycení záření a pro válcový detektor 44,664 %. Tento krok umožnil stanovit analytickou metodu jako referenční až od vzdálenosti 5 cm, což pomáhá minimalizovat relativní chybu. V důsledku toho překračují naměřené hodnoty hladinu 100 %.



Obrázek 35 Závislost F12 na vzdálenosti detektoru (varianta 1)

Přestože byly provedeny jisté úpravy referenčních hodnot, u varianty 1 stále relativní chyba mezi 5 až 20 cm dosahuje až 100 % zejména u zdrojů s nízkou aktivitou (v řádech do 15 kBq), což může být způsobeno fluktuací pozadí. V případě zdrojů s aktivitou nad 30 kBq se s výjimkou posledního měření vzorku  $^{241}\text{Am}$  pohybuje relativní chyba kolem 20 %. U zářiče  $^{241}\text{Am}$  o aktivitě 30 kBq byly naměřené hodnoty jako jediného vzorku vyhodnoceny jako menší než hodnoty získané analytickou metodou. Toto je pravděpodobně způsobeno konstrukcí zářiče, zejména odstíněním velké části vzorku v něm. Závislost relativní chyby na vzdálenosti od detektoru je znázorněna na obrázku 36. [24]





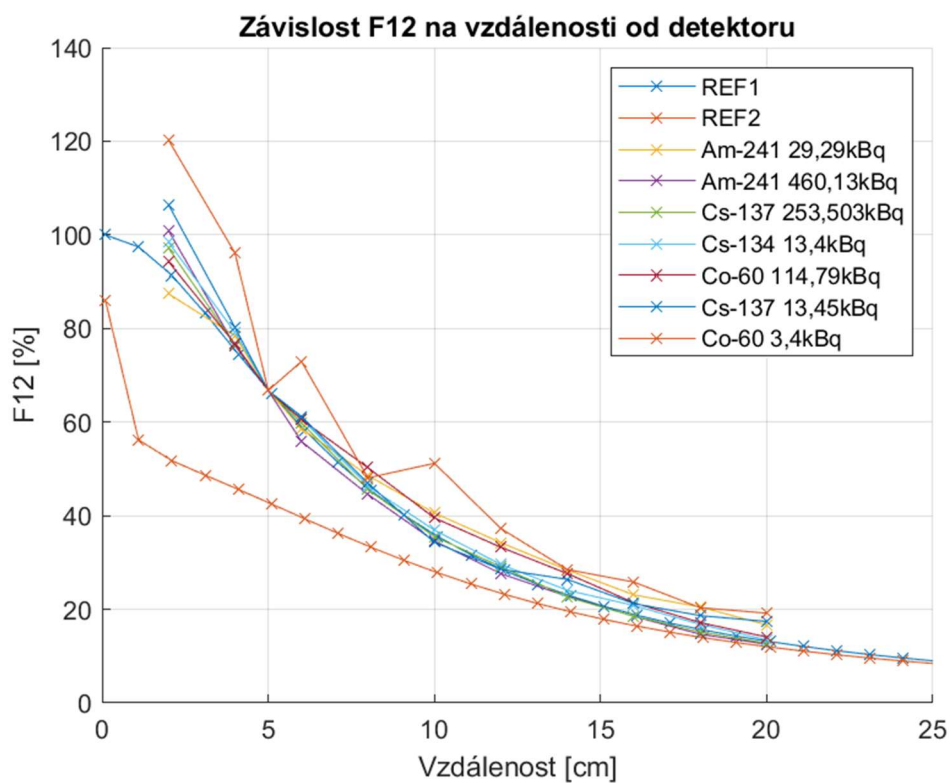
Obrázek 36 Závislost relativní chyby na vzdálenosti detektoru (varianta 1)

U druhé varianty s posunutým detektorem se postupovalo podobně jako u varianty 1, přičemž referenční hodnota byla stanovena ve vzdálenosti 5 cm. Na obrázku 37 je znázorněna závislost F12 na vzdálenosti od detektoru.

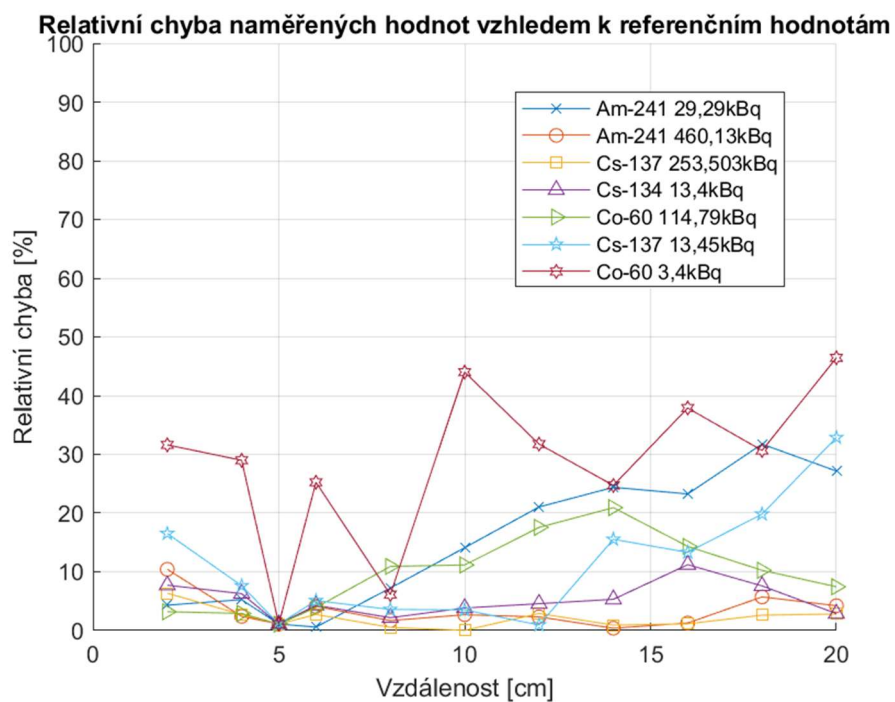
Na tomto obrázku jsou identifikovány dvě referenční křivky, REF1 a REF2. První referenční křivka odpovídá analytické metodě při shodném umístění středu detektoru se středem vzorku, zatímco druhá referenční křivka odpovídá situaci, kdy je vzorek umístěn u hrany detektoru. Nicméně druhá křivka neodpovídá skutečným měřením a nemohla být použita jako referenční. Místo toho byla jako referenční použita křivka REF1, která lépe odpovídala skutečnosti. [24]

