



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

**Zprovoznění a zkušební provoz přístroje NA6201 pro měření
alfa a beta aktivity**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

OCHRANA OBYVATELSTVA

Autor: Bc. Tomáš Rösler

Vedoucí práce: Ing. Eva Zemanová, Ph.D.

České Budějovice 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem Zprovoznění a zkušební provoz přístroje NA6201 pro měření alfa a beta aktivity jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby bakalářské práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé diplomové práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 10. 5. 2021

.....

Poděkování

V první řadě chci poděkovat Ing. Zemanové, Ph.D, za vedení mé diplomové práce. Dále chci poděkovat Ing. Zemanovi za poskytnutí prostoru a rady pro vypracování praktické části diplomové práce.

Zprovoznění a zkušební provoz přístroje NA6201 pro měření alfa a beta aktivity

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá zprovozněním a zkušebním provozem přístroje NA6201 pro měření alfa a beta aktivity, který je umístěn v dozimetrické laboratoři Zdravotně sociální fakulty. Od přestěhování laboratoře do pavilonu H Nemocnice České Budějovice je vybavení využíváno k praktické výuce, popřípadě výzkumu výjimečně.

Teoretická část práce se zabývá fyzikálními aspekty souvisejícími s alfa a beta zářením, jeho dozimetrií, monitorováním a principy detektorů. V neposlední řadě je uveden právní rámec této problematiky a systém výzkumu, resp. monitorování v ČR. V praktické části se práce zabývá procesem zprovoznění přístroje NA6201, jeho nastavením a měřením vzorků. Dále se zabývá posouzením využitelnosti přístroje při výuce a dalším výzkumu. V praktické části bylo srovnávacím měřením zjištěno že přístroj NA6201 není schopen spolehlivě měřit aktivitu beta. Srovnávací měření spočívalo v odběru vzorků vod z pramenů, jejich zpracování a stanovení celkové objemové aktivity beta. Pro srovnání byl využit Alfa-beta automat EMPOS EMS-3. Další využitelnost přístroje NA6201 je možná jen za předpokladu vyřešení řešení identifikovaných nedostatků současné situace, zejména absence chemické laboratoře s potřebným vybavením pro zpracování vzorků a absence tlakové lahve s metanem. Navrhovaná možná řešení jsou přesunutí přístroje do vhodnějších prostor nebo dovybavení laboratoře.

Klíčová slova

Aktivita; ionizující záření; radionuklidy; dozimetrie; detektory ionizujícího záření, vodní zdroje; monitorování

Setup and testing of alpha beta counter NA6201

Abstract

This diploma thesis was focused on the Setup and testing of alpha beta counter NA6201 for measuring alpha and beta activity, which is located in the dosimetric laboratory of the Faculty of Health and Social Studies. Since the laboratory was moved to wing H, the equipment has been used for practical education or research sporadically.

The theoretical part of this diploma thesis studies aspects of physics related to alpha and beta radiation, its dosimetry, monitoring and the working of detectors. The legal framework of this topic and the research system, resp. monitoring in the Czech Republic is also examined.

In the practical part, this diploma thesis focuses on the set up of the NA6201 counter, its setting and measurement of samples. It also includes an assessment of the usability of the device in education and further research. In the practical part, it was found by comparative measurements that the NA6201 device is not able to reliably measure beta activity. The comparative measurement consisted of water samples collection from springs, their processing and determining the total beta volume activity. The Alpha-beta EMPOS EMS 3 automat was used for comparison. Further use of the NA6201 counter is possible only if the identified shortcomings of the current situation are solved, especially the absence of a chemical laboratory with the necessary equipment for sample processing and the absence of a methane cylinder. Proposed possible solutions are moving the device to more suitable premises or retrofitting the laboratory with necessary equipment.

Key words

Activity; ionizing radiation; radionuclides; dosimetry; ionizing radiation detectors, water sources; monitoring

Obsah

Úvod.....	9
1 Teoretická část.....	10
1.1 Stavba atomu.....	10
1.2 Radioaktivní přeměna	11
1.2.1 Přeměna alfa	12
1.2.2 Přeměna beta.....	13
1.2.3 Přeměna gama.....	14
1.2.4 Rentgenové záření.....	14
1.2.5 Neutronové záření.....	15
1.3 Interakce ionizujícího záření	15
1.3.1 Ionizace.....	16
1.3.2 Excitace.....	16
1.3.3 Vznik brzdného záření	16
1.3.4 Fotoefekt	16
1.3.5 Comptonův jev.....	17
1.3.6 Tvorba elektron pozitronových párů.....	17
1.3.7 Interakce neutronů	17
1.4 Radionuklidy v životním prostředí.....	17
1.4.1 Přírodní radionuklidy	18
1.4.2 Umělé radionuklidy	18
1.4.3 Významné radionuklidy v životním prostředí	18
1.4.4 Kontaminace vody	20
1.5 Kontaminace organismu radionuklidy	23
1.5.1 Vnější kontaminace.....	23
1.5.2 Vnitřní kontaminace	23
1.6 Biologické účinky ionizujícího záření	25

1.6.1	Deterministické účinky	26
1.6.2	Stochastické	26
1.7	Detektory ionizujícího záření	27
1.7.1	Obecný princip elektronického detektoru	27
1.7.2	Nejdůležitější fyzikální charakteristiky detektorů	28
1.7.3	Pozadí detektoru	29
1.7.4	Plynové detektory	30
1.7.5	Scintilační detektory	34
1.7.6	Polovodičové detektory	37
1.8	Právní rámec.....	39
2	Cíle práce a výzkumná otázka	43
3	Metodika.....	44
3.1	Zprovoznění měřiče alfa-beta NA 6201	44
3.1.1	Studium principu a shromáždění materiálů k alfa-beta NA 6201	44
3.1.2	Vizuální prohlídka přístroje alfa-beta NA 6201, zjištění stavu jednotlivých komponent, jejich funkčnosti a nedostatků	44
3.1.3	Zajištění doplnění potřebných komponent, zhodnocení funkčnosti vyhodnocovacích jednotek	44
3.1.4	Nastavení pracovních napětí	45
3.2	Stanovení spolehlivosti účinnosti stanovení pro stanovení objemové aktivity beta	45
3.2.1	Postup měření s NA6201	47
3.2.2	Postup srovnávacího měření přístrojem EMS3	47
3.3	Měření celkové objemové aktivity beta	48
3.3.1	Zpracování vzorků	51
3.3.2	Postup srovnávacího měření přístrojem EMS3	52
3.3.3	Postup srovnávacího měření NA6201	52
4	Výsledky.....	53

4.1	Zprovoznění měřiče nízkých aktivit alfa-beta NA 6201	53
4.1.1	Princip fungování a technické informace NA 6201.....	53
4.1.2	Zjištění stavu NA 6201 a vybavení laboratoře	58
4.1.3	Doplnění potřebných komponent a hodnocení vyhodnocovacích jednotek 58	
4.1.4	Stanovení pracovního napětí.....	61
4.2	Stanovení spolehlivosti účinnosti stanovení pro stanovení objemové aktivity beta 66	
4.2.1	Výsledky přístroje NA 6201	66
4.2.2	Výsledky přístroje EMS 3.....	68
4.3	Měření celkové objemové aktivity beta	71
5	Diskuse	73
6	Závěr.....	77
7	Seznam použitých zdrojů	78
8	Seznam zkratk.....	82

Úvod

Instrumentální měření radioaktivity je důležitou součástí radiační ochrany, která zjištěné hodnoty využívá k usměrňování a regulaci ozáření radionuklidy v životním prostředí a potravinách, tak aby nedošlo ke zvýšení rizika poškození osob a životního prostředí. Životní prostředí a potraviny obsahují radionuklidy, které jsou jejich přirozenou součástí, nebo do nich pronikají z důvodu lidské činnosti. Zkušenosti z historie ukazují, že monitorování radionuklidů v životním prostředí dokáže odhalit potenciálně i reálně nebezpečné nakládání s radionuklidy, chyby v nastaveném systému radiační ochrany při nakládání s radionuklidy a zvýšené koncentrace přírodně vyskytujících se radionuklidů v životním prostředí. Na základě včasného zjištění lze přijmout opatření ke snížení rizika poškození osob i životního prostředí.

Významnou činností v rámci radiační ochrany je sledování radionuklidů ve vodě. Jde především o objemové aktivity záření alfa a beta v pitné vodě z přírodních zdrojů radionuklidů a sledování umělých radionuklidů ve vodotečích a výpustech zejména v okolí jaderných elektráren. Technika instrumentálního měření objemových aktivit je stále rozvíjena a jsou využívány moderní přístroje i postupy stanovení.

Pro měření aktivity plošných vzorků jako jsou odparky, sedimenty nebo prášky, lze použít přístroj NA6201 pro měření alfa a beta aktivit, který je umístěný v dozimetrické laboratoři ZSF JU. Je tvořený analogovou vyhodnocovací jednotkou a detekční jednotkou s průtokovým proporcionálním detektorem, doplněný anti koincidenčním scintilačním detektorem. Zprovozněním přístroje, zkušebním provozem a hodnocením jeho využitelnosti se zabývá praktická část diplomové práce.

1 Teoretická část

1.1 Stavba atomu

Vědní obor, který se zabývá studiem jádra atomu a jeho přeměnami se nazývá jaderná fyzika. Objev radioaktivity v roce 1896 Henri Becquerelem je uznávaný jako moment, kdy jaderná fyzika započala jako samostatný vědní obor. Velmi rychle se rozvíjela, do konce století byly známy tři druhy radioaktivity. Jádro atomu, ve kterém je koncentrována většina hmotnosti, postuloval Ernest Rutherford v roce 1911 na základě dat z jeho experimentů s alfa zářením. Další klíčové momenty jaderné fyziky, jako jsou objevy neutronu, silné interakce, jaderné přeměny a fúze, prokázaly její důležitost. V současnosti je jaderná fyzika základem pro mnohé běžně využívané technologie a je nadále rozvíjena.

Následující hodnoty popisují stavbu atomu. Složení atomu určuje jeho vlastnosti.

Z – protonové číslo

A – nukleonové číslo

N – neutronové číslo

Nuklid – atom s konkrétním protonovým a nukleonovým číslem

Izotop – atom se stejným protonovým číslem a rozdílným nukleonovým číslem

Izobar – atom se stejným nukleonovým číslem, ale rozdílným protonovým číslem

(Masterson, 2018)

Atomové jádro je tvořeno protony a neutrony, tyto subatomárními částice jsou k sobě vázány působením silné interakce. Silná interakce působí na velmi malou vzdálenost a vykazuje nasycenost – působí pouze na malé množství nukleonů v bezprostřední blízkosti. Protony se vzájemně odpuzují působením elektrostatické interakce. Celková vazebná energie jádra je u jednotlivých nuklidů různá, se zvyšujícím se protonovým číslem prudce roste až do maxima u prvku železa a poté pozvolna klesá (Masterson, 2018).

Se zvyšujícím se počtem nukleonů v jádře dochází k nárůstu celkové vazebné energie, narůstající počet protonů ovšem zvyšuje vliv elektrostatických odpuzivých sil vyšší měrou. Kompetice těchto dvou sil vede u těžkých jader k jejich nestabilitě a přeměnám (Masterson, 2018).

1.2 Radioaktivní přeměna

Radioaktivní přeměna je přeměna jádra nebo jeho energetického stavu provázena emisí ionizujícího záření. Jev, při kterém dochází k samovolnému rozpadu energeticky nestabilních jader, se nazývá radioaktivita. Nuklidy, které mají schopnost se takto samovolně rozpadat, nazýváme radionuklidy. Chování jader nestabilních nuklidů je statistického charakteru. K rozpadu radionuklidů dochází s konstantní pravděpodobností pro konkrétní radionuklid. Tato pravděpodobnost je vyjadřována pomocí přeměnové konstanty (Lehto, 2017).

Počet přeměn v určitém množství nuklidů v čase popisuje rozpadový zákon:

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt$$

N – počet nuklidů

λ – přeměnová konstanta

t – čas

Integrací získáme funkci

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

N – počet jader v čase t

N_0 – počet jader v čase $t = 0$

λ – přeměnová konstanta

Pro větší názornost rychlosti přeměny radionuklidu je využíván poločas přeměny, ten popisuje, za jakou dobu se přemění právě polovina jader. Jelikož popisuje stejnou vlastnost jako přeměnová konstanta, je mezi nimi vztah:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Veličina popisující radioaktivitu je aktivita, která udává počet přeměn za jednotku času. Hodnota aktivity je závislá na počtu jader v čase t_0 a čase t , který uplynul od počátečního stavu radionuklidu. Rozpadový zákon lze tak vyjádřit jako:

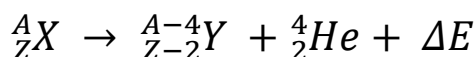
$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Jednotkou SI pro vyjádření aktivity je Becquerel. Je definovaný jako počet přeměn za sekundu. Pro vyjádření aktivity látek je využíváno odvozených jednotek, které vyjadřují aktivitu vztahenou k další jednotce, například objemu, hmotnosti, plochy (Lehto, 2017).

Přeměna radionuklidů je doprovázena emisí ionizujícího záření. Ionizující záření je foton nebo částice schopná ionizovat atomy. Přímou ionizujícím zářením jsou nabitě částice, které mají dostatečnou kinetickou energii k ionizaci atomu. Nepřímou ionizující částice způsobují interakcemi s okolím vznik sekundárního přímo ionizujícího záření (Lehto, 2017).

