

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů

Obor: Jaderné inženýrství



Neutronová aktivační analýza environmentálních vzorků  
na školním reaktoru VR-1

Neutron activation analysis of environmental samples at the  
Training Reactor VR-1

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracovala: Bc. Alena Krechlerová  
Vedoucí práce: Ing. Milan Štefánik, Ph.D.  
Rok: 2021





## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Alena Krechlerová**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Název práce česky: **Neutronová aktivační analýza environmentálních vzorků na školním reaktoru VR-1**

Název práce anglicky: Neutron activation analysis of environmental samples at the Training Reactor VR-1

### Pokyny pro vypracování:

1. Navažte na svoji bakalářskou práci a výzkumný úkol a proveďte shrnutí a prohloubení doposud nabytých znalostí v oblasti neutronové aktivační analýzy (NAA) a to zejména s ohledem na analýzu vzorků životního prostředí. Zaměřte se i na záležitosti monitorování parametrů neutronového pole aktivační metodou na jaderných reaktorech.
2. Pokračujte ve výběru lokalit vhodných pro monitorování znečištění životního prostředí na území ČR. Vzorky odebrané z daných míst připravte ve spolupráci s vedoucím práce pro experimenty NAA na školním reaktoru VR-1 (např. vysušení, rozemletí, zpopelnění atd.).
3. Ve spolupráci s vedoucím práce navrhnete a zrealizujete aktivační a NAA experimenty na reaktoru VR-1 zvolených vzorků životního prostředí. Proveďte kvalitativní i kvantitativní analýzu složení zkoumaných vzorků. Zaměřte se mimo jiné i na přítomnost těžkých kovů ve vzorcích, resp. kontaminantů.
4. S ohledem na experimenty NAA proveďte i měření charakteristik neutronového pole na školním reaktoru VR-1 s využitím aktivační techniky (reakční rychlosti, spektrální indexy).
5. Proveďte podrobnou diskusi nad získanými výsledky z pohledu posouzení znečištění životního prostředí v ČR vlivem průmyslu a jiných lidských činností. Výsledky svého výzkumu prezentujte i v grafické podobě (např. rozšířená mapa odběrů vzorků, případně zastoupení vybraných polutantů apod.).

### Doporučená literatura:

- [1] Greenberg R. R., Bode P., De Nadai Fernandes E. A.: *Neutron Activation Analysis: A Primary Method of Measurement*, Spectrochimica Acta Part B, 2011
- [2] Petr, J.: *Experimentální fyzika reaktorů*, Ediční středisko ČVUT, Praha, 1992
- [3] Musílek, L. et al.: *Dozimetrie ionizujícího záření (Integrované metody)*, Ediční středisko ČVUT, Praha, 1992
- [4] Štefánik, M. et al.: *Investigation of mammoth remains using the neutron activation analysis at the Training Reactor VR-1*, Applied Radiation and Isotopes 166 (2020), 109292
- [5] Alfassi, Z.B.: *Activation Analysis*, CRC Press, Inc., Florida, 1990, ISBN 08493-4583-9
- [6] Abdel-Sabour, M., Zohny, E.: *Impact of industrial activities on total chromium in alluvial Egyptian soils as determined by neutron activation analysis*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 260 (2004), p. 233-236

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

**Ing. Milan Štefánik, Ph.D.**  
KJR FJFI ČVUT v Praze

Datum zadání diplomové práce:

19. 10. 2020

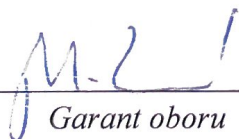
Datum odevzdání diplomové práce:

3.5.2021

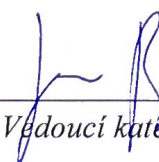
Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

V Praze dne 19. 10. 2020

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.

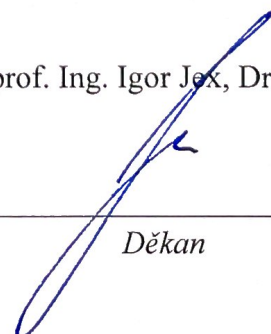
  
\_\_\_\_\_  
Garant oboru

Ing. Jan Rataj, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.

  
\_\_\_\_\_  
Děkan



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Milanu Štefánikovi, Ph.D za ochotu, trpělivost, svědomitost a podnětné návrhy při vedení diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat prof. RNDr. Vojtěchu Ettlrovi, Ph.D za odkázání na články, díky kterým byla vybrána znečištěná místa. Nakonec děkuji své rodině a přátelům za vstřícnost a trpělivost nejen během vypracovávání diplomové práce, ale i celého studia.

Bc. Alena Krechlerová

*Název práce:*

**Neutronová aktivační analýza environmentálních vzorků na školním reaktoru VR-1**

*Autor:* Bc. Alena Krechlerová

*Studijní program:* Aplikace přírodních věd

*Obor:* Jaderné inženýrství

*Druh práce:* Diplomová práce

*Vedoucí práce:* Ing. Milan Štefánik, Ph.D.

Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská,  
České vysoké učení technické v Praze

*Konzultant:* –

*Abstrakt:* Diplomová práce se zabývá nedestruktivní neutronovou aktivační analýzou (NAA) náplavových půd a mečů pocházejících z několika lokalit v České republice, a to za účelem stanovení obsahu polutantů. Vzorky byly sesbírány na Šumavě zvolené jako referenční oblast a v Jáchymově, Kutné Hoře nebo Valašském Meziříčí v oblastech vyznačujících se průmyslovou činností. Vzorky z uvedených lokalit byly ozařovány na reaktoru VR-1. Kvalitativní NAA v jednotlivých vzorcích potvrdila přítomnost sodíku, draslíku, manganu, hliníku či lanthanu. Významně zastoupeny byly i toxické kovy, konkrétně arsen, rtuť nebo baryum. V meších byl navíc nalezen chlor a jod. Také byla provedena kvantitativní analýza za účelem stanovení koncentrace sodíku, draslíku, železa, zlata a arsenu. Získaná data z průmyslových oblastí byla srovnána s oblastí referenční a s převzatými hodnotami prvkového zastoupení v zemské kůře. Rovněž bylo monitorováno neutronové pole reaktoru VR-1. Na základě získaných dat bylo ověřeno, že reaktor VR-1 je vhodným nástrojem k určování složení a koncentrace prvků environmentálních vzorků. Dosažené výsledky mohou být v budoucnu použity k monitorování znečištění životního prostředí.

*Klíčová slova:* Neutronová aktivační analýza, gama-spektrometrie, náplavové půdy, mechy, HPGe detektor, hustota toku tepelných neutronů

*Title:*

**Neutron activation analysis of environmental samples at the Training Reactor VR-1**

*Author:* Bc. Alena Krechlerová

*Branch of study:* Nuclear Engineering

*Kind of Thesis:* The Master degree Project

*Supervisor:* Ing. Milan Štefánik, Ph.D.

Department of Nuclear Reactors, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague

*Abstract:* The Master Degree project is focused on an instrumental neutron activation analysis of alluvial soils and mosses from several locations in the Czech Republic in order to determine pollution in the environment. The samples were obtained in Šumava, which was chosen as a reference area, then in Jáchymov, Kutná Hora and Valašské Meziříčí. Previous regions were chosen due to the occurring industry. Samples were irradiated at the VR-1 training reactor. In all of the specimen elements such as sodium, potassium, manganese, aluminium or lanthanum were found. Toxic metals, specifically arsenic, mercury or barium, were identified as well. In addition, chlorine and iodine in mosses were observed. Qualitative analysis was also executed to determine the concentration of sodium, potassium, iron, gold and arsenic. The obtained results from polluted areas were compared to the data from reference location and concentration of elements in the Earth's crust. Moreover, the neutron field of the VR-1 training reactor was monitored. It was verified that the VR-1 training reactor is a suitable device to identify composition and concentration of environmental samples and obtained data can be used in the future to monitor environmental pollution.

*Key words:* Neutron activation analysis, gamma-spectrometry, alluvial soils, mosses, HPGe detector, thermal neutron flux density

# Obsah

Úvod	17
<b>1 Gama-spektrometrie</b>	<b>19</b>
1.1 Interakce $\gamma$ -záření s látkou	19
1.1.1 Fotoefekt	21
1.2 Comptonův rozptyl	22
1.3 Tvorba elektron-pozitronových párů	23
1.4 Druhotné procesy	24
<b>2 Detektory v gama-spektrometrii</b>	<b>27</b>
2.1 Polovodičové detektory	27
2.1.1 Polovodičový HPGe detektor	28
2.1.2 Energetická kalibrace	29
2.1.3 Účinnostní kalibrace polovodičového HPGe detektoru	30
2.1.4 Nejistoty měření	31
<b>3 Neutronová aktivační analýza a monitorování neutronového pole</b>	<b>33</b>
3.1 Neutronové zdroje	34
3.2 Neutronové interakce	36
3.3 Typy neutronové aktivační analýzy	37
3.4 Metody neutronové aktivační analýzy	38
3.5 Fyzikální aparát neutronové aktivační analýzy	39
3.6 Aplikace neutronové aktivační analýzy	42
3.7 Aktivační detektory neutronů	43
3.8 Hustota toku tepelných neutronů	44
<b>4 Znečištění životního prostředí</b>	<b>47</b>
4.1 Anomální výskyt arsenu v půdách České republiky	48
4.2 Kyanidy a jejich dopad na životní prostředí	49
<b>5 Studium složení vzorků životního prostředí na výzkumných reaktorech</b>	<b>51</b>
5.1 Rychlý pulzní reaktor IBR-2	51
5.1.1 Studium mechů ze železné huti, sever Norska	52
5.1.2 Zkoumání mechů z města Baia Mare, Rumunsko	52
5.1.3 Analýza půd z delty Nilu, Egypt	53
5.2 TRIGA Mark-III, Mexiko	53



5.2.1	Sběr mechů z údolí Toluca, Mexiko . . . . .	53
5.3	TRIGA Mark-II, Bangladěš . . . . .	54
5.3.1	Sběr půd v Bangladěši . . . . .	54
5.4	Výzkumný reaktor NIRR-1, Nigérie . . . . .	55
5.4.1	Sběr půd okolo NIRR-1 . . . . .	55
5.4.2	Skládka, Sardauna Memorial College, Kaduna, Nigérie . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Experimentální studium environmentálních vzorků</b>	<b>57</b>
6.1	Výzkumný reaktor VR-1 . . . . .	57
6.2	Kalibrace absolutní detekční účinnosti . . . . .	59
6.3	Analýza půd a mechů . . . . .	61
6.4	Studium vzorků z Valašského Meziříčí . . . . .	64
6.5	Analýza náplavových půd a mechů ze Šumavy . . . . .	65
6.6	Studium půd a mechů z Jáchymova . . . . .	66
6.7	Analýza vzorků z Kutné Hory . . . . .	67
6.8	Výsledky neutronové aktivační analýzy . . . . .	67
6.9	Diskuze výsledků . . . . .	69
6.10	Charakteristiky neutronového pole . . . . .	75
6.11	Rozbor spektra přirozeného pozadí . . . . .	76
	<b>Závěr</b>	<b>79</b>
	<b>Literatura</b>	<b>80</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>88</b>

# Seznam zkratek a veličin

Zkratka	Význam česky, anglicky
BAEC	Bangladéšská komise pro atomovou energii, Bangladesh Atomic Energy Commission
CIAE	Čínský institut pro atomovou energii, China Institute of Atomic Energy
DEP	Druhý výletový pík, Double escape peak
DGNAA	Neutronová aktivační analýza pomocí zpožděného $\gamma$ -záření, Delayed Gamma Neutron Activation Analysis
ENAA	Epitermální neutronová aktivační analýza, Epithermal Neutron Activation Analysis
FEP	Pík úplného pohlcení, Full energy peak
FNAA	Neutronová aktivační analýza rychlými neutrony, Fast Neutron Activation Analysis
FSS	Fourierův spektrometr, Fourier Stress Spectrometer
HPGe	Germanium s vysokou čistotou, High purity germanium
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii, International Atomic Energy Agency
INAA	Instrumentální neutronová aktivační analýza, Instrumental Neutron Activation Analysis
ININ	Státní institut jaderného výzkumu, National Institute for Nuclear Research
MNSR	Malý výzkumný reaktor, Miniature Neutron Source reactor
NAA	Neutronová aktivační analýza, Neutron Activation Analysis
NIRR-1	Nigerijský výzkumný reaktor, Nigeria research reactor
NRT	Neutronová radiografie a tomografie, Neutron radiography and tomography
NVO	Nezávislá výkonová ochrana, Independent power protection system
PGNAA	Promptní gama neutronová aktivační analýza, Prompt Gamma Neutron Activation Analysis
PMV	Provozní měření výkonu, Operation power measurement
RNAA	Radiochemická neutronová aktivační analýza, Radiochemical Neutron Activation Analysis
SEP	První výletový pík, Single escape peak
SÚJV	Spojený ústav jaderných výzkumů, Joint Institute for Nuclear Research
ÚJF AV ČR	Ústav jaderné fyziky Akademi věd České republiky, Nuclear Physics Institute of The Czech Academy of Sciences
TNAA	Termální neutronová aktivační analýza, Thermal Neutron Activation Analysis

Značka	Název, jednotka
$A_0$	Počáteční aktivita kalibračního zářiče , (Bq)
$A_{err}$	Nejistota aktivity etalonu, (-)
$A_{etalon}$	Aktivita radionuklidu v etalonu, (Bq)
$A_{sat}$	Saturovaná aktivita, (Bq)
$A_{vzorek}$	Aktivita radionuklidu ve vzorku, (Bq)
$E_\gamma$	Energie fotonu, (eV)
$E_0^\gamma$	Kinetická energie fotonu před srážkou, (eV)
$E_j$	Vazebná energie, (eV)
$E_e$	Energie elektronu, (eV)
$E_0^e$	Klidová energie elektronu, (eV)
$F_{cd}$	Kadmiový korekční faktor, (-)
$g$	Westcottův $g$ -faktor, (-)
$I_{err}$	Nejistota intenzity gama linky, (-)
$I_\gamma$	Intenzita gama linky, (%)
$m_{etalon}$	Hmotnost etalonu, (g)
$m_{vzorek}$	Hmotnost prvku ve vzorku, (g)
$N$	Počet částic, (-)
$N_A$	Avogadrova konstanta, ( $\text{mol}^{-1}$ )
$N_0$	Původní počet stabilních jader, (-)
$N_r$	Celkový počet rozpadů, (-)
$M$	Relativní atomová hmotnost, (-)
$P$	Aktivita vzniklých radionuklidů, (Bq)
$P_1$	Aktivita vyzářená vzorkem, (Bq)
$P_2$	Počet kvant zaznamenaných detektorem, (Bq)
$r_{cd}$	Kadmiový poměr, (-)
$R_R$	Reakční rychlost, ( $\text{s}^{-1}$ )
$R_{Rth}$	Reakční rychlost pro tepelné neutrony, ( $\text{s}^{-1}$ )
$R_{Rcd}$	Reakční rychlost aktivační fólie umístěné v kadmiovém pokrytí, ( $\text{s}^{-1}$ )
$S$	Plocha fotopíku, (imp)
$S_{err}$	Nejistota plochy fotopíku, (-)
$T_{1/2}^{err}$	Nejistota poločasu rozpadu, (-)
$t_a$	Čas ozařování, (s)
$t_{live}$	Doba měření detektorem po odečtení mrtvé doby, (s)
$t_{real}$	Skutečná doba měření detektorem, (s)
$t_v$	Doba vymírání, (s)
$t_v^{etal}$	Čas uplynulý od měření původní aktivity $A_0$ , (s)
$Z$	Protonové číslo, (-)
$\varepsilon$	Absolutní účinnost detektoru, (-)
$\theta$	Přírodní zastoupení izotopu daného radionuklidu, (-)
$\lambda$	Rozpadová konstanta, ( $\text{s}^{-1}$ )
$\sigma$	Aktivační mikroskopický účinný průřez, (barn)
$\sigma_{ef}$	Efektivní účinný průřez, (barn)
$\sigma_0$	Účinný průřez pro tabelovanou energii, (barn)
$\tau$	Pravděpodobnost, že dojde k dané interakci, (-)
$\phi$	Hustota toku neutronů, ( $\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

# Seznam obrázků

1.1	Pravděpodobnost výskytu jednotlivých interakcí . . . . .	20
1.2	Schématické znázornění fotoefektu . . . . .	21
1.3	Schéma Comptonova rozptylu . . . . .	22
1.4	Schéma tvorby elektron-pozitronových párů . . . . .	24
1.5	Tvorba elektron-pozitronových párů v plynové komoře . . . . .	24
1.6	Spektrum gama-záření . . . . .	25
2.1	Blokové schéma zapojení systému . . . . .	28
2.2	Typické spektrum naměřené pomocí HPGe detektoru . . . . .	29
2.3	HPGe detektor uvnitř olověného stínění . . . . .	29
2.4	Schéma HPGe detektoru . . . . .	30
2.5	Příklad energetické kalibrace polovodičového HPGe detektoru . . . . .	32
2.6	Zobrazení kalibrace absolutní detekční účinnosti polovodičového HPGe detektoru . . . . .	32
3.1	Závislost mikroskopických účinných průřezů pro $^{235}\text{U}$ . . . . .	37
3.2	Závislost aktivity vzorku na čase . . . . .	40
3.3	Studované mamutí vzorky připevněné na plastovém držáku . . . . .	43
3.4	Fotka Johna Normana Collinse, červenec 1969 . . . . .	43
3.5	Odhad spektra hustoty toku neutronů . . . . .	45
4.1	Kožní projevy při chronické otravě arsenem . . . . .	49
4.2	Koncentrace arsenu v jehličí, rok 2005 . . . . .	50
5.1	Schéma pulzního reaktoru IBR-2 . . . . .	52
5.2	Rychlý pulzní reaktor IBR-2 . . . . .	52
5.3	Sběr půdních vzorků pomocí metody vrtání . . . . .	54

5.4	Připravené vzorky půd těsně před ozařováním v poli neutronů . . . . .	54
5.5	Hala reaktoru NIRR-1 . . . . .	55
6.1	Schéma školního reaktoru VR-1 . . . . .	58
6.2	Schéma aktivní zóny C16 reaktoru VR-1 . . . . .	58
6.3	Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, srovnání geometrií . . . . .	61
6.4	Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, přiblížení srovnání geometrií	61
6.5	Místa sběru vzorků pro diplomovou práci, výzkumný úkol a bakalář- skou práci . . . . .	62
6.6	Náplavové půdy a mechy před vložením do pece . . . . .	63
6.7	Environmentální vzorky umístěné v ampulkách . . . . .	63
6.8	Zastoupení arsenu v náplavových půdách . . . . .	69
6.9	Zastoupení arsenu v meších . . . . .	71
6.10	Zastoupení sodíku v náplavových půdách . . . . .	72
6.11	Zastoupení sodíku v meších . . . . .	72
6.12	Zastoupení draslíku v náplavových půdách . . . . .	72
6.13	Zastoupení draslíku v meších . . . . .	73
6.14	Složení zemské kůry . . . . .	73
6.15	Zlaté a měděné aktivační fólie a kadmiové pokrytí . . . . .	76
16	Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 3 mm . . . . .	89
17	Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 30 mm . . . . .	89
18	Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 80 mm . . . . .	90
19	Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 120 mm . . . . .	90
20	Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 250 mm . . . . .	90



# Seznam tabulek

4.1	Příklad zdrojů znečišťujících látek . . . . .	47
6.1	Seznam kalibračních zářičů pro bakalářskou práci . . . . .	59
6.2	Seznam kalibračních zářičů pro výzkumný úkol . . . . .	59
6.3	Parametry získané z programu efekt32, část 1 . . . . .	60
6.4	Parametry získané z programu efekt32, část 2 . . . . .	60
6.5	Prováděné experimenty, jejich označení a datum . . . . .	64
6.6	Parametry ozařovaných vzorků z Valašského Meziříčí . . . . .	64
6.7	Hodnoty ozařovaných etalonů . . . . .	64
6.8	Parametry ozařovaných vzorků ze Šumavy . . . . .	65
6.9	Charakteristiky ozařovaných etalonů . . . . .	65
6.10	Charakteristiky aktivačních fólií pro monitorování neutronového pole . . . . .	65
6.11	Charakteristiky ozařovaných vzorků z Jáchymova . . . . .	66
6.12	Parametry aktivačních fólií pro monitorování neutronového pole . . . . .	66
6.13	Hodnoty ozařovaných vzorků z Kutné Hory . . . . .	67
6.14	Pozorované radionuklidy nalezené ve všech vzorcích . . . . .	68
6.15	Zastoupení vybraných prvků v náplavových půdách v devíti oblastech České republiky . . . . .	68
6.16	Zastoupení vybraných prvků v meších v sedmi oblastech České republiky . . . . .	69
6.17	Koncentrace vybraných prvků v náplavových půdách v devíti oblastech České republiky . . . . .	70
6.18	Koncentrace vybraných prvků v meších v šesti oblastech České republiky . . . . .	71
6.19	Reakční rychlosti, hustoty toku tepelných neutronů a kadmiové poměry, druhý experiment . . . . .	76
6.20	Reakční rychlosti, hustoty toku tepelných neutronů a kadmiové poměry, třetí experiment . . . . .	76
6.21	Rozbor spektra přirozeného pozadí s uzavřeným stíněním . . . . .	77

22	Seznam prvků identifikovaných v náplavové půdě, Jáchymovský potok, Jáchymov . . . . .	91
----	--	----

# Úvod

Neutronová aktivační analýza (NAA) je analytická metoda sloužící ke stanovení obsahu a zastoupení prvků ve vzorku. Principiálně je založená na ozařování vzorků neutrony s následným měřením gama spekter na příslušném spektrometru. Její hlavní výhodou je možnost provést analýzu instrumentálně, tedy aniž by došlo k poškození nebo spotřebě daného vzorku. Mezi další klady metody patří schopnost určit 30 až 40 prvků během jednoho měření, výsledky lze obdržet s nízkými nejistotami. Díky uvedeným výhodám lze neutronovou aktivační analýzu využít nejen v archeologii, medicíně nebo forenzních vědách, ale i při zkoumání environmentálních vzorků a zjišťování znečištění životního prostředí toxickými prvky. Diplomová práce pojednává o neutronové aktivační analýze environmentálních vzorků, a sice o náplavových půdách a meších. NAA uvedených vzorků byla provedena nedestruktivně na Katedře jaderných reaktorů na reaktoru VR-1.

Cílem diplomové práce bylo navázat na bakalářskou práci a výzkumný úkol, a provést tak shrnutí a prohloubení dosud nabytých znalostí v oblasti NAA. Dalším úkolem bylo zaměřit se na monitorování parametrů neutronového pole aktivační metodou na jaderných reaktorech v místě ozařování NAA vzorků. Byly vybrány vhodné lokality pro monitorování znečištění životního prostředí na území České republiky. Vzorky odebrané z daných míst byly ve spolupráci s vedoucím práce připraveny pro experimenty neutronové aktivační analýzy, konkrétně byly vysušeny, rozemlety, zváženy a připevněny k plastovému nosiči. Následně byly navrženy a zrealizovány NAA experimenty na reaktoru VR-1 připravených vzorků. Experimenty NAA byly doprovázeny aktivačními měřeními prováděnými taktéž na reaktoru VR-1. Na základě naměřených spekter na polovodičovém HPGe detektoru byla provedena kvalitativní a kvantitativní analýza. Pozornost byla věnována přítomnosti těžkých kovů, respektive kontaminantů nacházejících se ve vzorcích, a tedy i v životním prostředí na místech sběru vzorků. Rovněž byla provedena diskuze nad získanými výsledky z pohledu posouzení znečištění životního prostředí v České republice vlivem průmyslu a jiných lidských činností.

Celá práce je rozdělena do šesti kapitol. První kapitola se zabývá jadernou gama-spektrometrií, konkrétně interakcí  $\gamma$ -záření s látkou včetně fotoefektu, Comptonova rozptylu a tvorby elektron-pozitronových párů. Další kapitola pojednává o detektorech využívaných při gama-spektrometrii, především o polovodičovém HPGe detektoru, který se nachází na Katedře jaderných reaktorů a mimo jiné je využíván při zkoumání environmentálních vzorků. Dále je charakterizována samotná neutronová aktivační analýza, její typy, metody a aplikace. Popsána je i problematika neutronového pole

pomocí aktivačních detektorů. V neposlední řadě se práce zabývá samotným znečištěním vzorků, kdy je speciální důraz kladen na arsen a kyanidy. Nakonec je v teoretické části pojednáváno o využití neutronové aktivační analýzy environmentálních vzorků na výzkumných reaktorech ve světě.

Jádrem diplomové práce je samotná experimentální část, která je rozebrána v poslední kapitole. Je popsán samotný průběh experimentů a uvedeny výsledky práce, včetně zastoupení a koncentrace prvků ve vzorcích a monitorování neutronového pole. V závěru práce jsou diskutovány výsledky práce a rozebrán vliv přirozeného pozadí při dlouhodobějším měření.

# Kapitola 1

## Gama-spektrometrie

Spektrometrie je metoda, kterou lze použít k identifikaci různých radioaktivních izotopů ve vzorku. Měří se interakce mezi světlem a hmotou, a také intenzita a vlnová délka záření. Jinými slovy jde o metodu zkoumání a měření konkrétního spektra a je široce používána pro spektroskopickou analýzu vzorků materiálů. Záření, jež se při výše popisované metodě měří, se dělí dle charakteru působení na hmotu, a sice na ionizující a neionizující záření. Ionizujícím záření je nazýváno záření, jehož kvanta mají tak vysokou energii, že jimi lze vyrážet elektrony z atomového obalu, a tím látku ionizovat. Aby k tomuto jevu došlo, je nutné elektronu předat energii vyšší, než je jeho vazbová energie v atomu. [1, 2]

Ionizující záření se dále dělí na záření přímo a nepřímo ionizující. Nabité částice, např. elektrony, pozitrony, protony nebo  $\alpha$  částice, ionizují látku přímo. Jejich elektrické pole interaguje s atomy média, jímž prochází. Jinak je tomu u nepřímo ionizujícího záření, které je vyvoláváno elektricky neutrálními částicemi, a sice neutrony,  $\gamma$ -zářením či rentgenovým zářením. Kvanta nepřímo ionizujícího záření předávají část nebo celou svoji energii nabitým částicím, které poté způsobují onu ionizaci. [3]

Interakce záření s látkou jsou hojně využívány v materiálovém odvětví, detektorech nebo radiační terapii. Účinky interakce závisí na intenzitě, energii a typu záření nebo na absorpční schopnosti samotného materiálu. V práci bude pojednáváno především o interakci  $\gamma$ -záření a neutronů s látkou.

### 1.1 Interakce $\gamma$ -záření s látkou

Popisované  $\gamma$ -záření je záření bez elektrického náboje, a tím se řadí mezi nepřímo ionizující záření. Vyznačuje se tím, že s látkou interaguje s určitou pravděpodobností, přitom při jedné interakci může předat i podstatnou část své energie. Jeho průchod látkou lze charakterizovat mírou zeslabení, a sice polotloušťkou, což je vrstva materiálu, která zeslabí svazek záření na polovinu své původní hodnoty. [4]

Zmiňované  $\gamma$ -záření má krátkou vlnovou délku, řádově od  $10^{-11}$  m do  $10^{-13}$  m. Vzniká při jaderných reakcích či radioaktivní přeměně přechodem jádra z vyššího

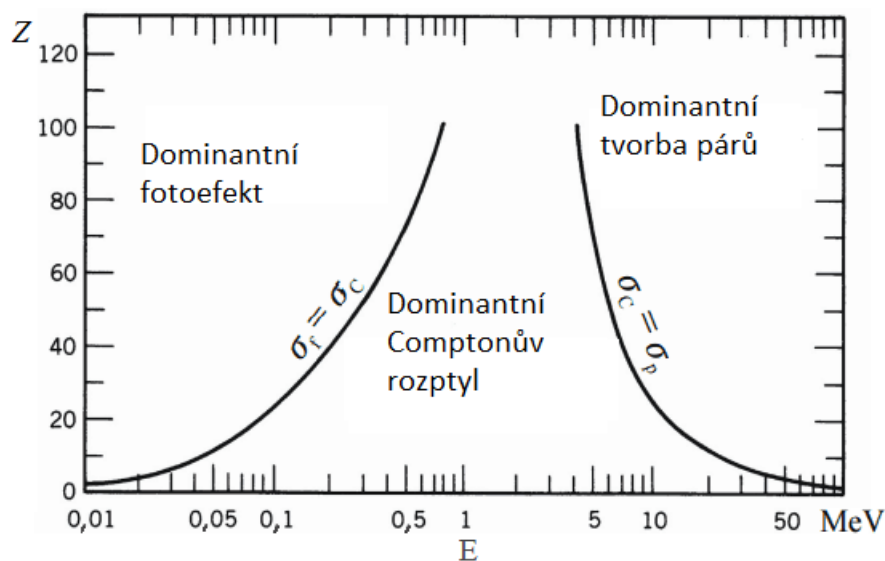


do nižšího energetického stavu, kdy se jádro zbavuje své excitační energie tím, že vyžáří foton. Je velmi podobné rentgenovému záření, rentgenové záření má ovšem původ v elektronovém obalu. Fotony  $\gamma$ -záření se většinou nevyskytují osamocně, obvykle doprovází  $\alpha$  nebo  $\beta$ -záření. Má čárové spektrum, což znamená, že radionuklid emituje fotony s určitými energiemi charakteristickými pro jeho přeměnu. K nejčastěji používaným zdrojům  $\gamma$ -záření patří například kobalt  $^{60}\text{Co}$ , cesium  $^{137}\text{Cs}$  nebo sodík  $^{24}\text{Na}$ . [5].

Gama-spektrometrie je metoda sloužící k měření aktivity materiálu. Jejím cílem je stanovit energii a intenzitu registrovaného  $\gamma$ -záření, a na základě naměřených dat poté identifikovat příslušné radionuklidy. Používá se v případech, kdy je vyžadována nedestruktivní analýza. V jaderné gama-spektrometrii je energie dopadajících fotonů měřena detektorem.