Navzdory obecně nižším hodnotám impulzů na jednotku času (CPS) u varianty 2 jsou naměřeny výrazně nižší odchylky od referenční křivky, zejména u hodnot v blízkosti 5 cm a při nízkoaktivních radionuklidech i při větších vzdálenostech. Z křivky relativní chyby je patrné, že s výjimkou  $^{60}\text{Co}$  se chyba pohybuje kolem 30 %, zatímco u varianty 1 dosahovala až 100 %. [24]

Z toho vyplývá, že i když výsledky z varianty 1 vykazují vyšší chyby a větší fluktuaci u nízkoaktivních radionuklidů, druhá varianta dosahuje lepších výsledků při měření vzdálenosti od detektoru a má menší odchylky od referenční křivky, což naznačuje její vyšší spolehlivost.

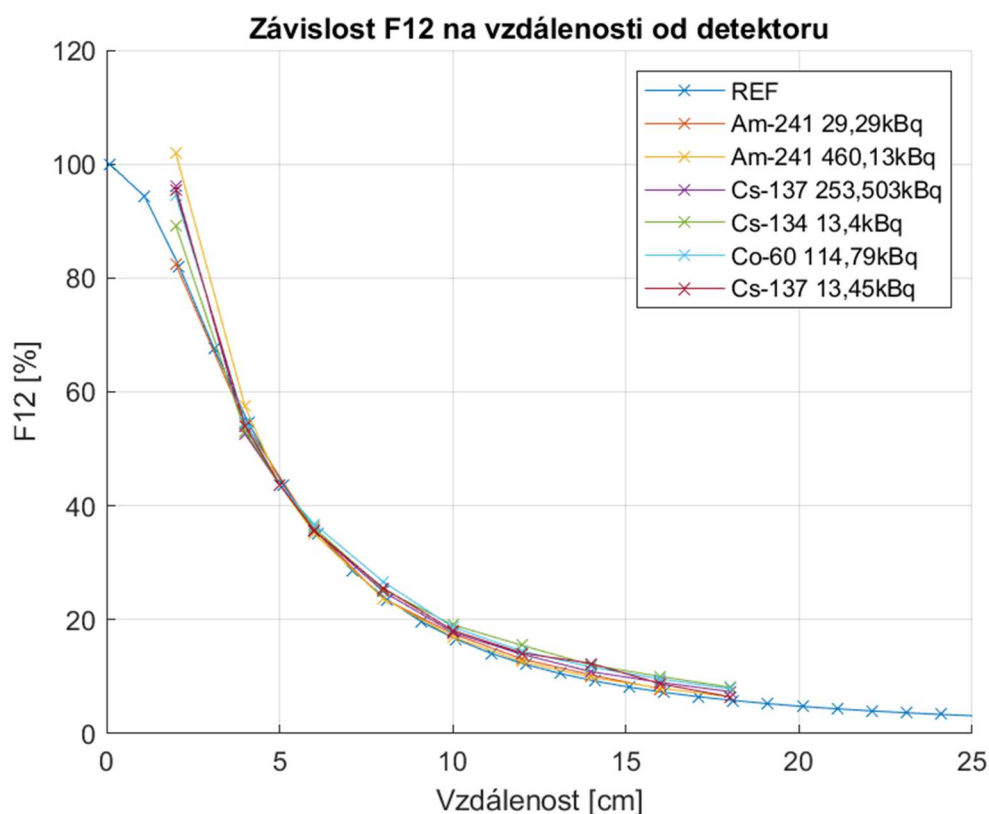


Obrázek 37 Závislost F12 na vzdálenosti detektoru (varianta 2)



Obrázek 38 Závislost relativní chyby na vzdálenosti detektoru (varianta 2)

Poslední varianta využívala stejného principu přepočítání přes koeficient jako varianta 2 jenom s tím rozdílem, že se pro měření použil válcový detektor, který je nastaven v ose se středem vzorku. Jako referenční křivka byla použita analytická metoda pro výpočet kruhového detektoru, která má strmější průběh než křivka kvádrového detektoru. Pro měření byly použity pouze 4 etalony a 1 zářič. Etalon  $^{60}\text{Co}$  byl vyřazen z důvodu velké proměnlivosti hodnot a nemožnosti spolehlivého výpočtu pro aktivity nižší než 13kBq. [24]