1.2.1 Přeměna alfa

Při alfa přeměně jádra dochází k emisi alfa částice – He^{2+} mateřským jádrem a k přeměně na dceřiné jádro o dva protony a dva neutrony menší. Schematicky přeměnu alfa zapisujeme jako:



X – mateřské jádro

Y – dceřiné jádro

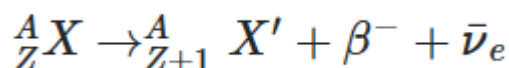
ΔE – Energetický výtěžek v podobě kinetické energie alfa částice a dceřiného jádra

Alfa částici tvoří dva protony a dva neutrony, má kladný elektrický náboj $+2e$. Jádro opouští rychlostí okolo 4 % rychlosti světla a má kinetickou energii okolo 5 MeV. Alfa záření je málo pronikavé, ve vzduchu je jeho dolet pouhých několik centimetrů. Můžeme ho velice snadno odstínit listem papíru, ve tkáních má dolet okolo 0,1 mm. V případě zevní kontaminace nedochází k proniknutí přes epidermis – rohovějící svrchní část kůže. V případě vnitřní kontaminace je veškerá energie deponována do živé tkáně v bezprostřední blízkosti. Radiační váhový faktor pro alfa částice – 20. Radiační váhový faktor charakterizuje relativní schopnost ionizace prostředí ve srovnání s fotonovým zářením (Kónya, Nagy, 2012).

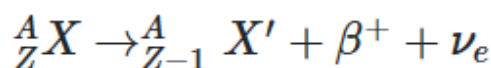
1.2.2 Přeměna beta

Přeměna beta je nejběžnější radioaktivní přeměnou, dochází k ní v širokém spektru nuklidů a realizuje se přeměnou beta plus a beta minus.

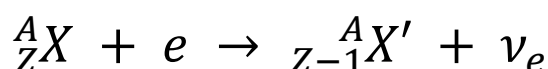
Při beta minus rozpadu dochází v jádře k přeměně neutronu na proton a vyzáření elektronu a antineutrína. Dceřiný nuklid má o proton navíc a nachází se v periodické soustavě o jedno místo vpravo od mateřského. Schematicky přeměnu zapisujeme jako:



Při přeměně beta plus dochází k přeměně protonu na neutron a vyzáření pozitronu a neutrína z jádra. Dceřiný nuklid má tedy o proton méně a nachází se v periodické soustavě o jedno místo vlevo od mateřského. Schematicky přeměnu zapisujeme jako:



Elektronový záchyt je jev, při kterém dochází k zachycení elektronu z obalu jádrem atomu, ve kterém je nadbytek protonů. Proton s elektronem se přemění na neutron a volné místo ve vnitřní energetické hladině elektronového obalu je obsazeno elektronem z hladiny vyšší za vzniku charakteristického záření. Dceřiný nuklid má tedy o proton méně a nachází se v periodické soustavě o jedno místo vlevo od mateřského. Schematicky přeměnu zapisujeme jako:



Beta částice jsou elektrony nebo pozitrony s elektrickým nábojem $\pm 1e$ a relativně velmi malou hmotností. Rychlost beta částic se blíží rychlosti světla, ve vzduchu mají dolet desítek centimetrů. Stínění beta částic je komplikované vznikem brzdného záření. Pro odstínění beta částic za minimálního vzniku brzdného záření postačí 10 mm akrylátového skla. V případě zevní kontaminace dochází k proniknutí přes epidermis a působení na hlubší vrstvy kůže. Radiační váhový faktor pro beta částice – 1 (Kónya, Nagy, 2012).

1.2.3 Přeměna gama

Přeměna gama je způsobena přechodem jádra z excitovaného stavu do stavu základního, kdy je rozdíl energie emitován z jádra v podobě gama fotonu. Nedochozí tedy ke změně v počtu ani druhu nuklidů v jádře (Kónya, Nagy, 2012).

Gama částice je nenabitý foton elektromagnetického vlnění s energií od několika keV až po cca 8 MeV. V části této energetické oblasti se překrývá s fotony rentgenového záření, které mají původ v elektronovém obalu. Záření má čárové spektrum, konkrétní radionuklid emituje fotony s určitou energií. Energie gama fotonu je udávána:

$$E = h \frac{C}{\lambda}$$

h – Planckova konstanta

C – rychlost světla ve vakuu

λ – vlnová délka záření.

Gama záření neinteraguje stejně jako alfa a beta záření a jeho pronikavost prostředím je daleko vyšší. Pro odstínění gama záření je vhodný materiál s velkým počtem protonů a velkou hustotou. Ke snížení intenzity gama záření o polovinu je potřeba 1 cm olova nebo 9 cm betonu (Kónya, Nagy, 2012).

1.2.4 Rentgenové záření

Rentgenové záření je forma elektromagnetického záření vznikající při interakci volných elektronů v atomovém obalu. V nejvyšších energiích se překrývá s gama zářením, které má ovšem původ v atomovém jádře. Podle mechanismu vzniku rozlišujeme brzdné a charakteristické rentgenové záření. Stínění rentgenového záření je obdobné jako stínění záření gama, stejně tak je radiační váhový faktor 1 (Natale, 2011).

Brzdné záření vzniká prudkým zpomalením a zakřivením dráhy rychle letícího elektronu při průchodu silným elektrostatickým polem v blízkosti atomového jádra. Ztracená energie elektronu je vyzářena v podobě fotonu rentgenového záření. Energie fotonu brzdného záření je závislá na rychlosti elektronu a protonovém čísle interagujícího atomu. Energie vznikajícího záření má spojité spektrum (Ishii, 2006).

Charakteristické záření vzniká při interakci volného elektronu s elektrony vázanými v atomovém obalu. Volný elektron při průletu elektronovým obalem narazí do elektronu, čímž mu předá energii. Při interakci s elektronem v nižších energetických hladinách dochází k jeho vybuzení (excitaci) na vyšší energetickou hladinu, nebo k jeho uvolnění při předání dostatečné energie. Excitovaný elektron nadbytečnou energii emituje v podobě fotonu o energii rovnající se rozdílu mezi hladinami. V případě vyražení elektronu v nižší energetické hladině je jeho místo obsazeno elektronem z vyšší hladiny a přebytek energie je opět uvolněn ve formě fotonu. Energie fotonů je vždy rovna rozdílu energií mezi jednotlivými hladinami a je charakteristická pro jednotlivé nuklidy (Ishii, 2006).

1.2.5 Neutronové záření

Neutronové záření je nenabitě záření tvořené volnými neutrony, které jsou typicky uvolňovány z jádra atomu při jaderném štěpení nebo jaderné fúzi. Volné neutrony jsou nestabilní a rozpadají se na proton, elektron a anti elektron neutrino. Střední doba života volných neutronů je 881,5 sekundy. Volné neutrony mají velmi široké spektrum energií. Energie ovlivňuje jejich interakce i účinky na živou hmotu. Radiační váhový faktor se liší podle energie a je uvedený v tabulce 1. Ke stínění neutronů je využíván materiál bohatý na lehké nuklidy jako vodík, se kterými neutrony interagují pružným rozptylem. Při stínění neutronů vzniká gama záření, které je nutné také odstínit (Yue et al., 2013).

Tabulka 1: Radiační váhový faktor neutronů

Energie	Radiační váhový faktor
<10 keV	5
10 keV -100 keV	10
110 keV – 2MeV	20
2 MeV – 20 MeV	10
>20 MeV	5

Zdroj: (Yue et al., 2013)

1.3 Interakce ionizujícího záření

Částice ionizující záření interagují s okolím různým způsobem. Druh interakce je závislý na vlastnostech ionizujícího záření jako je náboj, energie a na vlastnostech látky, se kterou interaguje, například počet elektronů v atomu a hmotnost jádra (Thornton, Rex, 2013).

1.3.1 Ionizace

K ionizaci atomu dochází, pokud je interagujícím zářením dodána elektronu v obalu dostatečná energie k překonání vazebné energie a jeho uvolnění. Závislost specifické ionizace na hloubce průniku nabitých částic do látky popisuje Braggova křivka (Masterson, 2018).

Přímo ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi, které mají dostatečnou energii k ionizaci atomů. Přímo ionizujícími částicemi jsou elektrony, pozitrony, protony a částice alfa. Nepřímo ionizující záření je tvořeno nenabitými částicemi, které prostředí neionizují, ale při interakcích uvolňují sekundární přímo ionizující částice, které následně prostředí ionizují. Nepřímo ionizující částicemi jsou fotony a neutrony (Masterson, 2018).

1.3.2 Excitace

Pokud interagující částice předá vázanému elektronu menší energii, než je potřebná k jeho uvolnění, dojde k jeho vybuzení na vyšší energetickou hladinu tzv. excitaci. Při návratu na původní hladinu (deexcitace) dochází k uvolnění přebytečné energie ve formě elektromagnetického vlnění – fotonového záření, jehož energie je rovna rozdílu dvou energetických hladin v elektronovém obalu, mezi kterými přeskok nastal. Toto energetické záření nazýváme charakteristické a má čárové spektrum (Masterson, 2018).

1.3.3 Vznik brzdného záření

Brzdné záření vzniká průletem elektronu v blízkosti atomového jádra, při kterém dojde důsledkem coulombovské interakce k brždění elektronu a ke změně jeho směru. Přebytek energie je uvolněn ve formě elektromagnetického vlnění – fotonového záření se spojitým energetickým spektrem (Masterson, 2018).

1.3.4 Fotoefekt

Fotoefekt vzniká při interakci nepřímo ionizujícího záření s hmotou. K fotoefektu dochází při interakci fotonu gama záření s elektronem v atomovém obalu blízko jádra. Foton předá elektronu veškerou svoji energii a tím sám zaniká. Elektron následně energii využije na překonání vazebné energie a uvolní se z elektronového obalu, nazýváme ho fotoelektron. Jeho místo zaplní elektron z vyšší energetické hladiny a přebytečná energie tohoto elektronu je uvolněna ve formě fotonu charakteristického rentgenového záření. Tento jev je nejpravděpodobnější u nižších energií fotonů a jeho pravděpodobnost roste se zvyšujícím se protonovým číslem (Masterson, 2018).

1.3.5 Comptonův jev

Comptonův jev je rovněž důsledkem interakce nepřímo ionizujícího záření s hmotou. Foton gama záření interaguje s volným, nebo slabě vázaným elektronem ve vnějších vrstvách elektronového obalu, předá mu pouze část své energie a rozptýlí se jiným směrem pod zákonitým úhlem. Typicky nastává u fotonů s energií 200 keV až 2 MeV. Vyražený tzv. Comptonův elektron přebírá kinetickou energii fotonu a může dále přímo ionizovat stejně jako např. beta částice. Rozptýlený foton zpravidla dále interaguje fotoefektem, pokud má pro tuto interakci energii (Thornton, Rex, 2013).

1.3.6 Tvorba elektron pozitronových párů

Dalším projevem interakce nepřímo ionizujícího záření s hmotou je tvorba elektron pozitronových párů. Fotonové záření s energií vyšší než energie odpovídající hmotnosti dvou klidových elektronů – tedy $2 \times 0,511$ MeV v dostatečné blízkosti s coulombovým polem jádra atomu může být přeměněn na pozitron a elektron. Tento jev je opakem anihilace hmoty, kdy elektron a pozitron anihiluje za vzniku dvou fotonů o energii 511 keV (Thornton, Rex, 2013).

1.3.7 Interakce neutronů

K pružnému rozptylu dochází při interakci neutronu s lehkým jádrem, při níž je veškerá předaná energie konvertována na kinetickou energii. Neutrony jsou takto zpomaleny a pokračují se zbytkem energie (Lehto, 2017).

K nepružnému rozptylu dochází při interakci neutronu s těžkým jádrem, při níž neutron předá část své energie jádru a s nižší kinetickou energií pokračuje dále. Část předané energie zůstává v podobě kinetické energie, zbytkem je jádro excitováno. Při následné deexcitaci je energie uvolněná ve formě gama fotonu (Lehto, 2017).

Při neutronovém záchytu dochází k absorpci neutronu do jádra atomu, jeho excitaci a následné deexcitaci a emisi gama fotonu (Lehto, 2017).

1.4 Radionuklidy v životním prostředí

Radionuklidy v životním prostředí jsou jeho přirozenou součástí, nebo se do něj dostávají uměle v důsledku lidské činnosti. Druh a koncentrace přírodních radionuklidů je ovlivněna mnoha faktory (Luig et al., 2011).

1.4.1 Přírodní radionuklidy

Přírodní radionuklidy v životním prostředí mají původ v několika procesech. Působením kosmického záření vznikají radionuklidy, především uhlík ^{14}C a tritium ^3H , kontinuálně. Primární radionuklidy vznikly před zformováním sluneční soustavy a jsou součástí zemské kůry od samotného vzniku Země. V životním prostředí se ve významnějším množství vyskytují primární radionuklidy s velmi dlouhým poločasem rozpadu. Jde především o ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U a ^{235}U . ^{40}K prochází přeměnou beta minus na argon a elektronovým zachytem na ^{40}Ca . Tyto nuklidy jsou již považovány za stabilní. Přeměny ^{232}Th , ^{238}U a ^{235}U jsou původci dceřiných radionuklidů, které tvoří jejich rozpadové řady (Luig et al., 2011).

Rozpadové řady popisují kaskádu přeměn řady nestabilních nuklidů až po nuklidy stabilní, kterými jsou izotopy olova. Součástí rozpadových řad jsou významné dceřiné radionuklidy jako je ^{226}Ra a ^{222}Rn (Luig et al., 2011).

1.4.2 Umělé radionuklidy

Umělé radionuklidy vznikají činností člověka – při využívání jaderné energie k produkci elektrické energie, pro jejich využití ve zbraních hromadného ničení nebo v radioterapii. Tvorba těchto radionuklidů může být záměrná, nebo vedlejším produktem jiné činnosti se zdroji ionizujícího záření. Záměrně produkované umělé radionuklidy mají mnoho využití i způsobů přípravy. Radionuklidy vzniklé uměle, které nemají další využití, nazýváme radioaktivní odpad. Atomový zákon definuje radioaktivní odpad jako:

Věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahujícím nebo jí kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené tímto zákonem pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště.

Nakládání s radioaktivním odpadem je komplikovaný problém a způsoby jeho řešení jsou v rámci radiační ochrany, ochrany zdraví obyvatel i životního prostředí před ionizujícím zářením legislativně ošetřeny v zákoně č. 263/2016 Sb., atomový zákon.