Ačkoliv existuje velké množství interakcí  $\gamma$ -záření s látkou, uvažují se především tři následující interakce, a sice *fotoefekt*, *Comptonův rozptyl* a *tvorba elektron-pozitronových párů*. Pro uvedené děje je charakteristické částečné, či úplné předání energie fotonu elektronu. Je vhodné říci, že fotony ztrácejí energii náhle pomocí srážek vedoucích ke změně úhlu či jejich úplnému zániku. To je v kontrastu se zářením přímo ionizujícím, kdy dochází ke ztrátě energie postupně a spojitě díky neustálým srážkám s atomy. [6]

Dále je nutné podotknout, že pravděpodobnost výskytu jedné ze tří výše uvedených možností interakce  $\gamma$ -záření s látkou závisí na energii záření. Veličina charakterizující pravděpodobnost, že dojde k určité interakci s atomem, se nazývá *účinný průřez*. Na obr. 1.1 je zobrazena závislost energie fotonu  $E_\gamma$  a protonového čísla látky  $Z$  na interakci, která nastane. Například při ozařování látek s vysokým protonovým číslem a energií  $\gamma$ -záření řádově v kiloelektronvoltech bude velmi pravděpodobně docházet k fotoefektu. Pro střední energie a nižší protonové číslo převládá Comptonův rozptyl a u vyšších energií dominuje tvorba elektron-pozitronových párů. [5, 7]



Obrázek 1.1: Pravděpodobnost výskytu jednotlivých interakcí gama-záření s látkou [6]

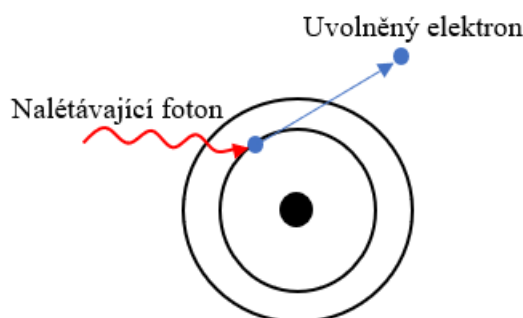
V následujících podkapitolách budou více rozebrány konkrétní interakce fotonů s látkou, a to fotoefekt, Comptonův rozptyl a tvorba elektron-pozitronových párů. Nakonec budou zmíněny další procesy, které se nachází v naměřených gama spektrech.

### 1.1.1 Fotoefekt

Nejdůležitější interakcí fotonu s látkou z pohledu gama-spektrometrie je fotoefekt. Během fotoefektu interaguje foton s elektronem atomu, předává mu veškerou svoji energii, a poté zaniká. Elektron je díky dodané kinetické energii emitován z elektronového obalu látky, je-li dodaná energie větší než výstupní práce elektronu. Popsaný děj je znázorněn na obr. 1.2. Energie uvolněného elektronu je definována následujícím vztahem:

$$E_e = E_\gamma - E_j, \quad (1.1)$$

kde  $E_e$  je kinetická energie uvolněného elektronu,  $E_\gamma$  energie fotonu a  $E_j$  vazebná energie elektronu potřebná k jeho uvolnění z vazby. [8]



Obrázek 1.2: Schématické znázornění fotoefektu

Po uvolněním elektronu v obalu atomu vzniká vakance, která je zaplněna elektronem z vyšší energetické hladiny. Následně je vyzářeno i rentgenové záření, které má ale nízkou energii a bývá rychle absorbováno. V menší míře dochází k vyzáření Augerových elektronů, což jsou elektrony vyzářené z atomu v souvislosti s přechodem jiného elektronu na nižší energetickou hladinu. I tak lze fotoefekt považovat za děj, kdy se téměř pohltí veškeré  $\gamma$ -záření. Je také jevem, který je nejvíce využíván při gama-spektrometrii právě kvůli předání veškeré energie fotonu detektoru. Výstupním impulsem je poté tzv. FEP (*full energy peak*) neboli pík úplného pohlcení, s jehož pomocí lze určit složení nebo množství vybraného prvku ve vzorku. Pík úplného pohlcení lze vidět na obr. 1.6. [8, 11]

Fotoefekt je dominantní pro nižší energie fotonu  $E_\gamma$  a vyšší atomová čísla  $Z$  (viz obr. 1.1). Toto je také hlavní důvod, proč se jako stínění používají materiály s vysokým protonovým číslem. Dochází totiž k fotoefektu, a tedy k zániku fotonu. Jako stínící materiál se používá například olovo. Ze stejného důvodu se používají materiály s vysokým  $Z$  pro výrobu detektorů užívaných pro gama-spektrometrii. Není definován žádný konkrétní vztah pro pravděpodobnost fotoelektrického jevu,

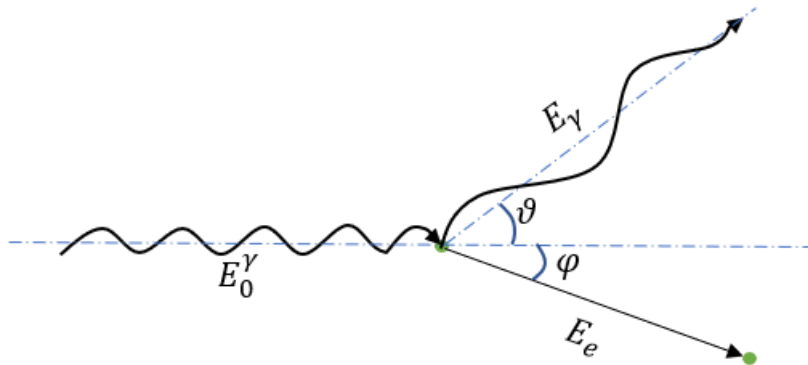
nicméně dle [6] se dá použít následující empirický vzorec:

$$\tau \cong \text{konst} \cdot \frac{Z^n}{E_\gamma^{3,5}}, \quad (1.2)$$

kde  $\tau$  je pravděpodobnost, že dojde k fotoefektu,  $Z$  protonové číslo,  $E_\gamma$  energie fotonu a  $n$  je exponent, jehož hodnota se liší a nabývá hodnot v rozmezí 4 až 5. [6]

## 1.2 Comptonův rozptyl

Při interakci fotonu s volným či slabě vázaným elektronem v atomu může dojít ke Comptonovu jevu. Je to nepružný rozptyl, kdy foton předá elektronu jen část své energie, a po srážce mění svůj směr o úhel  $\vartheta$ . Elektron má po kolizi s fotonem nenulovou kinetickou energii a odrazí se pod úhlem  $\varphi$ . Comptonův rozptyl je znázorněn na obr. 1.3. [12]



Obrázek 1.3: Schéma Comptonova rozptylu

Za předpokladu, že je elektron v klidu a že probíhá rozptyl na volném elektronu, je možné ze zákona zachování energie a hybnosti stanovit vztahy mezi energiemi a úhly rozptylu či odrazu. K rozptylu na volném elektronu dochází tehdy, když je energie fotonu mnohonásobně vyšší než vazebná energie elektronu. Energie rozptýleného fotonu je dána předpisem

$$E_\gamma(\vartheta) = \frac{E_0^\gamma}{1 + \frac{E_0^\gamma}{E_0^e}(1 - \cos \vartheta)}, \quad (1.3)$$

kde  $E_\gamma(\vartheta)$  představuje energii odraženého fotonu v závislosti na úhlu  $\vartheta$ ,  $E_0^\gamma$  kinetickou energii fotonu před srážkou a  $E_0^e$  klidovou energii elektronu. Rozptyl fotonů se pohybuje v rozmezí úhlů  $\vartheta = 0^\circ$  až  $180^\circ$ . [9]

Na základě vztahu (1.3) lze říci, že foton ztrácí nejvíce energie při zpětném rozptylu, tedy pro úhel  $\vartheta = 180^\circ$ . Naopak pro úhly rozptylu blízké  $\vartheta = 0^\circ$  nepředává foton elektronu téměř žádnou energii. Děj se může několikrát opakovat. Foton poté ztratí tolik energie, že převládne pravděpodobnost zániku fotonu fotoelektrickým jevem. [14]

Comptonův jev převládá u  $\gamma$ -záření středních energií (viz obr. 1.1) a u látek s nižším protonovým číslem  $Z$ . Pro pravděpodobnost Comptonova rozptylu nebyl stanoven žádný konkrétní předpis. Vychází se opět z empirického vzorce závisícím na počtu elektronů materiálu. Proto se pravděpodobnost mění přibližně lineárně s rostoucím či klesajícím protonovým číslem  $Z^1$ . [6]

Comptonův rozptyl při neutronové aktivační analýze není běžně využíván. V gama-spektrometrii ovšem způsobují tzv. *Comptonovo kontiuum* či *Comptonovu hranu*, které je možné vidět na obr. 1.6. Comptonova hrana a kontiuum se používají u organických scintilátorů, kde je nízká pravděpodobnost, že bude naměřen fotopík. Comptonovu hranu lze v omezené míře použít pro gama-spektrometrii. Konkrétně je pomocí ní možné vykonat energetickou kalibraci organických scintilátorů využitím monoenergetických zdrojů, například  $^{137}\text{Cs}$ .

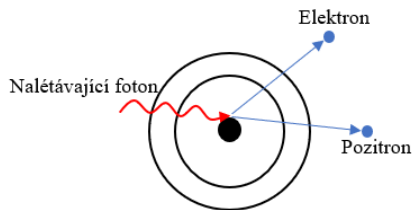
### 1.3 Tvorba elektron-pozitronových párů

Poslední uváděnou interakcí je tvorba elektron-pozitronových párů. Dochází k ní pouze v případech, kdy je energie fotonu větší než 1,022 MeV, tedy vyšší než dvě klidové hmotnosti elektronu. V poli atomového jádra se energie elektromagnetického záření přemění na elektron a pozitron, vzniká tím elektron-pozitronový pár. Pozitron je kladně nabitá částice mající stejnou klidovou hmotnost, jakou má elektron a urazí přibližně stejnou dráhu, než se zpomalí. Vzniklé částice ztrácejí svou energii ionizací a excitací, neurazí ovšem vzdálenost větší než několik milimetrů. Jakmile pozitron ztratí dostatečné množství kinetické energie, spojí se s libovolným elektronem. Uvedený proces se nazývá anihilace. Během anihilace se obě částice přemění na elektromagnetické záření, konkrétně dva anihilační fotony, každého o energii 0,511 MeV odpovídající energetickému ekvivalentu klidové hmotnosti elektronu. Produkovaná gama kvanta se pohybují v navzájem opačných směrech a mohou dále interagovat s látkou pomocí fotoefektu či Comptonova rozptylu. Tvorba elektron-pozitronových párů je naznačena na obr. 1.4 nebo na obr. 1.5. [15]

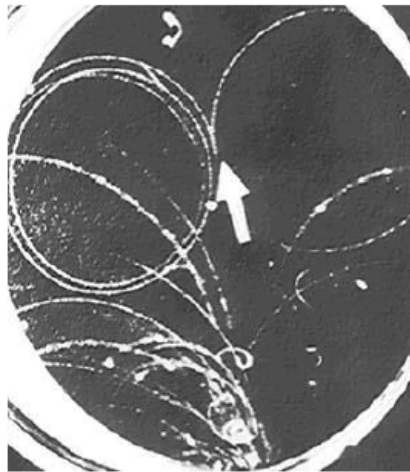
S menší pravděpodobností může dojít k tvorbě elektron-pozitronových párů v poli elektronového obalu. K tomu je ale zapotřebí, aby měl foton energii alespoň 2,044 MeV. [10]

Neexistuje jednoduchý předpis pro určení pravděpodobnosti vzniku elektron-pozitronových párů. Pravděpodobnost ale přibližně roste s druhou mocninou atomového čísla  $Z^2$  a se zvyšující se energií fotonu. [6]

V gama-spektrometrii je produkce elektron-pozitronových párů zodpovědná za vznik *single escape peak* (SEP), jež má hodnotu  $E_\gamma = \text{FEP} - 0,511$  MeV a *double escape peak* (DEP) o energii  $E_\gamma = \text{FEP} - 1,022$  MeV. SEP vzniká, jestliže po anihilaci pozitronu a elektronu uniká jeden z fotonů z detektoru. Při DEP unikají z detektoru po anihilaci fotony oba. Díky elektron-pozitronovým párům vzniká i tzv. *anihilační pík*. Ten se objevuje v případech, že k produkci páru dojde mimo krystal detektoru. Anihilační linka v naměřeném spektru má hodnotu 0,511 MeV. Linky SEP a DEP lze vidět na obr. 1.6.



Obrázek 1.4: Schéma tvorby elektron-pozitronových párů



Obrázek 1.5: Tvorba elektron-pozitronových párů v plynové komoře [11]

## 1.4 Druhotné procesy

Během interakce  $\gamma$ -záření se ve spektru neprojevují pouze jevy způsobené fotoefektem, Comptonovým rozptylem a tvorbou elektron-pozitronových párů. Mohou se v něm vyskytnout i další píky vlivem rentgenového záření, Augerových elektronů, brzdného záření nebo reagováním fotonů s krystalem a stíněním detektoru. Strukturu gama spektra lze vidět na obr. 1.6. Následující druhotné procesy byly převzaty z [16].

V ideálním případě je uvažováno, že kvanta, která vycházejí ze zdroje, vstupují do krystalu ihned bez jakékoliv předešlé interakce s okolními materiály. Dále se předpokládá, že veškerá energie je absorbována a primárně dochází k fotoefektu a že v jednu dobu interaguje s krystalem pouze jeden foton. Ve spektru se ale objevují i další jevy, jež budou popsány dále.

V kapitole 1.1.1 bylo uvedeno, že během fotoefektu v okamžiku, kdy je zaplňována díra po uvolněním elektronu, dochází k emisi energie ve formě rentgenového záření nebo Augerova elektronu. Ve většině případů je tato energie pohlcena v krystalu detektoru. Ovšem v případě, kdy k fotoefektu dochází v blízkosti povrchu krystalu detektoru, nemusí být emitované rentgenové záření vůbec detekováno. V takovémto případě vzniká tzv. *rentgenový únikový pík*, který se nachází vlevo od fotopíku. Dochází k němu nejčastěji u nízkoenergetických fotonů nebo u malých detektorů.

Fotony nemusí interagovat pouze s krystalem, ale interagují i se stíněním detektoru a může dojít ke vzniku rentgenového záření, které je následně zachyceno detektorem. Jeho hodnoty závisí na materiálu, ze kterého je stínění vyrobeno. V případě olova lze ve spektru vidět *rentgenový pík*, jehož hodnota je 75 keV. Z tohoto důvodu je detektor pokryt tenkou vrstvou absorbujícího materiálu, který pohltí emitované rentgenové záření.

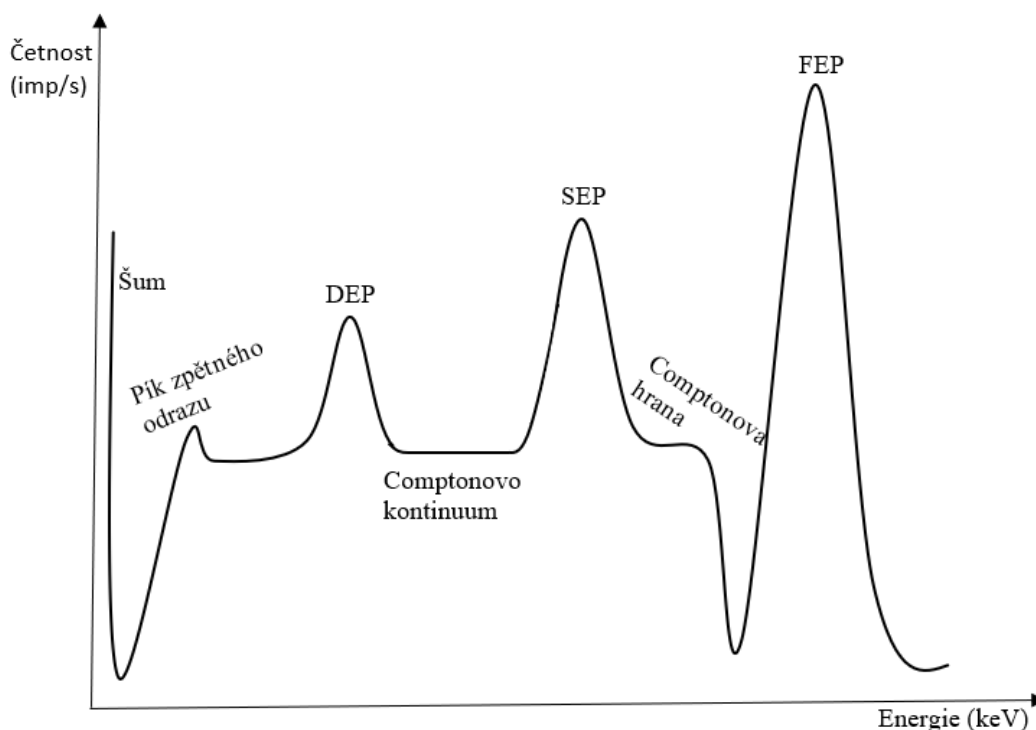
Ve spektru se může dále nacházet *pík zpětného odrazu*. Ten se vyskytuje v případě, že dojde ke Comptonově rozptylem ve stínění detektoru. Kvanta se s největší

pravděpodobností odrážejí pod úhlem blízkým  $180^\circ$ . Výsledkem je právě již dříve zmiňovaný pík zpětného odrazu.

Dále se ve spektru mohou vyskytovat *sumační píky*. K nim dochází v případě, že se měří s větší mrtvou dobou materiály s vyšším nukleonovým číslem  $A$ . V jednu chvíli interaguje s krystalem detektoru více fotonů a vznikne pouze jeden pík o energii, který je součtem energií interagujících kvant.

Během ozařování vzorku vzniká  $\beta$ -záření, které může zkomplikovat měření spektra způsobením brzdného záření. Popsaný děj může být naměřen při nízkých energiích.

V neposlední řadě může mít vliv, *samostínění* vzorku, *šum* nebo při dlouhodobějších měřeních se ve spektru mohou objevovat i energetické linky z přirozeného pozadí. To je problém v případě, že jsou měřeny prvky s podobnými  $\gamma$ -linkami jako jsou  $\gamma$ -linky některých prvků v přirozeném pozadí.



Obrázek 1.6: Spektrum gama-záření



# Kapitola 2

## Detektory v gama-spektrometrii

Gama-spektrometrie je nedestruktivní analytická metoda, která umožňuje v kombinaci s neutronovou aktivační analýzou (NAA) identifikovat a určit množství prvků ve vzorku. Během jednoho měření se detekují odlišné energie gama kvant emitovaných ze vzorku, jejichž srovnáním se známými energiemi se stanoví prvky ve vzorku. Gama-spektrometrie se nevyužívá pouze u neutronové aktivační analýzy, ale i v oblasti nukleární medicíny, výzkumu materiálů, environmentální oblasti či u průmyslového využití radioizotopů. [17]

Pro první laboratorní experimenty měření spekter  $\gamma$ -záření byly využity scintilační detektory, konkrétně detektor NaI(Tl), a to v 50. letech minulého století. Scintilační detektory jsou založeny na principu excitace elektronů do vyšších energetických stavů vlivem interakcí s fotony. Kvantum záření vniká do materiálu scintilačního krystalu, kde interaguje s látkou, předává jí energii a dochází k excitaci jader, které se vrací do základního stavu pomocí vyzáření fotonů nacházejících se ve spektru viditelného světla. Uvolněná energie se tedy přemění na záblesk viditelného spektra. Fotony jsou poté převedeny do fotonásobiče, jehož úlohou je znásobit a transformovat viditelné paprsky světla na elektrický impuls. Děje se tak při dopadu světelných záblesků z krystalu na fotokatodu. Z ní se uvolní malé množství elektronů, jenž interagují s dynodami umožňujícími násobení impulsu. Uvolňuje se tak více elektronů, které dopadají na anodu fotonásobiče a vytvoří tak měřitelný elektrický impuls zpracovávaný v zesilovací soustavě. [18, 19] Scintilační detektory jsou hojně využívány díky vlastnostem jako je vysoká účinnost, která umožňuje pracovat se zdroji záření o malé aktivitě, dále možnost použít jeden scintilátor pro různé druhy záření, přenositelnost nebo poměrně nízká cena. Na druhou stranu jejich nevýhodou je nízké energetické rozlišení. Proto se v dnešní době používají hlavně polovodičové detektory, jejichž princip bude vysvětlen v následující kapitole. [20]

### 2.1 Polovodičové detektory

Polovodičové detektory jsou založeny na reakcích s polovodičovým krystalem, nejčastěji křemíkem nebo germaniem. Prvotní práce s polovodičovými detektory započala v průběhu 30. let minulého století, plně se ale začaly rozvíjet až o 20 let



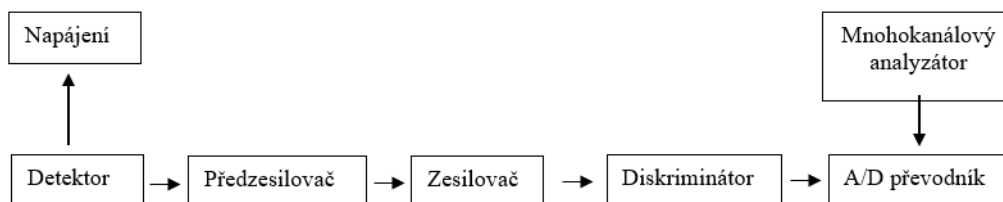
později. První prototypy vznikaly v 60. letech 20. století. Hlavní výhodou polovodičových detektorů je jejich vysoké rozlišení, které je definováno jako šířka fotopíku v polovině jeho výšky. [21, 22]

Princip fungování polovodičového detektoru je velmi podobný fungování detektoru plynového. Na rozdíl od plynu slouží jako médium pevný polovodičový materiál. Místo párů elektron-iont se díky ionizujícímu záření vytvoří páry elektron-díra. Elektrony se začnou pohybovat k anodě detektoru, díry ke katodě. Pohyb částic způsobí proudový impuls. Výhodou oproti plynovým detektorům je, že k vytvoření páru elektron-díra je zapotřebí asi desetkrát menší energie. Z toho vyplývá, že polovodičové detektory produkují více nábojů nesoucí informaci o ionizaci, a díky tomu mají i lepší rozlišení. Polovodičové detektory jsou také kompaktnější a mají velmi rychlou dobu odezvy. Na druhou stranu jejich nevýhodou je potřeba neustálého chlazení během provozu detektoru. K tomu se nejčastěji používá tekutý dusík. V dnešní době je snaha najít takový polovodičový materiál, díky kterému by mohl být detektor provozován i při pokojové teplotě. [21]

Na Katedře jaderných reaktorů, kde byla realizována experimentální část diplomové práce, se nachází polovodičový HPGe detektor, který byl používán v experimentech neutronové aktivační analýzy a bude popsán v následující podkapitole.

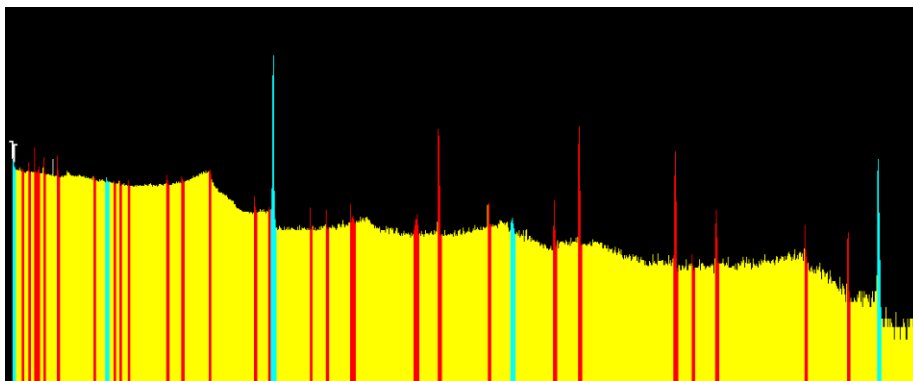
### 2.1.1 Polovodičový HPGe detektor

Polovodičový HPGe detektor je spektrometr s germaniovým krystalem o vysoké čistotě. Typický polovodičový HPGe detektor se skládá ze samotného HPGe detektoru, zdroje vysokého napětí, předzesilovače, zesilovače, diskriminátoru, A/D převodníku a multikanálového analyzátoru. V praktických podmínkách foton nejprve interaguje s germaniovým krystalem detektoru a způsobí vznik párů elektron-díra. Pohybem elektronů a děr k elektrodám vzniká proudový impuls, který je zesílen v *předzesilovači*. Puls je dále zesilován a tvarován v *zesilovači* a veden přes *diskriminátor*, ve kterém je nastavena úroveň registrace signálu. Jeho intenzita je následně konvertována do numerické hodnoty použitím *A/D převodníku*, jež jsou poslány do *mnohokanálového analyzátoru*, kde jsou určeny kanály a četnosti jednotlivých pulsů. Blokové schéma zapojení systému je zobrazeno na obr. 2.1, příklad typického naměřeného spektra půdních vzorků pomocí HPGe detektoru je uveden na obr. 2.2. [17, 23]



Obrázek 2.1: Blokové schéma zapojení systému [23]

Polovodiče mají za pokojové teploty dostatek volných elektronů, aby mohly vést proud, který by byl během měření zaznamenáván jako *šum* a zkreslil tak naměřené hodnoty. Proto, jak již bylo řečeno výše, je nutné krystal detektoru chladit, a sice buď



Obrázek 2.2: Typické spektrum naměřené pomocí HPGe detektoru [24]

kapalným dusíkem, nebo jiným vhodným způsobem, např. elektronicky. Výsledky měření by taktéž mohlo ovlivnit ionizující záření pocházející z okolí, proto je nutné detektor obklopit *stíněním*, které okolní záření pohltí. Jako stínění se nejčastěji používá olovo.

Polovodičový HPGe detektor se nachází i na Katedře jaderných reaktorů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské. Byl dodán společností Canberra a zanesen na obr. 2.3 a 2.4. Pro řízení detektoru a měření spekter je používán software Genie 2000 [24]. HPGe detektor je uložen uvnitř stínící komory, která má rozměry  $450 \times 450 \times 600$  mm a je tvořena olověnými cihlami s tloušťkou 50 mm. Olověné cihly zabraňují průniku záření z přirozeného pozadí do detektoru. Vrchní část stínící komory je vybavena posuvným víkem, kterým se vkládají či vyndávají měřené vzorky. Vnitřní stěna komory je dále potažena tenkým 2 mm tlustým měděným plechem, který slouží k záchytu rozptýleného záření. Detektor je chlazen tekutým dusíkem, jenž je přiváděn z Dewarovy nádoby umístěné pod detektorem a lze ji vidět i na obr. 2.4. [25]



Obrázek 2.3: HPGe detektor uvnitř olověného stínění

Pro přesné vyhodnocení měření na HPGe detektoru je nutné před každým měřením provést energetickou a účinnostní kalibraci. Umožní správné určení jednotlivých izotopů a jejich množství. Energetická a účinnostní kalibrace je prováděna pomocí kalibračních zářičů, které jsou certifikovány. Průvodní certifikát obsahuje název radionuklidu, jeho aktivitu, poločas rozpadu, referenční datum, způsob výroby a další údaje.

### 2.1.2 Energetická kalibrace

Pro správné přiřazení konkrétních radionuklidů k jednotlivým energetickým linkám, tedy provedení kvalitativní analýzy, je nutné provést energetickou kalibraci spektrometru. Energetická kalibrace se provádí pomocí vybraných kalibračních



Obrázek 2.4: Schéma HPGe detektoru

zářičů, jež se volí tak, aby pokryly co největší interval energií. U těchto etalonů se po dostatečně dlouhou dobu naměří spektrum, a poté se přiřadí jednotlivé píky ke známým izotopům obsaženým v zářiči. Jedná se o vyjádření lineární závislosti mezi energií  $\gamma$ -záření a číslem kanálu analyzátoru (příklad uveden na obr. 2.5). Energetická kalibrace se provádí v prostředí programu Genie 2000.

### 2.1.3 Účinnostní kalibrace polovodičového HPGe detektoru

Pro provedení kvantitativní analýzy, tedy určení množství nuklidu ve vzorku, je nezbytné provést kalibraci absolutní detekční účinnosti. Provádí se v několika vzdálenostech od detektoru, v nichž se na základě naměřených dat určuje účinnost detektoru v závislosti na energii fotonu. I zde je nutné vybrat etalony, které pokrývají celé spektrum energií a je nutné znát i jejich aktivitu. Navíc je žádoucí, aby všechny etalony měly shodnou velikost a tvar. [26]

Účinnostní kalibrace je úměrná počtu kvant  $\gamma$ -záření, které zaregistruje detektor a počtu kvant, které vyzáří daný kalibrační zářič. Výstupem je tzv. *účinnostní křivka* vyjadřující závislost účinnosti detektoru  $\varepsilon$  a energie dopadajícího  $\gamma$ -záření  $E_\gamma$ . Její průběh je znázorněn na obr. 2.6. Účinnost detektoru není pro všechny energie stejná. Pro nízké energie je účinnost nízká, a to kvůli tomu, že obal detektoru je obvykle vyroben z hliníku pohlcující nízkoenergetické fotony. Se stoupající energií účinnost roste, poté začne opět klesat. Důvodem je fakt, že při vyšších energiích část fotonů pronikne detektorem bez fotoefektu nebo reaguje Comptonovým rozptylem. [26]

Jak již bylo řečeno výše, pro stanovení detekční účinnosti je nutné znát aktivitu kalibračních zářičů. Detekční účinnost a hodnota aktivity, kterou zachytí detektor,

se určují pomocí píků úplného pohlcení v naměřených spektrech. Dále je nutné znát některé veličiny z certifikátu přiloženému ke kalibračnímu zářiči. Aktivitu etalonu  $P_1$  je nutné vypočítat ke dni vykonání kalibrace, a to pomocí rozpadového zákona daného předpisem

$$P_1 = A_0 e^{-\lambda t_v^{\text{etal}}}, \quad (2.1)$$

kde  $A_0$  je aktivita zářiče uvedená v certifikátu etalonu,  $\lambda$  rozpadová konstanta a  $t_v^{\text{etal}}$  čas uplynutý od měření původní aktivity  $A_0$ .

Aktivita  $P_2$  zaznamenaná detektorem se určí ze vztahu

$$P_2(E_\gamma) = \frac{S(E_\gamma) \lambda \cdot \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}}}{I_\gamma(E_\gamma) (1 - e^{-\lambda t_{\text{real}}})}, \quad (2.2)$$

kde  $E_\gamma$  je energie daného fotopíku,  $S(E_\gamma)$  plocha fotopíku o energii  $E_\gamma$ ,  $t_{\text{real}}$  skutečná doba měření detektorem,  $t_{\text{live}}$  doba měření po odečtení mrtvé doby a  $I_\gamma(E_\gamma)$  představuje intenzitu gama linky  $E_\gamma$ .