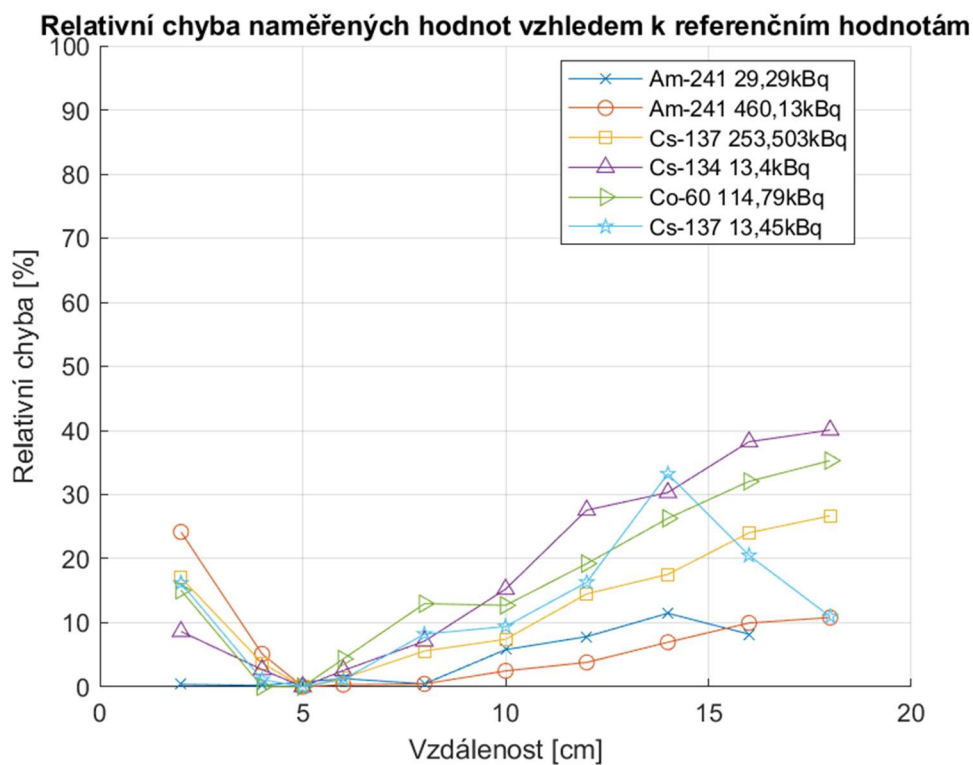


Obrázek 39 Závislost F12 na vzdálenosti detektoru (varianta 3)

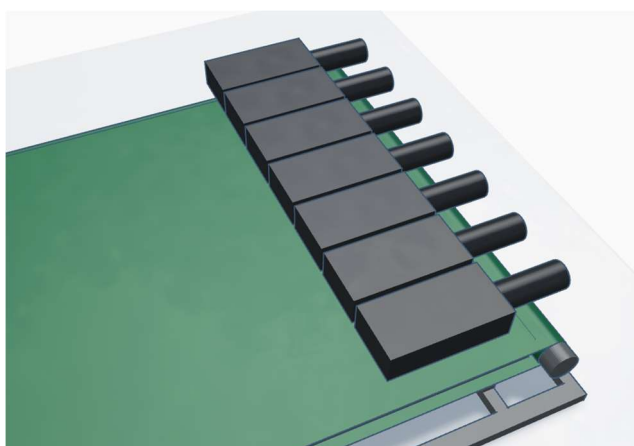
Z obrázku 40 je patrné, že relativní chyba, vynecháme-li  $^{60}\text{Co}$  (3,4 kBq), dosahuje vyšších hodnot již od 10 cm a u 20 cm dosahuje 40 %. Z tohoto vyplývá, že varianta 3, kdy je  $^{60}\text{Co}$  zanedbáno, vykazuje horší výsledky než varianta 2 a naznačuje nižší spolehlivost. [24]

Konfigurace výpočtu vzdálenosti pomocí křivky je výrazně omezena poskytnutými detektory. Ve výsledku je spolehlivá pouze v rozmezí od 5 cm do 15 cm u kvádrového detektoru a od 5 do 10 cm u detektoru válcového. Za tímto bodem křivka mění svůj průběh, což snižuje přesnost výpočtu. Pro zvýšení spolehlivosti a použitelnosti v praxi by bylo nezbytné použít detektory s větší detekční plochou nebo zvážit alternativní metody pro určení místa kontaminace.

Alternativní metoda vychází z návrhu zařízení v kapitole 7, kde je navrženo uložení několika detektorů po šířce pásu. Čím více detektorů je použito, tím více fólie umístěné na páse může být ušetřeno. Pomocí nejvyšší hodnoty CPS v řadě detektorů se pak vyhodnotí místo kontaminace. [21]



Obrázek 40 Závislost relativní chyby na vzdálenosti detektoru (varianta 3)



Obrázek 41 Alternativní metoda pro určení místa kontaminace po šířce pásu

### 9.3.3 Princip detektoru 3

Umístění detektoru je realizováno za detektorem 1 s pootočením o  $90^\circ$ . Toto řešení umožňuje rychlejší posun oproti použití konfigurace upnutí detektoru, jak je v případě konfigurace 1. Cílem detektoru je identifikace místa kontaminace po délce pásu, kde by detektor při pohybu zdroje záření zaznamenával nárůst impulzů za sekundu a na základě toho vyhodnotil polohu kontaminace.

Provedeny byly dva typy měření: první s kvádrovým detektorem a druhé s detektorem válcovým. Vybrány byly vzorky etalonů  $^{241}\text{Am}$  s aktivitou 460,13 kBq,  $^{60}\text{Co}$  s aktivitou 114,79 kBq a  $^{137}\text{Cs}$  s aktivitou 13,4 kBq při 5cm vzdálenosti detektorů od vzorků a s posunem 1,87 cm za sekundu pro detailnější vykreslení nárůstu píku.