1.4.3 Významné radionuklidy v životním prostředí

Radionuklidy v životním prostředí přispívají k celkové dávce ozáření obyvatelstva, jejich přítomnost je monitorována v mnoha složkách životního prostředí, např. v atmosféře, ve vzduchu v podobě aerosolů, ve vodních zdrojích, v lesním ekosystému (půda, zvěřina, houby), v zemědělských produktech atd. V České republice je téměř polovina celkového

ozáření obyvatel způsobena radonem, který se koncentruje v budovách. Vysoké koncentrace jsou způsobeny přítomností ^{222}Rn a jeho mateřského radionuklidu ^{226}Ra v podloží. Monitorování životního prostředí je zaměřené i na radionuklidy, které by se v něm mohly vyskytnout v případě radiační mimořádné události (Státní ústav radiační ochrany, v.v.i, © 2021).

Draslík – ^{40}K tvoří 0,012 % přírodního draslíku, podléhá přeměnám beta minus, beta plus a elektronovému záchytu. Poločas přeměny je přibližně $1,25 \times 10^9$ let. Aktivita ^{40}K tvoří za běžné radiační situace rozhodující podíl na celkové objemové aktivitě beta ve vodě (Atwood, 2010).

Cesium – ^{137}Cs vzniká při štěpení ^{235}U a dalších nuklidů v jaderných reaktorech a zbraních. Podléhá gama a beta přeměně a má poločas přeměny 30,08 let. Bylo významně obsaženo ve spadu a deponováno do životního prostředí po černobylské havárii. Cesium se velmi dobře váže v půdě, podloží nebo na dně řek ve formě solí (jako stroncium, viz níže). Pro jeho dlouhý poločas rozpadu je významným radionuklidem, který ovlivňuje životní prostředí v případě jaderných výbuchů. Při vnitřní kontaminaci organismu je cesium jako analog draslíku – biotransportováno do svalstva. V praxi je cesium využíváno jako etalon pro kalibraci detektorů gama záření (Atwood, 2010).

Jód – ^{131}I je dalším významným produktem jaderného štěpení. Podléhá beta minus a gama přeměně, jeho poločas rozpadu je 8,02 dnů. Je zvláště nebezpečný pro štítnou žlázu, ve které je jód selektivě ukládán. Je významný při haváriích jaderných elektráren, tvoří až 90 % celkové aktivity. ^{125}I je využíván pro radioterapii štítné žlázy (Atwood, 2010).

Stroncium – ^{90}Sr je produkt jaderného štěpení, jeho poločas přeměny je 28,8 let a podléhá beta minus přeměně. Je obsažen především ve využitém jaderném palivu. Radionuklid byl významně obsažen ve spadu a deponován do životního prostředí po černobylské havárii. Při vnitřní kontaminaci organismu je selektivně ukládán do kostní matrix. Prakticky je využíván jako etalon ke kalibraci detektorů při stanovení objemové aktivity beta (Sedlářová et al., 2016).

Yttrium – ^{90}Y vzniká ze ^{90}Sr , má poločas přeměny 64,1 hodin a podléhá beta minus přeměně. Je využíváno v radioterapii a ke kalibraci jako etalon při stanovení celkové objemové aktivity beta v rovnováze se ^{90}Sr (Sedlářová et al., 2016).

Vodík – ^3H neboli tritium, podléhá beta minus přeměně. Poločas přeměny je 12,32 let. Vzniká působením kosmického záření, nebo v jaderném reaktoru neutronovým záchytem v deuteriu, nebo rozpadem ^6Li na ^4He a ^3H po neutronovém záchytu. Jaderná elektrárna Temelín a Dukovany vypouští ^3H v podobě kapalných a plyných výpustí, jejichž aktivita je regulována rozhodnutím Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB), právními předpisy a kontrolována průběžným monitorováním výpustí jak ze strany SÚJB, tak ze strany provozovatele jaderných elektráren.

Uran – ^{235}U a ^{238}U jsou primordiální – vznikly před zformováním země a sluneční soustavy, radioizotopy s velmi dlouhým poločasem přeměny, podléhají alfa přeměně a jejich přítomnost v zemském podloží je prekurzorem pro výskyt dalších radionuklidů. Tvoří tzv. uranové rozpadové řady, ve kterých radioaktivními přeměnami vznikají sekundární radionuklidy. Výslednými nuklidy uranové rozpadové řady jsou izotopy olova, které jsou považovány za stabilní (Thoennesen, 2016).

Radium – ^{226}Ra je dceřiným radionuklidem uran-radiové rozpadové řady. Poločas přeměny je asi 1600 let. Alfa přeměnou přechází v ^{222}Rn , vzácně beta minus přeměnou na ^{226}Th (Thoennesen, 2016).

Radon – ^{222}Rn je plyný radionuklid s poločasem přeměny 3,825 dnů. Podléhá přeměně alfa. Významně se podílí na celkovém ozáření obyvatelstva z přírodních zdrojů (Thoennesen, 2016).

1.4.4 Kontaminace vody

Pronikání přírodních radionuklidů do vodního ekosystému, především z podloží, je přirozeným dějem, a proto je úroveň aktivity v různých vodách rozdílná. Průměrné objemové aktivity radonu ve vodách v ČR jsou kolem 15 Bq/l, nejvyšší zjištěné hodnoty ze studní přesahují 1000 Bq/l. Při dosažení objemové aktivity radonu 300 Bq/l musí dodavatelé pitné vody pro veřejnou potřebu tuto hladinu snížit – například provzdušňováním, nebo nahradit zdroj vody (Státní ústav radiační ochrany, v.v.i, © 2021).

Umělé radionuklidy se mohou do vodního ekosystému dostat několika způsoby. V těch nejzávažnějších případech může kontaminace způsobit významné poškození organismů, zdraví člověka i smrt (Martin et al., 2019)

Kontaminace po fukušimské havárii

11. března 2011 došlo k havárii v japonské jaderné elektrárně Fukušima I. Důsledkem zemětřesení, vlny tsunami a dalších komplexních faktorů, došlo k přehřátí a roztavení reaktorů 1, 2 a 3, následným explozím vodíku v prostoru reaktorů a uvolnění vysoce radioaktivního materiálu do okolí. K uvolnění radioaktivního materiálu došlo také záměrně v rámci preventivních opatření. Kvůli narůstajícímu tlaku byl upuštěn plyn z prostoru reaktoru. Chladicí voda byla vypouštěna přímo do Tichého oceánu, z důvodu uvolnění prostoru pro zadržení více kontaminované vody (Hasegawa et al., 2016).

V období mezi 21. březnem a červencem byl Tichý oceán kontaminován asi 27 PBq ^{137}Cs . K uvolnění 82 % ^{137}Cs došlo již před 8. dubnem. V okolí Fukušimy jsou v Tichém oceánu jedny z nejsilnějších mořských proudů, které tento materiál transportovaly do velkých vzdáleností, čímž došlo k jeho rozptýlení. Z výsledků měření kontaminace mořské vody i pobřežních sedimentů vyplývají závěry, že dopad kontaminace na mořský ekosystém bude minimální, jelikož hodnoty koncentrací radionuklidů jsou pod hodnotami, které jsou považované za škodlivé pro mořské živočichy (Buessler et. al., 2012).

Pobřeží a pobřežní vody jsou ovšem ohroženy pokračujícím uvolňováním radioaktivního materiálu z elektrárny. Mořské organismy stojící na vrcholu potravního řetězce jako jsou ryby, jsou radioaktivním materiálem zasaženy nejvíce a dochází u nich k bioakumulaci radionuklidů. Z tohoto důvodu je nutné průběžně sledovat kontaminaci ulovených ryb u pobřeží Fukušimy. Cesium byly kontaminovány i řeky a zdroje vod pro pěstování zejména rýže a ostatních plodin. Po dekontaminaci cesia z polí, půdy, obytných budov, lesů a parků, byly rozsáhle dekontaminovány i dna řek, nádrží a zavlažovacích zdrojů, kde bylo cesium na dně vázáno v podobě solí na jílu, píseku a kameny. Tato dekontaminace probíhala například náročným vybagrováním dna, navezením nového materiálu a uskladněním kontaminovaného (Buessler et. al., 2012).

Japonské limity pro ^{131}I a ^{137}Cs v pitné vodě a obecně v potravinách jsou stanoveny na 100 Bq/kg. V období mezi 16. až 21. březnem došlo k překročení těchto limitů v pitné vodě v Tokiu, Fukušimě a Ibaraki. 24. března byl ^{131}I detekován ve 12 ze 47 prefektur, z nichž v Tochigi byla zjištěna nejvyšší kontaminace a to 110 Bq/kg. Dne 25. března aktivita v pitné vodě poklesla na 79 Bq/kg a byla pod limitem pro kojence v Tokiu a Čibě, stále však překračovala limity v Hitachi a Tokaimury. Rozbory pitné vody v japonských městech v roce 2015 odhalily vyšší kontaminaci v Tokiu (Hasegawa et al., 2016).

Do října 2019 bylo v prostoru elektrárny uskladněno přes milion metrů krychlových kontaminované vody. Uskladněná voda je filtračním systémem zbavována radionuklidů a po dosažení dostatečně nízké objemové aktivity vypouštěna do oceánu nebo odpařena do atmosféry. Tímto způsobem ovšem nelze odstranit tritium, které je součástí molekul vody a není odlišitelné od běžného vodíku. Do prosince 2019 bylo u téměř třetiny uskladněné vody dosaženo požadovaného poklesu aktivity. Průměrná objemová aktivita tritia v uskladněné vodě je 0,73 MBq (Ministry of Economy, Trade and Industry, 2020).

V dubnu 2021 oznámil předseda japonské vlády plán na vypouštění uskladňované vody do oceánu. Vypouštění bude probíhat déle než deset let a vypouštěná voda bude zbavená všech radionuklidů kromě tritia. Tritium ve vypouštěné vodě nepřesáhne objemovou aktivitu 1 500 Bq/l. Ročně dojde k vypuštění stejného množství tritia, které jaderná elektrárna vypouštěla za běžného provozu a to 22 TBq. Příprava technologie na vypouštění nádrží, ředění vody a kontrolu aktivity potrvá do roku 2022, kdy bude vypouštění zahájeno (Wagner, 2021).

Kontaminace okolí kombinátu Maják

Kombinát Maják leží na východě Ruské federace, v jižní části pohoří Ural. Byl vybudován pro sovětský jaderný program a jeho součástí byl první reaktor na výrobu plutonia do jaderných zbraní v Sovětském svazu. Okolní jezera a řeky byly závodem využívány bez ohledu na jejich znečišťování radionuklidy. K umocnění znečištění okolí přispělo i několik havárií (Clay, 2001).

Je odhadováno, že do řeky Teča bylo mezi lety 1949 a 1956 vypuštěno 76 milionů metrů krychlových radioaktivního odpadu. Na březích řeky leželo 23 vesnic, které ji využívaly jako zdroj pitné vody a kvůli jejímu znečištění musely být evakuovány. Jezero Kyzyltaš sloužilo jako zdroj chladicí vody pro reaktory na výrobu plutonia. Otevřený primární chladicí okruh vypouštěl použitou a vysoce kontaminovanou vodu zpět do jezera. Do jezera Karačaj byl ukládán radioaktivní odpad se záměrem jej přesunout do podzemního betonového uložště. Tento plán se z důvodu příliš vysoké radioaktivity neuskutečnil a jezero jako uložště sloužilo až do událostí známých jako Kyštymská katastrofa (Suslova et al., 2015)

Ve vodách v České republice můžeme z přírodních radionuklidů očekávat přítomnost ^{40}K , ^{226}Ra a jeho dceřiných produktů ^{222}Rn a ^{220}Rn . Přítomnost těchto radionuklidů je ovlivněna především složením podloží, ze kterého radionuklidy prostupují do vody.

Z důvodu lidské činnosti lze ve vodách očekávat přítomnost ^3H , které je vypouštěno z jaderných elektráren a ^{137}Cs a ^{90}Sr , které byly deponovány do životního prostředí v České republice po černobylské havárii. V případě povrchových vod jsou radionuklidy ^3H , ^{137}Cs a ^{90}Sr v rámci monitorovací radiační sítě sledovány (Státní úřad pro jadernou bezpečnost, © 2021).

1.5 Kontaminace organismu radionuklidy

1.5.1 Vnější kontaminace

Vnější kontaminace je stav, při kterém dochází k usazení radionuklidu na povrchu těla. V tomto případě je radiační poškození způsobováno především beta zářením, které proniká 2–5 mm pod povrch kůže. Takto působící záření způsobuje především radiační dermatitidu, epilaci a poškození oční čočky (Kuna, Navrátil, 2005).

V závažných případech vnější kontaminace může dojít k rozvinutí akutního radiačního syndromu. Akutní radiační syndrom vzniká po jednorázovém celotělovém ozáření dávkou vyšší než 0,7 Gy. Projevy akutního radiačního syndromu jsou závislé na obdržené dávce. Rozeznáváme tři formy: hematologická, gastrointestinální a neurovaskulární (Clements, Casani, 2016).

1.5.2 Vnitřní kontaminace

V případě vnitřní kontaminace dochází k průniku radionuklidu do těla inhalací, ingescí nebo penetrací. Mechanismus vstupu i vlastnosti radionuklidu ovlivňují metabolismus radionuklidu v těle a místo jeho působení. Radiační poškození při vnitřní kontaminaci způsobují především radionuklidy, které jsou pomalu vylučovány z těla a mají dlouhý poločas přeměny. Radiační poškození spojené s vnitřní kontaminací umocňuje alfa záření, které již není odstíněno vzduchem nebo vrchními vrstvami kůže, působí na bezprostřední vzdálenost a veškerá jeho energie je využita k interakcím s organismem (Österreicher, Vávrová, 2003).