Absolutní detekční účinnost, také nazývaná jako efektivita, je definována jako podíl aktivity zachycené detektorem  $P_2$  a aktivity vyzářené etalonem  $P_1$ . Pro danou energii  $E_\gamma$  platí

$$\varepsilon(E_\gamma) = \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.3)$$

Díky předpisu (2.3) lze získat diskrétní hodnoty účinnostní křivky pro energie  $E_\gamma$  a pro danou geometrii. Stanovené hodnoty lze proložit vhodným polynomem a obdržet tak již dříve zmiňovanou účinnostní křivku detektoru. Polynom prokládající diskrétní hodnoty má tvar

$$\varepsilon(E_\gamma) = \exp \left[ \sum_{i=0}^k a_i (\ln E_\gamma)^i \right], \quad (2.4)$$

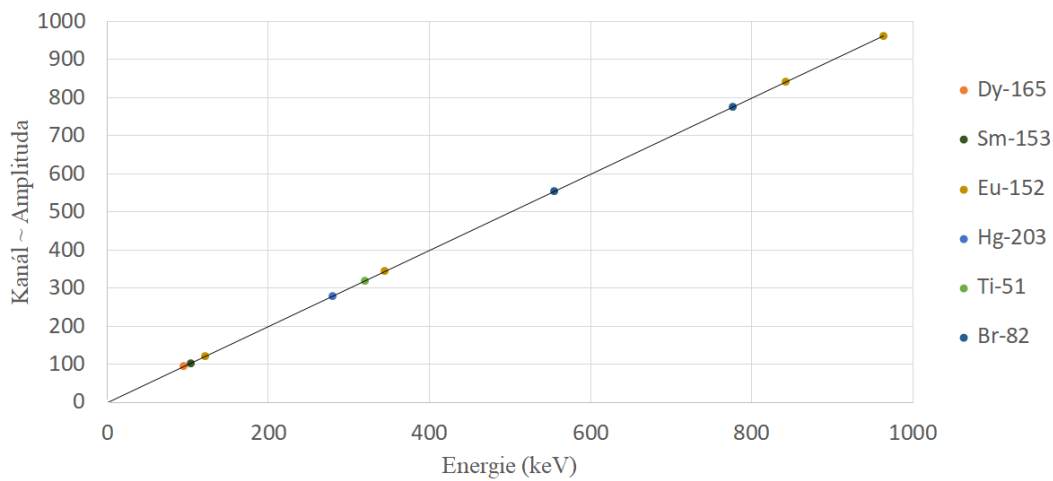
kde  $k$  představuje stupeň polynomu a  $a_i$  parametry fitu členů polynomu, které se na KJR získávají pomocí programu efekt32.exe. Do vstupního souboru programu efekt32 se zanáší energie píků, jejich účinnost a relativní odchylky účinností.

## 2.1.4 Nejistoty měření

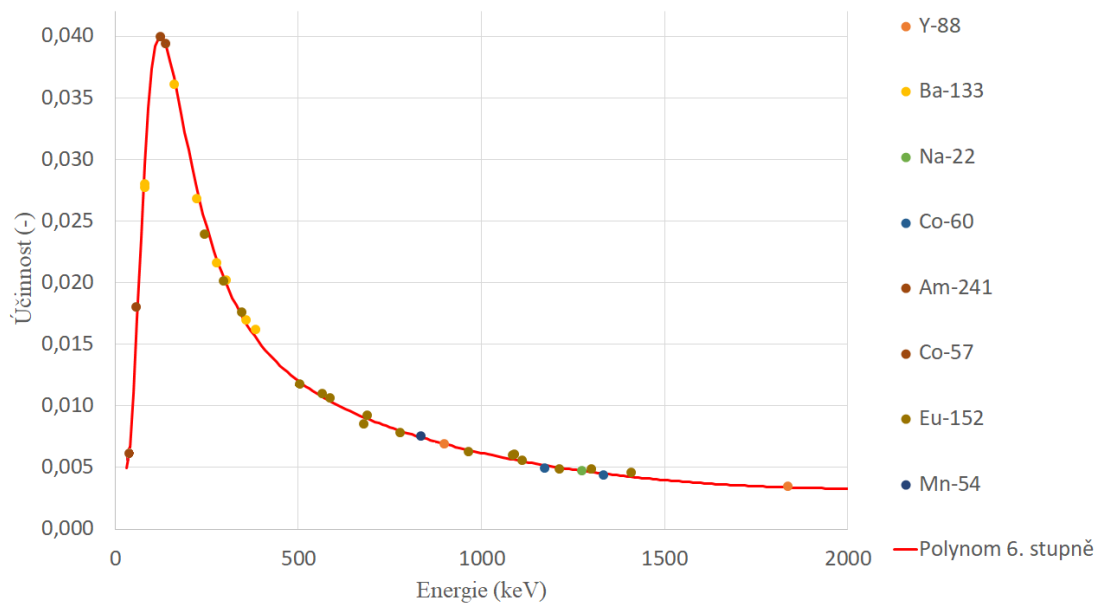
Nejistoty měření se vyskytují během každého experimentu a ovlivňují výsledek měření. Označují rozsah hodnot, které je možné přiřadit k měřené veličině. Aby bylo možné určit přesnost účinnostní křivky, je taktéž nutné stanovit nejistoty měření. Relativní nejistotu experimentálních bodů  $\varepsilon_{\text{err}}$  je možné určit ze vztahu převzatého z [28]

$$\varepsilon_{\text{err}}(E_\gamma) = \sqrt{A_{\text{err}}^2 + \left[ 0,03 \left( \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}} - 1 \right) \right]^2 + (t_v^{\text{etal}})^2 \cdot \left( \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \right)^2 \cdot (T_{1/2}^{\text{err}})^2 + S_{\text{err}}^2 + I_{\text{err}}^2}, \quad (2.5)$$

kde  $A_{\text{err}}$  je nejistota aktivity daného etalonu,  $T_{1/2}^{\text{err}}$  nejistota poločasu rozpadu radionuklidu,  $S_{\text{err}}$  nejistota plochy fotopíku a  $I_{\text{err}}$  nejistota intenzity. Koeficient 0,03 se v rovnici vyskytuje kvůli mrtvé době detektoru. Uvedený vztah se používá v SÚJV Dubna.



Obrázek 2.5: Příklad energetické kalibrace polovodičového HPGe detektoru [27]



Obrázek 2.6: Zobrazení kalibrace absolutní detekční účinnosti polovodičového HPGe detektoru

## Kapitola 3

# Neutronová aktivační analýza a monitorování neutronového pole

V současnosti má obrovský význam neutronové záření hrající nezastupitelnou roli při výrobě elektrické energie v jaderných elektrárnách. Dále se využívá ve výzkumné činnosti, a sice v neutronové radiografii, výrobě radiofarmak nebo v neutronové aktivační analýze, o které bude pojednáno později. Neutronové záření je druh ionizujícího záření tvořený volnými neutrony. Neutrony jsou emitovány z nestabilních jader atomu při různých jaderných reakcích, zejména při jaderném štěpení nebo jaderné fúzi. Neutronové záření nenese elektrický náboj, nemůže tedy ztrácet energii přímou ionizací atomů. Interakce s elektrony v elektronovém obalu atomu jsou minimální, neutrony reagují pouze s atomovými jádry. Neutronové záření je zároveň velmi pronikavé, lze ho ale efektivně odstínit vodíkem v případě rychlých neutronů. V případě neutronů tepelných se odstiňují materiály bohatými na vodík, například polyetylenem s přídavkem boru, lithia nebo kadmia. [29, 30]

Aktivační analýza je radioanalytická metoda založená na aktivaci jader neznámého vzorku a následném studiu jeho složení. Aktivací jader se rozumí reakce částic s prvkem vedoucím na vznik radioaktivní látky, přičemž aktivující částicí bývá nejčastěji neutron v případě jaderných reaktorů a proton při ozařování vzorků pomocí urychlovačů, například cyklotronu. Provádí se tzv. *kvalitativní analýza*, kdy se určují prvky, které se nachází v daném vzorku, a *kvantitativní analýza*, při níž je zjišťováno množství daného prvku ve vzorku. Objev aktivační analýzy učinili roku 1934 Irene Joliot Curie s manželem Fredericem Joliotem, již bombardovali hliník, bor a hořčík s přirozeně se vyskytujícími alfa částicemi. Návrh využít aktivační analýzu k určení prvků ve vzorku byl poprvé proveden roku 1936 Georgem de Hevesym a Hilde Levi, kteří použili neutrony jako částice ostřelující dysprosium a europium. [31] Metoda byla využitelná pro měření jader s dostatečným poločasem rozpadu a emitovanou aktivitou po ozařování v poli neutronů. Využitelná je i v případech, kdy jsou vznikající jádra stabilní, ale měří se okamžité  $\gamma$ -záření nebo nabitě částice vznikající v reaktoru při daných reakcích. Speciálním případem aktivační analýzy je *neutronová aktivační analýza* (NAA), kdy se studuje složení vzorku využitím aktivace ve známém neutronovém poli. I přes vývoj jiných analytických metod zůstává neutronová aktivační analýza dodnes hojně zastoupenou metodou k určování složení vzorků. [32]

Neutronová aktivační analýza byla v předkládané diplomové práci prováděna nedestruktivně na Katedře jaderných reaktorů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské v Praze. Byla uskutečněna za účelem zjištění znečištění pocházejícím z dopravy, těžby, zemědělství nebo průmyslu, a to provedením kvalitativní a kvantitativní analýzy.

Výhodou neutronové aktivační analýzy je možnost provedení nedestruktivní analýzy. Lze ji tedy použít například pro analýzu vzácných archeologických, geologických či medicínských vzorků. Mezi další výhody se řadí určení více prvků během jednoho měření nebo jejich stopového množství ve vzorku nebo snadná automatizace. V neposlední řadě, kvůli minimální manipulaci před ozařováním, existuje minimální riziko kontaminace vzorku. Lze určit velké rozsahy koncentrací, a sice od několika stotisícin až do desítek procent zastoupení prvku ve vzorku a získat velice přesné výsledky o nízké nejistotě. Nezáleží na skupenství měřené látky, pouze je nutné ji umístit do vhodné ampulky. Další výhodou je možnost použití radiochemické neutronové aktivační analýzy (RNAA), kdy je vzorek po ozařování radiochemicky separován a je možné stanovit vybrané prvky, konkrétně V, Cr, Mn, Co, Ni a další. [33]

Mezi další výhody se řadí nižší náklady na samotnou analýzu, na druhou stranu k analýze je zapotřebí drahých přístrojů, konkrétně reaktoru k ozařování nebo polovodičového HPGe detektoru k měření spekter. Jelikož NAA potřebuje jaderný reaktor, je popisovaná metoda používána výrazně méně než jiné dostupnější analytické metody jako je například atomová absorpční spektrometrie, hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plasmatem nebo rentgenová fluorescenční analýza. Další nevýhodou je práce s radioaktivním materiálem nebo další omezení daná vlastnostmi vzniklých radionuklidů jako je krátký poločas rozpadu, účinný průřez či intenzita dané reakce. V neposlední řadě je potřeba ozařovat vzorky při vyšším výkonu, což má za následek vyšší aktivitu vzorků. Dále je vhodné zmínit, že prvky jako vodík, uhlík nebo kyslík neprodukují během ozařování radioaktivní izotopy a pomocí NAA nemohou být měřeny. [34]

Díky výše zmíněným vlastnostem je NAA i v dnešní době stále používána, nejčastěji jako referenční metoda pro jiné analytické techniky.

## 3.1 Neutronové zdroje

Neutronovým zdrojem je jakýkoliv objekt emitující neutrony. Zdroje neutronů plní nezastupitelnou roli ve vědecko-výzkumných činnostech, průmyslových, přírodovědeckých či lékařských aplikacích nebo při studiu životního prostředí. Nejvíce využívanými zdroji pro uvedené účely jsou výzkumné jaderné reaktory, které dokáží poskytnout dostatečně vysoké hustoty toku neutronů v širokém spektru energií. Na druhou stranu ale mají vysoké pořizovací náklady a jsou náročné na obsluhu. Proto se tam, kde není vyžadována vysoká intenzita zdroje, používají spíše radionuklidové zdroje využívající k produkci neutronů reakce typu spontánního štěpení, reakce  $(\alpha, n)$  nebo  $(\gamma, n)$ . Mají malé rozměry, snadno se přepravují a nejsou náročné na údržbu a obsluhu. Také jsou levnější než jaderný reaktor. Jejich nevýhodou je, v porovnání s reaktory, nízká intenzita. Při používání radionuklidových zdrojů je nutné znát jejich základní charakteristiky s dostatečnou přesností. [35]

Radionuklidové zdroje využívající jaderných reakcí ( $\alpha, n$ ) se nejčastěji skládají ze dvou dominantních nuklidů. První slouží jako zdroj primárních  $\alpha$  částic, které v sekundární reakci interagují s terčovými jádry druhého nuklidu za emise neutronů. V současnosti jsou nejhojněji využívanými zdroji  $\alpha$  částic izotopy  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{241}\text{Am}$ . Za terčové materiály se volí výhradně lehké prvky, protože pouze vůči nim mají  $\alpha$  částice dostatečnou energii nutnou na překonání elektrostatické síly a uvolnění neutronu. Nejvhodnějším terčovým izotopem je  $^9\text{Be}$ , jiné terčové materiály se prakticky nepoužívají. Nejčastěji používanými zdroji využívajícími reakci ( $\alpha, n$ ) jsou AmBe a PuBe zdroje. [35, 36]

Podobně je tomu u foto-neutronových zdrojů využívající reakce ( $\gamma, n$ ). Skládají se opět z primárního zdroje fotonů a z terčového materiálu. Jako terčové materiály lze použít pouze izotopy vodíku  $^2\text{H}$  a berylia  $^9\text{Be}$ . Důvodem je dostatečně nízká vazebná energie neutronu, kdy indukovaný foton poté dokáže uvolnit neutron z vazby. Typickým představitelem neutronového zdroje využívaného v praxi je zdroj typu  $^{124}\text{SbBe}$ . Hlavní výhodou foto-neutronových zdrojů je, že v případě emitování monoenergetických fotonů při radioaktivní přeměně, jsou emitovány také monoenergetické neutrony. Energie monoenergetických neutronů je nižší než u jiných radionuklidových zdrojů. Nevýhodami jsou nízký výtěžek neutronů a obtíže spojené s přítomností vysokoenergetického  $\gamma$ -záření o značné intenzitě. [35, 36]

Dalším zástupcem zdrojů neutronů je spontánní štěpení. S rostoucím protonovým číslem izotopu stoupá pravděpodobnost spontánního štěpení. Vždy se však jedná pouze o minoritní způsoby přeměny, dominantním zůstává  $\alpha$  nebo  $\beta$  přeměna. Nejhojněji používaným nuklidem je  $^{252}\text{Cf}$  kvůli vysokému podílu spontánního štěpení, nižších nákladech na výrobu a vyššímu poločasu rozpadu, který je přibližně 2,65 roku. [36, 37]

Jako zdroje neutronů používají také generátory neutronů. Generátory neutronů jsou kompaktní zařízení produkující neutrony na základě fúzní reakce dvou izotopů vodíku. Fúzní reakce probíhají pomocí urychlených částic  $^2\text{H}$  nebo  $^3\text{H}$  v terči z kovového hydridu složeného z  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  nebo jejich směsi. [37]

Nakonec je vhodné zmínit urychlovačem řízené neutronové zdroje. Jsou to intenzivní zdroje neutronů pro výzkumné účely, protože poskytují podstatně vyšší neutronové toky než běžné radionuklidové zdroje. Pořád ale nedosahují tak vysokých toků jako na jaderném reaktoru. Jsou založené na jaderných reakcích vedoucích k produkci neutronů s využitím vhodného terčového materiálu. Jako zdroj nabitých částic, konkrétně protonů, deutronů či  $\alpha$  částic, je obvykle použit urychlovač. Urychlovač nabitých částic poskytuje svazky o vysokých intenzitách. Jako terčové materiály se obvykle používají  $^9\text{Be}$ ,  $^7\text{Li}$ , D nebo T. [38]

Nejvhodnějšími neutronovými zdroji pro neutronovou aktivační analýzu jsou výzkumné reaktory. Mají vhodné neutronové toky, dá se využít aktivace tepelnými, epitermálními neutrony, ale i rychlými neutrony nebo využití především reakcí radiačního záchyty, kde je dobrá znalost mikroskopických účinných průřezů. Dále je možné použít urychlovačem řízené neutronové zdroje, kdy je možná aktivační analýza rychlými neutrony. Uvedený neutronový zdroj má spojité spektrum a je možné nastavovat rozsah spektra vůči prahu reakcí studovaných radionuklidů. V neposlední



řadě se využívají radionuklidové zdroje, kdy je největší výhodou jejich přenositelnost. Nevýhodou na druhou stranu je nízká emisní četnost. [38]

## 3.2 Neutronové interakce

Aby bylo možné provést neutronovou aktivační analýzu, je nutné samotný vzorek nejprve ozářit. Jaderné reaktory jsou závislé na způsobu interakce neutronů s jádrem. Specifikem neutronů je absence elektrického náboje, proto mají možnost reagovat přímo s jádrem atomu a nikoliv s atomovým obalem. Energie neutronů v jaderném reaktoru se pohybuje v řádu setin eV až přibližně 20 MeV. V popsaném energetickém intervalu dochází k pružnému a nepružnému rozptylu, radiačnímu záchytu, štěpení, k produkci nabitých částic nebo reakcím produkujících neutrony. [39]

Pružný rozptyl ( $n,n$ ) nastává tehdy, když se dopadající neutron odráží od jádra a po srážce je v základním energetickém stavu. Speciálním případem je rezonanční pružný rozptyl, kdy po interakci neutronu s jádrem vzniká složené jádro. Během pružného rozptylu se zachovává kinetická energie a hybnost. Účinný průřez pro pružný rozptyl je konstantní pro nízké energie neutronu a nazývá se potenciálový rozptyl. Po oblasti potenciálového rozptylu následuje oblast rezonancí a oblast vysokých energií. Zde jsou rezonance již natolik husté, že mezi nimi nelze rozlišit a účinný průřez je hladkou a pomalu se měnící funkcí energie neutronu. Závislost mikroskopického účinného průřezu pro pružný rozptyl na energii neutronu je zanesena na obr. 3.1. [39, 40]

K nepružnému rozptylu ( $n,n'$ ) dochází, jestliže je po srážce jádro ponecháno v excitovaném stavu. Do základního stavu se vrací vyzářením neutronu a jednoho nebo více gama kvant. Jedná se o prahovou reakci, neutron musí mít dostatek energie, aby mohl uvést terčové jádro do excitovaného stavu. Mikroskopický účinný průřez pro nepružný rozptyl je nulový až do prahové energie. Závislost mikroskopického účinného průřezu pro nepružný rozptyl na energii neutronu je zanesena na obr. 3.1. [39, 40]

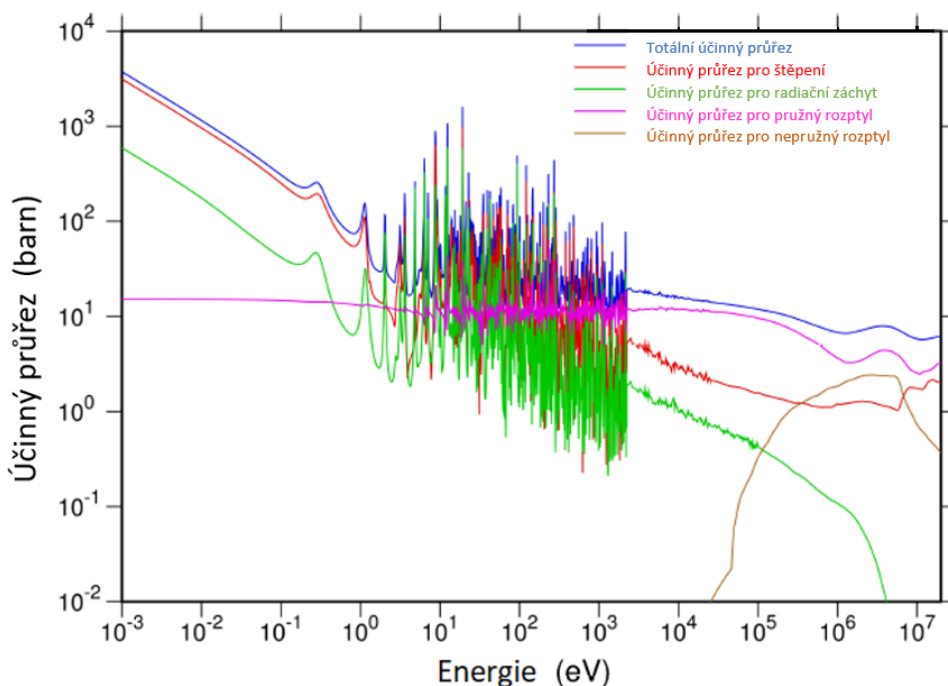
Radiační záchyt ( $n,\gamma$ ) je jadernou reakcí, při které dochází k absorpci neutronu a ke zformování těžšího jádra. Jádro je ponecháno v excitovaném stavu a do základního stavu se vrací pomocí vyzářením  $\gamma$ -záření. Jedná se o bezprahovou reakci, účinný průřez pro radiační záchyt se pro většinu nuklidů mění v oblasti nízkých energií jako funkce  $\frac{1}{\sqrt{E}} \sim \frac{1}{v}$ , proto se oblast nazývá jako  $\frac{1}{v}$  oblast. Rezonance v účinném průřezu pro radiační záchyt se vyskytují při stejných energiích jako rezonance pro mikroskopický účinný průřez pro pružný rozptyl. V oblasti vysokých energií je mikroskopický účinný průřez pro radiační záchyt hladkou funkcí energie neutronu. Závislost mikroskopického účinného průřezu a energie neutronu je opět zanesena na obr. 3.1. Je důležité říct, že popsaná reakce je nejčastěji uplatňována při neutronové aktivační analýze a byla využita i při experimentech diplomové práce. [40, 41]

Štěpení ( $n,f$ ) vyvolané neutrony nastává u těžkých jader. Patří k základní interakci uvolňující energii v jaderných reaktorech. Pohlcením neutronu se jádro rozpadne, obvykle na dva menší štěpné produkty. Lze pozorovat dvě odlišné energetické závislosti účinného průřezu pro štěpení v závislosti na charakteristikách jádra. První

průběh nastává u štěpných izotopů a je obdobný průběhu pro radiační záchyt. Druhý průběh je prahový a dochází k němu u štěpitelných izotopů. Závislost mikroskopického účinného průřezu pro štěpení a energie neutronu je vynesena na obr. 3.1. [39, 41]

Mezi další absorpční reakce patří produkce nabitých částic  $(n,\alpha)$ ,  $(n,p)$ . Jsou to reakce způsobující pohlcení neutronu a následnou emisi  $\alpha$  částice nebo protonu. Reakce může být jak exotermická, tak endotermická. [39]

Mezi poslední zmíněné reakce patří reakce produkující neutrony. Schematicky se zapisují jako  $(n,2n)$  či  $(n,3n)$ . Jsou to reakce s vysokoenergetickými neutrony. Také jsou endotermické a mohou uvolnit jeden až dva nové neutrony. [39]



Obrázek 3.1: Závislost mikroskopických účinných průřezů pro  $^{235}\text{U}$  [39]

### 3.3 Typy neutronové aktivační analýzy

Neutronovou aktivační analýzu lze provádět za různých podmínek. Lze ji rozdělit dle typu ozařování, tedy je-li vzorek ozařován v reaktoru tepelnými, epitermálními nebo rychlými neutrony. Další skupinou je rozdělení dle typu provedení analýzy, konkrétně může být NAA vykonána destruktivně či nedestruktivně. Posledním typem je možnost měření  $\gamma$ -záření, a sice je-li měřeno v průběhu či po ozařování v poli neutronů.

První rozebranou skupinou je rozdělení dle typu provedení analýzy, konkrétně zkoumání vzorků destruktivně či nedestruktivně. Mezi nejznámější typ NAA patří *instrumentální* neboli *nedestruktivní neutronová aktivační analýza* (INAA). Jak již napovídá samotný název, hlavní výhodou INAA je možnost nedestruktivní analýzy,

což nachází široké uplatnění v archeologii, geologii či ve forenzních vědách. INAA je také velmi citlivou metodou a pomocí ní je možné určit velké množství stopových prvků. Prvky se určují pomocí spektrometru s vysokým energetickým rozlišením. Na základě naměřených spekter se provádí kvalitativní a kvantitativní neutronová aktivační analýza. Opakem INAA je *radiochemická neutronová aktivační analýza* (RNAA). Po ozáření vzorku se provede radiochemická separace, aby se docílilo izolace jednoho nebo skupiny vybraných frakcí. [34]

Dalším typem NAA je dle měření  $\gamma$ -záření. *Promptní neutronová aktivační analýza* (PGNAA) se provádí během ozařování vzorků. Je to nedestruktivní metoda měřící  $\gamma$ -záření emitované okamžitě po radiačním záchytu neutronu s terčovým jádrem. PGNAA se používá u izotopů majících vysoký účinný průřez pro radiační záchyt, například B, Cd, Sm nebo Gd. Dále pro prvky, které mají nízký poločas rozpadu a nešly by změřit pomocí zpožděného  $\gamma$ -záření nebo u prvků produkujících stabilní izotopy, a sice lehké prvky. V neposlední řadě je možné pomocí PGNAA měřit izotopy mající nízkou intenzitu. Opakem PGNAA je *neutronová aktivační analýza pomocí zpožděného  $\gamma$ -záření* (DGNAA). Uvedený druh NAA se používá v případech, kdy vznikají radionuklidy s měřitelnými hodnotami intenzit, poločasů rozpadů, atd. Vzorek je po ozařování měřen ve spektrometru, pomocí jehož spekter je prováděna kvalitativní a kvantitativní analýza. [42]

Poslední typ provedení NAA závisí na energii neutronů. *Termální neutronová aktivační analýza* (TNAA) je prováděna tepelnými neutrony. Z obr. 3.1 lze vidět, že v oblasti nízkých energií, tedy u energií přibližně do 0,1 eV, je největší pravděpodobnost, že dojde k radiačnímu záchytu. Proto je TNAA považována za nejjednodušší a nejuniverzálnější typ hojně využívaný v laboratořích neutronové aktivační analýzy. *Epitermální neutronová aktivační analýza* (ENAA) slouží pouze k ozařování určitých nuklidů. Používá se u prvků majících výraznou a oddělenou rezonanci na počátku rezonanční oblasti. Aby nedocházelo k termální neutronové aktivační analýze, je vzorek obalen v materiálu absorbujícím tepelné neutrony, a to nejčastěji v kadmium nebo boru. Energie epitermálních neutronů se pohybuje v rozmezí 0,1 eV až 100 keV. Nakonec je vhodné zmínit *neutronovou aktivační analýzu pomocí rychlých neutronů* (FNAA), která se může provádět pomocí (n,p), (n, $\alpha$ ) či (n,2n) reakcí. Typickým příkladem je reakce s  $^{56}\text{Fe}$ , kdy dochází k reakci  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ . FNAA se může provádět i pomocí neutronových generátorů. Energie rychlých neutronů se pohybuje v hodnotách nad 100 keV. [43]

Na Katedře jaderných reaktorů je prováděna nedestruktivní a zpožděná neutronová aktivační analýza. Z většiny se zkoumají reakce způsobené tepelnými neutrony. Kvantitativní analýza se provádí pomocí tzv. relativní metody, která bude popsána v následující kapitole.

### 3.4 Metody neutronové aktivační analýzy

Kvantitativní analýza, konkrétně určování množství prvku ve vzorku, se stanovuje pomocí vybrané metody aktivační analýzy. Existuje několik metod, a sice absolutní a relativní metoda, dále komparátorová a  $k_0$ -NAA metoda.

*Absolutní metoda* umožňuje pomocí změřené aktivity vzorku přímo stanovit množství zkoumaného izotopu. Používá se velmi zřídka, protože je požadována přesná znalost neutronového spektra a účinného průřezu aktivační reakce v daném energetickém rozsahu. Znalost neutronového toku pro danou energii není obvykle známa, proto se používá spíše relativní metoda. [44]

*Relativní metoda* je proces, kdy je spolu s ozařovaným vzorkem ozařována i aktivační fólie nebo standard o známé hmotnosti hledaného prvku ve vzorku. Vzorek i aktivační fólie jsou ozařovány za stejných ozařovacích podmínek, a sice po stejnou dobu a ve stejné poloze kvůli co nejvíce identickému neutronovému poli. Je založena na porovnávání aktivity radionuklidu ve zkoumaném vzorku a aktivační fólie o známé hmotnosti. Hmotnost příslušného prvku ve zkoumaném vzorku  $m_{\text{vzorek}}$  se určí pomocí vztahu

$$m_{\text{vzorek}} = \frac{m_{\text{etalon}} \cdot A_{\text{vzorek}}}{A_{\text{etalon}}}, \quad (3.1)$$

kde  $m_{\text{etalon}}$  je hmotnost daného etalonu,  $A_{\text{vzorek}}$  aktivita prvku v ozářeném vzorku a  $A_{\text{etalon}}$  aktivita etalonu. Aktivity  $A_{\text{etalon}}$  a  $A_{\text{vzorek}}$  vyjadřují hodnoty vztažené k momentu, kdy byly vzorky vytaženy z reaktoru. Uvedená metoda je využívána na Katedře jaderných reaktorů a byla využita i v diplomové práci. Vztah pro aktivitu prvku ve vzorku  $A_{\text{vzorek}}$  bude odvozen v následující kapitole.

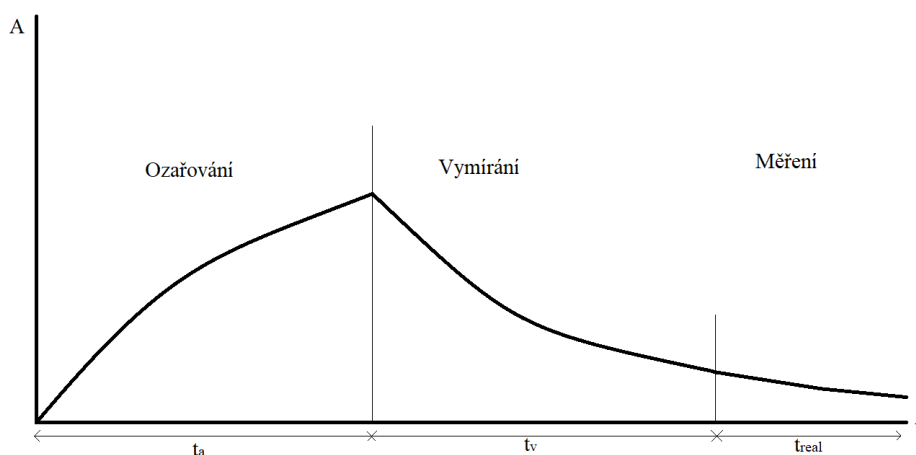
*Komparátorová metoda* je časově náročná pro určování většího množství prvků ve vzorku. Pro určování více prvků se využívá tzv.  $k$ -faktorů, které jsou obvykle určovány experimentálně společným ozářením standardu a komparátoru. Hmotnost prvku ve vzorku je potom stanovená stejně jako u relativní metody. Člen vpravo je ale navíc pronásoben  $k$ -faktorem. [45]

Metoda  $k_0$ -NAA vychází z komparátorové metody. Liší se pouze faktorem, zde označeným jako  $k_0$ -faktor, jenž je kombinací jaderných dat a experimentálně stanovených parametrů. Oproti komparátorové metodě jsou navíc  $k_0$ -faktory nezávislé na neutronovém toku a charakteristikách spektra. [45]

### 3.5 Fyzikální aparát neutronové aktivační analýzy

V průběhu neutronové aktivační analýzy jsou vzorky a aktivační fólie nejprve vloženy do pole neutronů, kde jsou ozařovány po určitou dobu. Jejich aktivita může narůst až po hodnotu nasycení označenou jako  $A_{\text{sat}}$  a nazývanou *saturovaná aktivita*. Po dosažení stanovené doby jsou vzorky a aktivační fólie vyjmuty z pole neutronů a přeneseny do laboratoře neutronové aktivační analýzy, kde jsou cyklicky měřeny na spektrometru detekujícím emitované  $\gamma$ -záření. Průběh aktivity během ozařování, přenosu a měření je zobrazen na obr. 3.2. Veličina  $t_a$  značí čas ozařování,  $t_v$  čas mezi vyjmutím z reaktoru a počátkem měření v detektoru a  $t_{\text{real}}$  čas měření v detektoru.