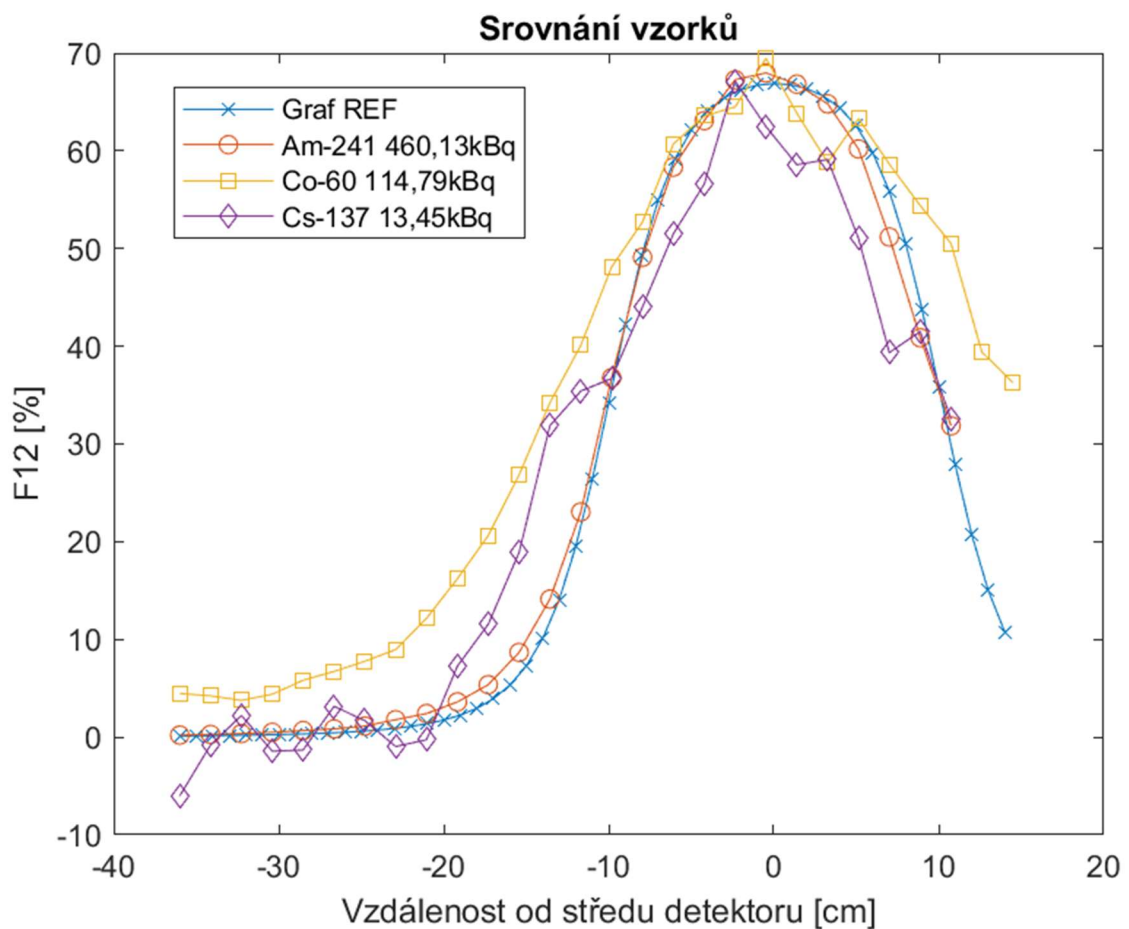
Obrázek 42 Měření konfigurace detektoru 3 (kvádrový typ)



Obrázek 43 Měření konfigurace detektoru 3 (válcový typ)

Na obrázcích 44 a 45 je vynesena nárůst CPS při posunu zdroje záření. Z těchto obrázků je patrné, že při dosažení vzorku ke středové souměrnosti detektoru jsou hodnoty nejvyšší, což umožňuje odečíst polohu kontaminantu.

U kvádrového typu na obrázku 44 lze pozorovat, že hodnoty vzorků dosahují horních hodnot již 7 cm od středu detektoru. To umožňuje zrychlení posuvu bez toho, aby detektor špatně vyhodnotil polohu kontaminantu, což by mohlo nastat kvůli omezenému nastavení vzorkování. Snížení vzorkování by mohlo vést k velkému kolísání hodnot, zejména u vzorků s nižší aktivitou, a tím k nepřesnostem v měření. [24]