Biokinetiku radionuklidů ovlivňuje především jejich biotransportabilita. Biotransportabilní radionuklidy jsou tělem snadno vstřebatelné do krevního oběhu a v některých případech mohou vstupovat do biologických procesů. Podle způsobu distribuce dělíme radionuklidy na čtyři skupiny. Rovnoměrně rozdělené v organismu jsou jednoduché kationty jako draslík a sodík. Dvojmocné radionuklidy jako stroncium deponují do kostní matrix, trojmocné a vícemocné radionuklidy jsou rozděleny mezi kosti

a orgány s podílem elementů retikuloendoteliální soustavy. Poslední skupinou jsou prvky, které jsou selektivně ukládány ve specifických orgánech. Jde především o radioizotopy prvků využívaných v biologických procesech nebo jejich chemické analogy. Příkladem je radioizotop jódu – který má orgánovou afinitu ke štítné žláze. Chemické analogy jsou například radium, se kterým organismus “nakládá” jako s vápníkem nebo cesium, se kterým je nakládáno jako s draslíkem a je deponováno do svalů (Österreicher, Vávrová, 2003).

Důležitým ukazatelem pro vnitřní kontaminaci je biologický a efektivní poločas. Biologický poločas udává dobu, za kterou je z těla vyloučena polovina přijatého radionuklidu. Efektivní poločas značí dobu, za jakou klesne aktivita radionuklidu v těle na polovinu kombinovaným působením fyzikálního a biologického poločasu (Österreicher, Vávrová, 2003).

K vnitřní kontaminaci penetrací přes kůži a sliznice dochází především při poranění a kontaminaci ran, kterými pronikají radionuklidy do krevního oběhu. Sliznice náchylné ke vstřebání radionuklidů jsou zejména v dutině nosní (Österreicher, Vávrová, 2003).

Vnitřní kontaminace ingescí je způsobena požitím radionuklidů, nebo přesunem vdechnutých radionuklidů ciliárním epitelem do hltanu. Radionuklidy v těle postupují zažívacím traktem stejně jako potrava. Vstřebání radionuklidů ze zažívacího traktu ovlivňuje doba průchodu zažívacím traktem. Radiačním poškozením je ohroženo především tlusté střevo, kde dochází ke stagnaci radionuklidů až po dobu několika dnů. Druh radionuklidu ovlivňuje míru vstřebání, jód a cesium jsou velmi dobře vstřebávané do krevního oběhu a distribuovány dále po těle (Österreicher, Vávrová, 2003).

Vnitřní kontaminaci inhalací způsobují radionuklidy ve formě aerosolu nebo plynné radionuklidy. Respirační ústrojí má schopnost filtrace vdechovaného vzduchu a samočištění. Míra pronikání radionuklidů je ovlivněna především velikostí částic v aerosolu. Částice větší než 15 μm jsou zachyceny již v nosní dutině a nosohltanu, částice o rozměru 5 až 15 μm jsou vychytávány v bronchiálním stromu. Menší částice proniknou až do plicích sklípků. Vstřebatelné radionuklidy pronikají do krevního oběhu nebo jsou vtaženy do lymfatického systému, uloženy v lymfatických uzlinách a pomalu absorbovány do tělních tekutin (Österreicher, Vávrová, 2003).

1.6 Biologické účinky ionizujícího záření

Účinky ionizujícího záření na živé organismy se zabývá radiobiologie. Výsledné radiobiologické účinky ionizujícího záření ovlivňují biologické, fyzikální a chemické faktory. Stáří organismu, pohlaví i celkový fyzický stav ovlivňuje tzv. radiosenzitivitu, což je citlivost tkání vůči záření (Kuna, Navrátil, 2005).

Účinky ionizujícího záření na organismus jsou závislé na fyzikálních faktorech záření, a to na druhu záření, jeho energii, dávkovém příkonu uvažovaného druhu záření, rozdělení dávky v čase a distribuci dávky v organismu. Nabité částice interagují primárně s elektronovým obalem atomů utvářejících živou hmotu, neutrální částice s jádrem atomů (Kuna, Navrátil, 2005).

Chemické faktory ovlivňují účinek ionizujícího záření na molekulární úrovni. Koncentrace kyslíku zvyšuje množství vznikajících radikálů a tím intenzitu či pravděpodobnost poškození buněk. Naopak přítomnost radioprotektivních látek, které jsou schopné volné radikály zachytávat, může vést k částečné ochraně organismu před poškozením (Reisz et al., 2014).

Biologické účinky ionizujícího záření jsou způsobeny různými mechanismy. Mechanismus poškození organismu na chemické úrovni je způsoben ionizací molekul v buňce. Voda je nejběžnější molekulou v buňce, a proto je její ionizace nejvýznamnější. Dochází k tzv. radiolýze vody. Ionizovaná molekula vody je nestabilní a rozpadá se na vodíkový ion a hydroxylový radikál. Tyto radikály reagují s okolím a poškozují biomolekuly, také dochází k jejich vzájemným reakcím a tvorbě peroxidu vodíku, silného oxidačního činidla (Österreicher, Vávrová, 2003).

Působení radikálů na molekulu DNA (deoxyribonukleová kyselina) nebo přímé působení ionizujícího záření způsobuje její poškození. Nejvýznamnějším druhem poškození je přerušení vlákna molekuly DNA. Méně závažné je přerušení pouze jednoho vlákna dvoušroubovice, tento stav je nazýván jednoduchým zlomem a buňka je vybavena reparačními mechanismy k nápravě tohoto zlomu. Pokud dojde k přerušení obou vláken dvoušroubovice jedná se o dvojný zlom, který je náročnější na reparaci (Borrego-Soto et al., 2015)

Radiosenzitivita buněk je pro jednotlivé druhy odlišná. V obecné rovině radiosenzitivitu popsali Bergonie a Tribondeau radiologickým zákonem, který říká: *Radiosenzitivita tkáně je přímo úměrná reprodukční aktivitě a nepřímo úměrná stupni diferenciaci.*

Radiosenzitivita se také mění s fází buněčného cyklu. Nejvíce radiorezistentní jsou buňky v S fázi a G1 fázi, naopak nejvíce radiosenzitivní jsou v M fázi buněčného cyklu (Österreicher, Vávrová, 2003).

1.6.1 Deterministické účinky

Deterministické účinky ionizujícího záření jsou biologické účinky, které se projevují až po překročení prahové dávky. Vznik a intenzita deterministických účinků jsou ovlivněny absorbovanou dávkou, citlivostí tkáně a parametry záření. K projevu deterministických účinků po překročení prahové dávky dochází z důvodu poškození kritického množství buněčné populace, včetně poškození reparačních mechanismů. Typickými příklady jsou radiační dermatitida, která vzniká při jednorázovém lokálním překročení dávky 3 Gy, katarakta s prahovou dávkou 5 Gy a akutní nemoc z ozáření s prahovou dávkou pro celotělové ozáření 0,7 Gy (Österreicher, Vávrová, 2003).

1.6.2 Stochastické

Stochastické účinky ionizujícího záření nevyžadují pro manifestaci překročení prahové dávky. Jejich výskyt je pravděpodobnostního charakteru, který roste přímo úměrně s dávkou záření. Stochastické účinky popisuje bezprahový lineární model (Sacks et al., 2016).

Bezprahový lineární model předpokládá, že neexistuje prahový limit pro vznik stochastických účinků, a že s jakkoliv malým ozářením je spojená nenulová pravděpodobnost vzniku stochastických účinků. Pravděpodobnost vzniku stochastických účinků je podle tohoto modelu lineární a součet malých dávek za určitý čas má stejný efekt na zvýšení pravděpodobnosti jako jednorázová dávka stejné intenzity (Sacks et al., 2016).

Charakteristické pro stochastické účinky je jejich projevení s dlouhým časovým odstupem od ozáření. Typickým příkladem stochastických účinků jsou nádorová bujení a genetická poškození projevená v další generaci. Nádory vzniklé z důvodu radiačního poškození nelze fyziologicky odlišit od ostatních (Österreicher, Vávrová, 2003).

1.7 Detektory ionizujícího záření

Pro detekování a měření fyzikálních vlastností ionizujícího záření bylo vyvinuto mnoho způsobů, které pracují na od základu odlišných principech. Pro tuto diplomovou práci jsou stěžejní elektronické detektory, proto je v této kapitole pozornost věnována především jim. A to tzv. kontinuálním detektorům, které podávají průběžnou informaci o okamžité hodnotě charakterizující detekované záření v místě detektoru. Po ukončení ozařování detektoru klesne výstupní signál na nulu.

1.7.1 Obecný princip elektronického detektoru

Modelový detektor ilustruje obecný princip jeho fungování. Pro detekci částice ionizujícího záření musí částice s detektorem interagovat jedním z možných mechanismů. Tato interakce a předání energie je velmi krátká a může být ve většině případů považována za okamžitou. Tato interakce způsobí vznik určitého elektrického náboje v aktivním objemu detektoru. Tento náboj je poté převeden na elektrický signál, nejčastěji pomocí elektrického pole v detektoru, které způsobí pohyb nábojů v opačných směrech. Čas zpracování náboje je rozdílný u jednotlivých druhů detektorů a je závislý na mobilitě náboje v aktivním objemu detektoru a na průměrné vzdálenosti k elektrodám. Detektor tedy reaguje na jednu částici elektrickým proudem po dobu, kterou zabere zpracování náboje (Murray, Holbert, 2020).

Detektory pracují v některém ze tří základních režimů. Těmi jsou pulsní režim, který je používán nejčastěji, proudový režim, který má také širší využití a MVS (mean square voltage) režim, který je používán ve specifických měřeních (Murray, Holbert, 2020).

Proudový režim poskytuje nepřetržitý el. proud z ozařovaného detektoru. Velikost proudu je úměrná střední intenzitě dopadajícího záření. Spojitost elektrického proudu je způsobena delší dobou zpracování elektrického náboje (Knoll, 2010).

MVS režim je užitečný pro měření v prostředí s více druhy ionizujícího záření. Výstupní signál je úměrný druhé mocnině náboje pro jednu interakci. MVS režim tedy zvýrazňuje interakce s velkým nábojem. Tento režim se využívá například pro měření neutronového záření (Knoll, 2010).

Pulsní režim detekuje jednotlivé elektrické výboje způsobené interakcí částice ionizujícího záření s detektorem a zaznamenává intenzitu náboje. Ta je přímo úměrná energii uvolněné při interakci v detektoru. Všechny detektory, které zaznamenávají

energii jednotlivých pulsů pracují v pulsním režimu a tvoří skupinu spektrometrů. V případech, kdy na velikosti deponované energie nezáleží, je využíván jednodušší pulsní režim, který zaznamenává všechny impulsy, které překonají určitou energetickou mez. Využití pulsního režimu je omezeno nutností určité prodlevy mezi jednotlivými impulzy pro jejich správné zaznamenání (Knoll, 2010).

Záznam impulsů a jejich grafické znázornění (spektrum) je závislé na vlastnostech detektoru a elektrického obvodu, do kterého je detektor zapojen. Obecně lze říct, že náběžná strana pulsu – tedy rychlost dosažení maximální intenzity náboje, je závislá na vlastnostech detektoru. Výška maxima je dána poměrem předaného elektrického náboje ku elektrické kapacitě celého elektrického obvodu. Rychlost návratu z maxima na původní hladinu je udána časovou konstantou obvodu, do kterého je detektor zapojen (Knoll, 2010).

1.7.2 Nejdůležitější fyzikální charakteristiky detektorů

Detekční účinnost detektoru je závislá na druhu detekovaného záření. Přímo ionizující částice alfa a beta vytváří interakci s aktivním objemem detektoru dostatečné množství iontů a jejich detekce je proto snazší než detekce ostatních druhů ionizujícího záření. Detekční účinnost je dělená na absolutní detekční účinnost a vnitřní detekční účinnost (Knoll, 2010).

Absolutní detekční účinnost je poměr mezi detektorem zaznamenanými impulzy a počtem emitovaných částic záření za určitý čas. Absolutní detekční účinnost je ovlivňována geometrickým uspořádáním detektoru, absorpcí záření v prostoru mezi detektorem a zdrojem záření a vnitřní detekční účinností (Knoll, 2010).

Vnitřní detekční účinnost je poměr mezi detektorem zaznamenanými impulzy a počtem částic záření procházející aktivním objemem detektoru za určitý čas. Vnitřní detekční účinnost je ovlivněna průletem částic bez interakce s aktivním objemem detektoru, rekombinací iontových párů před vznikem výboje a výstupního signálu a dalšími charakteristikami detektoru jako mrtvá doba, energetické rozlišení a prostorové rozlišení (Knoll, 2010).

Mrtvá doba detektoru je čas, kdy detektor není schopen zaznamenat nové interakce v aktivním objemu. Mrtvá doba je pro odlišné detektory rozdílná a limitujícím faktorem může být jak detektor samotný, tak elektronická část dozimetru. Nezapočítání interakcí

v mrtvé době není jediným problémem tohoto jevu. Detektor na interakci v mrtvé době může reagovat i dalším prodloužením mrtvé doby (Knoll, 2010).

Energetické rozlišení je vlastností spektrometrů, které nejsou schopny rozlišovat velmi blízké energie částic záření. Energetické rozlišení – rozlišovací schopnost je ovlivněno především statistickou fluktuací, nelinearitou a nehomogenitou (Knoll, 2010).

Prostorové rozlišení je vlastností detektoru určující minimální vzdálenost částic záření, které je schopný rozlišit jako dvě diskrétní částice (Murray, Holbert, 2020).

Geometrické uspořádání detektoru

Pro měření ionizujícího záření s malým doletem nebo nízkou energií je využíváno uspořádání, při kterém je vzorek vkládán přímo do prostoru detektoru (např. studňové uspořádání). Detektory jsou rozděleny podle prostorové geometrie, ve které jsou schopné detekovat ionizujícího záření na detektory s 4π geometrií – zaznamenávají ionizující částice vyzařované ze vzorku ve všech směrech a detektory s 2π geometrií – zaznamenávají ionizující záření ze vzorku pouze v jedné polovině prostoru (Knoll, 2010).