Na Katedře jaderných reaktorů je prováděna jak kvalitativní, tak kvantitativní neutronová aktivační analýza. Kvantitativní analýza se provádí pomocí relativní metody, která byla popsána v předešlé podkapitole. K určení hmotnosti prvku ve vzorku je používán vztah (3.1). Je třeba určit aktivitu radionuklidu, která se získá



Obrázek 3.2: Závislost aktivity vzorku na čase

z bilanční rovnice. Bilanční rovnice je definována jako změna počtu radioaktivních jader ve vzorku v průběhu ozařování a lze ji zapsat vztahem

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N, \quad (3.2)$$

kde  $N$  značí počet naprodukovaných radionuklidových jader,  $-\lambda N$  úbytek jader rozpadem a  $P$  tzv. produkční rychlost radionuklidů během ozařování.

Jedná se o obyčejnou diferenciální rovnici 1. řádu, která má po použití metody integračního faktoru a drobných úpravách tvar

$$N(t_a) = \frac{P}{\lambda} \cdot (1 + c \cdot e^{-\lambda \cdot t_a}). \quad (3.3)$$

Po dosazení počáteční podmínky vyjadřující, že na počátku ozařování vzorek neobsahuje žádná radioaktivní jádra, je hodnota konstanty  $c$  rovna  $-1$ . Matematický zápis počáteční podmínky je  $N(0) = 0$ . Dosadí-li se konstanta  $c$  do vztahu (3.3), je počet radioaktivních jader na konci ozařování roven

$$N(t_a) = \frac{P}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_a}). \quad (3.4)$$

Definici aktivity

$$A = \lambda \cdot N, \quad (3.5)$$

lze dosadit do (3.4) a získat tak vztah pro aktivitu v čase  $t_a$ , t.j. na konci ozařování, ve tvaru

$$A(t_a) = P \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_a}). \quad (3.6)$$

Po vyjmutí vzorků a aktivačních fólií z reaktoru již nedochází k produkci dalších radioaktivních jader a jejich aktivita se řídí pouze rozpadovým zákonem. Aktivitu

vzorku na počátku měření v detektoru lze zapsat ve tvaru

$$A(t_v) = A(t_a) \cdot e^{-\lambda \cdot t_v}. \quad (3.7)$$

Jakmile je vzorek umístěn do HPGe detektoru a spustí se měření, je možné určit aktivitu vzorku. Její časový průběh se zapíše jako

$$A(t_m) = A(t_v) \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad (3.8)$$

kde  $t_m$  je čas měření.

Aktivita je definována jako počet radioaktivních přeměn za jednotku času. Za dobu měření  $t_{\text{real}}$  zaregistruje HPGe detektor počet rozpadů  $N_r$  jako integrál

$$N_r = \int_0^{t_{\text{real}}} A(t_m) dt_m. \quad (3.9)$$

Po dosazení vztahů (3.6), (3.7) a (3.8) a zintegrování se získá předpis pro počet rozpadů

$$N_r = \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_a}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_v} \cdot P \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{real}}}). \quad (3.10)$$

Hodnota  $N_r$  není obecně známá a je potřeba ji určit pomocí gama-spektrometrického měření. S využitím těchto veličin se přepíše (3.10) na tvar

$$N_r = \frac{S(E_\gamma) \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}}}{I_\gamma(E_\gamma) \cdot \varepsilon(E_\gamma)}. \quad (3.11)$$

Ze vztahu (3.10) se vyjádří předpis pro produkční rychlost

$$P = \frac{N_r \cdot \lambda}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_a}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_v} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{real}}})}. \quad (3.12)$$

Produkční rychlost  $P$  je dále definována jako součin reakční rychlosti  $R_R$  a počtu stabilních jader  $N_0$ , tedy

$$P = R_R \cdot N_0. \quad (3.13)$$

Z (3.12) a (3.13) se určí reakční rychlost  $R_R$  ve tvaru

$$R_R = \frac{N_r \cdot \lambda}{N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_a}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_v} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{real}}})}, \quad (3.14)$$

jednotkou reakční rychlosti je ( $\text{s}^{-1}$ ).

Konečně dosazením (3.11) do předchozího vztahu se získá výsledný předpis pro reakční rychlost ozářeného vzorku

$$R_R = \frac{S(E_\gamma)\lambda \cdot \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{live}}}}{N_0 \cdot \varepsilon(E_\gamma) \cdot I_\gamma(E_\gamma) (1 - e^{-\lambda \cdot t_a}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_v} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{real}}})}. \quad (3.15)$$

Pomocí vztahu (3.6) a z obr. 3.2 vyplývá, že po dostatečně dlouhé době ozařování lze dosáhnout saturované aktivity, která je číselně rovna hodnotě produkční rychlosti

$$A_{\text{sat}} = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \lim_{t_a \rightarrow \infty} P (1 - e^{-\lambda \cdot t_a}) = P. \quad (3.16)$$

## 3.6 Aplikace neutronové aktivační analýzy

Neutronová aktivační analýza má ve světě široké uplatnění. Typicky se může využít ke kontrole a monitorování životního prostředí, v oblasti geologie a geochemie, biomedicíně, ve výzkumu materiálů, archeologii nebo v potravinářství. Zpočátku byla NAA používána v mnoha zemích k ověření uvedeného složení certifikovaných referenčních materiálů. NAA se ale postupem let stala tak populární, že v dnešní době slouží k validaci dalších metod zkoumajících složení vzorků. [33, 46]

V živých organismech se nachází velké množství prvků, ovšem většina z nich pouze ve stopovém množství a jejich koncentraci nelze měřit pomocí běžných metod. Různé prvky nacházející se v těle se pojí s lidským zdravím a možností jeho poruch. Proto se v oblasti *biomedicíny* začala používat NAA. Analyzované lidské vzorky se dělí na tvrdou tkáň, měkkou tkáň a tělní tekutiny. V případech tvrdých tkání byla například prováděna analýza kostí. Určovala se koncentrace vápníku a fosforu, aby se určila pevnost kostí. Z měkkých tkání se nejčastěji zkoumají játra. Je to velmi důležitý orgán, ve kterém je obsaženo velké množství stopových prvků v porovnání s jinými tkáněmi. Zkoumaly se i hladiny železa či hliníku v mozku, protože jejich zvýšené hodnoty údajně mohou vést k Alzheimerově chorobě. Z tělních tekutin se provádí analýzy krve a moči. Odebíraly se například vzorky krve u pracovníků v oblasti závodu zpracovávajícího nerezové oceli. Určovaly se hodnoty chromu a manganu. [46]

NAA lze provádět v rámci *archeologického výzkumu*. Vykonává se nedestruktivní neutronová aktivační analýza středověkých stříbrných mincí, keramiky, porcelánu a dalších. Na reaktoru VR-1 bylo studováno složení mamutích ostatků, konkrétně fragmentů mamutích kostí, jež jsou zaneseny na obr. 3.3. [47]

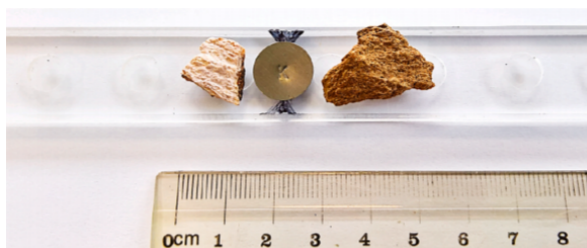
Další možná aplikace NAA je ve *forenzních vědách*. Důvodem je možnost změřit stopové množství prvků a vysoká přesnost výsledků. Metodu lze také provést nedestruktivně. Poprvé byla použita během vyšetřování na konci 60. let, kdy byl pomocí ní zatknut sériový vrah John Norman Collins (obr. 3.4). Vyšetřovatelé nechali provést neutronovou aktivační analýzu vlasů jedné z obětí, a sice z jejího oblečení a ze sklepa příbuzného pachatele, kde bylo nalezeno několik neznámých vzorků vlasů. Na základě analýzy bylo prokázáno, že vlasy ze sklepa patřily oběti. Byl to jeden z klíčových důkazů k zatčení Johna Collinse. Popisovaná metoda se dále používá u střelného prachu, barvy a biologických materiálů, nejčastěji vlasů. Například díky

neutronové aktivační analýze vlasů Napolena Bonaparteho bylo zjištěno, že byl otráven arsenem. [47, 49]

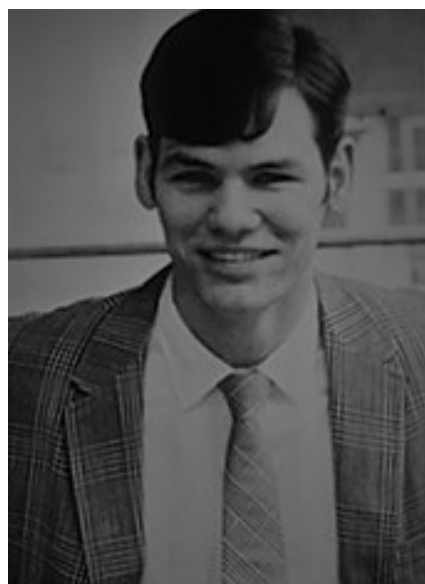
NAA bývá využívána i v *geologii*. Zkoumá se elementární zastoupení nerostů a jejich koncentrace v různých geologických oblastech. Mapování oblastí pomáhá určit místa, kde by mohla být zřízena úložiště radioaktivního odpadu. Také se určuje, které nerosty je vhodné použít jako součást cementu či betonu určených k biologickému stínění u jaderných zařízení. V minulosti bylo zkoumáno i složení meteoritů. [51]

V neposlední řadě je možné NAA použít v *potravinářství* a při zkoumání složení různých *doplňků stravy*. Určují se stopové toxické prvky, které by mohly škodit zdraví nebo se zkoumá, zdali doplňky obsahují vybrané prvky uvedené ve složení. Použitelná je i při ověření *zajištěné kvality referenčních materiálů*, kdy se kontroluje, zdali má daný materiál předepsané složení. Neutronová aktivační analýza může být provedena i u *průmyslových produktů* jako jsou oleje, slitiny, keramika, elektronické materiály a další.

NAA nachází široké uplatnění v *oblasti životního prostředí* za účelem stanovení jeho znečištění. Zkoumání znečištění životního prostředí bylo cílem diplomové práce a o dané aplikaci bude více pojednáno v následující kapitole.



Obrázek 3.3: Studované mamutí vzorky připevněné na plastovém držáku [48]



Obrázek 3.4: Fotka Johna Normana Collinse, červenec 1969 [50]

### 3.7 Aktivační detektory neutronů

V souvislosti s významnější produkcí neutronů v jaderných reaktorech, nabitých částic v urychlovačích a s použitím jaderných zbraní je potřeba měřit pole a dávky neutronů. Celá problematika se dělí na dva úseky. Prvním jsou metody detekce a spektrometrie neutronů, jejichž cílem je stanovit fluenci nebo příkon fluence neutronů a



energetické rozdělení těchto veličin. Druhým je metoda dozimetrie a radiační ochrana, jejichž cílem je stanovit ekvivalentní dávku neutronů a s ní související veličiny. Pro připomenutí, neutrony nepatří mezi ionizující částice. Z toho vyplývá, že pro jejich detekci se musí využívat konverzní materiál, jehož prostřednictvím jsou měřeny sekundární nabitě částice vzniklé interakcí neutronu s konverzním materiálem. Dalšími způsoby spektrometrie neutronů je metoda odražených jader, měření produktů jaderných reakcí, produktů štěpení vyvolaného neutrony nebo měření aktivity indukované neutrony. Aktivační detektory neutronů se řadí k měření produktů jaderných reakcí. Aktivační detektory se tedy nevyužívají pouze ke kvantitativní analýze, ale stanovením reakční rychlosti pomocí vztahu (3.15) a ze znalosti příslušných účinných průřezů lze monitorovat i neutronové pole reaktoru. [52]

Aktivační detektory neutronů jsou založeny na reakci neutronů s jádrem materiálu detektoru. Na rozdíl od ostatních detektorů měřících produkty jaderných reakcí ale nejsou vyhodnocovány produkty reakce vzniklé v okamžiku, kdy dochází k reakci, ale až vznikající radionuklidy. Aby bylo na základě vzniklé aktivity možné popsat neutronové pole, je na místě, aby vzniklá směs radionuklidů byla co nejjednodušší. Proto je vhodné jako aktivační detektory používat čisté prvky a pokud možno takové, u kterých dominuje jediná reakce s neutrony vedoucí ke vzniku radionuklidu. Vzniklý radionuklid by měl být snadno měřitelný a účinný průřez sledované reakce co nejvyšší. [53]

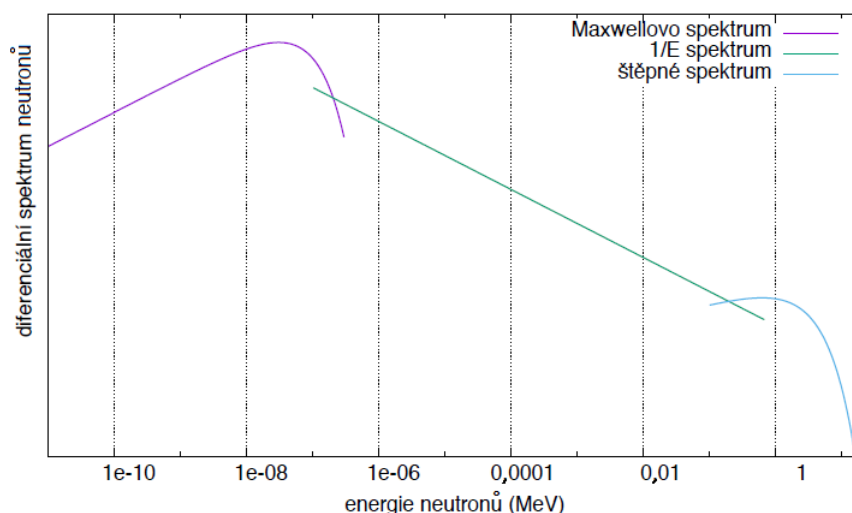
Ke spektrometrii neutronů je využíváno sady aktivačních detektorů, a sice z různých materiálů. Nejčastěji jsou ve formě tenké fólie nebo drátku. Přednostmi aktivačních detektorů jsou zejména malé rozměry a hmotnost, široká oblast použitelnosti nebo necitlivost vůči vnějším vlivům. [52, 54]

Neutronové spektrum jaderného detektoru je rozdělené na oblast tepelných, epitermálních a rychlých neutronů (obr. 3.5). Maxwellovo spektrum platí pro oblast tepelných neutronů, spektrum  $1/E$  pro epitermální neutrony a štěpné spektrum pro rychlé neutrony. Z obrázku lze vidět, že v reaktoru je největší příspěvek tepelných neutronů a je využíváno bezprahové reakce  $(n,\gamma)$ . Měření ale ovlivňují i epitermální a rychlé neutrony. Proto se využívají vhodné obalové materiály, které slouží k odfiltrování příspěvků tepelných neutronů. Pomocí dalších vztahů je poté možné získat hustotu toku tepelných neutronů. [53]

Nejčastěji používané aktivační detektory využívající bezprahové reakce  $(n,\gamma)$  pro detekci tepelných neutronů jsou  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{115}\text{In}$  nebo  $^{164}\text{Dy}$ . Pro detekci rychlých neutronů se používají prahové interakce, a sice  $(n,p)$  či  $(n,\alpha)$  na  $^{31}\text{P}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  či  $^{27}\text{Al}$ . Jako prahové aktivační detektory se využívají i některé štěpné materiály, konkrétně  $^{234}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  či  $^{238}\text{U}$ . [52]

### 3.8 Hustota toku tepelných neutronů

V minulé podkapitole bylo uvedeno, že pomocí aktivačních detektorů lze monitorovat neutronové pole reaktoru. Měří se absolutní hustota toku tepelných neutronů,



Obrázek 3.5: Odhad spektra hustoty toku neutronů [55]

jejíž získání spočívá ve znalosti hodnoty reakční rychlosti pro radiační záchyt neutronu a hodnoty účinného průřezu pro radiační záchyt. Účinný průřez je definován jako míra pravděpodobnosti, že dojde k dané reakci. Standardní energie pro tabelaci účinných průřezů pro tepelné neutrony je uváděna pro pokojovou teplotu 20,43°C. To odpovídá energii neutronu 0,0253 eV a rychlosti neutronu 2200 m/s. Většina reaktorů je provozována při jiné teplotě než je teplota pokojová. Proto byl zaveden tzv. *Westcottův formalismus* převádějící účinný průřez pro tabelovanou energii  $\sigma_0$  na efektivní účinný průřez  $\sigma_{ef}$  pro aktuální teplotu reaktoru. Vztahy byly převzaty z [35].

Aby bylo možné zjistit hustotu toku tepelných neutronů, je nutné zvolit vhodný aktivační detektor. Musí být dostatečně citlivý na tepelné neutrony, také musí být znám jeho mikroskopický účinný průřez pro radiační záchyt tepelných neutronů. Jeho poločas rozpadu musí být tak dlouhý, aby bylo možné po ozáření dostatečně změřit jeho gama spektrum. To mimo jiné znamená, že musí být vybrán izotop, který po radiačním záchytu vyzařuje  $\gamma$ -záření. Gama kvanta zároveň musí mít vyšší intenzitu a energii, která bude snadno odlišitelná od gama kvant z přirozeného pozadí. Vhodný aktivační detektor se ozařuje holý a v kadmiovém pokrytí.

Hustota toku tepelných neutronů se určuje pomocí reakční rychlosti. Její hodnota se získá ze vztahu (3.15). Pro reakční rychlost dále platí

$$R_R = \sigma_{ef} \cdot \phi, \quad (3.17)$$

kde  $\sigma_{ef}$  je efektivní účinný průřez pro reakci neutronu s terčovým jádrem ozařovací fólie a  $\phi$  hustota toku neutronů.

Reakční rychlost tepelných neutronů odpovídá rozdílu celkové reakční rychlosti holé aktivační fólie získané pomocí vztahu (3.15) a aktivační fólie umístěné v kadmiovém pokrytí. Vyjádří se následující předpis

$$R_{Rth} = R_R - F_{cd} \cdot R_{Rcd}, \quad (3.18)$$

kde  $R_{\text{Rth}}$  je reakční rychlost tepelných neutronů,  $R_{\text{R}}$  reakční rychlost v případě holé aktivační fólie,  $F_{\text{cd}}$  kadmiový korekční faktor zohledňující skutečnost, že kadmium zachycuje i neutrony na hranici epitermální a tepelné oblasti a  $R_{\text{Rcd}}$  reakční rychlost aktivačního detektoru v kadmiovém pokrytí.

Na základě znalosti předchozích vztahů lze získat hustotu toku tepelných neutronů  $\phi_{\text{th}}$  definovanou předpisem

$$\phi_{\text{th}} = \frac{R_{\text{Rth}}}{\sigma_0}, \quad (3.19)$$

kde  $\sigma_0$  značí účinný průřez pro tabelovanou energii. Uvedený vztah platí pro případ, kdy se účinný průřez mění dle zákona  $1/v$ .

Pro případ, kdy se účinný průřez pro danou reakci nemění dle zákona  $1/v$ , platí pro hustotu toku tepelných neutronů

$$\phi_{\text{th}} = \frac{R_{\text{Rth}}}{g \cdot \sigma_0}, \quad (3.20)$$

kde  $g$  je Westcottův  $g$ -faktor vyjadřující odchylku od zákona  $1/v$  a platící pouze pro tepelné neutrony.

K charakterizaci neutronového pole v reaktoru se kromě reakčních rychlostí využívá i tzv. *spektrálních indexů*. Spektrální index je definován jako podíl reakčních rychlostí pro různé materiály, reakce a energetické oblasti neutronů. K nejznámějšímu a nejpoužívanějšímu spektrálnímu indexu v reaktorové fyzice patří *kadmiový poměr*  $r_{\text{cd}}$ , který rozlišuje zastoupení tepelných a epitermálních neutronů. Určuje se na základě předpisu

$$r_{\text{cd}} = \frac{R_{\text{R}}}{R_{\text{Rcd}}}. \quad (3.21)$$

# Kapitola 4

## Znečištění životního prostředí

Kvalita životního prostředí významně ovlivňuje zdraví člověka. Dle odhadu Světové zdravotnické organizace zemře předčasně každým rokem v důsledku znečištění ovzduší polévatým prachem asi 280 tisíc lidí. Mezi nejvýznamnější důsledky polévatého prachu patří respirační, kardiovaskulární, metabolická a nádorová onemocnění nebo vývojové a reprodukční poruchy. [56]

I přes to, že mnohé země již zavedly opatření ke snížení znečištění životního prostředí, je každým rokem do životního prostředí vypuštěno velké množství polutantů. Mnoho znečišťujících látek je do atmosféry uvolněno ve formě aerosolů nebo drobných kapalných a pevných částic. Za hlavní zdroj znečištění životního prostředí je obecně považován průmysl, výroba energie, vytápění domácností, doprava a spalování odpadu. [57].

Aby bylo možné vyvinout účinné strategie pro zlepšení kvality ovzduší, je dobré vědět, jaké typické znečišťující látky jsou emitovány z různých zdrojů. Příklady škodlivých prvků a jejich emitorů jsou uvedeny v tab. 4.1

Tabulka 4.1: Příklad zdrojů znečišťujících látek [57]

Zdroj	Prvky
Uhelné elektrárny	As, Se, S
Tepelné elektrárny	V, Ni, vzácné prvky
Doprava	Br, Pb
Spalování odpadu	Ag, Zn, Sb, Cd, Sn, Pb
Spalování dřeva	C, S, N
Rafinerie	Vzácné prvky
Tavírny sulfidů	In, Cd, As, Se, S

Znalost prvkového složení životního prostředí, tedy vzduchu, vody a půdy, je důležité z hlediska zjištění jeho znečištění. Speciální pozornost je věnována těžkým kovům, které jsou nejvíce škodlivé pro životní prostředí a lidské zdraví. Kovy jako kadmium, rtuť, olovo či arsen jsou známy pro jejich toxicitu. Těžké kovy jsou do ovzduší uvolňovány z těžby nebo spalováním fosilních paliv. Do atmosféry se těžké kovy dostávají i přirozenými procesy, např. vulkanickými erupcemi. [58]

Ke zjištění znečištění životního prostředí se v dnešní době nejčastěji používají biomonitory. Biomonitory jsou biologické indikátory sloužící k detekci změn fyzikálních a chemických vlastností životního prostředí. Mezi biomonitory se řadí mechy, lišejníky, jehličí, listy a jiné. Výhodami sledování biomonitorů jsou zvýšené koncentrace znečišťujících látek v porovnání se systémem, který má být zkoumán. Jejich sběr je obvykle jednodušší než přímé postupy odběrů vzorků a většina organismů a tkání také odráží průměrné vnější podmínky za delší dobu. V neposlední řadě mohou biologické monitory neustále kontrolovat znečištění životního prostředí, a to díky jejich neustálé přítomnosti v něm. [57]

Využitím NAA mohou být sledovány i vzorky anorganické, konkrétně půdy a sedimenty. Jejich výhodou je, že obsahují vyšší množství kovů než je tomu například u vzduchu, vody či rostlin. Neutronová aktivační analýza se může provádět i na houbách.

Dalším typem vzorků, na němž je použitelná NAA, je voda. Uvedený typ vzorků se musí před samotným ozařováním upravit, proto není v praxi příliš využíván. [46]

S ohledem na zkoumání životního prostředí byla diplomová práce zaměřena jednak na analýzu anorganických vzorků, konkrétně náplavových půd, a také na analýzu biomonitorů, a sice mechu. Uvedená práce se zabývala stanovením koncentrace arsenu, sodíku a draslíku v nasbíraných vzorcích.

## 4.1 Anomální výskyt arsenu v půdách České republiky

Arsen je polokov vyskytující se ve třech alotropických<sup>1</sup> modifikacích. Chemicky je podobný fosforu a může ho nahradit v některých reakcích. Je to toxický<sup>2</sup> prvek, jenž je znám již od starověku, kdy se využíval jako součást slitin. Kovový arsen není toxický, nicméně v organismu je metabolizován<sup>3</sup> na toxický  $\text{As}_2\text{O}_3$ . V minulosti došlo k nespočtu otrav arsenem, ať už záměrným, nebo náhodným. Například v roce 2008 v Číně bylo kolem 450 lidí otráveno vodou, do které se deštěm vyplavil obsah úložiště z místní továrny. Arsen a jeho sloučeniny se nevyskytují pouze ve vodě, ale i ve vzduchu a v půdě. Půda je sférou, kde se arsen a jeho sloučeniny akumulují ve zvýšených koncentracích a dochází v ní k celé řadě procesů ovlivňující mobilitu arsenu. [59, 60]

V okolním prostředí je možné se běžně setkat s určitou nízkou hladinou arsenu. Do těla proniká nejčastěji potravou a vodou, vstřebává se a ukládá zejména v kůži, vlasech a nehtech. Z organismu je vylučován převážně močí. Může dojít k chronické nebo akutní otravě arsenem. Akutní otrava arsenem bývá poměrně dramatická. Projevuje se bolestmi břicha, průjmy, nevolností, zvracením, motáním hlavy nebo

---

<sup>1</sup>Alotropie–Vlastnost chemického prvku označující schopnost vyskytovat se v několika různých strukturních formách, které mají výrazně odlišné fyzikální vlastnosti.

<sup>2</sup>Toxicita–Vlastnost chemických sloučenin spočívající ve vyvolání otravy osob nebo zvířat, které látku požíly, vdechly či vstřebaly kůží.

<sup>3</sup>Metabolizace–Proces látkové přeměny v živých tkáních.

poruchami vědomí. Poměrně často se objevuje rozpad červených krvinek. Arsen způsobí poškození základních životních orgánů, která mohou skončit kómatem nebo smrtí. Chronická otrava menšími dávkami arsenu má zejména kožní projevy (obr. 4.1). Postižení jedinci mají vyšší riziko vzniku rakoviny kůže. Dále se mohou vyskytovat příznaky jako brnění končetin nebo toxické poškození jater. Přebytek arsenu se z těla vylučuje pomocí látek, které na sebe arsen navážou a jsou vyloučeny z těla ven. Při akutní otravě lze arsen vyloučit dialýzou. [61, 62]



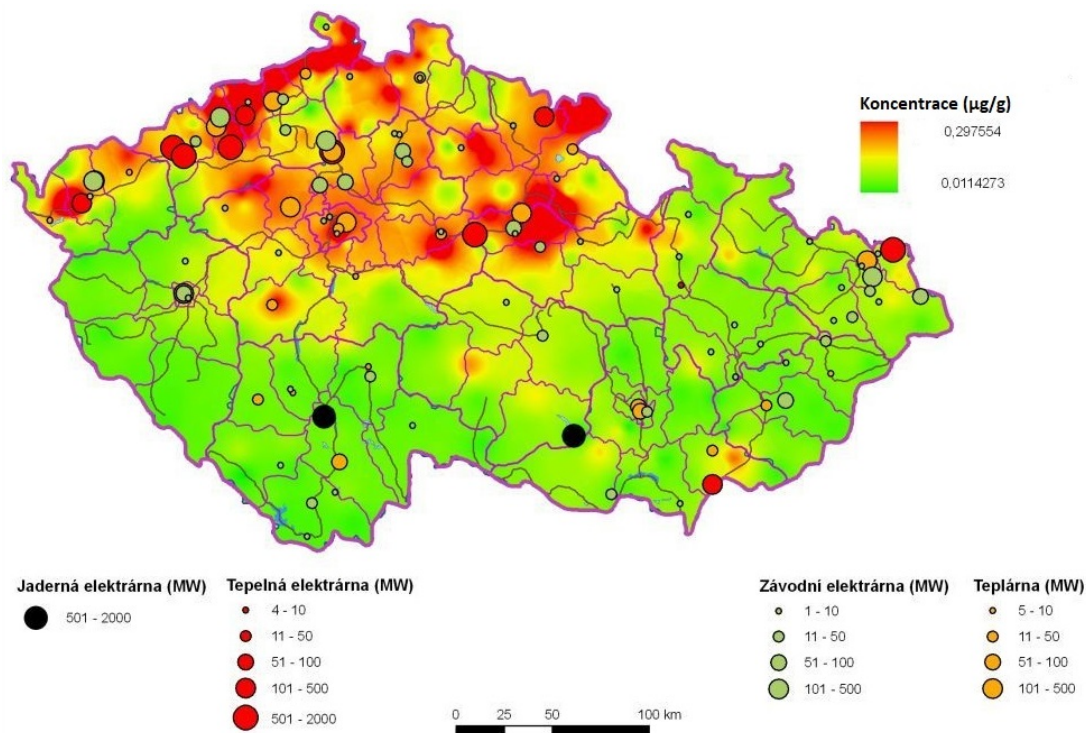
Obrázek 4.1: Kožní projevy při chronické otravě arsenem [63]

Zdroje kontaminace arsenem v životním prostředí mohou být přírodní nebo antropogenní. K přírodním zdrojům arsenu patří vulkanická činnost a zvětrávání hornin bohatých na arsen. Do životního prostředí se arsen dostává i antropogenními činnostmi, konkrétně v důsledku hutnictví, výrobou kovů, spalováním uhlí nebo spalováním dřeva ošetřeného arsenovými preparáty. Dříve byl arsen také součástí pesticidů. Příklad koncentrace arsenu v jehličí naměřeném v roce 2005 je na obr. 4.2. Dle [65] je koncentrace arsenu v mechorostech přibližně stejná jako v jehličí. Na základě přiloženého obrázku lze říci, že spalováním fosilních paliv a důlní činností je půda v řadě oblastí České republiky postižena kontaminací arsenem. U důlní činnosti se jedná o lokální zdroj znečištění, u spalování fosilních paliv jde o významný zdroj plošného znečištění. [64]

## 4.2 Kyanidy a jejich dopad na životní prostředí

Kyanidy je obecný název pro sloučeniny, ve kterých se kombinuje uhlík s dusíkem. Jako kation může v kyanidech vystupovat celá řada kovů, jako například sodík, draslík a další. Uvedené sloučeniny jsou v malé míře přirozenou součástí životního prostředí, protože jsou produktem některých bakterií, hub a řas. Do životního prostředí se ale dostávají i antropogenními činnostmi, a to především z průmyslových odpadních vod, z povrchové a tepelné úpravy kovů, tepelného zpracování uhlí, při čištění ropy nebo spalování fosilních paliv či plastů. [67]

Kyanidy jsou rozpustné ve vodě a v alkoholu. Ve styku s vodou mohou mít zápach po kyanovodíku, tedy mandlový zápach, nebo po amoniaku, a sice štiplavý zápach. Po okyselení se z kyanidů uvolňuje kyanovodík, což je prudce jedovatý plyn. Kyanidy a kyanovodík nelze tím pádem oddělovat jako dvě látky. Kyanidy mohou obsahovat i toxické kovy, konkrétně kadmium, olovo a řadu dalších kovů. [68]



Obrázek 4.2: Koncentrace arsenu v jehličí, rok 2005 [66]

Kyanidy jsou používány v chemickém, metalurgickém a fotografickém průmyslu. Dále při výrobě plastů, pryží a výbušnin. Kyanid sodný a draselný jsou důležité sloučeniny při elektrochemickém pokovování a tvrzení ocelí. V neposlední řadě mohou být kyanidy používány pro extrakci zlata a stříbra z minerálů v těžebním průmyslu.