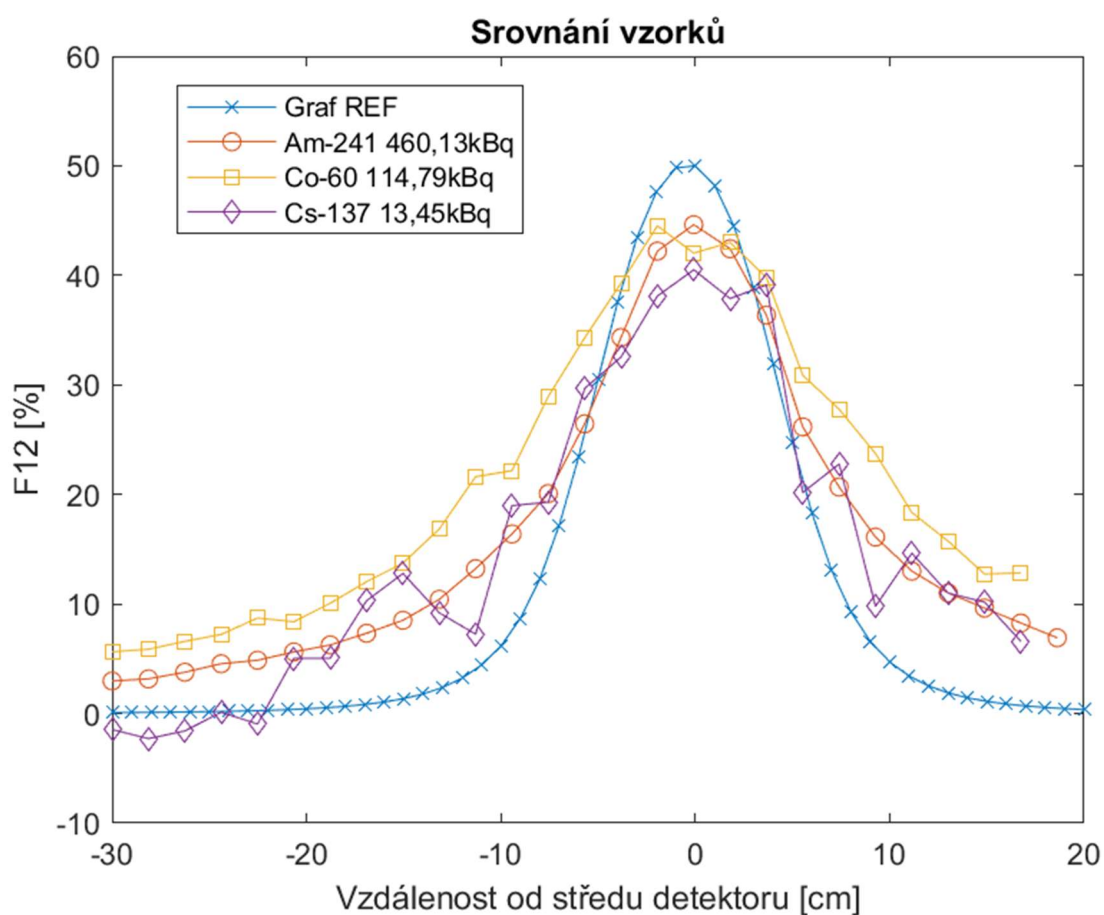


Obrázek 44 Měření konfigurace detektoru 3 (kvádrový typ)

Při měření válcového typu je pozorován rychlý nárůst a pokles hodnot, což je způsobeno menší plochou oproti kvádrovému typu. Při použití těchto rozměrů by pásový dopravník vyžadoval pomalejší posun, aby se dosáhlo požadované spolehlivosti identifikace polohy kontaminace.

Dále lze na měření pozorovat dřívější nárůst hodnot oproti očekávané závislosti, zejména u  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{60}\text{Co}$ . To může být způsobeno vysokou energetickou úrovní gama záření a její interakcí s detektorem i při vyšších vzdálenostech. Tento jev lze řešit odstíněním detektorů olovem, čímž lze dosáhnout pouze hodnot při vzorku na ploše pod detektorem.

V případě válcového typu je dřívější nárůst ovlivněn výškou detektoru, což umožňuje detekci záření pomocí boční plochy detektoru. Tento jev vede k vyšším hodnotám naměřených impulsů za sekundu oproti očekávanému průběhu. [24]



Obrázek 45 Měření konfigurace detektoru 3 (válcový typ)

#### 9.3.4 Vyhodnocení výsledků navržené konfigurace z laboratorního měření

Z výsledků měření sestavy lze vyvodit několik hlavních poznatků. Všechny detektory prokázaly schopnost identifikovat kontaminaci a vyhodnotit aktivity zdroje záření. Detektor 1 byl úspěšně použit k identifikaci a výpočtu aktivity kontaminantu na plastové fólii. Nejlepší výsledky dosáhl v rozmezí 4-8 cm od povrchu pásu, kde byla metoda nejpřesnější a v souladu s analytickou křivkou.

Detektor 2 se zaměřil na určení vzdálenosti zdroje záření pomocí informace z detektoru 1, přičemž varianta 2 s posunutým detektorem ukázala nejlepší spolehlivost. I přes to byla tato metoda s poskytnutými detektory dostatečně spolehlivá mezi 5 až 15 cm pro kvádrový typ a 5 až 10 cm pro válcový typ. Pro použití v praxi je doporučena alternativní metoda nebo použití detektorů s většími rozměry.

Detektor 3 se pak staral o identifikaci místa kontaminace po délce pásu. Zde bylo zjištěno, že kvádrový typ byl vhodnější volbou kvůli delšímu času, kdy jsou hodnoty u píku, což umožňuje zrychlit pás a stále správně vyhodnotit místo kontaminace. V případě válcového typu bylo zjištěno, že dřívější nárůst hodnot byl ovlivněn výškou detektoru, což bylo umožněno detekcí boční stranou detektoru. Tato informace naznačuje možnost minimalizovat vliv boční detekce u válcového a kvádrového typu pomocí odstínění detektorů olovem.

Z výsledků měření můžeme vyvodit, že navrhované zařízení s plastovými scintilačními detektory je možné použít pro charakterizaci a recyklaci plastových fólií a tím přispět ke snížení objemu plastových odpadů v jaderných elektrárnách v ČR.