1.7.3 Pozadí detektoru

U každého reálného měřicího zařízení se přes měřený signál překládá a superponuje "nulový" signál - tzv. pozadí (background). Při měření ionizujícího záření prostupuje do detektoru kromě záření ze zkoumaného zdroje také nežádoucí záření z okolí. Toto záření označované jako pozadí je proměnné a je využíváno několik postupů, jak jeho vliv na měření minimalizovat. Minimalizace vlivu pozadí na měření je důležitá především při měření nízkých aktivit. V principu lze způsoby rozdělit na pasivní a aktivní. Nejběžněji využívaným pasivním způsobem je absorpční stínění detektoru vhodným materiálem o vhodné tloušťce. Materiál a jeho množství je volen s ohledem na druh detektoru a druh měření. Nejběžněji využívané materiály jsou olovo, ocel, wolfram a beton (Knoll, 2010).

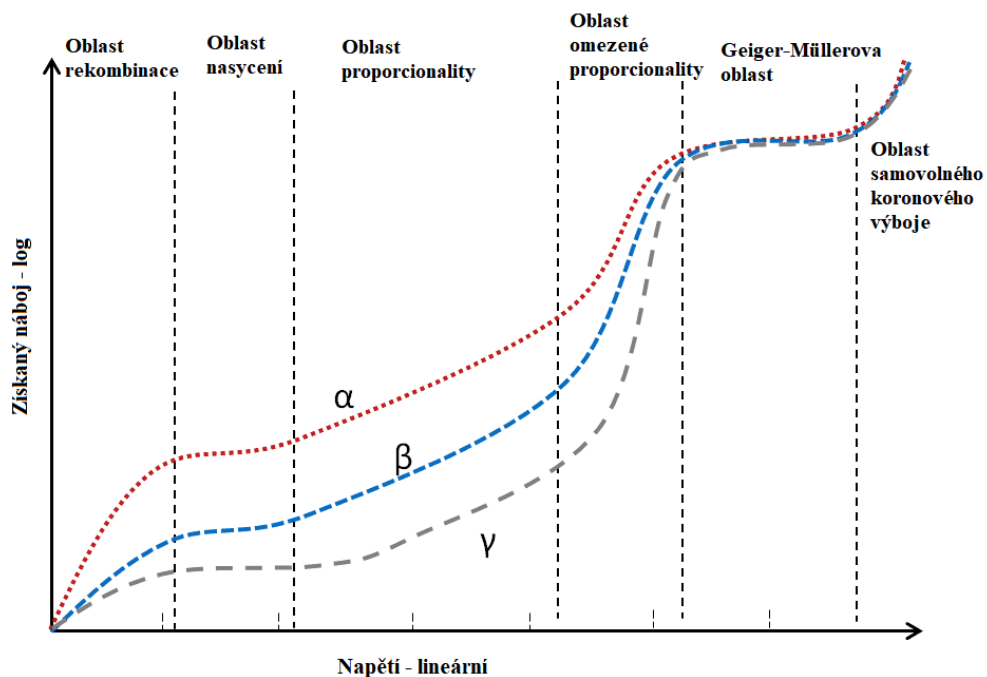
Metody aktivní diskriminace pozadí aktivně sledují a jeho vliv zpracovávají do měření. Metoda antikoincidenčního stínění využívaná především při měření vysokoenergetického ionizujícího záření a při měření velmi nízkých aktivit spočívá v obklopení primárního detektoru detektorem sekundárním a zpracování pulsu v primárním detektoru pouze v případě, že nebyl ve stejný okamžik zaznamenán puls i v sekundárním detektoru (Knoll, 2010).

Koincidenční stínění využívá faktu, že je v mnoha případech jeden druh záření doprovázený dalším. V případě beta přeměny dochází k následnému vyzáření gama fotonu dceřiným nuklidem. Koincidenční stínění využívá dva detektory a k zaznamenání beta impulsu dochází pouze v případě simultánního zaznamenání gama impulsu v sekundárním detektoru (Knoll, 2010).

1.7.4 Plynové detektory

Plynové detektory jsou jedním z nejstarších a nejrozšířenějších druhů detektorů ionizujícího záření. Excitace a ionizace jsou primárně využívané interakce k zaznamenání přítomnosti částice ionizujícího záření v detektoru. Plynové detektory jsou tvořeny katodou a anodou, které jsou odděleny plynem. Napětí na elektrodách, druh a tlak plynu jsou odlišné pro různé druhy plynových detektorů. Průlet částice v aktivním objemu detektoru tvoří interakcemi s plynem iontové páry – kationt plynu a volný elektron. Jelikož částice při průletu detektorem neinteraguje pouze ionizací, je skutečná energie potřebná k vytvoření jednoho iontového páru vyšší než teoretická energie pro ionizaci jednoho atomu plynu. Počet vytvořených iontových párů je závislý na druhu plynu, druhu záření a jeho energii (Gerndt, Průša, 2011).

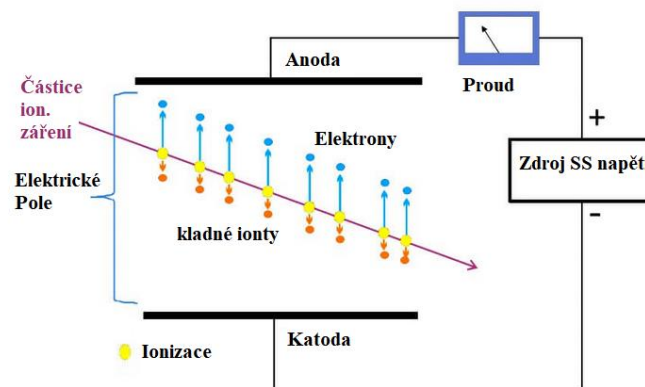
Plynové detektory a vznikající procesy v závislosti na vnějším napětí mezi elektrodami popisuje volt-ampérová charakteristika na obrázku 1.



Obrázek 1: Volt-ampérová charakteristika. Převzato a upraveno z: Connor (2019).

Se zvyšujícím se pracovním napětím na elektrodách roste rychlost pohybu elektronů k anodě, což ovlivňuje způsob interakce s okolím po jejich dráze letu. V poli s nízkým napětím jsou iontové páry schopné rekombinovat zpět na neutrální atomy, což snižuje intenzitu zaznamenaného ionizačního proudu. Napětí v této rekombinační oblasti se proto v detektorech nevyužívá. S rostoucím napětím následuje oblast nasyceného proudu, kde je rekombinace potlačena rychlostí elektronů na zanedbatelnou hodnotu. Tato oblast je využívána v **ionizačních komorách**.

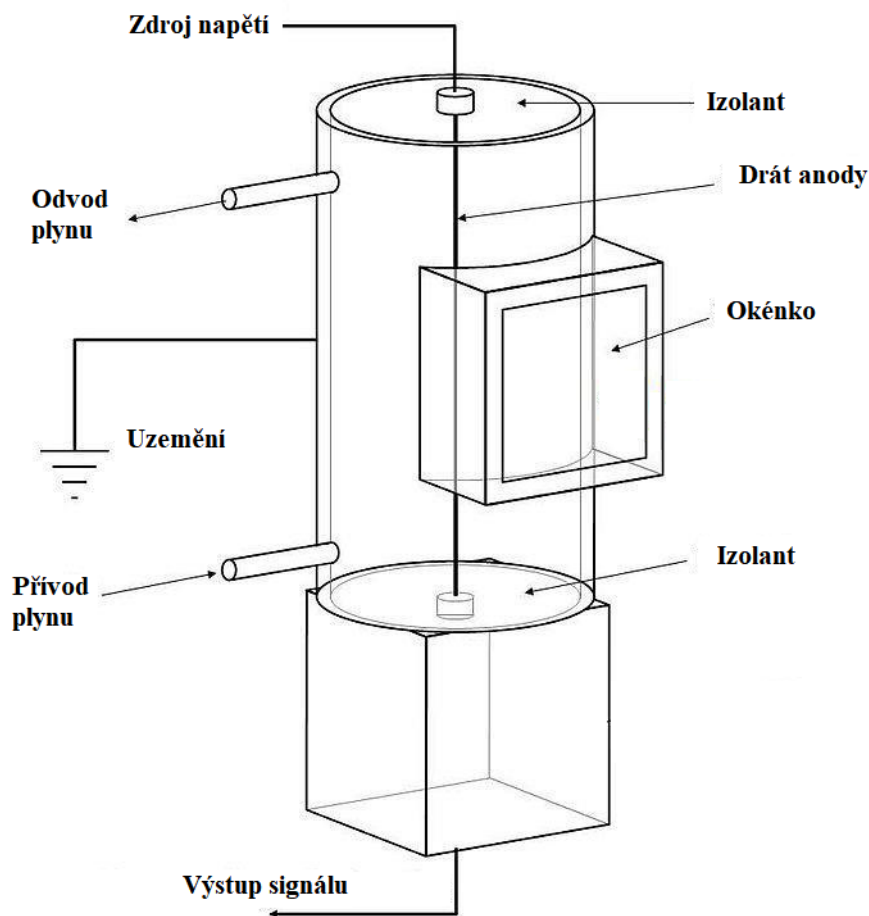
Ionizační komory jsou nejjednodušším druhem plynového detektoru. Schéma funkce je znázorněno na obrázku 2. Jako zdroj napěťového pulzu jsou pro jejich vyšší pohyblivost využívány elektrony přicházející na anodu. Z důvodu nízkého napětí vyvolaného průchodem jedné částice jsou ionizační komory využívány především v proudovém režimu. Ionizační komory nemusí mít prostor mezi elektrodami uzavřen. V tomto případě jako zdroj pro iontové páry slouží vzduch, který může mezi elektrodami volně proudit. Příkladem tohoto uspořádání jsou ionizační hlásiče požáru (Knoll, 2010).



Obrázek 2: Schéma ionizační komory. Převzato a upraveno z: Instrumentation tools (©2021).

S nárůstem napětí nad tuto oblast je elektronům dodána dostatečná energie k další ionizaci. To zvýší zaznamenaný náboj a amplitudu impulsu. V omezeném intervalu pracovního napětí je tento nárůst lineární a zaznamenaný ionizační proud je proporcionální počtu iontových párů vytvořených původní částicí ionizujícího záření. Tato oblast proporcionality je využívána **proporcionálními detektory**

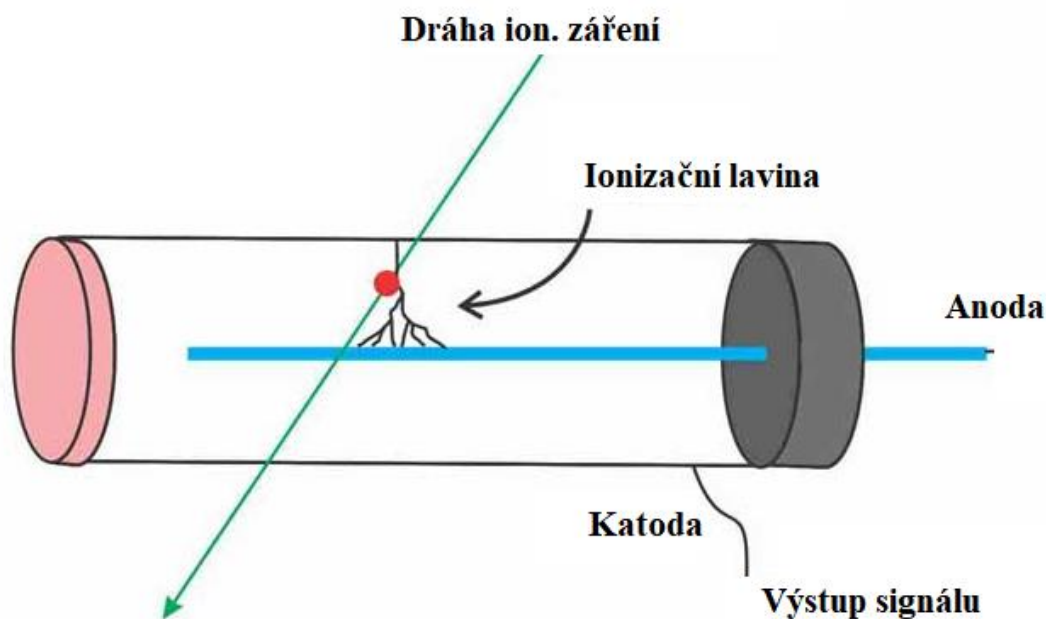
Proporcionální detektory jsou v naprosté většině případů využívány v pulzním režimu a využívají proporcionální oblast napětí, ve které je detekovaný náboj úměrný energii ionizující částice. Nejběžnější tvar detektoru, na obrázku 3, je válcový s anodou v ose v podobě vodiče a katodou v podobě pláště. Elektrické pole a tvar detektoru jsou navrženy tak, aby k vytvoření lavinového efektu docházelo v bezprostřední blízkosti anody a jedna diskretní lavina odpovídala právě jednomu iontovému páru vzniklému interakcí ionizujícího záření s plynem. Plyny, kterými jsou proporcionální detektory plněny je volen s ohledem na pohyb volných elektronů k anodě a jeho chemickou stálost. Nejběžněji používané jsou vzácné plyny, směsi vzácných plynů a metanu, nebo čistý metan. Způsoby plnění detektoru plynem je volen s ohledem na jeho využití. Nejjednodušším způsobem je naplnění detektoru plynem bez možnosti jeho obměny. Plyn v těchto detektorech postupně degraduje a detektor ztrácí svoje vlastnosti. Této degradaci ostatní konstrukce předchází obměnu plynu v detektoru (Knoll, 2010).



Obrázek 3: Schéma proporcionálního detektoru. Převzato a upraveno z: Chen et al. (2017).

Další nárůst napětí zvýší koncentraci kationtů natolik, že jejich elektrické pole začne ovlivňovat elektrodami indukované elektrické pole, což způsobí nelinearitu náboje vůči iontovým párům. Pokud je napětí dostatečně vysoké, dochází k lavinové ionizaci, dokud nedojde k vytvoření dostatečného množství kationtů, které sníží intenzitu elektrického pole dostatečně pro zastavení lavinové ionizace. Detektor tedy vydá puls o stejné intenzitě, bez ohledu na původní iontové páry, neboť je vždy ukončen až po dosažení limitního množství kationtů. Tuto oblast využívá **Geiger-Müllerův počítač** (Aliaga Kelly, Boyes, 2010).