V případě uvolnění kyanidů do vody či půdy je jejich akumulace ve vodních organismech nepravděpodobná. Kyanid ve vodě a půdě je totiž nestálý a může se rychle odpařit do ovzduší ve formě kyanovodíku. Podléhají také mikrobiologickému rozkladu. Kyanidy se neváží na částice půdy, mohou se proto vyluhovat do podzemních vod. Jsou navíc vysoce toxické pro ryby a ostatní vodní organismy, protože narušují vázání kyslíku dýchacími enzymy. Kyanidy jsou látky ohrožující zdraví člověka. Do organismu mohou vstupovat inhalací, ingescí, ale i prostupem pokožkou. Větší dávka způsobí, že je zastaveno buněčné dýchání, buňky nejsou schopny využít kyslík. Smrtelná dávka kyanidu draselného je pro člověka 200 mg. Otrava se nejprve projeví u tkání s největšími nároky na kyslík. Nejcitlivější je nervová tkáň, prvotními příznaky při otravě kyanidem je únava, bolest hlavy, hučení v uších a nevolnost. Smrt nastává jako důsledek nedostatku kyslíku životně důležitých center v prodloužené míše. [68]

# Kapitola 5

## Studium složení vzorků životního prostředí na výzkumných reaktorech

Jak již bylo řečeno v dřívějších kapitolách, neutronová aktivační analýza se používá i pro studium environmentálních vzorků, právě za účelem zjištění znečištění životního prostředí. Bylo zkoumáno složení jak organických, tak anorganických vzorků. V následujícím textu budou popsány výzkumné reaktory a jejich konkrétní využití NAA půd a mečů.

### 5.1 Rychlý pulzní reaktor IBR-2

Reaktor IBR-2 je rychlý pulzní reaktor chlazený tekutým sodíkem. Poprvé byl spuštěn roku 1984 a nachází se ve Spojeném ústavu pro jaderný výzkum (SÚJV) Dubna v Rusku. Průměrný výkon je 2 MW, výkon pulzu asi 1850 MW, palivem je  $\text{PuO}_2$ . Aktivní zóna reaktoru má nepravidelný hexagonální tvar, je složená z 69 palivových kazet s maximálním vyhořením o 9 %. Hustota toku tepelných neutronů v moderátoru je průměrně asi  $10^{13}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , maximálně přibližně  $10^{16}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Aktivní zóna je uložena ve dvojité ocelové nádobě, která je obklopená stacionárním reflektorem, kontrolními a řídicími tyčemi, vodním moderátorem a 14 horizontálními kanály. Moderátor slouží k termalizaci rychlých neutronů, jež jsou využity během experimentů v horizontálních kanálech.

Unikátní vlastností reaktoru je možnost periodicky měnit reaktivitu. Toho se dosáhne otáčením hlavního a pomocného pohyblivého reflektoru. Rotory uvedených reflektorů se pohybují v opačných směrech s různými rychlostmi. Při frekvenci 5 Hz je reaktor uveden z hlubokého podkritického stavu do stavu nadkritického. Výkonový impuls je vytvořen v okamžiku, kdy se oba reflektory přiblíží k aktivní zóně reaktoru.

V současné době se na reaktoru nachází 13 zařízení umožňujících vědecký výzkum, například 7 difraktometrů, spektrometr pro rozptyl neutronů malého úhlu,

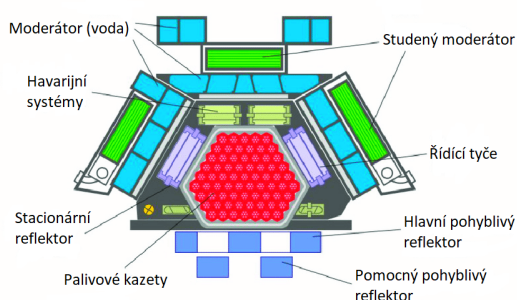


reflektometry, nepružné spektrometry, atd. Ve výstavně je navíc neutronový zobrazovací aparát pro rentgenové a tomografické studie (NRT) a Fourierův spektrometr pro měření napětí (FSS).

Reaktor IBR-2 se používá hlavně v oblasti fyziky kondenzovaných látek a aplikovaného výzkumu včetně neutronové aktivační analýzy. Schéma reaktoru IBR-2 a hala reaktoru jsou na obr. 5.1 a obr. 5.2. [69]

### 5.1.1 Studium mečů ze železné huti, sever Norska

Na reaktoru IBR-2 bylo provedeno mnoho experimentů zkoumajících znečištění životního prostředí. Jako příklad lze uvést zkoumání mečů pomocí instrumentální neutronové aktivační analýzy popsané v [71]. Bylo nasbíráno několik vzorků rokytníku světlého z 25 míst v oblasti železné huti na severu Norska a zkoumáno složení z hlediska znečištění těžkými kovy. Výsledkem bylo nalezení 38 prvků včetně těžkých prvků typických pro hutní průmysl jako je Cr, Fe, Mo, Sr, Se nebo Hf. Byly nalezeny zvýšené hodnoty chromu a železa. Po uzavření huti a provedení dalších analýz se zjistilo, že hodnoty chromu v meších byly zvýšené asi 100× oproti měření provedeném během provozu huti. Naopak tomu bylo u železa, jeho hodnoty vyšly asi 10× menší než při analýze za provozu huti. [71]



Obrázek 5.1: Schéma pulzního reaktoru IBR-2 [70]



Obrázek 5.2: Rychlý pulzní reaktor IBR-2 [70]

### 5.1.2 Zkoumání mečů z města Baia Mare, Rumunsko

Další analýza mečů prováděná na popsaném reaktoru je z oblasti Baia Mare, což je město nacházející se v Rumunsku. Bylo analyzováno několik vzorků rašeliníku Girgensohnova v silně znečištěném okolí Baia Mare. Experiment probíhal tak, že bylo nasbíráno devět vzorků uvedeného mechu, a sice z oblasti Dubny v Rusku a z blízkosti hory Vitoshka nacházející se v Bulharsku. Před samotným začátkem experimentu byla zjištěna koncentrace vybraných 36 prvků, mezi nimiž se nacházel As, Ag, Cd, Na, Mg a další. Uvedené mechy byly poté zasazeny na balkónech ve výšce asi 24 metrů nad zemí, kde byly ponechány 4 měsíce. Po tomto období na nich byla provedena nedestruktivní NAA a byla sledována koncentrace stejných 36 prvků. Mechy obsahovaly zvýšené hodnoty Ag, As, Cd či Zn, což jsou prvky typicky se

nacházející v oblasti průmyslu, konkrétně nedaleko budov pro zpracování zinku a olova. V neposlední řadě byly srovnávány koncentrace vybraných prvků mezi mechy nasbíranými v Rusku a Bulharsku. Zkoumaly se také rozdíly mezi ozařováním celých rostlinek mechů a pouze jejich listů [72]

### 5.1.3 Analýza půd z delty Nilu, Egypt

Nil je jednou z největších řek na planetě Zemi. Prochází 11 státy a vlévá se do Středoziemního moře. Delta Nilu byla hustě osídlena již od dávných let a dané území je navíc centrem průmyslu a zemědělství. Nil také slouží jako odvod odpadních vod. Z uvedených důvodů bylo nasbíráno 40 vzorků náplavových půd ze břehu Nilu, všechny na území Egypta. Nebyly zjištěny žádné zvýšené hodnoty, ve vzorcích se ovšem v menší míře nacházely prvky pocházející z průmyslu, a to Ni, Cu, Zn nebo As. Navíc ve vzorcích byly nalezeny prvky nacházející se v nerostech z Etiopské vysočiny. Ukazuje se, že Nil je zodpovědný za transport sedimentů na delší vzdálenosti. [73]

## 5.2 TRIGA Mark-III, Mexiko

Reaktor TRIGA Mark-III je umístěn v jaderném výzkumném centru Dr. Nabora Carrilla Florese, jenž je součástí Národní instituce jaderného výzkumu (ININ) nacházející se mezi Mexico City a Toluca City. Reaktor Mark-III je v provozu od roku 1968 a dosahuje maximálního výkonu rovnému 1000 kW. Jedná se o reaktor bazénového typu, podstava a stěny jsou tvořeny hliníkem a jsou zabudovány do betonového stínění.

Aktivní zóna reaktoru je umístěna v blízkosti dna bazénu a je zavěšena na pohyblivém mostu podél bazénu. Chlazení reaktoru je zajištěno přirozenou konvekcí, reaktor může být provozován na plném výkonu v jakékoliv poloze aktivní zóny v bazénu. Obsahuje 74 nízko obohacených palivových kazet obsahujících  $UO_2$ , 4 řídicí tyče. Aktivní zóna má 126 různých pozic v 6 soustředných prstencích obklopujících střed aktivní zóny. Na kraji aktivní zóny se nachází grafitový reflektor. [74]

### 5.2.1 Sběr mechů z údolí Toluca, Mexiko

Toluca je jedním z větších měst nacházející se v Mexiku. V metropolitní oblasti uvedeného města bylo nasbíráno několik vzorků mechů za účelem zjištění znečištění. Odebraná místa zahrnovala osídlené, průmyslové i přírodně chráněné oblasti. Výsledky ukázaly, že osídlené oblasti byly výrazně víc zasaženy průmyslem než přírodně chráněná místa. Bylo zjištěno, že v osídlených oblastech byly vlivem průmyslu zvýšené hodnoty těžkých kovů, a sice As, Cr, Cu, Zn, Pb, Se, Cs a Sb. [75]

## 5.3 TRIGA Mark-II, Bangladéš

TRIGA Mark-II reaktor je výzkumný reaktor o výkonu 3 MW nacházející se v budově Bangladéšské komise pro atomovou energii (BAEC). Jedná se o lehkovodní reaktor válcového tvaru, který je v provozu od roku 1986. Palivem je nízko obohacený uran-zirkonium-hydrid uspořádaný v kruhové mříži. Kruhové mříže dále obsahují grafitový reflektor. Aktivní zóna se skládá ze 100 palivových kazet a z 6 řídicích tyčí a je umístěna v hliníkové nádobě.

Reaktor se nepoužívá pouze k neutronové aktivační analýze, ale i k výuce, produkci radioizotopů nebo k radiografii. [76]

### 5.3.1 Sběr půd v Bangladéši

Bangladéš je stát nacházející se v jižní Asii mající největší říční deltu na světě. Je to velmi úrodná země, ovšem půda je náchylná k nižší úrodnosti a kvalitě kvůli vysokému počtu obyvatelstva, a tím pádem vysokému podílu zemědělství. Zároveň ubývá úrodné půdy, protože se do popředí dostává průmysl a rozšiřují se obytné oblasti.

Koncentrace těžkých kovů v půdě a v ovzduší je velmi důležitým aspektem z hlediska kvality životního prostředí. Proto byly nasbírány dva vzorky půdy nacházející se v oblasti Singair Upazila. Na těchto vzorcích byla opět provedena INAA zaměřená na těžké kovy, určovala se jejich koncentrace a porovnávaly se získané hodnoty mezi analyzovanými místy. Na jednom ze dvou zkoumaných míst byly nalezeny zvýšené hodnoty sodíku. Jako důsledek průmyslu byl ve vzorcích nalezen také arsen, jeho hodnoty ale nebyly nad stanovenými limity. V důsledku průmyslu se v nasbírané půdě nalézalo také železo, mangan, chrom nebo scandium. Na obr. 5.3 a obr. 5.4 je vidět sběr půdních vzorků a vzorky zabalené a připravené těsně před ozařováním. [77]



Obrázek 5.3: Sběr půdních vzorků pomocí metody vrtání [77]



Obrázek 5.4: Připravené vzorky půd těsně před ozařováním v poli neutronů [77]

## 5.4 Výzkumný reaktor NIRR-1, Nigérie

Nigerijský výzkumný reaktor-1 (NIRR-1) je Malý výzkumný reaktor (MNSR), jenž byl ještě před necelými dvěma lety vybaven vysoce obohaceným palivem  $U-Al_4$  z Číny. V srpnu roku 2019 bylo dle IAEA zmiňované vysoce obohacené palivo vráceno do Číny a vyměněno za nízko obohacené palivo  $UO_2$ . Reaktor byl navrhnut a postaven Čínským institutem pro atomovou energii (CIAE). Nachází se v Centru pro energetický výzkum a výuku na univerzitě Ahmadu Bello v Nigérii. Jde o reaktor bazénového typu o nominálním výkonu 30 kW, který byl poprvé spuštěn v roce 2004. Má celkem 347 palivových kazet, v každé jsou 3 hliníkové reflektory. Reaktor NIRR-1 (obr. 5.5) má pouze jednu centrální řídicí tyč tvořenou kadmiiem. Nejčastěji se používá pro neutronovou aktivační analýzu a tvorbu radioizotopů. [78]



Obrázek 5.5: Hala reaktoru NIRR-1 [79]

### 5.4.1 Sběr půd okolo NIRR-1

V okolí výzkumného reaktoru NIRR-1 bylo nasbíráno několik půdních vzorků, a to kvůli určení jejich složení. Do půd se totiž mohou snadno ukládat v okolí vznikající radionuklidy nebo se do ní mohou ukládat látky pocházející z průmyslu, zemědělství, atd. Určovala se přítomnost a koncentrace šesti kovů, a to La, Sm, Eu, Dy, Yb a Lu. Všechny prvky kromě Dy byly v půdách nalezeny. Ukázalo se, že koncentrace ostatních prvků byla v blízkosti jedné strany elektrárny mírně zvýšená, nicméně hodnoty nebyly nadlimitní. Všechny z hledaných prvků se navíc nacházejí v zemské kůře. [80]

### 5.4.2 Skládka, Sardauna Memorial College, Kaduna, Nigérie

Kontaminace komunálním odpadem může zvýšit hodnoty těžkých kovů v okolním prostředí. Na skládce poblíž Sardauna Memorial College nacházející se v Kaduně v Nigérii bylo nasbíráno a analyzováno 6 vzorků v různé hloubce. Byla provedena INAA a zjištěna přítomnost 29 prvků, včetně těžkých kovů. Zjistilo se, že s rostoucí

hloubkou odebraných vzorků klesá koncentrace většiny těžkých kovů uvolněných do okolí vlivem znečištění. Analýzy poukazovaly na to, že i přes nízkou absorpci kovů hlouběji do podloží, se uvedené kovy vyskytovaly ve všech vzorcích, nehledě na hloubku jejich odběru. Platilo, že v nejvýše nasbíraném místě vyšly hodnoty některých kovů jako nejvyšší, konkrétně hodnoty hliníku, sodíku, draslíku, železa a dalších. Naopak tomu bylo například u manganu, thoria, hafnia nebo chromu. [81]

# Kapitola 6

## Experimentální studium environmentálních vzorků

Neutronová aktivační analýza vybraných anorganických a organických vzorků je vykonávána za účelem stanovení znečištění životního prostředí. Experimentální část diplomové práce byla prováděna na reaktoru VR-1 na Katedře jaderných reaktorů Fakulty jaderné a fyzikální inženýrské ČVUT v Praze. Byly ozařovány vzorky náplavových půd a mechů, a sice trávníku Schreberového a rokytu cypřišovitého. Gama spektra potřebná k provedení kvalitativní a kvantitativní analýzy byla měřena na polovodičovém HPGe detektoru nacházejícím se v laboratoři neutronové aktivační analýzy na Katedře jaderných reaktorů.

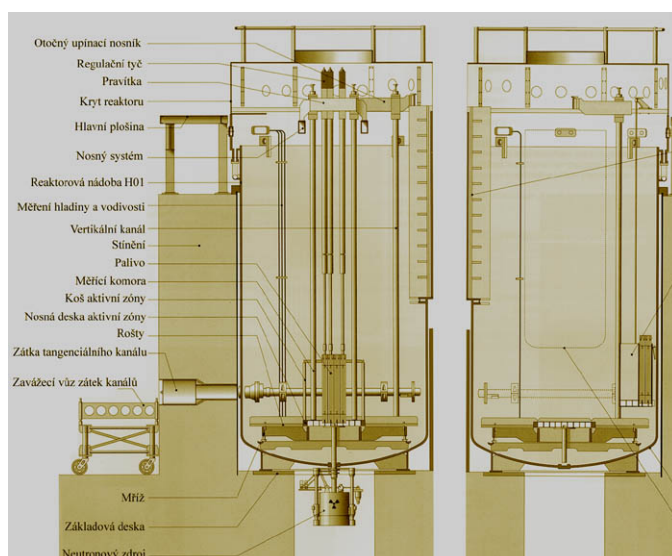
### 6.1 Výzkumný reaktor VR-1

Školní reaktor VR-1 (obr. 6.1) je lehkovodní reaktor bazénového typu. Poprvé byl uveden do provozu roku 1990 na Katedře jaderných reaktorů nacházející se v Holešovicích v Praze. Nominální výkon je 100 W, krátkodobě, a to maximálně 72 hodin ročně, může být výkon až 500 W. Jako moderátor, chladivo, reflektor a biologické stínění je používána lehká voda. Teplo je odváděno z aktivní zóny pomocí přirozené konvekce. Bazénové uspořádání reaktoru umožňuje snadný přístup k aktivní zóně, manipulaci se vzorky a detektory nebo k přemísťování palivových souborů. Reaktor je provozován při atmosferickém tlaku a při pokojové teplotě. Nejčastěji je používán pro vzdělávání a výcvik studentů a zaměstnanců z jaderných elektráren.

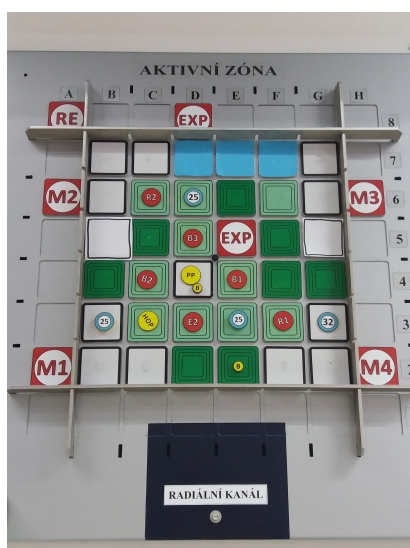
Palivem jsou nízko obohacené uranové články typu IRT-4M mající 19,7 %  $^{235}\text{U}$ . Palivové tyče jsou pokryty hliníkem a jsou uspořádány ve čtvercové geometrii. V aktivní zóně je umístěno 15 až 20 palivových článků a 5 až 7 absorpčních kadmiových tyčí, záleží na momentálním uspořádání aktivní zóny. Absorpční tyče slouží k ovládnutí reaktivity a k bezpečnému odstavení reaktoru. Jejich konstrukce jsou identické, liší se ovšem funkcí. Dělí se na absorpční tyče bezpečnostní, experimentální a regulační. Hustota toku tepelných neutronů je  $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Při spouštění reaktoru je používán AmBe neutronový zdroj, jenž je uložený ve stínícím kontejneru pod reaktorovou



nádobou a jeho pohyb je zajištěn pneumaticky. Schéma aktuální aktivní zóny C16 je znázorněno na obr. 6.2.



Obrázek 6.1: Schéma školního reaktoru VR-1 [83]



Obrázek 6.2: Schéma aktivní zóny C16 reaktoru VR-1

Tělo reaktoru je vyrobeno ze stínícího betonu s přídavkem litiny a barytového kamene. V tělese jsou umístěny dvě nádoby, jež se značí jako H01 a H02. Obě nádoby jsou konstrukčně shodné, liší se pouze využitím. Nádoba H01 slouží jako reaktorová, nádoba H02 jako manipulační. V nádobě H01 jsou navíc průchodky pro radiální a tangenciální kanál, v její vnitřní části se dále nacházejí měřicí kanály nebo provozní a měřicí potrubí. V hale je umístěna třetí nádoba H03 sloužící pro skladování demineralizované vody přecherpané z nádoby H01 nebo H02.

Řídicí systém reaktoru se skládá z provozního měření výkonu (PMV), které je zabezpečeno čtyřmi štěpnými komorami RJ 1300. Dále z nezávislé výkonové ochrany (NVO) tvořené čtyřmi borovými detektory SNM-12. Výstupní signály všech detektorů

jsou zobrazovány na pultu operátora, pro vyhodnocení signálů je uplatňována logika „dva ze tří“. [82, 83]

## 6.2 Kalibrace absolutní detekční účinnosti

Aby bylo možné určit vybrané prvky ve vzorku, je nutné provést před samotnými experimenty kalibraci absolutní detekční účinnosti spektrometru. Pro určení prvků nacházejících se ve vzorku, je nutné navíc provést i energetickou kalibraci HPGe detektoru.

V rámci bakalářské práce [84] a výzkumného úkolu [85] byla provedena kalibrace absolutní detekční účinnosti polovodičového HPGe detektoru nacházejícího se v laboratoři neutronové aktivační analýzy na Katedře jaderných reaktorů v Praze. Měření bylo provedeno pro 5 různých geometrií, konkrétně 3 mm, 30 mm, 80 mm, 120 mm a 250 mm. Bylo použito celkem devět kalibračních zářičů v rámci bakalářské práce, osm v rámci výzkumného úkolu. Seznam etalonů použitých během vypracování bakalářské práce, je uveden v tab. 6.1, pro etalony používané během experimentální části výzkumného úkolu poté v tab. 6.2. Kalibrační zářiče byly zvoleny tak, aby svými gama linkami pokrývaly co největší škálu energií důležitých z pohledu gama-spektrometrie, a získané body bylo možné proložit vhodným polynomem.

Tabulka 6.1: Seznam kalibračních zářičů pro bakalářskou práci [84]

Etalon	Počáteční aktivita $A_0$ (kBq)	Referenční datum
$^{88}\text{Y}$	772,60	20.12.2016
$^{133}\text{Ba}$	250,00	8.11.2010
$^{226}\text{Ra}$	15,07	1.2.2005
$^{22}\text{Na}$	71,88	30.1.2008
$^{60}\text{Co}$	220,20	20.12.2007
$^{241}\text{Am}$	486,70	20.12.2007
$^{57}\text{Co}$	68,33	5.12.2013
$^{152}\text{Eu}$	455,30	8.11.2010
$^{54}\text{Mn}$	489,50	5.12.2013

Tabulka 6.2: Seznam kalibračních zářičů pro výzkumný úkol [85]

Etalon	Počáteční aktivita $A_0$ (kBq)	Referenční datum
$^{133}\text{Ba}$	63,09	1.2.2005
$^{226}\text{Ra}$	15,07	1.2.2005
$^{22}\text{Na}$	71,88	30.1.2008
$^{60}\text{Co}$	782,50	31.10.2017
$^{60}\text{Co}$	220,20	20.12.2007
$^{241}\text{Am}$	486,70	20.12.2007
$^{57}\text{Co}$	68,33	5.12.2013
$^{152}\text{Eu}$	620,20	15.1.2013



U vybraných kalibračních zářičů byla nejprve vypočtena aktivita etalonu  $P_1$  vztažená ke dni vykonání kalibrace. K jejímu stanovení byl použit vztah (2.1). Etalony se dále postupně vkládaly do polovodičového HPGe detektoru a měřila se jejich gama spektra v příslušné geometrii. Z gama spekter byly vybrány energie linek s vysokou intenzitou, u kterých se následně odečetla plocha pod píkem. Na základě předpisu (2.2) byla získána aktivita gama kvant zachycených detektorem  $P_2$ . Podílem aktivit  $P_2$  a  $P_1$  (viz (2.3)) se získala hodnota absolutní účinnosti detektoru pro konkrétní energii  $E_\gamma$ .

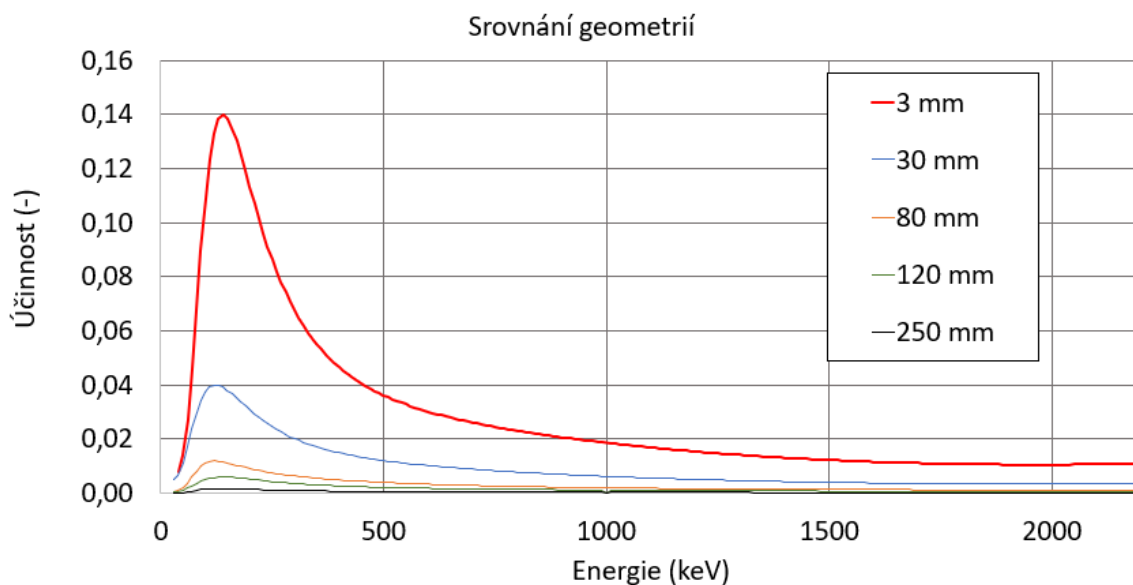
Výše popsaným způsobem byly obdrženy diskrétní hodnoty absolutní detekční účinnosti pro danou energii  $E_\gamma$  a geometrii detektor-zářič měřeného etalonu. Diskrétní hodnoty se proložily polynomem tvaru (2.4). Parametry  $a_i$  byly získány pomocí programu efekt32.exe převzatého z ÚJF AV ČR. Vstupní soubor pro program efekt32 obsahoval energie píků v keV, absolutní detekční účinnosti  $\varepsilon$  píků a nejistoty měření z předpisu (2.5). Hodnoty parametrů fitu jsou uvedeny v tab. 6.3 a tab. 6.4. Polynomická křivka prokládající hodnoty se nazývá jako tzv. účinnostní křivka. Porovnání závislosti efektivity a energie gama linek pro všechny měřené geometrie je zaneseno na obr. 6.3. Na obr. 6.4 je přiblížení více vzdálených geometrií od detektoru, které nenabývaly tak vysokých účinností. Závislosti pro jednotlivé geometrie se nachází v příloze na obr. 16 až 20. Veškeré grafy závislosti efektivity a energie gama linek byly převzaty z výzkumného úkolu [85].

Tabulka 6.3: Parametry  $a_i$  získané z programu efekt32, část 1 [85]

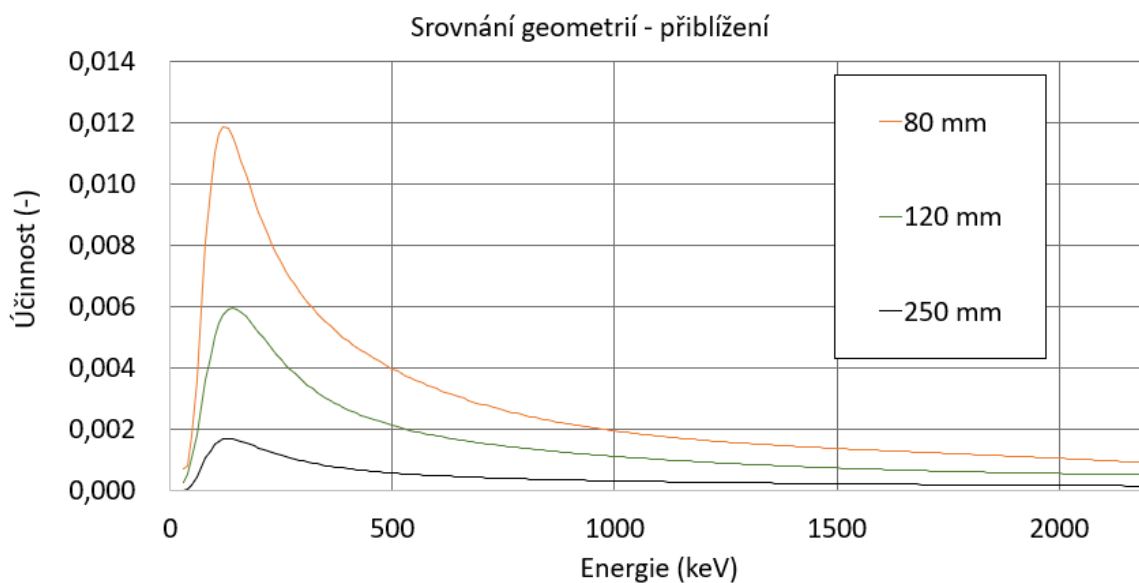
Parametr	Geometrie	Nejistota	Geometrie	Nejistota	Geometrie	Nejistota
$a_i$	3 mm	( $10^{-2}$ )	30 mm	( $10^{-2}$ )	80 mm	( $10^{-2}$ )
$a_0$	-3,985	0,94	-5,085	0,38	-6,244	0,26
$a_1$	-1,010	3,12	-1,073	1,29	-0,987	0,87
$a_2$	-0,199	4,11	-0,205	1,56	0,283	2,21
$a_3$	0,073	3,89	0,162	2,39	0,287	2,00
$a_4$	0,597	4,88	0,474	2,55	-0,275	3,53
$a_5$	0,372	1,82	0,253	9,12	-0,467	2,97
$a_6$	0,058	0,22	0,037	0,11	-0,204	0,95
$a_7$	-	-	-	-	-0,027	0,10

Tabulka 6.4: Parametry získané z programu efekt32, část 2 [85]

Parametr	Geometrie	Nejistota	Geometrie	Nejistota
$a_i$	120 mm	( $10^{-2}$ )	250 mm	( $10^{-2}$ )
$a_0$	-6,802	0,35	-8,077	0,27
$a_1$	-0,966	1,22	-0,844	0,97
$a_2$	-0,162	2,13	-0,032	1,69
$a_3$	-0,082	2,72	-0,141	2,62
$a_4$	0,193	2,81	-0,021	1,69
$a_5$	0,155	1,07	0,021	0,32
$a_6$	0,025	0,13	-	-
$a_7$	-	-	-	-



Obrázek 6.3: Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, srovnání geometrií [85]

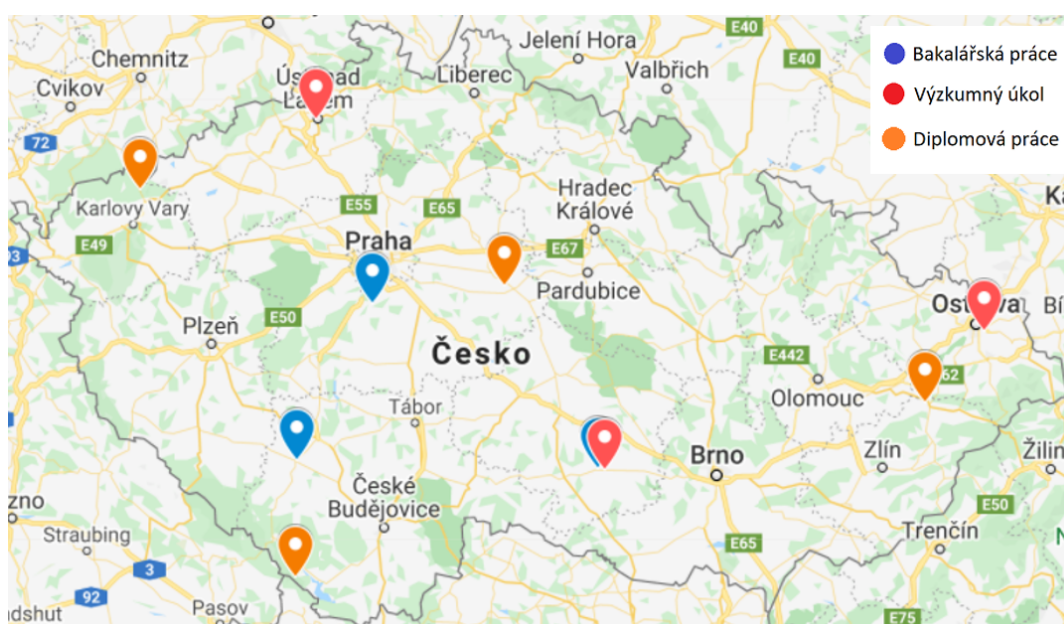


Obrázek 6.4: Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, přiblížení srovnání geometrií [85]

### 6.3 Analýza půd a mechů

V důsledku znečištění životního prostředí zemře každým rokem předčasně až několik set tisíc lidí. [56] V rámci diplomové práce byla provedena neutronová aktivační analýza environmentálních vzorků, konkrétně náplavových půd a mechů, a to právě kvůli zjištění znečištění životního prostředí.