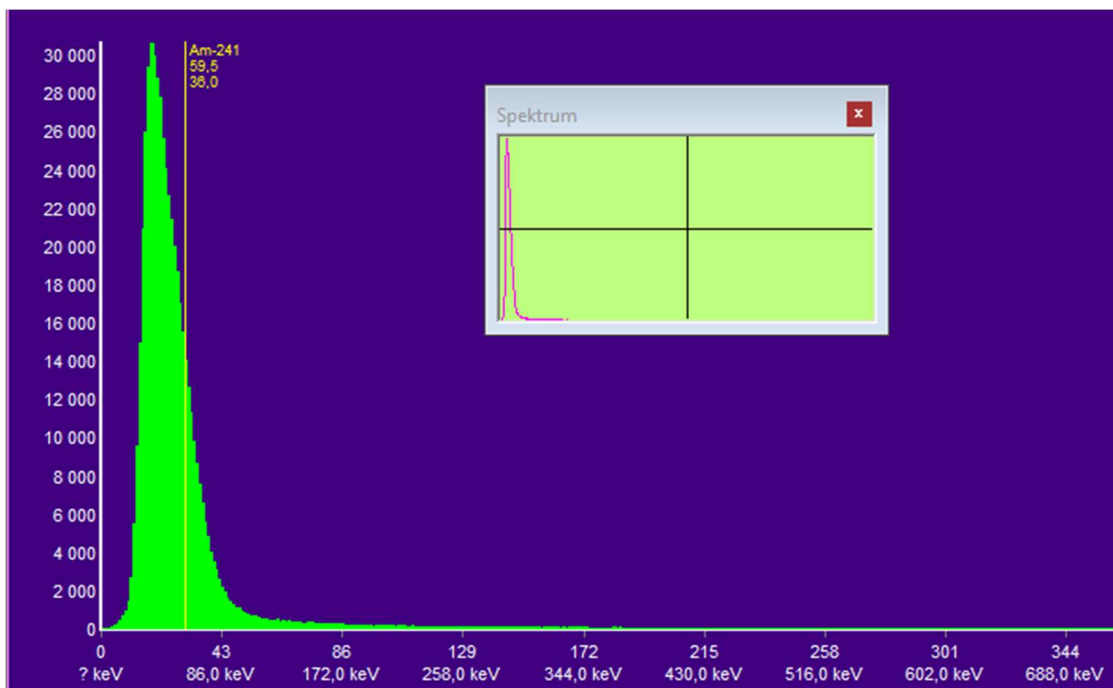


## 9.4 Výsledky spektrometrie plastových scintilátorů

Mimo stanovení aktivity a lokalizace kontaminace byla laboratorním měřením demonstrována spektrální analýza etalonů pomocí programu GAMWIN. Pro tuto analýzu byly vybrány tři různé typy gama zdrojů:  $^{241}\text{Am}$  s aktivitou 460 kBq,  $^{60}\text{Co}$  s aktivitou 3,38 kBq a  $^{137}\text{Cs}$  s aktivitou 13,45 kBq.

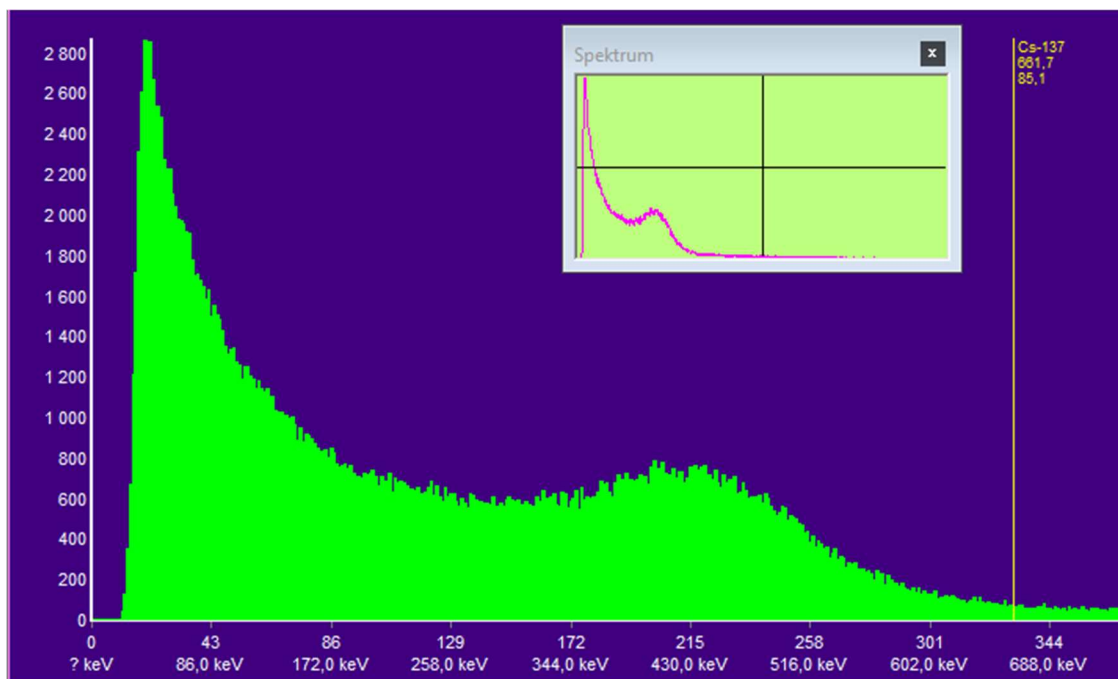
Na obrázku 45 je znázorněno spektrum  $^{241}\text{Am}$  spolu s teoretickým fotopíkem, který by mohl být zachycen anorganickými scintilátory nebo polovodičovými detektory. Většina impulzů ve spektru se nachází za fotopíkem, což je způsobeno Comptonovým rozptylem, který je schopen detekovat organický scintilátor, na rozdíl od fotoefektu, který vytváří fotopík. [29]

Prvek americium má fotopík na nižších energiích, kolem 59,5 keV, než cesium a kobalt, to způsobuje, že se nachází v oblasti šumu. Tento šum může být omezujícím faktorem při detekci a spektrometrii nízkoenergetického záření a mohou vzniknout spontánní termoemise fotokatody a šum v elektronických obvodech.



Obrázek 46 Scintilační spektrum  $^{241}\text{Am}$

Na obrázku 47 je vyobrazeno spektrum  $^{137}\text{Cs}$ , které má fotopík o energii 661 keV. To způsobuje, že se Comptonovo kontinuum rozprostírá ve větší části spektra. Spektrum začíná šumem na nižších energiích, následuje Comptonův rozptyl a je zakončeno Comptonovou hranou. [29]



Obrázek 47 Scintilační spektrum  $^{137}\text{Cs}$

V externí příloze je uvedeno spektrum  $^{60}\text{Co}$ , které má fotopíky na vyšších energiích (1173 keV a 1332,5 keV) a rozsáhlejší spektrum a Comptonovo kontinuum.

Z těchto spektrálních dat je patrné, že plastové scintilátory jsou schopny zaznamenat pouze Comptonův rozptyl, což ztěžuje jejich efektivní využití pro spektrometrii. V situacích s větším počtem zdrojů gama záření by mohlo být obtížné rozlišit Comptonův rozptyl pro daný nuklid a identifikovat přesně, o který nuklid se jedná.