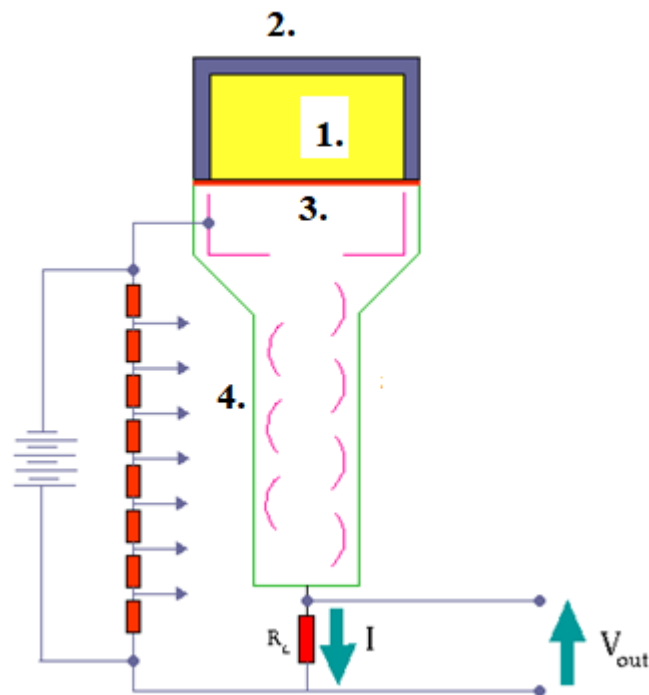
Geiger-Müllerova trubice je jedním z nejstarších druhů detektoru ionizujícího záření. Z důvodu její jednoduché konstrukce, nízké ceny a jednoduchosti užívání je stále využívána. Nejjednodušší konstrukce, na obrázku 4, je složená z kovové trubice, která tvoří plášť a zároveň slouží jako katoda. Dovnitř trubice je přivedena kovová tyčinka anody, v průniku trubici jsou odděleny izolačním materiálem. Prostor trubice je vyplněn plynem pod nízkým tlakem, plyn je doplněn vhodným halogenem, který plní funkci zhášecího plynu a zkracuje mrtvou dobu (Knoll, 2010).



Obrázek 4: Schéma Geiger Müllerovi trubice. Převzato a upraveno z: Imagesco (©2021).

1.7.5 Scintilační detektory

Scintilační detektory využívají vlastností scintilačních materiálů, které na interakci s ionizujícím zářením reagují emisí světla. Ideální scintilační materiál převádí kinetickou energii ionizujícího záření na detekovatelné světlo s vysokou efektivitou a linearitou. Je opticky propustný pro vlnové délky emitovaného světla. Impulsy světla jsou diskrétní s co nejkratším časem zhášení a má index lomu podobný sklu. Žádný materiál nemá všechny tyto vlastnosti zároveň, a proto je nutné volit vhodný scintilační materiál podle jeho využití. Důležitou vlastností je také skupenství scintilátoru. Pevný scintilátor NaI(Tl) je využíván pro detekci gama a rtg záření; ZnS(Ag) pro detekci alfa, beta a neutronového záření, plastické na alfa, beta a protonové záření; kapalné na beta, gama, a neutronové záření. Uspořádání částí scintilačního detektoru je znázorněno na obrázku 5 (Gerndt, Průša, 2011).



Obrázek 5: Uspořádání scintilačního detektoru. Převzato a upraveno z: Faanu et al., 2010

Po absorpci záření scintilačním materiálem (1.) produkované fotony vylétávají do všech směrů. Pro jejich nasměrování na fotokatodu je proto z ostatních stran umístěný reflektor (2.). Fotokatodou (3.) jsou fotony převedeny na fotoelektrony a fotonásobičem (4.) zesíleny. Toto zesílení se pohybuje v rozsahu 10^5 až 10^9 (Gerndt, Průša, 2011).

Reflektor odrážející fotony může být obyčejný leštěný kovový povrch, efektivnější jsou ovšem difusní reflektory tvořené oxidy hořčíku nebo hliníku. Požadavky na vlastnosti reflektoru závisí na druhu scintilátoru (Collum, 2017).

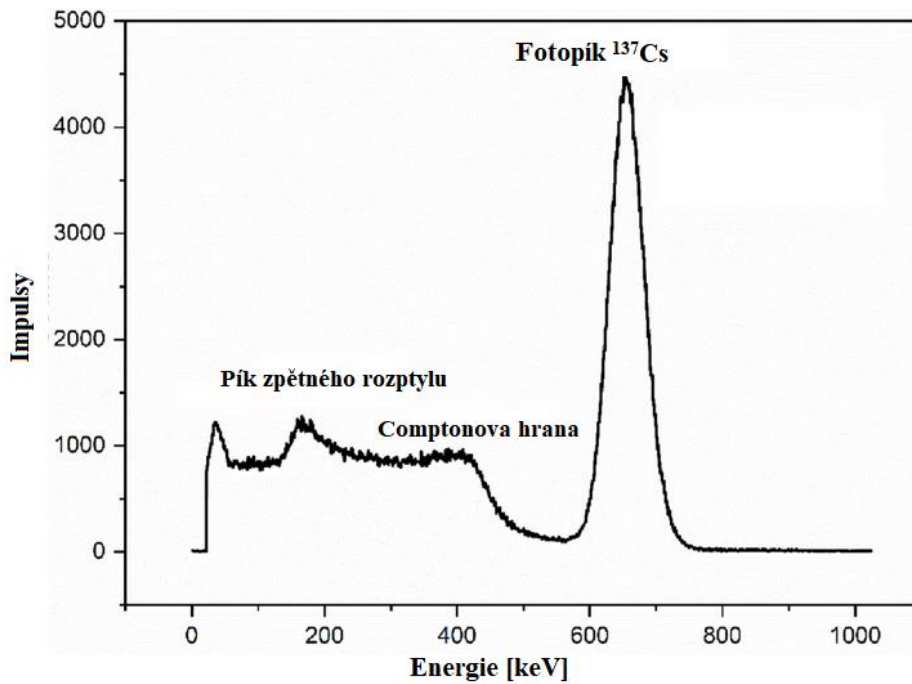
Světlovody jsou využívány v případech, kdy fotokatoda nemůže být z různých důvodů přímo u scintilátoru, nebo je její průměr menší než průměr scintilátoru. Funkce světlovodů využívá absolutní odrazivosti stěn, k jejich výrobě jsou využívána organická skla jako perspex a lucit. Křemenné sklo je velmi vhodné opticky, ale z důvodu náročnosti na opracovatelnost a cenu je využíváno jen v nezbytných situacích. Ztráty ve světelných vodičích dosahují 30 až 70 % (Collum, 2017).

Optický kontakt je tvořený na optických rozhraních, kde je snaha zamezit reflexím fotonů, ke kterým dochází kvůli technologickým nepřesnostem. Je většinou tvořen materiálem s blízkým indexem lomu, kterým se prostor optického rozhraní vyplní. U demontovatelných párů scintilátor fotonásobič je využíván silikonový olej. V případě pevně spojených scintibloků jde o silikonové gely, které jsou časově stálejší (Collum, 2017).

Fotonásobič je tvořen fotokatodou a dynodovým násobícím systémem. Fotokatody využívají fotoelektrického jevu. Po interakci fotonu s fotokatodou je vyražen elektron do vakua v prostoru fotonásobiče, ve kterém je následně elektrodami nasměrován do násobícího systému (Gerndt, Průša, 2011).

Elektronový násobící systém využívá k zesílení signálu jev sekundární emise. Elektron s kinetickou energií převyšující určitý práh vyrazí po dopadu na kovový povrch více elektronů. Střední počet elektronů vyražených primárním elektronem je úměrný jeho energii. Tento proces je v elektronovém násobícím systému směřován dynodami, mezi kterými je mezidynodový potenciál, opakován deset až čtrnáctkrát, čímž dochází k velkému zesílení a je ukončen sběrnou anodou (Collum, 2017).

Nejběžněji používaný je NaI(Tl) pro spektrometrii gama záření, energetické scintilační spektrum gama záření je graficky znázorněno na obrázku 6. Výška píku (N) odpovídá počtu zaznamenaných impulsů a poloha píku odpovídá energii zaznamenaných impulsů (E). Scintilační spektrum gama záření je složeno ze dvou hlavních částí – ostrého fotopíku a Comptonova spojitého spektra (Collum, 2017).

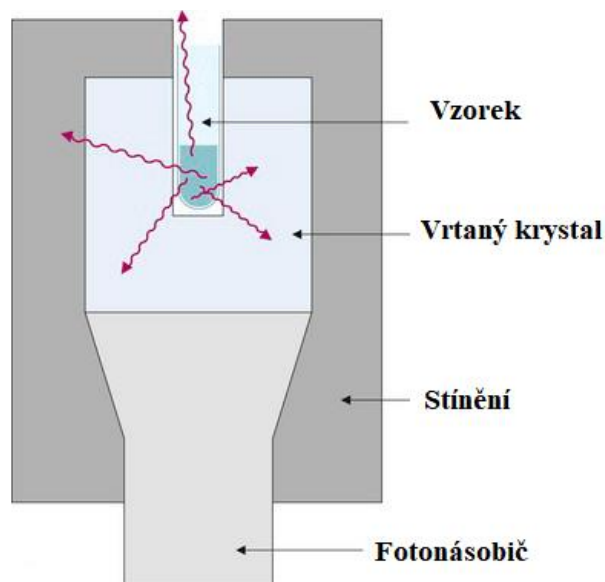


Obrázek 6: Spektrum gama záření ^{137}Cs . Převzato a upraveno z: (Rahman et al., 2020).

Ostrý fotopík vzniká pohlcením veškeré energie dopadajících fotonů především fotoefektem, popřípadě kombinací několika interakcí. Fotopíky vznikají v energiích charakteristických pro konkrétní radionuklidy podléhající gama přeměně (Collum, 2017).

Comptonovo spojité spektrum je tvořeno detekcí fotonů, které v detektoru interagují comptonovým rozptylem, a tedy ztrácí pouze část své energie. Toto spektrum má charakteristickou comptonovu hranu, která vzniká v oblasti maximální možné energie předané zářením gama elektronu při jedné interakci tímto rozptylem (Collum, 2017).

Studnové uspořádání scintilačního detektoru na obrázku 7 – dosahuje velké účinnosti detekce díky geometrii blízké 4π . Té je dosaženo uspořádáním, ve kterém jsou měřené vzorky vkládány do prostoru vrtaného krystalu a téměř kompletnímu obklopení aktivním objemem detektoru. Studnové uspořádání je využíváno pro stanovení objemové aktivity radonu ve vodě pomocí detekce fotonů gama dceřiných nuklidů radonu (Collum, 2017).



Obrázek 7: Uspořádání studnového detektoru. Převzato a upraveno z: Radiology Key (2016).

1.7.6 Polovodičové detektory

Polovodičový detektor využívá k získání elektrického signálu interakce ionizačního záření s polovodičovým materiálem. Polovodiče jsou materiály, které vedou elektrický proud za specifických podmínek. V polovodičových detektorech jsou využívány materiály jako křemík a germanium, které v elektrickém obvodu tvoří PN diodu – elektrický proud může procházet pouze v jednom směru. V detektoru je do elektrického obvodu zapojen polovodič v nevodivém směru a je pod napětím 1 000 až 2 000 V. Při interakci ionizujícího záření s aktivním objemem detektoru dochází ke vzniku párů děr a volných elektronů, jejichž množství je úměrné energii interagujícího záření. Elektrony a díry jsou elektrickým polem urychleny k elektrodám a dochází ke vzniku elektrického impulsu. Podle způsobu použití detektoru jsou voleny různé polovodičové materiály. Polovodičové spektrometry mají lepší energetické rozlišení než scintilační detektory (Girolamo, Nessi, 2014).

Křemíkové detektory jsou využívány například pro sledování drah nabitých částic v oblasti srážek v urychlovači částic. Ve srovnání s mlžnými komorami mají daleko vyšší prostorové rozlišení, ovšem za cenu vyšších pořizovacích nákladů. Pro správnou funkci je také potřeba chlazení. Omezující je také maximální tloušťka detektoru pouhých několik milimetrů – je řešena skládáním detektorů za sebe (Cherry et al., 2012).

Detektory germaniové jsou z monokrystalů dotované lithiem Ge(Li), nebo ze superčistého germania HPGe. Podle uspořádání jsou využívány k detekci a spektrometrii fotonového ionizujícího záření o různých energiích. Tloušťka citlivé vrstvy superčistého germania může být i několik centimetrů, a proto může být tento detektor použit k měření gama fotonů s energií několik MeV (Cherry et al., 2012).

Diamantové detektory jsou tvořeny uhlíkem uspořádaným do kubické krystalové mřížky. Tento materiál má velmi dobré časové rozlišení, k jeho použití není potřeba jej chladit a je odolný vůči poškození ionizujícím zářením. Využívá se pro detekci částic s vysokou energií (Cherry et al., 2012).

Kadmium-Zinek-Teluridové (CZT) detektory jsou využívány pro rentgenovou spektrometrii. CZT detektory nemají rozlišení jako germaniové detektory, ale jejich výhodou je možnost provozu za běžných teplot (Cherry et al., 2012).

1.8 Právní rámec

Požadavky na monitorování expoziční situace existující, zplánované nebo havarijní, řeší primárně zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon a jeho prováděcí předpisy. Z nich se úzce této problematiky dotýká:

Vyhláška č. 422/2016 Sb. Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, která definuje důležité pojmy související s tématem diplomové práce.

Celková objemová aktivita alfa je ukazatel obsahu přírodních radionuklidů emitujících záření alfa ve vodě. Blíže je definován postupem stanovení v normě ČSN 75 7611 a vyjadřuje se součtem objemových aktivit radioizotopů uranu ^{234}U , ^{235}U a ^{238}U v jejich přírodní směsi, která poskytuje stejnou odezvu jako měřený vzorek.