Nejprve byly identifikovány vhodné lokality pro odběr vzorků, které mohly být nějakým způsobem znečištěny. Aby bylo možné určit, zdali byly vybrané lokality znečištěné, či nikoliv, byly vzorky porovnávány s referenčním místem. Výběr oblastí byl konzultován s profesorem Vojtěchem Ettlerem, což je geochemik Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Na základě jeho odkázání na vědecké články byly vybrány tři lokality na území České republiky. Jako referenční místo byla zvolena oblast Koňského potoku na Šumavě. Dle průzkumu koncentrace znečišťujících látek nacházejících se v České republice měly být na uvedeném místě minimální koncentrace jakýchkoliv toxických látek. Dále byla vybrána dvě místa se zaměřením na znečištění arsenem, a to konkrétně břeh Jáchymovského potoku v Jáchymově a břeh řeky Vrchlice v Kutné Hoře. Uvedená místa byla vybrána na základě textu [65] a obr. 4.2. Jáchymov byl vybrán kvůli dříve probíhající důlní činnosti a spalování fosilních paliv v nedalekých uhelných elektrárnách, a to v Prunéřově, Tušimicích, Počeradech a Ledvicích. Kutná Hora byla zvolena z důvodu důlní činnosti, která byla v jejím okolí v minulosti hojně prováděna. Poslední místo, a sice břeh Bečvy nedaleko od Valašského Meziříčí, bylo zvoleno kvůli nedávné kauze úniku kyanidu do řeky Bečvy a následnému úhynu velkého množství ryb. Ve stejných lokalitách byly nasbírány i vzorky mechů, konkrétně trávník Schreberův a rokyt cypřišovitý. Náplavové půdy byly sbírány ze břehů řek, rybníků či potoků, vždy v hloubce přibližně 10 cm. Mapa sběru vzorků je vyobrazena na obr. 6.5. Pro porovnání jsou na mapě zaneseny i místa sběru vzorků v rámci bakalářské práce [84] a výzkumného úkolu [85].



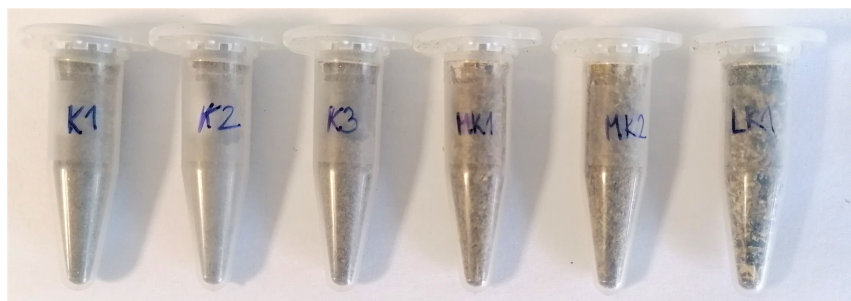
Obrázek 6.5: Místa sběru vzorků analyzovaných v diplomové práci, výzkumném úkolu a bakalářské práci [86]

Po samotném nasbíráni vzorků byly mechy důkladně očištěny od hlíny ve vodě a náplavové půdy osušeny na topení. Následně byly přeneseny na Katedru jaderných reaktorů, kde byly jak mechy, tak půdy umístěny do mističek a vloženy do pece na vysušení, vždy na 105°C po 24 hodin. Poté se vzorky vyjmuly z pece a postupně naplnily do malých ampulek tak, aby mohlo být předpokládáno, že jde o bodové zářiče. Aby bylo možné provést kvantitativní analýzu, bylo nutné znát hmotnost ozařovaného

vzorku. Proto se půdy i mechy vysoušely, aby voda ve vzorcích neovlivňovala výsledky. Navíc musely být zváženy nejprve prázdné ampulky, a poté ampulky naplněné náplavovou půdou či mechem. Rozdílem těchto dvou hmotností se potom získala hmotnost samotného vzorku. Ampulky se viditelně označily, přelepily lepící páskou, aby bylo zabráněno případné kontaminaci v reaktoru. Náplavové půdy a mechy před vložením do pece jsou na obr. 6.6, environmentální vzorky v ampulkách se nacházejí na obr. 6.7. Poté se spolu s vybranými etalony přilepily lepící páskou k plastovému nosiči, ke kterému byl připevněn rybářský vlasec. Plastový nosič spolu se vzorky se vložil do pole neutronů, kde byl po stanovený čas ozařován. Po vyjmutí z reaktoru se vzorky spolu s aktivačními fóliemi přenesly do laboratoře neutronové aktivační analýzy, kde se cyklicky vkládaly do polovodičového HPGe detektoru. Na základě naměřených spekter byla prováděna kvalitativní a kvantitativní analýza.



Obrázek 6.6: Náplavové půdy a mechy před vložením do pece



Obrázek 6.7: Environmentální vzorky umístěné v ampulkách

Stejně tak bylo monitorováno pole tepelných neutronů, konkrétně pomocí vybraných aktivačních fólií ze zlata a mědi. Aktivační fólie byly zváženy a připevněny k plastovému nosiči lepící páskou, přičemž fólie ze zlata i mědi byly ozařovány v párech. Jedna z fólií byla vždy holá, druhá byla vložena do kadmiového stínění. Po vložení do reaktoru byly etalony ozařovány po určitou dobu, následně byly vyjmuty z pole neutronů a přeneseny do laboratoře neutronové aktivační analýzy. Na základě naměřených gama spekter byly stanoveny reakční rychlosti pro dané fólie a na jejich základě určena hustota toku tepelných neutronů.

V diplomové práci byly provedeny čtyři ozařovací experimenty. Označení a data provedení zmíněných experimentů jsou shrnuty v tab. 6.5. Samotné ozařovací experimenty budou podrobněji popsány v následujícím textu.

Tabulka 6.5: Prováděné experimenty, jejich označení a datum

Označení ozařovacího experimentu	Datum
Experiment č. 1	16. 2. 2021
Experiment č. 2	9. 3. 2021
Experiment č. 3	30. 3. 2021
Experiment č. 4	12. 4. 2021

## 6.4 Studium vzorků z Valašského Meziříčí

První experiment v rámci diplomové práce byl proveden 16. 2. 2021 v dopoledních hodinách. Byly ozařovány vzorky náplavových půd ze břehu řeky Bečvy u Valašského Meziříčí a trávníku Schreberového nacházející se v okolí, které byly připraveny dle postupu uvedeného výše. Bylo nachystáno pět vzorků, konkrétně tři vzorky náplavových půd a dva vzorky mechů. Spolu se vzorky bylo přichystáno a ozařováno šest etalonů. Seznam a hmotnosti vzorků a etalonů jsou uvedeny v tab. 6.6 a 6.7. Aktivační drátek AuAs obsahuje 99,8 % zlata a 0,2 % arsenu, muskovit poté asi z 9,15 %  $K_2O$ . Koncentrace  $K_2O$  v muskovitu byla získána z [87].

Tabulka 6.6: Parametry ozařovaných vzorků z Valašského Meziříčí

Název vzorku	Označení	Hmotnost (mg)
Mech 1	BM1	418,8
Mech 2	BM2	647,2
Půda 1	B1	1213,0
Půda 2	B2	1151,5
Půda 3	B3	1224,3

Tabulka 6.7: Hodnoty ozařovaných etalonů

Etalon	Hmotnost (mg)
AuAs1	209,6
Muskovit 1	20,9
Muskovit 2	23,4
NaClRR	437,4
NaClA	478,8
Fe1	90,6

Vzorky byly rozděleny a umístěny na dva držáky. Na prvním držáku se nacházely půdní vzorky a etalony muskovit 1, Fe1 a NaClA. Na dalším držáku poté byly připevněny mechy, AuAs1, muskovit 2 a NaClRR. Jak první, tak i druhý držák byly umístěny do kanálu v reaktoru na pozici G3 mající průměr 32 mm a ozařovány po dobu 50 minut. První držák s půdami byl do reaktoru vložen v 9:32 na výkonu 1E5, v 9:39 bylo dosaženo výkonu 1E8. Tyče B123 a E2 se nacházely v horní koncové poloze. Tyč R1 byla ve vzdálenosti 520 mm, R2 se nacházela na 359 mm. Dávkový příkon vzorků po vyjmutí z reaktoru byl přibližně 230  $\mu\text{Sv/hod}$ . Držák s mechy byl vložen do aktivní zóny reaktoru v 10:36, opět na výkonu 1E5. Výkonu 1E8 bylo dosaženo

v 10:38. Dávkový příkon po vyjmutí z toku neutronů nabýval asi  $220\mu\text{Sv/hod}$ . Tyče se vzorky a etalony byly vždy po ozařování přeneseny do laboratoře neutronové aktivační analýzy, kde byla provedena kvalitativní a kvantitativní analýza.

## 6.5 Analýza náplavových pūd a mechů ze Šumavy

Další experiment byl proveden 9. 3. 2021 a byly ozařovány vzorky náplavových pūd z Koňského potoka a mech rokyt cypřišovitý z Národního parku Šumava. Opět bylo připraveno pět vzorků, a sice tři vzorky náplavových pūd a dva vzorky mechů dle postupu popsaneého výše. Navíc ovšem byly připraveny zlaté a mēděné holé fólie a fólie obalené v kadmii. Seznam a hmotnosti vzorků, etalonů a aktivačních fólií pro monitorování neutronového pole jsou uvedeny v tab. 6.8, 6.9 a 6.10.

Tabulka 6.8: Parametry ozařovaných vzorků ze Šumavy

Název vzorku	Označení	Hmotnost (mg)
Mech 1	KM1	243,3
Mech 2	KM2	239,5
Pūda 1	K1	583,4
Pūda 2	K2	1068,8
Pūda 3	K3	1040,2

Tabulka 6.9: Charakteristiky ozařovaných etalonů

Etalon	Hmotnost (mg)
AuAs2	183,3
Muskovit 1	20,9
Muskovit 2	23,4
NaClRR	437,4
NaClA	478,8
Fe3	89,4

Tabulka 6.10: Charakteristiky aktivačních fólií pro monitorování neutronového pole

Aktivační fólie	Hmotnost (mg)
Au9	126,7
Au24	121,2
Cu7	105,4
Cu8	103,6

Vzorky a etalony byly rozděleny a připevněny na tři držáky. Na prvním držáku byly umístěny náplavové pūdy, AuAs2, Fe3, NaClA a muskovit 1, na druhém držáku potom mechy, NaClRR a muskovit 2. Nakonec k poslednímu držáku byly připevněny aktivační fólie sloužící k monitorování neutronového pole. Všechny držáky byly postupně umístěny do kanálu G3 v aktivní zóně reaktoru, první a druhý držák po dobu 45 minut, poslední držák na 20 minut. První držák byl zasunut do aktivní zóny

v 9:43 na výkonu 1E5, v 9:49 bylo dosaženo výkonu 1E8, vytažen byl o 45 minut později, tedy v 10:34. Polohy tyčí B123 a E2 byly v horní koncové poloze, tyč R1 v pozici 519 mm a tyč R2 na 363 mm. Druhý držák byl vložen do pole neutronů v 10:38 na výkonu 1E7, na výkon 1E8 dosáhl reaktor v 10:41. Nakonec byly do pole neutronů vloženy aktivační fólie pro monitorování neutronového pole. Vzorky byly založeny ve 12:21 na výkonu 1E7, výkonu 1E8 bylo dosaženo ve 12:23.

## 6.6 Studium půd a mechů z Jáchymova

Během experimentu konaného 30. 3. 2021 se prováděla analýza půd nasbíraných ze břehu Jáchymovského potoka a mechů z oblasti Jáchymova. Příprava vzorků probíhala pomocí stejného postupu jako v předchozích případech. Ozařovány byly tentokrát čtyři vzorky, a sice dva vzorky náplavových půd a dva vzorky mechu rokytu cypřišovitého. Použity byly stejné etalony jako v experimentu č. 1, jejich seznam a hmotnost lze nalézt v tab. 6.7. Byla použita odlišná fólie železa, konkrétně Fe6 o hmotnosti 84,4 mg. Opět byly ozařovány zlaté a měděné holé fólie a fólie v kadmiovém pokrytí pro monitorování neutronového pole v reaktoru. Seznam a hmotnosti nasbíraných vzorků lze vidět v tab. 6.11, údaje potřebné k monitorování neutronového pole poté v tab. 6.12.

Tabulka 6.11: Charakteristiky ozařovaných vzorků z Jáchymova

Název vzorku	Označení	Hmotnost (mg)
Mech 1	JM1	342,5
Mech 2	JM2	299,9
Půda 1	J1	1344,7
Půda 2	J3	1453,5

Tabulka 6.12: Parametry aktivačních fólií pro monitorování neutronového pole

Aktivační fólie	Hmotnost (mg)
Au5	126,7
Au16	120,8
Cu7	105,4
Cu8	103,6

Vzorky spolu s aktivačními fóliemi byly rozděleny do tří držáků. Na prvním držáku byly opět připevněny půdy a etalony AuAs1, NaClRR, muskovit 1 a Fe6, na druhý držák mechy, muskovit 2 a NaClA. Na poslední držák byly přilepeny fólie monitorování neutronového pole. Všechny držáky byly opět umístěny do kanálu G3 v aktivní zóně reaktoru. Náplavové půdy a mechy byly ozařovány po dobu 50 minut, aktivační fólie na třetím držáku 30 minut. První držák byl do aktivní zóny zasunut ve 12:55 na výkonu 1E5, ve 13:01 bylo dosaženo výkonu 1E8, držák byl v reaktoru ponechán 50 minut, tedy do 13:51. V kritickém stavu byly tyče B123 a E2 v horní koncové poloze, tyč R1 v pozici 530 mm a tyč R2 na 359 mm. Druhý držák byl do pole neutronů vložen ve 13:57 při výkonu reaktoru 1E7, výkonu 1E8 bylo dosaženo

ve 14:00. Nakonec byl opět do pole neutronů vložen třetí držák s aktivačními fóliemi pro monitorování neutronového pole. Vzorky byly založeny ve 14:55 na výkonu 1E7, výkonu 1E8 bylo dosaženo ve 14:59.

## 6.7 Analýza vzorků z Kutné Hory

Poslední ozařovací experiment byl proveden 12. 4. 2021, a to vzorků náplavových půd ze břehu řeky Vrchlice a mechů rokytu cypřišovitého z Kutné Hory. Úprava vzorků se prováděla stejně jako v případech předchozích. K ozařování byly přichystány čtyři vzorky, a to dva vzorky náplavových půd a dva vzorky mechů. Jako etalony se použily stejné materiály jako jsou uvedeny v tab. 6.9 s výjimkou železa. Během popisovaného experimentu bylo ozařováno železo Fe2 s hmotností rovnou 88,4 mg. Seznam a hmotnosti nasbíraných vzorků lze vidět v tab. 6.13

Tabulka 6.13: Hodnoty ozařovaných vzorků z Kutné Hory

Název vzorku	Označení	Hmotnost (mg)
Mech 1	VM1	584,9
Mech 2	VM2	663,3
Půda 1	V1	1449,5
Půda 2	V2	1375,1

Vzorky půd, mechů a etalony byly, stejně jako v předešlých experimentech, rozděleny a upevněny na dva držáky. Na prvním držáku se nacházely půdy, NaClA, muskovit 1 a Fe2. Na druhém držáku potom mechy, NaClRR a muskovit 2. Analyzovaná sada vzorků byla ozařována po dobu 50 minut v kanálu reaktoru G3. První držák byl do aktivní zóny zasunut v 9:40 na výkonu 1E5, v 9:47 reaktor dosáhl výkonu 1E8, držák byl v reaktoru ponechán 50 minut, tedy do 10:37. Polohy tyčí B123 a E2 se nacházely v horní koncové poloze, tyč R1 v pozici 532 mm a tyč R2 na 330 mm. Druhý držák byl do pole neutronů vložen v 10:42 při výkonu reaktoru na 1E7, výkonu 1E8 bylo dosaženo v 11:15. Výsledky všech provedených experimentů jsou shrnuty v následující podkapitole.

## 6.8 Výsledky neutronové aktivační analýzy

Během čtyř experimentů NAA na Katedře jaderných reaktorů v Praze bylo ozářeno celkem deset vzorků náplavových půd a osm vzorků mechů, konkrétně dvou vzorků trávníku Schreberového a šesti vzorků rokytu cypřišovitého, z celkem čtyř lokalit České republiky. Náplavové půdy byly sesbírány ze břehů řeky Bečvy z Valašského Meziříčí, Koňského potoka z Národního parku Šumava, Jáchymovského potoka z Jáchymova a řeky Vrchlice z Kutné Hory. V okolí popisovaných potoků a řek byly nasbírány vzorky mechů. V rámci zkoumání životního prostředí byla nejprve provedena kvalitativní analýza. V tab. 6.14 jsou uvedeny pozorované radionuklidy, jejich gama linky, poločas rozpadu a jaderné reakce, ze kterých dané radionuklidy



vznikají. V popisované tabulce se nacházejí radionuklidy, které byly naměřeny ve všech měřených vzorcích, včetně vzorků z bakalářské práce a výzkumného úkolu. V tab. 6.15 a 6.16 jsou uvedeny vybrané prvky, které byly nalezeny ve vzorcích v dané lokalitě. Pro přehled jsou v tabulkách zahrnuty i výsledky analýz míst z bakalářské práce [84] a výzkumného úkolu [85]. Pro názornost se dále v dodatku práce nachází tab. 22, která obsahuje všechny určené nuklidy pro lokalitu Jáchymov. Uvedená lokalita byla vybrána kvůli komplexnímu spektru, které bylo ale vzhledem k průmyslu v okolí očekáváno. Data použitá při vyhodnocování naměřených spekter a provedení kvalitativní a kvantitativní analýzy byla získána z [88].

Tabulka 6.14: Pozorované radionuklidy nalezené ve všech vzorcích

Pozorovaný radionuklid	Energie gama linky line (keV)	Poločas rozpadu	Jaderná reakce
$^{24}\text{Na}$	1368,6; 2754,0	14,96 h	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$
$^{28}\text{Al}$	1779,0	2,24 m	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$
$^{42}\text{K}$	1524,7	12,36 h	$^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$
$^{46}\text{Sc}$	1120,5	83,79 d	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$
$^{51}\text{Ti}$	320,1	5,76 m	$^{50}\text{Ti}(n,\gamma)^{51}\text{Ti}$
$^{52}\text{V}$	1434,1	3,74 m	$^{51}\text{V}(n,\gamma)^{52}\text{V}$
$^{56}\text{Mn}$	846,7; 1810,8; 2113,1; 2522,8	2,58 h	$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$
$^{139}\text{Ba}$	165,9	83,06 m	$^{138}\text{Ba}(n,\gamma)^{139}\text{Ba}$
$^{140}\text{La}$	1596,2; 487,0; 815,8; 328,8; 925,2; 867,8	1,68 d	$^{139}\text{La}(n,\gamma)^{140}\text{La}$
$^{153}\text{Sm}$	103,2	46,28 h	$^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$
$^{165}\text{Dy}$	94,7	2,33 h	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}$

Tabulka 6.15: Zastoupení vybraných prvků v náplavových půdách v devíti oblastech České republiky

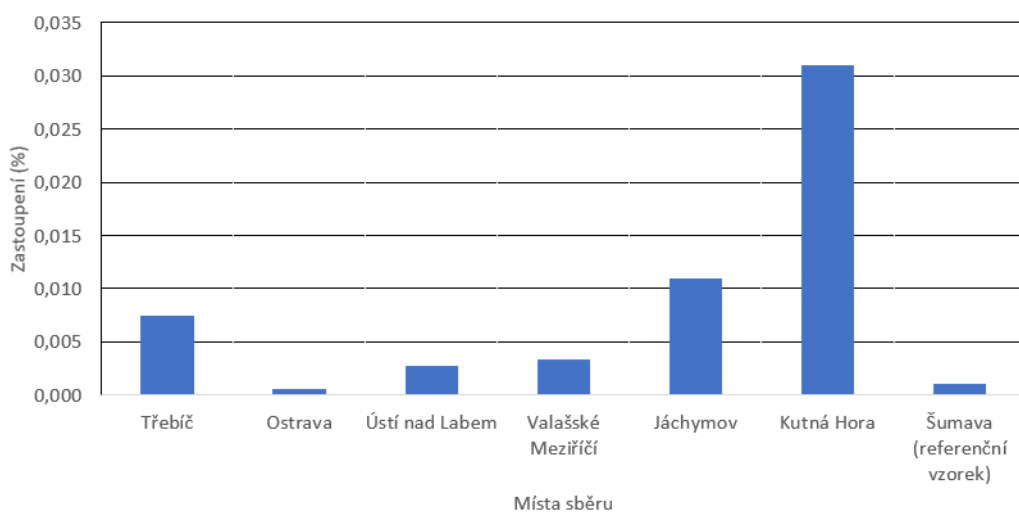
Místo sběru/ nalezený prvek	$^{197}\text{Au}$	$^{202}\text{Hg}$	$^{75}\text{As}$	$^{81}\text{Br}$	$^{115}\text{In}$	$^{121}\text{Sb}$	$^{180}\text{Hf}$	$^{122}\text{Te}$	$^{58}\text{Fe}$
Třebíč	-	✓	✓	-	-	-	✓	✓	✓
Měchenice u Prahy	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
Strakonice	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
Ostrava	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓
Ústí nad Labem	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	-
Valašské Meziříčí	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-
Jáchymov	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
Kutná Hora	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
Šumava (referenční místo)	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-

Prostřednictvím relativní metody ze vztahu (3.1) byla provedena kvantitativní analýza, pomocí níž se určovalo množství sodíku, draslíku, arsenu, zlata a železa.

Tabulka 6.16: Zastoupení vybraných prvků v meších v sedmi oblastech České republiky

Místo sběru/ nalezený prvek	$^{197}\text{Au}$	$^{202}\text{Hg}$	$^{75}\text{As}$	$^{81}\text{Br}$	$^{37}\text{Cl}$	$^{127}\text{I}$	$^{40}\text{Ar}$	$^{121}\text{Sb}$	$^{122}\text{Te}$
Třebíč	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Měchenice u Prahy	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	-
Ostrava	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
Valašské Meziříčí	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
Jáchymov	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Kutná Hora	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Šumava (referenční místo)	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-

V bakalářské práci a výzkumném úkolu, jejichž výsledky jsou pro porovnání uvedeny spolu s výsledky z diplomové práce, byly navíc zjišťovány koncentrace titanu, vanadu a hliníku. Výsledky kvantitativní analýzy náplavových půd a mechů devíti míst České republiky jsou zaneseny v tab. 6.17 a 6.18. Zastoupení arsenu, sodíku a draslíku v náplavových půdách bylo navíc zaneseno do grafů vyobrazených na obr. 6.8, obr. 6.10 a obr. 6.12, v meších potom na obr. 6.9, obr. 6.11 a obr. 6.13.



Obrázek 6.8: Zastoupení arsenu v náplavových půdách

## 6.9 Diskuze výsledků

V experimentální části diplomové práce bylo zkoumáno znečištění náplavových půd a mechů vlivem průmyslu či zemědělství. Byly provedeny celkem čtyři experimenty na reaktoru VR-1 a v laboratoři neutronové aktivační analýzy, během kterých se ozařovalo deset vzorků půd a osm vzorků mechů, konkrétně dva vzorky trávníku Schreberového a šest vzorků rokytu cypřišovitého.

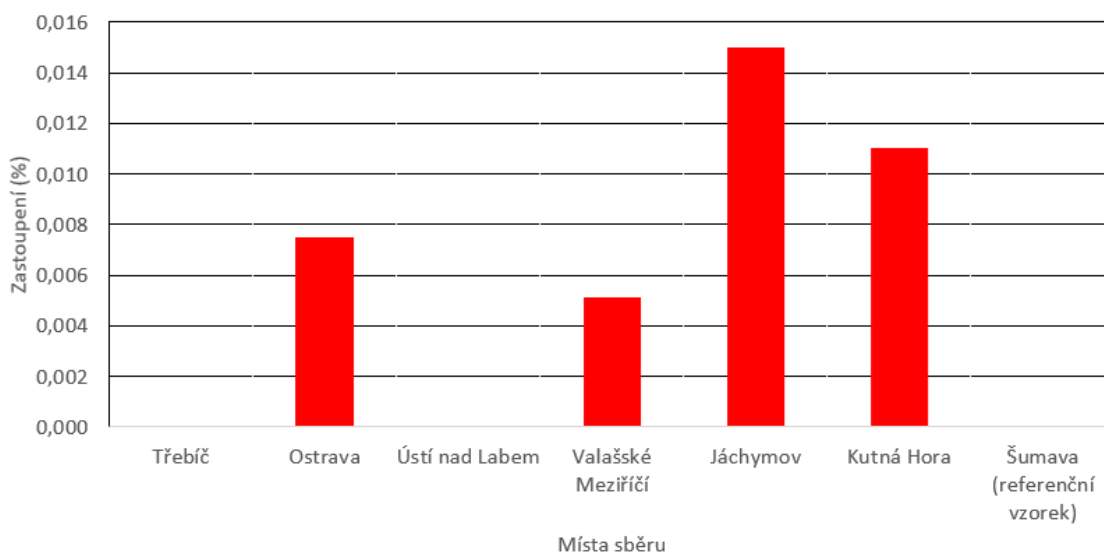
Tabulka 6.17: Koncentrace vybraných prvků v náplavových půdách v devíti oblastech České republiky

Místo sběru	Sledovaný prvek	Hmotnost prvku	Nejistoty	Zastoupení
Třebíč	Sodík	11,8 mg	1,5%	1,4%
	Arsen	$6,4 \times 10^{-2}$ mg	6,6%	$7,5 \times 10^{-3}\%$
	Vanad	$7,3 \times 10^{-2}$ mg	8,7%	$8,5 \times 10^{-3}\%$
	Titan	3,7 mg	13,0%	0,4%
	Hliník	63,7 mg	1,9%	7,4%
Měchenice u Prahy	Sodík	6,8 mg	1,8%	0,9%
	Titan	1,7 mg	22,8%	0,4%
Strakonice	Sodík	13,6 mg	1,6%	1,6%
	Hliník	84,1 mg	3,7%	9,8%
Ostrava	Sodík	5,4 mg	0,3%	0,4%
	Arsen	$6,6 \times 10^{-3}$ mg	19,4%	$5,4 \times 10^{-4}\%$
	Vanad	$5,6 \times 10^{-2}$ mg	12,4%	$4,5 \times 10^{-3}\%$
	Titan	3,8 mg	22,8%	0,2%
	Hliník	34,0 mg	2,6%	2,8%
	Zlato	$4,3 \times 10^{-4}$ mg	15,6%	$3,5 \times 10^{-5}\%$
Ústí nad Labem	Sodík	1,4 mg	1,1%	0,2%
	Arsen	$2,4 \times 10^{-2}$ mg	7,8%	$2,7 \times 10^{-3}\%$
	Vanad	0,1 mg	6,1%	$1,3 \times 10^{-2}\%$
	Titan	3,8 mg	7,7%	0,7%
	Hliník	70,4 mg	0,6%	7,8%
	Železo	25,0 mg	19,6%	1,5%
Valašské Meziříčí	Sodík	6,3 mg	0,4%	0,5%
	Draslík	9,7 mg	4,1%	0,8%
	Arsen	$4,2 \times 10^{-2}$ mg	23,2%	$3,4 \times 10^{-3}\%$
Jáchymov	Sodík	10,2 mg	0,2%	0,7%
	Draslík	18,1 mg	2,3%	1,2%
	Arsen	0,2 mg	1,1%	$1,1 \times 10^{-2}\%$
	Zlato	$6,0 \times 10^{-5}$ mg	42,1%	$4,2 \times 10^{-6}\%$
	Železo	39,5 mg	4,3%	2,7%
Kutná Hora	Sodík	11,0 mg	0,1%	0,8%
	Draslík	12,8 mg	1,9%	0,9%
	Arsen	0,4 mg	0,8%	$3,1 \times 10^{-2}\%$
Šumava	Sodík	10,1 mg	0,2%	0,9%
	Draslík	13,2 mg	2,3%	1,2%
	Arsen	$6,1 \times 10^{-3}$ mg	19,4%	$1,1 \times 10^{-3}\%$