## 10 ZÁVĚR

Tato diplomová práce poskytuje detailní přehled množství radioaktivního odpadu produkovaného v českých jaderných elektrárnách a jeho následného uložení do úložišť radioaktivního odpadu doplněný informacemi o aktivitách radionuklidů na těchto úložištích. Dále se zabývá měřením gama záření pomocí různých typů detektorů, včetně popisu jejich fyzikálních vlastností a možností použití pro zvýšení efektivity měření.

Další část práce je věnována návrhu zařízení s pomocí zkušeností odborníků z oboru detekce a měření radiace z firmy MIFRE a VF Nuclear, které přispěje k efektivnějšímu nakládání s radioaktivním materiálem, hlavně plastových fólií. V této části je popsáno zařízení pro měření aktivity kontaminovaných fólií i s funkčním principem zařízení a vybraného radiometru k detekci kontaminace plastových fólií včetně jeho možných konfigurací. Pro tento účel byl zvolen plastový scintilační detektor, který se osvědčuje v praxi. I přes nedostatky plastových scintilátorů byly tyto detektory vybrány především díky své variabilitě, výrobě a dostupnosti v různých velikostech. To z nich činí praktickou volbu pro měření. Tento návrh byl sestaven.

V rámci práce bylo také provedeno experimentální měření zdrojů ionizačního záření s využitím plastových scintilačních detektorů. Byla provedena analýza interakce gama záření s detektory pomocí metody Radiative view factors, což umožnilo efektivní výpočet zachytu záření na různých vzdálenostech a v různých geometrických uspořádáních detektorů. K těmto analýzám byl použit katalog, ze kterého byly vybrány konfigurace C-13 a C-41, které se nejvíce blížily vypůjčeným detektorům. Pro analýzu a užití v praxi byly použity dva plastové scintilátory s odlišnou geometrií od společnosti Nuvia a. s. Vypůjčené detektory byly kvádrového typu s rozměry 10 x 5 x 20 cm (D x Š x V) a válcový typ s průměrem podstavy detektoru 9 cm a výškou 15 cm.

Vzhledem k nejistým výsledkům získaným z analytické metody, které byly zjištěny z výsledků měření, byla jako referenční hodnota v závislostech zvolena vypočítaná hodnota analytickou metodou při vzdálenosti 5 cm od detektoru. Na základě tohoto kroku bylo možné stanovit analytickou metodu jako referenční až od vzdálenosti 5 cm. To pomohlo minimalizovat relativní chybu.

Součástí experimentu byl návrh zařízení k určení aktivity kontaminantu a jeho polohy vzhledem k délce a šířce pásového dopravníku. Tento postup by v ideálním případě pomohl značně snížit množství odpadu z použitých fólií. Bylo zkoumáno zachycení záření detektory v závislosti na jejich vzdálenosti od zdroje a analyzovány tři hlavní varianty konfigurace detektorů. Detektor první konfigurace stanovuje aktivitu vzorku, druhý detektor vyhodnocuje polohu aktivity po šířce zařízení a třetí detektor stanoví polohu aktivity po délce zařízení.

Výsledky laboratorního měření ukázaly, že navržené zařízení je schopno efektivně vypočítat aktivitu z hodnot impulzů za sekundu (CPS) a stanovit polohu záření po délce pásu pomocí nástupná závislosti impulzů za sekundu, tyto závislosti jsou na obrázku 44 a 45 i s nástupem závislosti referenční metody v ideálním případě. Pro určení polohy po šířce pásového dopravníku, i přes návrh několika různých variant pro zpřesnění výpočtu, byla navržena alternativní konfigurace založená na uložení více detektorů. Tato konfigurace umístění detektorů je vymodelována v 3D programu Tinkercad na obrázku 41. Ta by zvýšila spolehlivost měření a minimalizovala ztráty plastové fólie.

Pro měření a komplexní analýzu dat získaných ze scintilačních detektorů byl použit software GAMWIN. V tomto programu byla také provedena spektrometrická analýza zdrojů záření, zejména  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$  a  $^{137}\text{Cs}$ . Spektra jsou zobrazeny na obrázcích 46 a 47, kde lze pozorovat Comptonův rozptyl pod teoretickým fotopíkem, který plastové scintilátory nezaznamenávají. I přes tuto nevýhodu lze ze scintilačního spektra určit informace o určitých typech radionuklidů.

Pro výpočty a vynesení grafů byl použit výpočetní program Matlab, pro 3D vizualizaci konfigurací a návrhů pásových dopravníků byl použit online modelový program Tinkercad a pro 2D návrhy program AutoCAD.

## LITERATURA

- [1] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3629-9
- [2] SÚRAO. *Jak se dělí radioaktivní odpady* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/o-nas/radioaktivni-odpady/jak-se-deli-radioaktivni-odpady/>
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1, IAEA, Vienna (2009)*
- [4] ODBOR 41500. *Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice*. PDF. 1. 2019. Dostupné také z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/RAO/2019/12/Koncepce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR\\_2019.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/RAO/2019/12/Koncepce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR_2019.pdf)
- [5] *Zpráva o výsledcích činnosti: státního úřadu pro jadernou bezpečnost při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2022 ČÁST I. PDF. 1. 2023*. Dostupné také z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní\\_zpravy/ceske/2022/cast\\_I.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní_zpravy/ceske/2022/cast_I.pdf)
- [6] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Úložiště radioaktivního odpadu* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://sujb.gov.cz/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-radioaktivnim-odpadem/uloziste-radioaktivniho-odpadu/>
- [7] SÚRAO. *Stávající úložiště* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/>
- [8] SÚRAO. *Úložiště Dukovany*. Online. SÚRAO. 2023. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/uloziste-dukovany/>. [cit. 2023-10-29].
- [9] LIETAVA, Peter. *Hospodaření s radioaktivním odpadem v ČR 2022*. PDF. 1. 2023. Dostupné také z: [https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-rao/Hosp\\_RAO\\_2022.pdf](https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-rao/Hosp_RAO_2022.pdf)
- [10] SÚRAO. *Úložiště Richard*. Online. SÚRAO. 2023. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/uloziste-richard/>. [cit. 2023-10-29].
- [11] SÚRAO. *Úložiště Bratrství*. Online. SÚRAO. 2023. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/uloziste-bratrstvi/>. [cit. 2023-10-29].
- [12] SÚRAO. *Uzavřené úložiště Hostim*. Online. SÚRAO. 2023. Dostupné z: <https://www.surao.cz/stavajici-uloziste/uzavrene-uloziste-hostim/>. [cit. 2023-10-29].
- [13] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. Online. ULLMANN, Vojtěch. AstroNuklFyzika. 2021. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>. [cit. 2023-11-19].