Celková objemová aktivita beta je ukazatel obsahu přírodních radionuklidů emitujících záření beta ve vodě. Blíže je definován postupem stanovení v normě ČSN 75 7612 a vyjadřuje se součinem objemové aktivity izotopu ^{40}K přírodního draslíku a zastoupením jeho přeměny beta s emisí elektronů (β^-), který poskytuje stejnou odezvu jako měřený vzorek; zjištěná hodnota postihuje zejména radionuklidy vysílající záření beta.

Radiační mimořádná událost je událost, která vede nebo může vést k překročení limitů ozáření a která vyžaduje opatření, jež by zabránila jejich překročení nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiační ochrany,

Nejvyšší přípustná hodnota je hodnota veličiny radiační ochrany, po jejímž překročení nesmí být potraviny nebo krmiva uvedeny na trh.

Vyhláška č. 360/2016 Sb. Vyhláška o monitorování radiační situace (dále jen vyhláška) upravuje další stěžejní oblasti pro tuto diplomovou práci. Jde především o podrobné požadavky na formu a způsob monitorování radiační situace, požadavky na činnosti vykonávané měřicí laboratoří a její vybavení a o výčet veličin a skutečností důležitých z hlediska monitorování radiační situace.

Stanovené požadavky na formu a způsob monitorování radiační situace: Monitorování radiační situace ke stanovení velikosti zevního a vnitřního ozáření obyvatelstva je prováděno tak, aby při normálním monitorování bylo zajištěno systematické a trvalé měření úrovně ozáření, byly stanoveny obvyklé hodnoty ozáření, bylo umožněno včasné zjištění zvýšené úrovně zevního ozáření a byl potvrzen vznik nehodové expoziční situace.

Havarijní monitorování je prováděno tak, aby byl identifikován a charakterizován nastalý únik radioaktivní látky a šíření ionizujícího záření. Pokud nehodová expoziční situace vznikla na území České republiky, je součástí odhad šíření nastalého úniku radioaktivní látky a ionizujícího záření v okolí místa kde k úniku došlo, aby bylo identifikováno kontaminované území a bylo umožněno předpovědět vývoj nehodové expoziční situace.

Monitorování musí být prováděno prostřednictvím monitorovacích sítí. Ty jsou podle území děleny na síť řídkou a hustou, která je dále dělena na teritoriální síť – pokrývá celé území České republiky, lokální síť – pokrývá vybrané území a je na něm cíleně zahuštěná a hraniční síť

Monitorovací místa jsou měřicí, odběrová a sběrná, dále jsou dělena na stálá a na nestálá. Nestálá monitorovací místa – provedeno pouze jedno měření, jeden odběr nebo jeden sběr vzorku, jsou určena zeměpisnou šířkou a zeměpisnou délkou. Stálá monitorovací místa určuje navíc název a nadmořská výška. Monitorovacím místům je datovým střediskem přidělen identifikátor.

Měřicí a odběrová místa se stanovují před zahájením příslušného měření nebo odběru tak, aby byl minimalizován případný vliv okolních budov, porostu a dalších objektů na výsledek měření. Pro zpracování návrhu na zavedení, upřesnění nebo odvolání ochranných opatření se stanovují měřicí, odběrová místa a sběrná místa v lokálních sítích, v monitorovacích trasách.

Monitorovanými položkami, které mohou způsobit zevní ozáření jsou ovzduší, voda, půda a povrch lidského těla, těla zvířete a předmětu.

Monitorovanými položkami, ve kterých se sleduje obsah radionuklidů a které mohou při požití nebo vdechnutí způsobit vnitřní ozáření, jsou ovzduší a voda, které reprezentují životní prostředí, dále mléko, mléčné výrobky, smíšená strava, položky smíšené stravy a krmiva, které reprezentují potravní řetězec.

Monitorovanými položkami, ve kterých se sleduje vnitřní ozáření, jsou exkreta, vybrané orgány lidského těla nebo celé lidské tělo.

Vzorek se odebírá jako bodový nebo kontinuální, směsný nebo reprezentativní, v množství umožňujícím jeho měření podle přílohy č. 3 k vyhlášce.

Ke každému odebranému vzorku musí být proveden záznam o odběru, který je spolu se vzorkem předán přímo nebo prostřednictvím sběrných míst měřicí laboratoři.

Stanovené požadavky na činnosti vykonávané měřicí laboratoři: Měřicí laboratoř musí provést měření obsahu jednotlivých radionuklidů ve vzorcích v souladu s požadavky na nejmenší detekovatelnou hodnotu měřené fyzikální veličiny uvedenou v příloze č. 3 k této vyhlášce, při měření soustavně kontrolovat správné provádění měření tak, aby byla zajištěna jeho opakovatelnost, přesnost a citlivost, předat údaje o vzorku o měření uvedené do datového střediska, účastnit se porovnávacího měření a o prováděných činnostech vést a uchovávat záznamy po dobu 10 let, a o činnostech v souvislosti s havarijním monitorováním při radiační havárii po dobu 30 let.

Osoby uvedené v národním programu monitorování musí neprodleně dálkovým přístupem předat data z monitorování, která obsahují výsledky měření, datum, časové údaje a zeměpisné údaje, datovému středisku neprodleně po jejich získání,

Stanovené veličiny a skutečnosti důležité z hlediska monitorování radiační situace:

- Veličinami důležitými z hlediska monitorování radiační situace jsou fyzikální veličiny charakterizující pole záření a obsah radionuklidů v monitorovaných položkách uvedené v příloze č. 3 k této vyhlášce.
- Skutečnostmi důležitými z hlediska monitorování radiační situace jsou výsledky kontroly správného provádění měření a kontroly stálosti parametrů měřících a odběrových zařízení, činnosti prováděné měřicí laboratoři, záznamy o odběru a o měření, skutečnosti charakterizující kapalně a plynně výpusti z pracoviště, skutečnosti charakterizující pole ionizujícího záření a výskyt radionuklidů v okolí pracoviště, hodnoty monitorovacích úrovní a činnosti při jejich překročení, vzorky pro potřeby zahájení institucionální kontroly.

Národní program monitorování podle vyhlášky obsahuje:

výčet osob, které podle tohoto programu zajišťují monitorování, přehled monitorovacích sítí, včetně výčtu monitorovacích míst a jejich vyznačení v digitalizovaném mapovém podkladu, výčet monitorovaných položek s uvedením jejich členění do všech úrovní a výčet fyzikálních veličin, které v nich budou měřeny, výčet všech v úvahu připadajících postupů činností při monitorování, včetně rozsahu a frekvence provádění jednotlivých

činností, výčet měřicích a odběrových zařízení, popis jejich parametrů, určení frekvence kontroly stálosti jejich parametrů a provádění kalibrace, výčet měřicích laboratoří, popis datových formátů a formy datového přenosu, výčet vzorků, pro které může být požadováno opakované měření

MonRaS – je systém pro uveřejňování výsledků monitorování situace na území ČR. Na jeho zprovoznění a provozu se kromě SÚJB podílí společnosti Nuvia, a.s. a ABmerit. Samotné monitorování provádí SÚJB, Státní ústav radiální ochrany, provozovatel jaderných elektráren a ministerstva obrany, vnitra, zemědělství, financí a životního prostředí. V systému jsou uveřejňovány výsledky měření vzorků životního prostředí, aktuální dávkový příkon, výsledky monitorování radioaktivity v lidském těle.

2 Cíle práce a výzkumná otázka

Cíle diplomové práce:

1. Zprovoznění proporcionálního detektoru – přístroj NA6201 umístěný v dozimetrické laboratoři ZSF JU.
2. Ověřit funkci přístroje NA6201 zkušebním provozem.

Výzkumná otázka:

Je přístroj NA6201 schopen spolehlivě měřit alfa a beta aktivitu?

3 Metodika

3.1 Zprovoznění měřiče alfa-beta NA 6201

Zprovoznění měřiče alfa-beta NA 6201 se skládalo z dílčích kroků, které jsou popsány v následujících bodech. Průběh zprovoznění, získané poznatky a výsledky zprovoznění jsou uvedeny v následující kapitole „*Výsledky*“.

3.1.1 Studium principu a shromáždění materiálů k alfa-beta NA 6201

Studium principu proběhlo především rešerší literárních a internetových zdrojů. Především šlo o oblast detekce ionizujícího záření a rozsah a způsob využívání obdobných přístrojů.

Stěžejním materiálem k přípravě na zprovoznění byl návod k obsluze a údržbě. Naskenovaná verze sloužila především ke zpracování výsledků a fyzická verze návodu, který je k dispozici v dozimetrické laboratoři Zdravotně sociální fakulty Jihočeské univerzity (ZSF JU), pak sloužila jako opora při provádění dílčích kroků zprovoznění.

3.1.2 Vizualní prohlídka přístroje alfa-beta NA 6201, zjištění stavu jednotlivých komponent, jejich funkčnosti a nedostatků

Vizualní prohlídka přístroje proběhla v dozimetrické laboratoři ZSF JU. Dále byl nastudován princip práce s vyhodnocovací jednotkou i zacházení s jednotlivými částmi detekční jednotky. Zjištění stavu jednotlivých částí přístroje proběhlo především vizualní kontrolou, porovnáním vyhodnocovacích a detekčních jednotek a porovnáním s návodem výrobce.

3.1.3 Zajištění doplnění potřebných komponent, zhodnocení funkčnosti vyhodnocovacích jednotek

Na základě vizualní kontroly přístroje bylo zjištěno chybějící vybavení a zajištěno zapůjčení Státním ústavem radiační ochrany – pobočka České Budějovice. Zhodnocení funkčnosti bylo provedeno vzorovým měřením s etalonem EM 145 X ⁹⁰Sr za různých pracovních napětí a porovnáním fluktuace výsledků. Zároveň byla kontrolována funkčnost dílčích funkcí vyhodnocovacích jednotek jako nastavení času měření, nastavení režimu měření apod.

3.1.4 Nastavení pracovních napětí

Nastavení pracovního napětí jsem prováděl podle doporučení výrobce v návodu. Bylo provedeno stanovení pracovního napětí pro scintilační detektor a pracovní napětí průtokového proporcionálního detektoru záření beta a alfa.

3.2 Stanovení spolehlivosti účinnosti stanovení pro stanovení objemové aktivity beta

Ke stanovení spolehlivosti a účinnosti jsem využil bodový etalon typu EM 145 X, obsahující ^{90}Sr a chlorid draselný, který je využíván jako standard při stanovení celkové objemové aktivity beta podle ČSN 75 7612.

Účinnost měření η chloridu draselného je dána vztahem:

$$\eta = \frac{\frac{N_z}{t_z} - \frac{N_p}{t_p}}{14,4 \cdot m_z}$$

N_z – počet impulsů za celkovou dobu měření preparátu KCl

t_z – celková doba měření v sekundách

m_z – hmotnost KCl pro stanovení účinnosti v gramech

14,4 – součin zastoupení přeměny beta s emisí elektronů ^{40}K a měrné aktivity ^{40}K v KCl

N_p – počet impulsů za celkovou dobu měření pozadí

t_p – čas měření pozadí v sekundách

Účinnost měření etalonu je dána vztahem:

$$\eta = \frac{\frac{N_z}{t_z} - \frac{N_p}{t_p}}{A_{etalon}}$$

N_z – počet impulsů za celkovou dobu měření preparátu KCl

t_z – celková doba měření v sekundách

N_p – počet impulsů za celkovou dobu měření pozadí

t_p – čas měření pozadí v sekundách

A_{etalon} – aktivita etalonu v becquerelech

Aktivita etalonu A je vypočítaná podle vztahu:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

A_0 – počáteční aktivita etalonu stanovená výrobcem

e – Eulerovo číslo

λ – rozpadová konstanta, kterou získáme vztahem

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

$t_{1/2}$ – poločas rozpadu radionuklidu v sekundách

t – uplynulá doba do referenčního data etalonu v sekundách

Spolehlivost je ověřena Deanovým a Dixonovým Q testem na vyloučení odlehlých výsledků pro hladinu významnosti 0,05 pro 6 vypočtených hodnot účinnosti měření (hodnota kritického poměru 0,560). V případě překročení kritického poměru dochází k vyřazení hodnoty a opakování testu pro 5 zbývajících hodnot (hodnota kritického poměru 0,642). Za spolehlivý lze přístroj považovat, pokud dojde k vyřazení maximálně jedné naměřené hodnoty. V případě vyřazení hodnoty i při druhém testu nejsou přístrojem naměřené hodnoty stabilní.

Deanův a Dixonův Q test spočívá ve vzestupném seřazení výsledků, stanovení variačního rozpětí R – rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou, Q minimální a Q maximální a porovnání těchto hodnot s příslušným kritickým poměrem.

$$Q_{\text{minimální}} = \frac{X_2 - X_1}{R}$$

$$Q_{\text{maximální}} = \frac{X_6 - X_5}{R}$$

X_2 – 2. nejnižší zjištěná hodnota

X_1 – nejnižší zjištěná hodnota

R – Variační rozpětí

X_6 – nejvyšší zjištěná hodnota

X_5 – 2. nejvyšší zjištěná hodnota

Pro stanovení spolehlivosti a účinnosti měření chloridu draselného byla v laboratořích SÚJB připravena navážka 0,198 gramu KCl. Nejdříve byla využita ke srovnávacímu

měření, které je popsáno v kapitole 3.2.2 *Postup srovnávacího měření přístrojem EMS3* a následně přesunuta do laboratoře dozimetrie ZSF.

3.2.1 Postup měření s NA6201

Jako první krok měření s NA6201 jsem zahájil proplachování proporcionálního detektoru metanem. Poté jsem přichystal nosiče misek s prázdnou niklovou miskou pro měření pozadí, s miskou obsahující navážku chloridu draselného, s miskou obsahující etalon typu EM 145 X a prázdné nosiče pro posouvání vzorků v detekční jednotce.