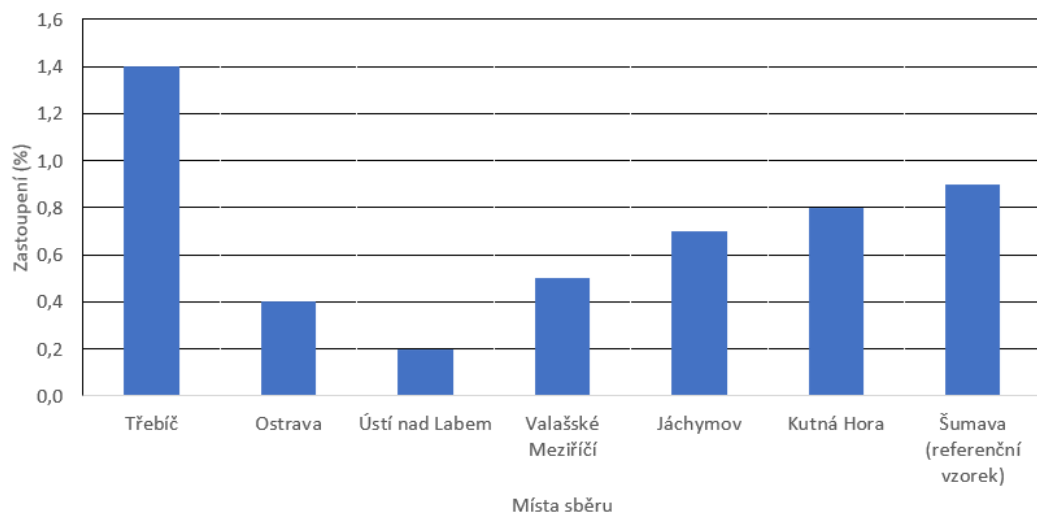
Výsledky kvalitativní analýzy ukázaly, že ve všech vzorcích byly přítomny prvky jako sodík, draslík, mangan, lanthan, hliník, vanad nebo titan (tab. 6.14). Přítomnost výše uvedených prvků v půdách a meších byla očekávána, protože dané prvky jsou zastoupeny v zemské kůře. Zastoupení prvků v zemské kůře je navíc zaznamenáno v koláčovém grafu na obr. 6.14. Je vhodné zmínit, že uvedené prvky se v zemské kůře

Tabulka 6.18: Koncentrace vybraných prvků v meších v šesti oblastech České republiky

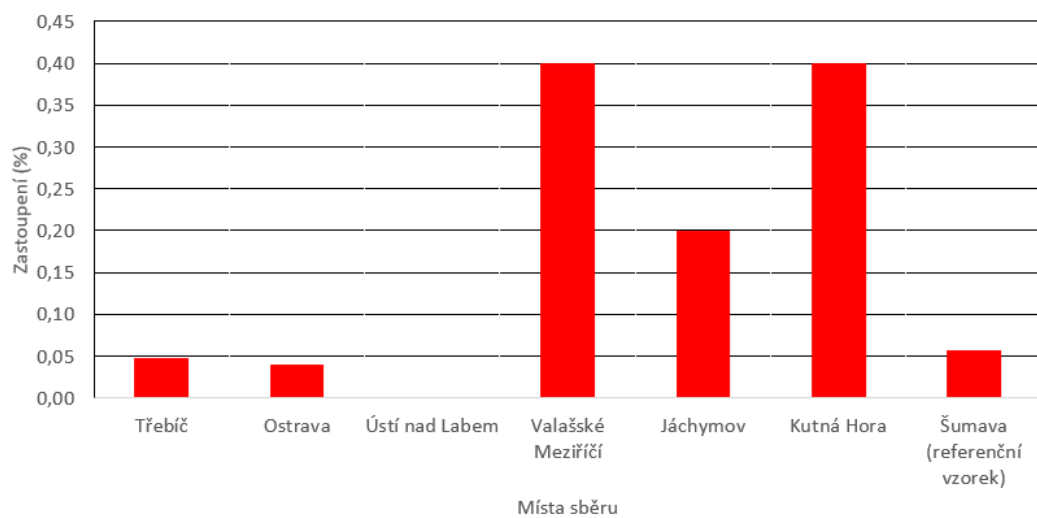
Místo sběru	Sledovaný prvek	Hmotnost prvku	Nejistoty	Zastoupení
Třebíč	Sodík	0,3 mg	1,0%	$4,7 \times 10^{-2}\%$
	Zlato	$6,6 \times 10^{-7}$ mg	9,0%	$1,2 \times 10^{-4}\%$
	Vanad	$2,1 \times 10^{-3}$ mg	20,7%	$3,9 \times 10^{-4}\%$
	Hliník	0,8 mg	3,1%	0,2%
Ostrava	Sodík	0,2 mg	1,0%	$4,0 \times 10^{-2}\%$
	Arsen	$3,5 \times 10^{-2}$ mg	6,6%	$7,5 \times 10^{-3}\%$
	Vanad	$2,9 \times 10^{-3}$ mg	21,9%	$6,2 \times 10^{-4}\%$
	Hliník	0,6 mg	10,7%	0,1%
	Zlato	$5,3 \times 10^{-4}$ mg	7,7%	$1,1 \times 10^{-4}\%$
Valašské Meziříčí	Sodík	1,6 mg	0,3%	0,4%
	Draslík	6,3 mg	2,0%	1,0%
	Arsen	$3,3 \times 10^{-2}$ mg	19,4%	$5,1 \times 10^{-3}\%$
Jáchymov	Sodík	0,8 mg	0,6%	0,2%
	Draslík	2,4 mg	3,0%	0,7%
	Arsen	$5,1 \times 10^{-2}$ mg	2,2%	$1,5 \times 10^{-2}\%$
	Zlato	$1,1 \times 10^{-4}$ mg	36,8%	$3,1 \times 10^{-5}\%$
Kutná Hora	Sodík	2,6 mg	0,4%	0,4%
	Draslík	5,4 mg	3,3%	0,9%
	Arsen	$6,5 \times 10^{-2}$ mg	2,0%	$1,1 \times 10^{-2}\%$
	Zlato	$1,1 \times 10^{-4}$ mg	31,3%	$1,9 \times 10^{-5}\%$
Šumava	Sodík	0,1 mg	6,2%	$5,7 \times 10^{-2}\%$
	Draslík	0,9 mg	18,3%	0,4%



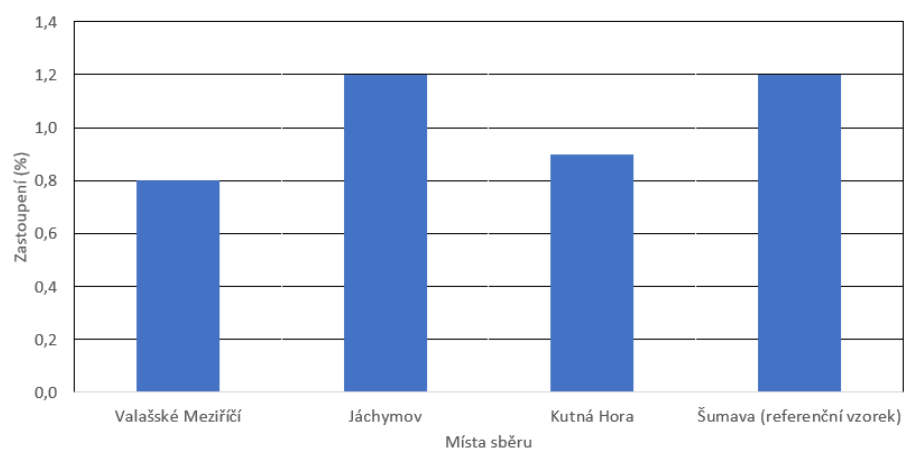
Obrázek 6.9: Zastoupení arsenu v meších



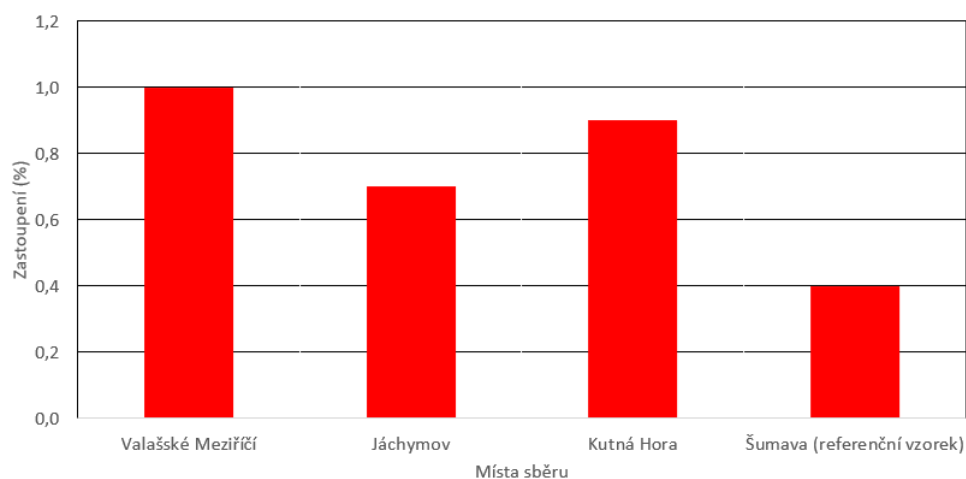
Obrázek 6.10: Zastoupení sodíku v náplavových půdách



Obrázek 6.11: Zastoupení sodíku v meších

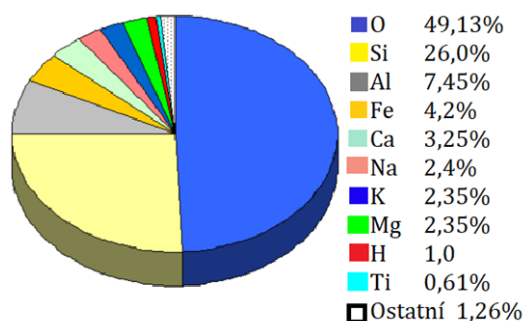


Obrázek 6.12: Zastoupení draslíku v náplavových půdách



Obrázek 6.13: Zastoupení draslíku v meších

nevyskytují osamoceně, ale ve sloučeninách. Z grafu vyplývá, že nejrozšířenějším prvkem zemské kůry je kyslík, dalšími hojně zastoupenými prvky jsou křemík, hliník, železo, vápník, sodík, draslík a další. Mezi méně zastoupené prvky v zemské kůře se řadí chlor, fosfor, síra, mangan, stroncium a další. [89] Prvky jako kyslík, křemík nebo vodík nebyly během kvalitativní analýzy vůbec identifikovány. Jedná se o lehké prvky, které nelze identifikovat pomocí nedestruktivní neutronové aktivační analýzy, kdy je měřeno zpožděné emitované  $\gamma$ -záření. Důvodů je hned několik, a sice krátký poločas rozpadu, nízká intenzita měřených gama linek nebo malé zastoupení potřebného izotopu prvku k vytvoření radionuklidu.



Obrázek 6.14: Složení zemské kůry [89]

V půdních vzorcích a meších byly zároveň nalezeny těžké kovy jako jsou arsen, rtuť či baryum. Jde o vysoce toxické kovy, které jsou škodlivé pro zdraví člověka. V zemské kůře jsou vzácným prvkem a ve zvýšených koncentracích se vyskytují spíše jako důsledek průmyslových činností. Dvě ze zkoumaných lokalit, a to Jáchymov a Kutná Hora, byly navíc zvoleny kvůli zjištění přítomnosti a koncentrace arsenu. Jeho přítomnost byla i zásluhou kvalitativní analýzy potvrzena. Z dalších prvků byl nalezen brom, který je ve své elementární formě značně toxický. Zajímavé je, že v některých vzorcích se také nacházelo zlato, častěji však v meších než v půdách. Nakonec se ve vzorcích nasbíraných u průmyslových oblastí vyskytovaly prvky jako hafnium, stroncium, gadolinium, tellur, antimon nebo cer.

Nelze říci, zdali je výhodnější provádět neutronovou aktivační analýzu preferenčně pro náplavové půdy či mechy. Výhodou náplavových půd je fakt, že jsou dostupnější a snáze se připravují k samotnému ozařování. Mechy je v některých lokalitách obtížné najít, obzvláště v zimním období. Navíc je důležité sbírat stejný druh mechu, protože každý druh má jiné sorpční schopnosti. Náplavové půdy se také před ozařováním nemusí tolik čistit, stačí je pouze vysušit. Naopak mechy je třeba po sběru očistit od hlíny, například vymytím v kbelíku s vodou. Navíc teplota během vysoušení v peci nesmí být příliš velká, protože vysoušený mech by mohl začít hořet a mohlo by dojít k úniku těkavých prvků. Nevýhodou půd je jejich vyšší hustota v porovnání s hustotou mechů. Do samotné ampulky je tedy možné vložit větší množství půdy než mechu a naplněná ampulka půdou má vyšší hmotnost než mech. To je jeden z důvodů, proč má po ozařování půda vyšší aktivitu než mech. Dalším důvodem, proč má mech nižší aktivitu než půdy, je koncentrace sodíku a draslíku. V tab. 6.17 a tab. 6.18 lze vidět, že koncentrace sodíku v meších je o řád menší než u náplavových půd a nižší je i koncentrace draslíku. Díky tomu lze v mechu snáze naměřit prvky, které je možné v půdě díky vysoké aktivitě sodíku a draslíku naměřit jen velmi těžko. Příkladem je  $^{37}\text{Cl}$ ,  $^{127}\text{I}$  nebo  $^{27}\text{Mg}$ . Vzhledem k nižší hustotě mechů ve srovnání s půdami zůstalo při enkapsulaci v ampulkách velké množství vzduchu. Proto se ve výsledném spektru u mechů vyskytoval i  $^{40}\text{Ar}$ , který není součástí mechů, ale vzduchu v ampulce.

V rámci diplomové práce byla provedena i kvantitativní analýza se zaměřením na určení koncentrace arsenu a nejčastějších sloučenin kyanidu, tedy sodíku a draslíku. Určovány byly také koncentrace zlata a železa. Nasbírané vzorky byly navíc porovnány s referenčním místem zvoleným v Národním parku Šumava. Koncentrace arsenu byly, vzhledem k důlní činnosti a přítomnosti fosilních elektráren, v okolí Jáchymova a Kutné Hory očekávány jako zvýšené. To se v porovnání s referenčním vzorkem také potvrdilo. Zastoupení arsenu bylo přibližně o jeden řád vyšší než v referenční oblasti. Potvrdilo se, že důlní těžba a fosilní elektrárny mají vliv na koncentraci arsenu v půdě. Mírně zvýšené hodnoty arsenu byly nalezeny i v oblasti Třebíče, kde se vzorky sbíraly ze břehu Račerovického rybníku. Račerovický rybník se nachází v blízkosti polí, mírně zvýšená hodnota tedy mohla mít původ z hnojení půd. Arsen je totiž i součástí pesticidů používaných v zemědělství. Zastoupení arsenu v meších bylo přibližně stejné jako zastoupení arsenu v náplavových půdách. Výjimkou byla hodnota arsenu v mechu v Ostravě, kde byla nalezena přibližně desetkrát větší koncentrace arsenu pocházející s nejvyšší pravděpodobností z průmyslu. Naopak tomu bylo u vzorků mechů z Kutné Hory, kde byly naměřené hodnoty arsenu v meších asi dvojnásobně menší než v náplavových půdách. Mohlo to být dáno tím, že vzorky půd a mechů nebyly sbírány hned vedle sebe, mechy byly sbírány v tamní oblasti v okruhu 500 metrů od místa sběru náplavových půd. Pro lepší představu je zastoupení arsenu v půdách a v meších vyobrazeno na obr. 6.8 a 6.9.

V oblasti Valašského Meziříčí, konkrétně řeky Bečvy, bylo analyzováno množství sodíku a draslíku, což jsou dva nejčastěji se vyskytující kationty v kyanidech. Kyanidy byly vybrány kvůli jejich úniku do řeky Bečvy v září roku 2020. Na druhou stranu, kyanidy jsou sloučeniny velmi dobře rozpustné ve vodě, proto se po několika měsících, tedy v době, kdy byly vzorky sbírány, již v půdě nemusely nacházet. To bylo také dle výsledků (obr. 6.10 a obr. 6.12) potvrzeno. Koncentrace sodíku a draslíku vyšly

řádově stejně jako v referenční oblasti. Porovnáním obr. 6.10 a obr. 6.11 nebo obr. 6.12 a obr. 6.13 či z tab. 6.17 a tab. 6.18 je navíc patrné, že mechy doopravdy obsahují menší koncentrace sodíku a draslíku v porovnání s půdami. Sodík se nevyskytuje pouze v kyanidech, ale je například i součástí solí nacházejících se v minerálních hnojivech. Při nadměrném hnojení může dojít k tzv. zasolování půd. Mírně zvýšené hodnoty sodíku byly nalezeny v oblasti Třebíče ze břehu Račerovického rybníku. Uvedený rybník se nachází v blízkosti polí. Lze tedy říci, že mírně zvýšené hodnoty sodíku mohly pocházet z nadměrného hnojení okolních polí.

Nakonec je dobré si povšimnout mírně zvýšené koncentrace hliníku nalezené v náplavové půdě ze břehu řeky Volyňky ze Strakonice. Koncentrace hliníku byla stanovena jako 9,8 %, což je hodnota mírně vyšší než je zastoupení hliníku v zemské kůře dle grafu na obr. 6.14. Mírně zvýšené hodnoty mohly být dány tím, že v blízkosti sběru půd se nachází slévárna vyrábějící odlitky z hliníku. V některých vzorcích se navíc vyskytovalo zlato, hodnoty se pohybovaly řádově okolo  $1 \times 10^{-4}$  %, a to jak v meších, tak v náplavových půdách. V zemské kůře se hodnoty zlata pohybují okolo  $4 \times 10^{-4}$  % až  $5 \times 10^{-4}$  %. Určovala se také koncentrace železa, jenž se dle [89] nachází v zemské kůře v koncentraci asi 4,2 %. V náplavových půdách bylo nalezeno železa méně, konkrétně okolo 2 %. Železo nebylo nalezeno ve všech vzorcích, i když dle výskytu v zemské kůře nalezeno být mělo. Důvod je takový, že železo je izotop mající dlouhý poločas rozpadu a nízkou intenzitu zkoumané gama linky. Je možné ho naměřit pouze při dlouhodobějších analýzách, a po rozpadu jader prvků o vysoké aktivitě a kratším poločasu rozpadu než u železa.

## 6.10 Charakteristiky neutronového pole

Z pohledu experimentální činnosti na reaktoru je nutné znát neutronové pole na vybraných místech, které lze monitorovat pomocí různých metod. Neutronové pole bylo během NAA experimentů měřeno pomocí offline metody aktivačních detektorů, jež byly popsány v kapitole 3.7. Aktivační fólie se tedy nepoužívají pouze ke kvantitativní analýze, ale i k monitorování neutronového toku. Cílem bylo stanovit reakční rychlosti v dané ozařovací pozici. Reakční rychlost je definována jako počet interakcí na jedno terčové jádro za jednotku sekundy. K jejímu vypočtení bylo využito vztahu (3.15). Pomocí předpisů uvedených v kapitole 3.8 byla stanovena hustota toku tepelných neutronů. Informace o neutronovém poli udávají i spektrální indexy. Při neutronové aktivační analýze je nejčastěji určován kadmiový poměr, jenž rozlišuje zastoupení tepelných a epitermálních neutronů v dané ozařovací pozici.

Během druhého a třetího ozařovacího experimentu NAA na reaktoru byla v rámci diplomové práce ozařována i zlatá a měděná holá fólie a zlatá a měděná fólie v kadmiovém pokrytí (obr. 6.15). Všechny fólie byly vloženy do stejného neutronového pole ve stejný čas, tedy za stejných ozařovacích podmínek. Výsledné hodnoty reakčních rychlostí, hustoty toku tepelných neutronů a kadmiového poměru jsou uvedeny v tab. 6.19 pro zlaté fólie a měděné fólie ozařované během druhého experimentu, dále v tab. 6.20 pro zlaté fólie a měděné fólie ozařované ve třetím experimentu.





Obrázek 6.15: Zlaté a měděné aktivační fólie a kadmiové pokrytí

Tabulka 6.19: Reakční rychlosti, hustoty toku tepelných neutronů a kadmiové poměry, druhý experiment

-	Zlatá fólie	Měděná fólie
Veličiny	Hodnoty	Hodnoty
$R_R$	$1,76 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$	$5,63 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$
$R_{Rcd}$	$2,80 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$	$2,42 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$
$R_{Rth}$	$1,44 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$	$5,35 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$
$\phi_{th}$	$1,45 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$1,20 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
$r_{cd}$	6,30	23,24

Tabulka 6.20: Reakční rychlosti, hustoty toku tepelných neutronů a kadmiové poměry, třetí experiment

-	Zlatá fólie	Měděná fólie
Veličiny	Hodnoty	Hodnoty
$R_R$	$1,63 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$	$6,32 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$
$R_{Rcd}$	$2,53 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$	$2,18 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$
$R_{Rth}$	$1,32 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$	$6,06 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$
$\phi_{th}$	$1,33 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$1,36 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
$r_{cd}$	6,38	28,99

Výsledné hodnoty hustoty toku neutronů se pohybovaly řádově  $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Spektrální indexy, konkrétně kadmiové poměry, nabývaly hodnot asi 6,3 pro zlatou fólii a 23 až 29 pro měděnou fólii, tedy čtyřikrát až pětkrát větší hodnoty než měl spektrální index pro zlatou fólii. Kadmiový poměr rozlišuje zastoupení tepelných a epitermálních neutronů pro danou fólii. Z výsledků lze vidět, že epitermální neutrony interagují méně s měděnou fólií, proto je hodnota kadmiového poměru vyšší.

## 6.11 Rozbor spektra přirozeného pozadí

Při dlouhodobějších měřeních může přirozené pozadí ovlivňovat měřená spektra analyzovaných vzorků. V případě dlouhodobých analýz, kdy se zkoumají prvky

s dlouhým poločasem rozpadu a nízkou intenzitou, se mohou ve spektrech objevovat gama linky z přirozeného pozadí. Fotony emitované z přirozeného pozadí o energii poblíž zajímavých píků tak mohou ovlivnit měření. Zároveň se stanovuje, jaké izotopy se v přirozeném pozadí nacházejí. Proto je dobré pravidelně měřit a vyhodnocovat spektra přirozeného pozadí.

V experimentální části diplomové práce bylo měřeno spektrum přirozeného pozadí s uzavřeným stíněním HPGe detektoru. Měření bylo spuštěno 30. 4. 2021, a to přibližně po dobu 73 hodin. Rozbor spektra přirozeného pozadí je uveden v tab. 6.21. Tabulkové hodnoty energií použitých v tabulce byly převzaty z [88].

Tabulka 6.21: Rozbor spektra přirozeného pozadí s uzavřeným stíněním

Vrchol	Naměřené hodnoty $E_\gamma$ (keV)	Tabulkové hodnoty $E_\gamma$ (keV)	$S$ (imp)	Rozpadová řada/ radionuklid
1	186,13	185,71	1087	U-235/U-235
2	239,00	238,63	1086	Th-232/Pb-212
3	295,59	295,22	829	U-238/Pb-214
4	338,57	338,32	451	Th-232/Ac-228
5	352,15	351,93	1312	U-238/Pb-214
6	510,99	511,00	6968	Anihilační linka
7	583,28	583,19	1020	Th-232/Tl-208
8	609,29	609,31	1850	U-238/Bi-214
9	727,06	726,86	291	Th-232/Ac-228
10	794,98	794,95	253	Th-232/Ac-228
11	860,58	860,56	255	Th-232/Tl-208
12	911,05	911,20	1309	Th-232/Ac-228
13	934,13	934,10	190	U-238/Bi-214
14	964,59	964,77	313	Th-232/Ac-228
15	968,71	968,97	723	Th-232/Ac-228
16	1120,18	1120,29	921	U-238/Bi-214
17	1238,20	1238,11	385	U-238/Bi-214
18	1377,79	1377,67	344	U-238/Bi-214
19	1408,21	1407,98	202	U-238/Bi-214
20	1461,19	1460,83	15799	K-40
21	1509,67	1509,23	112	U-238/Bi-214
22	1588,77	1588,19	280	Th-232/Ac-228
23	1592,99	-	472	Tl-208 DEP
24	1631,23	1630,63	167	Th-232/Ac-228
25	1730,61	1729,60	269	U-238/Bi-214
26	1765,36	1764,50	1406	U-238/Bi-214
27	1848,52	1847,42	192	U-238/Bi-214
28	2104,91	-	395	Tl-208 SEP
29	2119,51	2118,55	82	U-238/Bi-214
30	2205,41	2204,21	516	U-238/Bi-214
31	2449,81	2447,86	93	U-238/Bi-214
32	2616,71	2614,53	3437	Th-232/Tl-208

V naměřeném spektru je nejvýraznější anihilační pík o energii 511 keV a linka  $^{40}\text{K}$  o hodnotě  $E_\gamma = 1460,83$  keV. Draslík  $^{40}\text{K}$  je zároveň nejvíce zastoupeným radionuklidem v přirozeném pozadí. Ve spektru se při dlouhodobějším měření může objevit i člověkem vytvořené  $^{137}\text{Cs}$  mající energii  $E_\gamma = 661,66$  keV. V tab. 6.21 se sice nenacházelo, ale i tak je vhodné ho zmínit. Cesium  $^{137}\text{Cs}$  se v přirozeném pozadí nachází jako důsledek testů jaderných zbraní či vážnějších jaderných havárií, zejména černobylské havárie, protože  $^{137}\text{Cs}$  je jedním z hlavních produktů štěpení jader uranu  $^{235}\text{U}$ .

# Závěr

Cílem diplomové práce bylo navázat na bakalářskou práci a výzkumný úkol, provést shrnutí a prohloubení dosud nabytých znalostí v oblasti neutronové aktivační analýzy environmentálních vzorků a zaměřit se na monitorování parametrů neutronového pole aktivační metodou na jaderných reaktorech. Byly vybrány vhodné lokality pro monitorování znečištění životního prostředí na území České republiky. Rovněž byly navrženy a zrealizovány aktivační experimenty a experimenty neutronové aktivační analýzy náplavových půd a mechů. Práce byla zaměřena zejména na analýzu přítomnosti těžkých kovů a jiných toxických látek, a to kyanidů. Také byly měřeny charakteristiky neutronového pole, určovaly se reakční rychlosti, hustoty toku tepelných neutronů a spektrální indexy. V neposlední řadě byla získaná data porovnána se známými údaji a posouzena možnost znečištění životního prostředí v České republice vlivem průmyslu a jiných antropogenních činností.

V teoretické části práce bylo pojednáváno o jaderné gama-spektrometrii a detektorech v ní používaných. Následně se práce zabývala samotnou technikou neutronové aktivační analýzy, jejími typy, metodami, fyzikálním aparátem a aplikacemi. Část textu byla věnována i problematice monitorování neutronového pole, a sice stanovení hustoty toku tepelných neutronů v daném místě aktivní zóny a kadmiového poměru. Rovněž bylo popisováno znečištění životního prostředí toxickými prvky, speciální pozornost byla věnována znečištění arsenem a kyanidy. Bylo pojednáno i o experimentálních reaktorech využívajících neutronovou aktivační analýzu pro analýzu vzorků životního prostředí, a to náplavových půd a mechů.

Jádrem diplomové práce byla samotná experimentální část. Byla provedena nedestruktivní neutronová aktivační analýza náplavových půd a mechů na reaktoru VR-1. Před samotnou analýzou ale bylo nutné vybrat vhodná místa sběru. Na základě doporučených článků od profesora Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy Vojtěcha Ettlera byla zvolena referenční oblast sběru z Národního parku Šumava a dvě znečištěné lokality arsenem, konkrétně Jáchymov a Kutná Hora. V neposlední řadě byly nasbírány vzorky u Valašského Meziříčí kvůli údajnému znečištění kyanidy. Celkem tedy byly vybrány čtyři lokality na území České republiky, kde bylo sesbíráno dohromady deset vzorků náplavových půd a osm vzorků mechů. Na zkoumaných vzorcích byla provedena kvalitativní a kvantitativní neutronová aktivační analýza. Spolu s environmentálními vzorky byly do pole neutronů vkládány i aktivační fólie soli, muskovitu, železa a zlatý drátek obsahující arsen.

Výsledky kvalitativní analýzy odhalily přítomnost běžně zastoupených prvků v zemské kůře jako je sodík, mangan nebo draslík, z kovů potom hliník, vanad,

lanthan či titan. Byla potvrzena i přítomnost těžkých kovů, a sice arsenu a rtuti. V průmyslem zatížených oblastech byly identifikovány i hafnium, cer, tellur, stroncium a další. V některých vzorcích bylo také identifikováno zlato. V meších byl navíc nalezen chlor, jod, hořčík a argon. Je to dáno tím, že mechy obsahují menší množství sodíku a draslíku než je tomu u půd. Jejich gama linky tím pádem tolik nepřekrývají energetické gama linky o nižší intenzitě nacházejících se ve spektru a uvedené prvky je možné snáze naměřit. Dané prvky se vyskytovaly i v půdách, jejich přítomnost v nich ale byla spíše výjimkou. Mechy nemají tak velkou hustotu ve srovnání s půdami a při enkapsulaci zůstalo v ampulkách velké množství vzduchu. Proto se ve výsledném spektru vyskytoval i argon, který není součástí mechů, ale vzduchu v ampulce.

Pomocí kvantitativní analýzy se určovaly koncentrace arsenu, sodíku, draslíku, zlata a železa ve vzorcích. Ukázalo se, že hodnoty arsenu nasbírané v průmyslových oblastech v lokalitách Jáchymov a Kutná Hora byly asi desetkrát zvýšené než v referenční oblasti na Šumavě. Koncentrace sodíku a draslíku, které jsou součástí kyanidů nebyly vyhodnoceny jako zvýšené. Jejich hodnoty byly přibližně stejné jako hodnoty v referenční oblasti. V některých vzorcích se navíc objevovalo i zlato. Jeho průměrná hodnota v zemské kůře je asi  $4 \times 10^{-4} \%$  až  $5 \times 10^{-4} \%$ . Zastoupení zlata v analyzovaných vzorcích řádově odpovídalo zastoupení zlata v zemské kůře. Nakonec byla stanovena koncentrace železa, které se podařilo identifikovat pouze ve vzorku z Jáchymova. Železo ve vzorcích je totiž možné naměřit až při dlouhodobém měření ve spektrometru. Jeho koncentrace činila přibližně 2,0 %. V porovnání se zastoupením železa v zemské kůře byly hodnoty železa v nasbíraných vzorcích nižší. Dle literatury je v zemské kůře zastoupeno železo o hodnotě přibližně 4,2 %.

Pro potřeby experimentů NAA bylo monitorováno neutronové pole pomocí aktivačních detektorů. Určovaly se hodnoty hustot toků tepelných neutronů za pomoci stanovení reakčních rychlostí. Byly ozařovány holé zlaté a měděné fólie a zlaté a měděné fólie v kadmiovém pokrytí. Hustota toku tepelných neutronů nabývala hodnot řádově  $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . V neposlední řadě byly určovány i spektrální indexy, konkrétně kadmiový poměr.

Výsledky práce potvrdily, že reaktor VR-1 je vhodným nástrojem k provedení nedestruktivní neutronové aktivační analýzy environmentálních vzorků, konkrétně náplavových půd a mechů. Získaná data mohou být využívána k monitorování znečištění životního prostředí, a to nejen v České republice. Lze například sestavit mapu znečištění životního prostředí vybraných oblastí nebo dlouhodobě monitorovat změny složení životního prostředí vlivem znečištění.