- [14] ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. *Radiation effects* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/ionizing-radiation/Radiation-effects>
- [15] RADIATION KEY. *Interactions of Ionizing Radiation* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://radiologykey.com/interactions-of-ionizing-radiation/>
- [16] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. Online. ULLMANN, Vojtěch. AstroNuklFyzika. 2021. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#6>. [cit. 2023-11-19].
- [17] KNOLL, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement* /. 3rd ed. Michigan: John Wiley & Sons, 2000. ISBN 0-471-07338-5.
- [18] TAVERNIER, S. Detectors Based on Ionisation in Gases. In: *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-00829-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00829-0_4).
- [19] Mukhopadhyay, Sanjoy. (2005). *Plastic Gamma Sensors: An Application in Detection of Radioisotopes*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 5198.
- [20] AUTODESK, Inc. *AutoCAD* [software]. Verze 2024. San Rafael, CA: Autodesk, Inc., 2024 [cit. 2024-05-19]. Akademická licence. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>
- [21] Tinkercad AUTODESK, Inc. *Tinkercad* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.tinkercad.com>
- [22] ISIDORO, Martínez. *Radiative view factors*. PDF. 2021.
- [23] HOWELL, John R. *A catalog of radiation heat transfer configuration factors*. Online. ThermalRadiation. 2023. Dostupné z: <https://www.thermalradiation.net/tablecon.html>. [cit. 2024-05-17].
- [24] MATHWORKS, Inc. *MATLAB* [software]. Verze R2023a. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2023 [cit. 2024-05-19]. Akademická licence. Dostupné z: <https://www.mathworks.com>
- [25] NUVIATECH INSTRUMENTS. *Product Catalog: Scintillation Detectors*. PDF. 2024.
- [26] NUVIATECH INSTRUMENTS. *NUNA MCB*. Online. NUVIA. Nuvia. 2024. Dostupné z: <https://www.nuviatech-instruments.com/cz/Produkt/nuna-mcb/>. [cit. 2024-05-17].
- [27] LIBRETEXTS. Half-Life and Activity. In: *Physics LibreTexts* [online]. 2021 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College\\_Physics/College\\_Physics\\_1e\\_\(OpenStax\)/31%3A\\_Radioactivity\\_and\\_Nuclear\\_Physics/31.05%3A\\_Half-Life\\_and\\_Activity](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/College_Physics_1e_(OpenStax)/31%3A_Radioactivity_and_Nuclear_Physics/31.05%3A_Half-Life_and_Activity).
- [28] JGRAPH Ltd. *draw.io* [software]. Verze 2024. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.diagrams.net>

[29] GAMWIN. *Gamwin* [software]. Demo verze. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z:  
<http://www.gamwin.com>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

Am-241	Americium-241
ČMI	Český meteorologický institut
ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
<sup>60</sup> Co	Kobalt-60
<sup>134</sup> Cs	Cesium-134
<sup>137</sup> Cs	Cesium-137
CPS	Impulsy za sekundu
DP	Diplomová práce
EG	Etažovaný gama zářič
EW	Exempt waste (Odpad splňující kritérium pro uvolnění do prostředí)
G.-M.	Geigerovův-Müllerův
HLW	High level waste (Vysoce aktivní odpady)
JE	Jaderná elektrárna
LLW	Low level waste (Nízko aktivní odpady)
ILW	Intermediate level waste (Středně aktivní odpady)
NJZ	Nové jaderné zdroje
LR-0	Lehkododní reaktor
LVR-15	Lehkododní výzkumný reaktor
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MCA	Multikanálový analyzátor
MSc	Magistr věd
MSVP	Mezisklad vyhořelého paliva
NSRAO	Nízko a středně aktivní radioaktivní odpad
OS	Obalový soubor
PMT	Fotomultiplikační trubice
RAO	Radioaktivní odpad
STP	Standardní teplota a tlak
SPŠ	Střední průmyslová škola
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SVJP	Sklad vyhořelého jaderného paliva
USB	Univerzální sériová sběrnice
USA	Spojená státy americké
VAO	Vysoko aktivní odpad



VJP	Vyhořelé jaderné palivo
VLLW	Very low level waste (Velmi nízko aktivní odpady)
VSLW	Very short lived waste (Velmi krátkodobé odpady)
ÚRAO	Úložiště radioaktivních odpadů
ŽP	Životní prostředí

Symboly:

$A$	aktivita	Bq
$A$	plocha	$m^2$
cos	kosinus	-
$d$	diferenciál	-
$dA$	plošný pevek	$m^2$
$E$	práce a energie	eV
$F$	faktor pohledu	%
$G$	pomocná funkce	-
$H$	dávkový ekvivalent	Sv
ln	přirozený logaritmus	-
$L, r$	délka, vzdálenost	m
$m$	hmotnost	kg
$t$	čas	s
$V$	objem	$m^3$
$W$	šířka	m
$z$	výška	m
$\beta$	úhel	°
$\eta$	vnitřní detekční účinnost	%
$\pi$	Ludolfovo číslo	-
$\Sigma$	suma	-