# Literatura

- [1] ATA SCIENTIFIC instruments. Spectrometry And Spectroscopy: What's The Difference? [online]. [cit. 2. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://www.atascientific.com.au/spectrometry/>>
- [2] ULLMANN V. 1.6. Ionizující záření [online]. [cit. 19. 3. 2021]. Dostupné z: <<https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>>
- [3] MIGLIERINI M. Zdroje ionizujícího žiarenia. [cit. 23. 3. 2021]. Prezentace z předmětu Detekce záření, Katedra jaderných reaktorů, Praha. 2018.
- [4] FREITINGER SKALICKÁ Z., HALAŠKA J., HAVRÁNKOVÁ R., et al. Radiobiologie–7.3.3. Interakce s látkou [online]. [cit. 23. 3. 2021]. Dostupné z: <<http://fbmi.sirdik.org/7-kapitola/73/733.html>>
- [5] FREITINGER SKALICKÁ Z., HALAŠKA J., HAVRÁNKOVÁ R., et al. Radiobiologie–1.4.3. Záření gama [online]. [cit. 23. 3. 2021]. Dostupné z: <<http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/143.html>>
- [6] KNOLL G. F., Radiation Detection and Measurement. [cit. 23. 3. 2021]. John Wiley & Sons, Inc., USA, 1999. ISBN-10 8126522607
- [7] 2 CHAPTER – Interaction of Gamma Ray With Matter. [cit. 23. 3. 2021]
- [8] SPRAWLS P., The Physical Principles of Medical Imaging. [cit. 24. 3. 2021]. Madison, Wis: Medical Physics Publishing, 1995. ISBN 0-944838-54-5.
- [9] WAGNER V., Interakce záření gama s hmotou. [cit. 24. 3. 2021]. Prezentace z předmětu Základy jaderné fyziky, Ústav jaderné fyziky AVČR, Řež. 2021.
- [10] WAGNER V., Spektrum záření gama, jeho získávání a analýza. [cit. 24. 3. 2021]. Prezentace z předmětu Základy jaderné fyziky, Ústav jaderné fyziky AVČR, Řež. 2021
- [11] RAGHEB M., Gamma Rays Interaction with Matter. [cit. 24. 3. 2021]. Kurz NPRES. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA. 2019.
- [12] LÁZNA T., Měření záření gama. [cit. 25. 3. 2021]. Bakalářská práce, Ústav automatizace a měřicí techniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Brno. 2015.

- [13] HAVLÍK J., Radioterapie. [cit. 25. 3. 2021]. Prezentace z předmětu Lékařská technika, Katedra teorie obvodů, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze. 2011.
- [14] MOREIRA G. R., Gamma- and X-ray Interaction with Matter. [cit. 25. 3. 2021]. Prezentace z předmětu BAEN-625, Department of Food Science & Technology, Texas A&M University. 2021.
- [15] BRITANNICA. Interaction of gamma rays and X rays [online]. [cit. 27. 3. 2021]. Dostupné z: <<https://www.britannica.com/technology/radiation-measurement/Interactions-of-gamma-rays-and-X-rays>>
- [16] U.S.NRC. Gamma Spectrum Features. [cit. 27. 3. 2021]. Basic Health Physics. 2011.
- [17] REGUIGUI N., Gamma Ray Spectrometry. [cit. 29. 3. 2021]. Practical Information. 2006.
- [18] Chapter 5 Gamma-ray Spectrometry with Scintillators. [cit. 29. 3. 2021]. Materiály z kurzu Radioisotopes and Radiation Methodology, McMaster University. 2021.
- [19] ULLMANN V. 2.4. Scintilační detektory [online]. [cit. 29. 3. 2021]. Dostupné z: <<https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>>
- [20] USAČEV S., CHRAPAN J., CHUDÝ M., et al. Experimentálna jadrová fyzika. [cit. 29. 3. 2021]. ALFA Bratislava. SNTL Praha. 1981.
- [21] LEO W. R., Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments—Semiconductor Detectors. [cit. 29. 3. 2021]. Springer, Berlin, Heidelberg. La Tour de Peilz, Švýcarsko. 1994. ISBN: 978-3-540-57280-0.
- [22] TICHÝ M., Návod k laboratorním cvičením DEZ. [cit. 30. 3. 2021]. Materiály z předmětu Detekce záření, Katedra jaderných reaktorů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze. 2018.
- [23] MIGLIERINI M. Spektrometria ionizujúceho žiarenia [cit. 30. 3. 2021]. Prezentace z předmětu Detekce záření, Katedra jaderných reaktorů, Praha. 2018.
- [24] MIRION TECHNOLOGIES. Genie™2000 Basic Spectroscopy Software. [cit. 30. 3. 2021]. 2016.
- [25] MATĚJKA K. Experimentální úlohy na školním reaktoru VR-1. [cit. 30. 3. 2021]. Praha, Vydavatelství ČVUT. 2004. ISBN 80-01-03097-0.
- [26] BRABCOVÁ J., Měření rozložení výkonu v experimentálním reaktoru LR-0 (CV Řež) pomocí polovodičové spektrometrie gama. [cit. 30. 3. 2021]. Bakalářská práce, Jihočeská univerzita, Přírodovědecká fakulta, České Budějovice. 2012.

- [27] STÁTNI ÚŘAD RADIAČNÍ OCHRANY. Příloha V. Nastavení detekčních systémů. [cit. 30. 3. 2021]. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT. 2015.
- [28] ADAM J. et al. Transmutation of Th and U with Neutrons Produced in Pb Target and U-Blanket System by Relativistic Deuterons. [cit. 30. 3. 2021]. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna. E15-2008-118. 2008.
- [29] REICHL J., VŠETIČKA M. Encyklopedie fyziky–Neutronové záření [online] [cit. 5. 4. 2021]. 2021. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/806-neutronove-zareni>>
- [30] ARBEIT V. Metody detekce neutronů. [cit. 5. 4. 2021]. Bakalářská práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně. 2020.
- [31] HAMIDATOU L., SLAMENE H., AKHAL T., et al. 6. Concepts, Instrumentation and Techniques of Neutron Activation Analysis. [cit. 5. 4. 2021]. Imaging and Radioanalytical Techniques in Interdisciplinary Research. 2013. DOI: 10.5772/53686. ISBN 978-953-51-1033-0
- [32] ALFASSI Z. B. Activation analysis Volume I. [cit. 5. 4. 2021]. CRC Press, Inc., Florida. 1990. ISBN 08493-4583-9.
- [33] ÚSTAV JADERNÉ FYZIKY AV ČR. Neutron activation analysis (NAA) [online]. [cit. 9. 4. 2021]. Dostupné z: <<http://www.ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/velke-vyzkumne-infrastruktury-a-centra/canam/laboratories/Laboratory2/neutron-activation-analysis.html>>
- [34] IAEA-TECDOC-1215. Use of research reactors for neutron activation analysis. [cit. 9. 4. 2021]. IAEA Vídeň. 1998.
- [35] RATAJ J., HUML O., SKLENKA L'. Experimentální neutronová a reaktorová fyzika–Laboratorní cvičení. [cit. 9. 4. 2021]. České vysoké učení v Praze. 2016. ISBN 978-80-01-05904-3
- [36] JELÍNEK M. Analýza neutronového pole laboratorního AmBe zdroje s využitím měřicího stendu. [cit. 9. 4. 2021]. Diplomová práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno. 2017.
- [37] RATAJ J. Zdroje neutronů. [cit. 9. 4. 2021]. Presentace z předmětu Experimentální reaktorová fyzika, Katedra jaderných reaktorů, České vysoké učení v Praze. 2019.
- [38] ŠTEFÁNIK M., Zdroje neutronů pro aktivační analýzu. [cit. 11. 5. 2021]. Presentace z předmětu Neutronová aktivační analýza, Katedra jaderných reaktorů, ČVUT v Praze. 2021.
- [39] FRÝBORT J., HERALTOVÁ L., ŠTEFÁNIK M. Neutronové interakce. [cit. 2. 5. 2021]. Presentace z předmětu Základy reaktorové fyziky, Katedra jaderných reaktorů, ČVUT v Praze. 2017.



- [40] RATAJ J. Interakce neutronů. [cit. 9. 4. 2021]. Prezentace z předmětu Experimentální reaktorová fyzika, Katedra jaderných reaktorů, České vysoké učení v Praze. 2019.
- [41] STACEY W. M. Nuclear Reactor Physics. [cit. 9. 4. 2021]. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2007. ISBN-13 978-3527406791
- [42] HAMIDATOU L., SLAMENE H., AKHAL T., et al. 6. Concepts, Instrumentation and Techniques of Neutron Activation Analysis. [cit. 3. 5. 2021]. Imaging and Radioanalytical Techniques in Interdisciplinary Research. 2013. DOI: 10.5772/53686. ISBN 978-953-51-1033-0
- [43] HAMMAD, E. A. M. Elemental investigation of (Al-Cu) alloys and some geological samples using neutron activation and xrf analysis techniques. [cit. 2. 5. 2021]. Diplomová práce, Minufiya University. 2012
- [44] GREENBERG R. R., BODE P., DE NADAI FERNANDES E. A. Neutron activation analysis: A primary method of measurement. [cit. 3. 5. 2021]. Spectrochimica Acta Part B, Volume 66, Issues 3–4, Pages 193-241. 2011
- [45] ŠTEFÁNIK M. Základné metódy neutrónovej aktivačnej analýzy. [cit. 3. 5. 2021]. Prezentace z předmětu Neutronová aktivační analýza, Katedra jaderných reaktorů, FJFI, ČVUT v Praze. 2021.
- [46] WITKOWSKA E., SZCZEPANIAK K., BIZIUK M. Some applications of neutron activation analysis. [cit. 4. 5. 2021]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Gdansk University of Technology, Gdansk, Poland. 2005.
- [47] ALFASSI Z. B. Activation analysis Volume II. [cit. 4. 5. 2021]. CRC Press, Inc., Florida. 1990. ISBN 08493-4584-7.
- [48] STEFANIK M., SAZELOVA S., SKLENKA L'. Investigation of mammoth remains using the neutron activation analysis at the Training Reactor VR-1. [cit. 4. 5. 2021]. Applied Radiation and Isotopes, Volume 166. 2020. 109292.
- [49] PHOENIX. Neutron Activation [online]. [cit. 4. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://phoenixwi.com/materials-testing/neutron-activation/>>
- [50] WIKIPEDIA. Michigan Murders [online]. [cit. 4. 5. 2021]. Dostupné z: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Michigan\\_Murders#Arrest](https://en.wikipedia.org/wiki/Michigan_Murders#Arrest)>
- [51] HAMIDATOU L., NANDY M. Advanced Technologies and Applications of Neutron Activation Analysis [cit. 4. 5. 2021]. India. 2019. ISBN 978-1-78985-974-4
- [52] MUSÍLEK L. Dozimetrie neutronů. [cit. 4. 5. 2021]. Vydavatelství ČVUT, Praha. 1998. ISBN 80-01-01750-8
- [53] ŠTEFÁNIK M. Fyzikálne princípy aktivačných meraní. [cit. 4. 5. 2021]. Prezentace z předmětu Neutronová aktivační analýza, Katedra jaderných reaktorů FJFI, ČVUT v Praze. 2021.

- [54] ŠTURMA J. Aktivační analýza a spektrometrie neutronového pole na školním reaktoru VR-1. [cit. 4. 5. 2021]. Diplomová práce, Katedra jaderných reaktorů, FJFI, ČVUT, Praha. 2016.
- [55] FRÝBORT J., FRÝBORTOVÁ L., FEJT F. Difuzní teorie reaktoru. [cit. 4. 5. 2021]. Prezentace z předmětu Základy reaktorové fyziky, Katedra Jaderných reaktorů, FJFI, ČVUT, Praha. 2019
- [56] STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV. Zdraví a životní prostředí [online]. [cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z: <<http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi>>
- [57] KUČERA J. Selected Environmental Applications of Neutron Activation Analysis. [cit. 4. 5. 2021]. IAEA-TECDOC-1215, pp. 43-56. Nuclear Physics Institute, Řež, Czech Republic. 2001. ISSN 1011-4289
- [58] KŁOS A., ALEKSIAYENAK Y. A., ZIEMBIK Z., RAJFUR M., JERZ D., WACŁAWEK M., FRONTASYEVA M. V. The use of neutron activation analysis in the biomonitoring of trace element deposition in the Opole Province. [cit. 7. 5. 2021]. Ecological Chemistry and Engineering S, vol. 20, no. 4, 2014, pp. 677-687.
- [59] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR. Látka: Arzen a sloučeniny (jako As) [online]. [cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z: <[https://www.irz.cz/irz/latky/arsen\\_a\\_sl.html](https://www.irz.cz/irz/latky/arsen_a_sl.html)>
- [60] BABUŠKA V. Toxické prvky. [cit. 7. 5. 2021]. Prezentace z předmětu Lékařská chemie, Lékařská fakulta v Plzni, Univerzita Karlova. 2021.
- [61] ŠTEFÁNEK J. Otrava arsenem [online]. [cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://www.stefajir.cz/otrava-arsenem>>
- [62] STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV. Hodnocení zdravotních rizik ze znečištění ovzduší v roce 2006. [cit. 7. 5. 2021].
- [63] PŘÍZNAKY-PROJEVY NEMOCÍ. Otrava arsenem, arsenikem–příznaky, projevy, symptomy [online]. [cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://www.priznaky-projevy.cz/otravy/615-otrava-arsenem-arsenikem-priznaky-projevy-symptomy>>
- [64] KOPLÍK R. Toxické prvky v životním prostředí a v potravinách [cit. 7. 5. 2021]. Podklady k přednášce z předmětu Chemická bezpečnost potravin, Ústav analýzy potravin a výživy, VŠCHT, Praha. 2021.
- [65] SVOBODA O. Anomální výskyty arsenu v půdách České republiky. [cit. 7. 5. 2021]. Bakalářská práce, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha. 2012.
- [66] AKTUÁLNĚ.CZ. Našli jsme v půdě jedy, úřady to moc nezajímá [online]. [cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://zpravy.aktualne.cz/domaci/vedec-nasli-jsme-v-pude-jedy-urady-to-moc-nezajima/r i:article:731351/>>

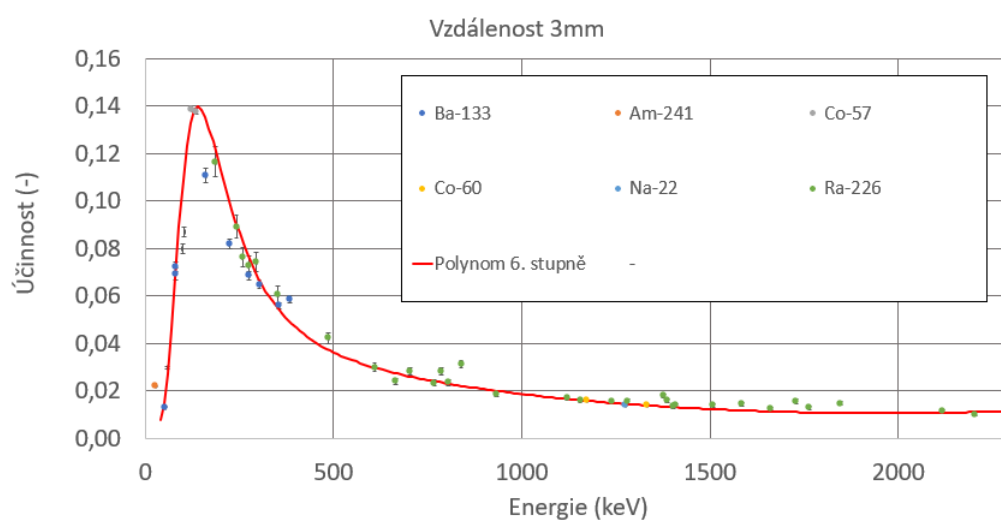
- [67] ARNIKA. Kyanidy [online]. [cit. 7. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://arnika.org/kyanidy>>
- [68] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ-IRZ. Kyanidy. [cit. 7. 5. 2021].
- [69] SHVETSOV N. V. Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research. [cit. 8. 5. 2021]. Quantum Beam Science Dubna, , vol. 1, no. 6. JINR, Dubna, Russia. 2017. ISSN 2412-382X
- [70] Fast pulsed reactor IBR-2 [online]. [cit. 8. 5. 2021]. 2015. Dostupné z: <<http://live.iop-pp01.agh.sleek.net/2015/09/23/fast-pulsed-reactor-ibr-2/>>
- [71] FRONTASYEVA M. V., STEINNES E. Epithermal Neutron Activation Analysis of Mosses Used to Monitor Heavy Metal Deposition Around an Iron Smelter Complex. [cit. 8. 5. 2021]. Analyst , vol. 120, no. 5, pp. 1437-1440, The Royal Society of Chemistry. 1995.
- [72] CULICOV O. A., MOCANU R., FRONTASYEVA M. V., et al. Active Moss Biomonitoring Applied to an Industrial Site in Romania:Relative Accumulation of 36 Elements in Moss-Bags. [cit. 8. 5. 2021]. Environmental Monitoring and Assessment, vol. 108, pp. 229-240. 2005.
- [73] ARAFA W. M., BADAWY W. M., FAHMI N. M., et al. Geochemistry of sediments and surface soils from the Nile Delta and lower Nile valley studied by epithermal neutron activation analysis. [cit. 8. 5. 2021]. Journal of African Earth Sciences, vol. 107, pp. 57-64. 2015.
- [74] AGUILAR-HERNÁNDEZ F. Mexican TRIGA Mark-III Reactor. [cit. 8. 5. 2021]. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Mexico.
- [75] ÁVILA-PÉREZ P., LONGORIA-GÁNDARA L. C., GARCIA-ROSALES G., et al. Monitoring of elements in mosses by instrumental neutron activation analysis and total X-ray fluorescence spectrometry. [cit. 9. 5. 2021]. Journal of Radianalytical and Nuclear Chemistry, vol. 317, pp. 367-380. 2018. co.
- [76] SALAM M. A., SARDER M. A., MALEK SONER M. A., et al. BAEC TRIGA research reactor. [cit. 9. 5. 2021].
- [77] RAHMAN S., JAMAL M., HOSSAIN S. M. Investigation of Vertical Distribution of Soil Elements at Central Part of Bangladesh Using Neutron Activation Analysis. [cit. 9. 5. 2021]. International Journal of Environmental Protection, vol. 3, iss. 2, pp. 5-13. 2013.
- [78] AGBO S. A., AHMED Y. A., EWA I. O. B., et al. Analysis of Nigeria research REACTOR-1 (NIRR-1) thermal power calibration methods. [cit. 9. 5. 2021]. Nuclear Engineering and Technology, vol. 48, no. 3, pp. 673-683. 2016. ISSN 1738-5733
- [79] Nigerian research reactor operator committed to safety [online]. [cit. 9. 5. 2021]. 2019. Dostupné z: <<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Nigerian-research-reactor-operator-committed-to-sa>>

- [80] GARBA L., EWA I. Rare earth element distribution patterns in the soils around the Nigerian Research Reactor-1, (NIRR-1) In Zaria, Nigeria. [cit. 9. 5. 2021]. European Scientific Journal, vol. 8, no.16, pp. 245-251. 2012. ISSN: 1857-7881.
- [81] MOHAMMED A., UMAR S., ISMAILA A., et al. Assessment of metal availability in dumpsite soil using neutron activation analysis. [cit. 9. 5. 2021]. Bayero Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 12, no 1, pp. 112-117. 2019.
- [82] Školní reaktor VR-1 [online]. [cit. 9. 5. 2021]. 2017. Dostupné z: <<http://www.reaktor-vr1.cz/cz/reaktor/popis>>
- [83] RATAJ J. Extensive utilisation of VR-1 reactor for nuclear education and training. [cit. 9. 5. 2021]. Belgium. 2010.
- [84] KRECHLEROVÁ A., Bakalářská práce–Studium environmentálních vzorků využitím neutronové aktivační analýzy na školním reaktoru VR-1. [cit. 24. 3. 2021]. Katedra jaderných reaktorů, Praha. 2019.
- [85] KRECHLEROVÁ A., Výzkumný úkol–Aktivační analýza vzorků životního prostředí na školním reaktoru VR-1. [cit. 10. 5. 2021]. Katedra jaderných reaktorů, Praha. 2020.
- [86] Mapy Google [online]. [cit. 12. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://www.google.com/maps>>
- [87] HUAYUAN MICA. Muscovite Mica–Product Details [online]. [cit. 12. 5. 2021]. Dostupné z: <[http://www.huayuanmica.com/muscovite-mica/muscovite-mica-2.html?gclid=Cj0KCQjwvYSEBhDjARIsAJMn0lhtrdc7ZfdACwTX2cqSybPQ-GGOjYjWHRsBUvijt8lya2Ii7PIUVIcaAoC6EALw\\_wcB](http://www.huayuanmica.com/muscovite-mica/muscovite-mica-2.html?gclid=Cj0KCQjwvYSEBhDjARIsAJMn0lhtrdc7ZfdACwTX2cqSybPQ-GGOjYjWHRsBUvijt8lya2Ii7PIUVIcaAoC6EALw_wcB)>
- [88] CHU S.Y.F., EKSTRÖM L.P., FIRESTONE R.B. Nuclear Data Search [cit. 30. 4. 2021]. Dostupné z <<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp>>
- [89] PERIODICKÁ TABULKA. Složení zemské kůry. [cit. 16. 5. 2021]. 2017. Dostupné z <<http://www.prvky.com/zemska-kura.html>>

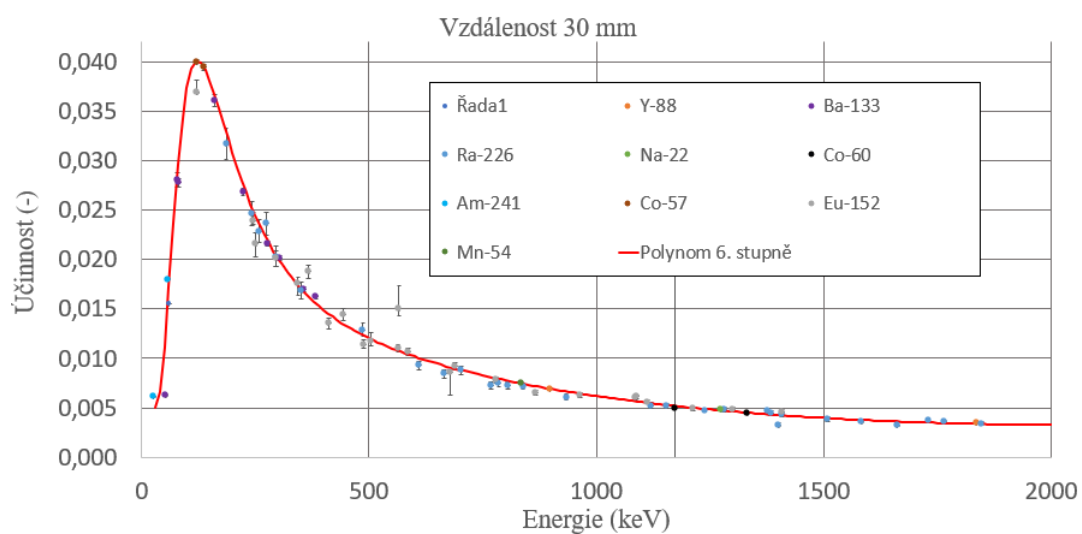


# Přílohy

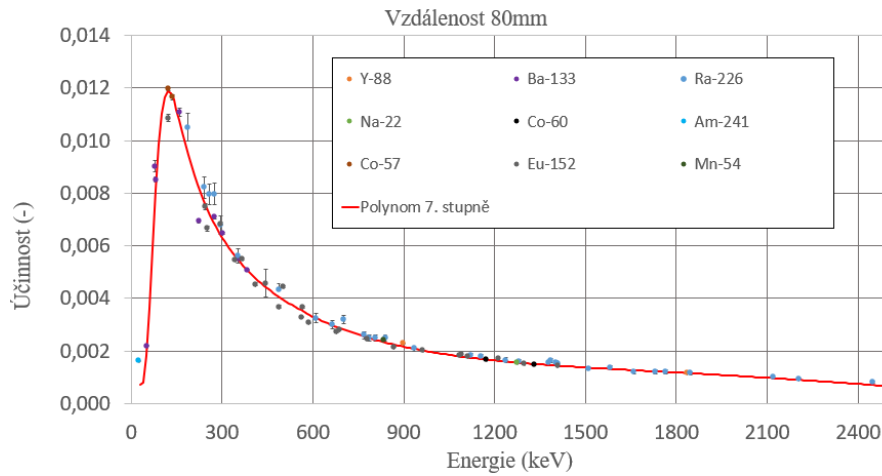
V příloze jsou vyneseny grafy kalibrace HPGe detektoru, které nebyly vyobrazeny v textu, protože by snižovaly jeho čitelnost. Grafy byly převzaty z [85]. Dále byla vložena kompletní tabulka výsledků kvalitativní analýzy pro vybranou lokalitu, konkrétně Jáchymova díky komplexnosti spektra.



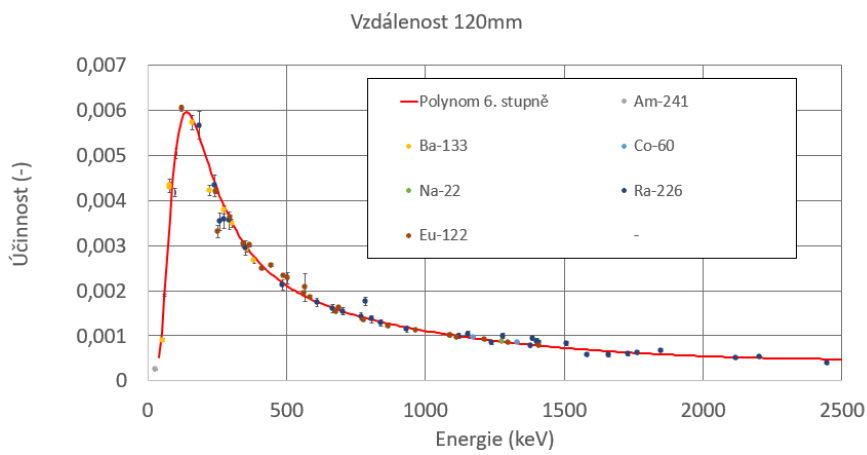
Obrázek 16: Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 3 mm



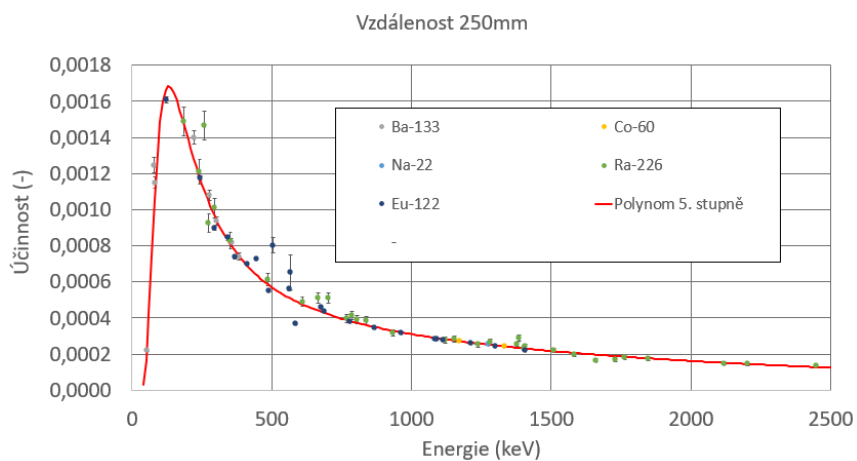
Obrázek 17: Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 30 mm



Obrázek 18: Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 80 mm



Obrázek 19: Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 120 mm



Obrázek 20: Kalibrace polovodičového HPGe detektoru, geometrie 250 mm

Tabulka 22: Seznam prvků nalezených v náplavové půdě, Jáchymovský potok, Jáchymov

Pozorovaný radionuklid	Energie gama linky (keV)	Poločas rozpadu	Jaderná reakce
$^{24}\text{Na}$	1368,6; 2754,0	14,96 hod	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$
$^{56}\text{Mn}$	846,7; 1810,8; 2113,1; 2522,8; 2657,5	2,58 hod	$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$
$^{42}\text{K}$	1524,7	12,36 hod	$^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$
$^{51}\text{Ti}$	320,1	5,76 min	$^{50}\text{Ti}(n,\gamma)^{51}\text{Ti}$
$^{52}\text{V}$	1434,1	3,74 min	$^{51}\text{V}(n,\gamma)^{52}\text{V}$
$^{28}\text{Al}$	1779,0	2,24 min	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$
$^{139}\text{Ba}$	165,9	83,06 min	$^{138}\text{Ba}(n,\gamma)^{139}\text{Ba}$
$^{140}\text{La}$	1596,2; 487,0; 815,8; 328,8; 925,2; 867,8	1,68 d	$^{139}\text{La}(n,\gamma)^{140}\text{La}$
$^{153}\text{Sm}$	103,2	46,28 hod	$^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$
$^{46}\text{Sc}$	1120,5	83,79 d	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$
$^{165}\text{Dy}$	94,7	2,33 hod	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}$
$^{239}\text{Np}$	106,1	2,36 d	$^{238}\text{U}(n,\gamma)$ a následné $\beta^-$ rozpady
$^{233}\text{Pa}$	312,2	26,97 d	$^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ a následné $\beta^-$ rozpady
$^{87\text{m}}\text{Sr}$	388,5	2,80 hod	$^{86}\text{Sr}(n,\gamma)^{87\text{m}}\text{Sr}$
$^{76}\text{As}$	559,1	1,08 d	$^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$
$^{59}\text{Fe}$	1099,3; 1291,6	44,50 d	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$
$^{203}\text{Hg}$	279,2	46,61 d	$^{202}\text{Hg}(n,\gamma)^{203}\text{Hg}$
$^{181}\text{Hf}$	482,2	42,39 d	$^{180}\text{Hf}(n,\gamma)^{181}\text{Hf}$
$^{123\text{m}}\text{Te}$	159,0	119,70 d	$^{122}\text{Te}(n,\gamma)^{123\text{m}}\text{Te}$
$^{141}\text{Ce}$	145,4	32,50 d	$^{140}\text{Ce}(n,\gamma)^{141}\text{Ce}$
$^{175}\text{Yb}$	396,3	4,18 d	$^{174}\text{Yb}(n,\gamma)^{175}\text{Yb}$
$^{72}\text{Ga}$	834,0	14,10 hod	$^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$
$^{124}\text{Sb}$	602,7	60,20 d	$^{123}\text{Sb}(n,\gamma)^{124}\text{Sb}$
$^{60}\text{Co}$	1332,5; 1173,2	5,27 r	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$
$^{82}\text{Br}$	776,5; 554,3	35,30 h	$^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$
$^{51}\text{Cr}$	320,1	27,70 d	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$
$^{198}\text{Au}$	411,8	2,70 d	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$
$^{27}\text{Mg}$	843,7; 1014,4	9,46 min	$^{26}\text{Mg}(n,\gamma)^{27}\text{Mg}$
$^{116\text{m}}\text{In}$	1293,6; 1097,3	54,29 min	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$