Po provedení této přípravy a uplynutí asi deseti minut jsem nastavil vyhodnocovací jednotku pro měření v anti koincidenčním režimu po dobu 100 sekund, zapnul zdroje vysokého napětí pro oba detektory, zasunul nosič s prázdnou miskou pod detektor pro měření pozadí a vyčkal na ustálení vyhodnocovací jednotky. Po ustálení vyhodnocovací jednotky a 60 minutovém proplachování detektoru jsem zahájil měření, výsledky jsem zaznamenával k dalšímu zpracování do programu MS excel. Po změření pozadí následovalo měření a záznam aktivity chloridu draselného a etalonu typu EM 145 X, které jsem 6x opakoval.

3.2.2 Postup srovnávacího měření přístrojem EMS3

Měření proběhlo v laboratoři SÚRO pobočka České Budějovice. Měřidlo alfa – beta automat typ EMS 3 je zde běžně využíváno ke stanovení celkových objemových aktivit alfa a beta vzorků vod měřených v rámci monitorování radiační situace. Oproti měření s NA6201, kde bylo potřeba provést kroky k zapnutí a ustálení přístroje, zde byl měřič typ EMS 3 již zapnutý a ustálený z předchozích měření.

Měřidlo alfa – beta automat typ EMS 3, výrobce EMPOS je vybaveno detekční jednotkou POB a plastovým scintilačním detektorem v anti koincidenčním zapojení. Jednotka je ovládána pomocí programu pro systém Windows. Vzorky jsou vkládány do karuselového nosiče vzorků a pod detektor umístěny pneumatickým podavačem.

Do karuselového podavače jsem umístil prázdnou miskou pro měření pozadí, miskou s chloridem draselným a etalon typu EM 145 X. Následně byl prostřednictvím počítačového programu nastaven čas měření na 100s a zahájeno měření. Zde bylo měření chloridu draselného a etalonu taktéž 6x opakováno.

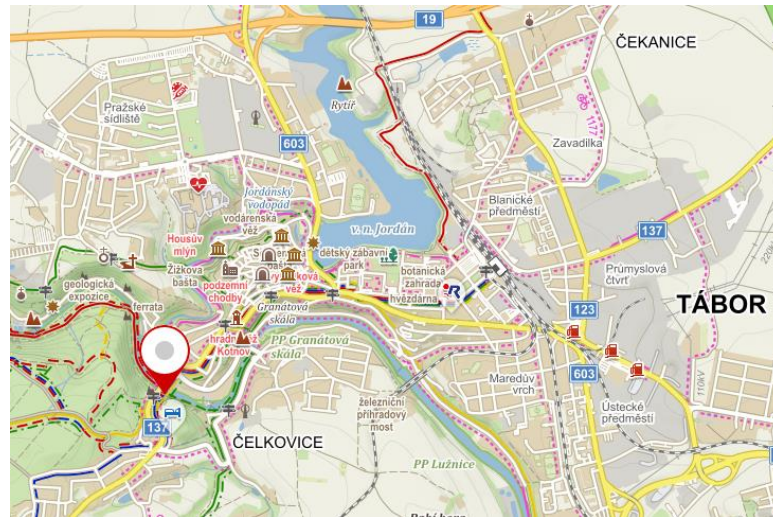
3.3 Měření celkové objemové aktivity beta

Pro zhodnocení celého procesu pro měření celkové objemové aktivity beta a pro srovnávací měření byl proveden vzorový odběr vzorků vody, jejich zpracování a vyhodnocení celkové objemové aktivity beta. Zdroji vzorků vody byly zvoleny prameny a studánky, u kterých je v lidové kultuře nebo přímo v názvu zmiňována radioaktivita vyvěrající vody.

Odběr vzorků vody byl proveden do 24 hodin před dalším zpracováním. Vzorky vody byly odebrány do polyetylenových lahví o objemu 2 l. Každá lahev byla před odběrem třikrát propláchnuta vodou ze zdroje vzorku a po samotném odběru označena místem a časem odběru. Zpracování vzorků a příprava kalibrační navážky chloridu draselného proběhlo v laboratořích SÚRO, pobočka České Budějovice.

Pramen svaté Eleonory

Pramen se nachází ve městě Tábor, u Švehlova mostu přes řeku Lužnici. Poloha pramene je vyznačená na obrázku 8, pramen samotný je na obrázku 9. Radioaktivita je zmiňována v popisu pramenu v Národním registru pramenů a studánek.



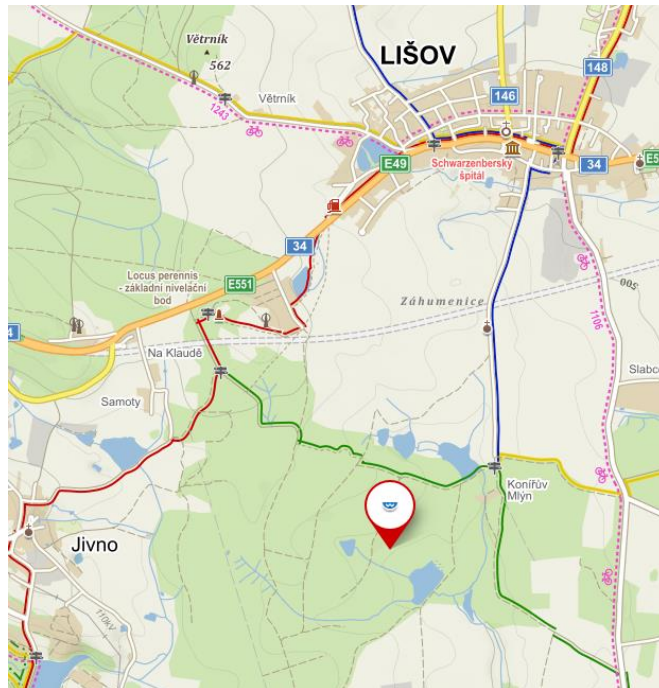
Obrázek 8: Poloha pramene svaté Eleonory.



Obrázek 9: Pramén svaté Eleonory.

Radioaktivní studánka

Radioaktivní studánka se nachází asi 3 km jižně od obce Lišov v blízkosti Smíchovského rybníka. Poloha studánky je vyznačená na obrázku 10, studánka je na obrázku 11. K obsahu radionuklidů ani původu názvu studánky nebyly nalezeny žádné ověřitelné informace.



Obrázek 10: Pozice radioaktivní studánky.



Obrázek 11: Radioaktivní studánka.

3.3.1 Zpracování vzorků

Pro stanovení celkové objemové aktivity beta byl vzorek vody před samotným měřením aktivity zpracován do formy odparku.

Použité pomůcky:

- Písková lázeň
- Porcelánové odpařovací misky
- Kvantitativní filtrační papír
- Muflová pec
- Žíhací kelímky s víčky
- Exsikátor
- Analytické váhy
- Niklové misky o průměru 50 mm
- Laboratorní kleště
- Skleněná tyčinka

Použité chemikálie:

- Ředěná kyselina chlorovodíková 1:1
- Ředěná kyselina chlorovodíková 1:30
- Destilovaná voda
- Etanol

Pracovní postup:

Pro odpaření vzorků jsem připravil pískovou lázeň s označenými porcelánovými odpařovacími miskami, ve kterých byl vložen kvantitativní filtrační papír. Do misek jsem postupně přiléval vzorky až do odpaření objemu 2 litrů každého vzorku. Po odpaření vody byl kvantitativní filtrační papír složen a odpařovací miska vytřena 1/8 filtračního papíru navlhčenou v ředěné kyselině chlorovodíkové. Složený filtrační papír i vlhčený papír jsem následně vložil do označených žíhacích kelímků a vložil k žíhání do muflové pece.

Po vyžíhání jsem nechal kelímky vychladnout a do označených niklových misek odebral navážky o hmotnosti 0,201 g a 0,198 g, které jsem následně rozprostřel do rovnoměrné vrstvy pomocí pár kapek etanolu. Tímto krokem byla příprava vzorků hotová a přistoupil jsem k měření celkové objemové aktivity beta pomocí měřidla alfa – beta automat typ EMS 3.

3.3.2 Postup srovnávacího měření přístrojem EMS3

Měření proběhlo v laboratoři SÚRO pobočka České Budějovice. Měřidlo alfa – beta automat typ EMS 3. Do karuselového podavače byla umístěna prázdná miska pro měření pozadí, miska s navázkou 0,193 g chloridu draselného, jako standard a získané odparky. Následně bylo prostřednictvím počítačového programu zahájeno měření po dobu 500 s. Po ukončení měření a získání výsledků byly misky převezeny do laboratoře dozimetrie ZSF.

3.3.3 Postup srovnávacího měření NA6201

Měření s NA6201 opět zahrnovalo proplachování proporcionalního detektoru metanem a vyčkání na ustálení celé soustavy. Vyhodnocovací jednotku jsem nastavil pro měření v anti koincidenčním režimu po dobu 500 sekund. Poté jsem změřil pozadí, standard chlorid draselný a odparky. Výsledky jsem zaznamenával k dalšímu zpracování do programu MS excel.

4 Výsledky

4.1 Zprovoznění měřiče nízkých aktivit alfa-beta NA 6201

Jednotlivé kroky odpovídají číslováním podkapitolám stejnojmenné části v předchozí kapitole „Metodika“.

4.1.1 Princip fungování a technické informace NA 6201

Vizuální kontrolou a z dokumentace bylo zjištěno, že měřič nízkých aktivit alfa-beta NA 6201, kterým je vybavena dozimetrická laboratoř Zdravotně sociální fakulty, se skládá z detekční jednotky (NA 6201-I) a vyhodnocovací jednotky (NA 6201-II). Součástí příslušenství jsou niklové misky na měřené vzorky o průměru 50 mm, nosiče misek a bodový etalon typu EM 145 X, obsahující ^{90}Sr . V tabulce 2 jsou popsány základní technické vlastnosti přístroje alfa-beta NA 6201.

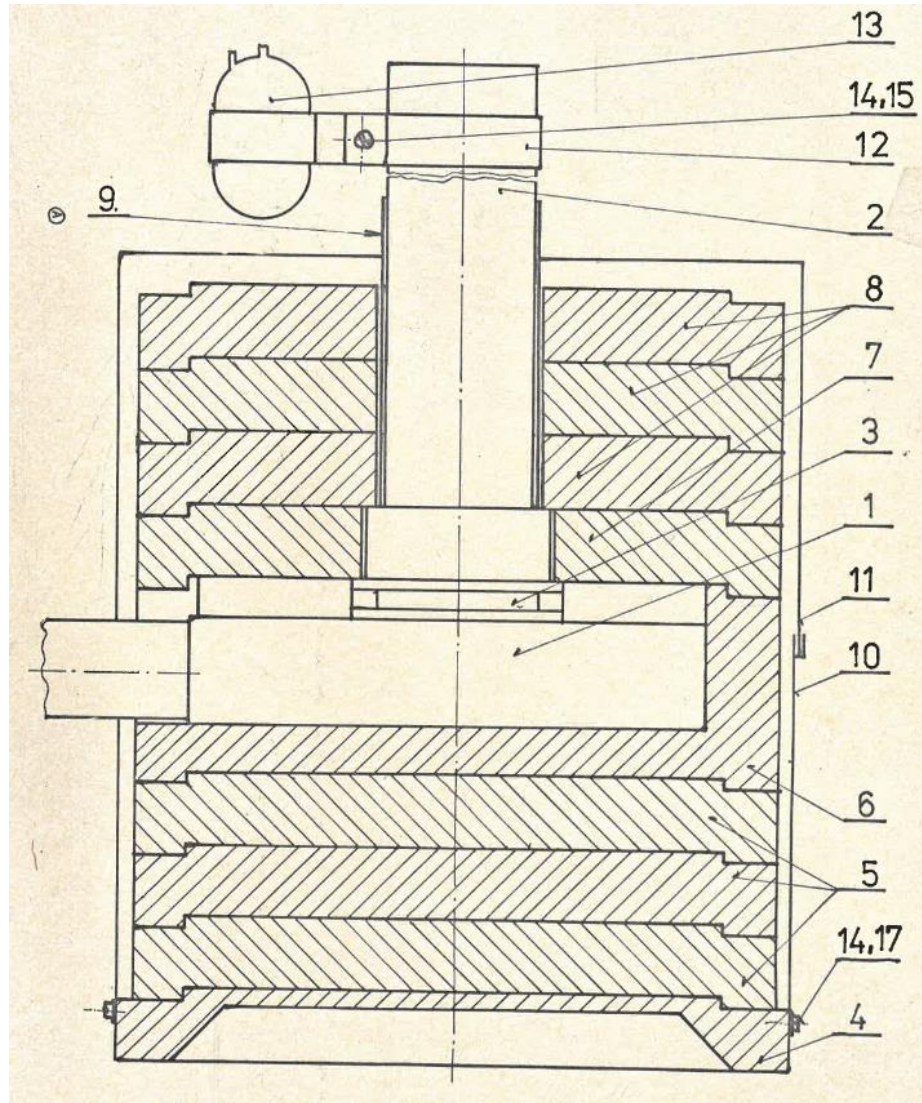
Tabulka 2: Přehled technických vlastností přístroje alfa-beta NA 6201

Typ detektoru pro hlavní kanál	Průtokový proporcionální počítač
Detekované záření	Alfa, beta
Průměr okénka detektoru	50 mm
Pracovní napětí pro hlavní kanál	2 000 – 4 500 V
Pracovní plyn	Metan
Průtok plynu	90 ml.min ⁻¹
Typ detektoru pro vedlejší kanál	Scintilační detektor SPB 81
Pracovní napětí pro vedlejší kanál	800 – 1 500 V
Způsob vyhodnocení v obou kanálech	Integrálně

Zdroj: Tesla výzkumný ústav... (1983).

Popis částí přístroje

Na obrázku 12 můžeme vidět schéma detekční jednotky NA 6201-I a v tabulce 3 je popis jednotlivých částí přístroje. Na obrázku 13 je použitá detekční jednotka.



Obrázek 12: Schéma detekční jednotky. Převzato a upraveno z: Tesla výzkumný ústav... (1983).

Tabulka 3: Popis částí detekční jednotky

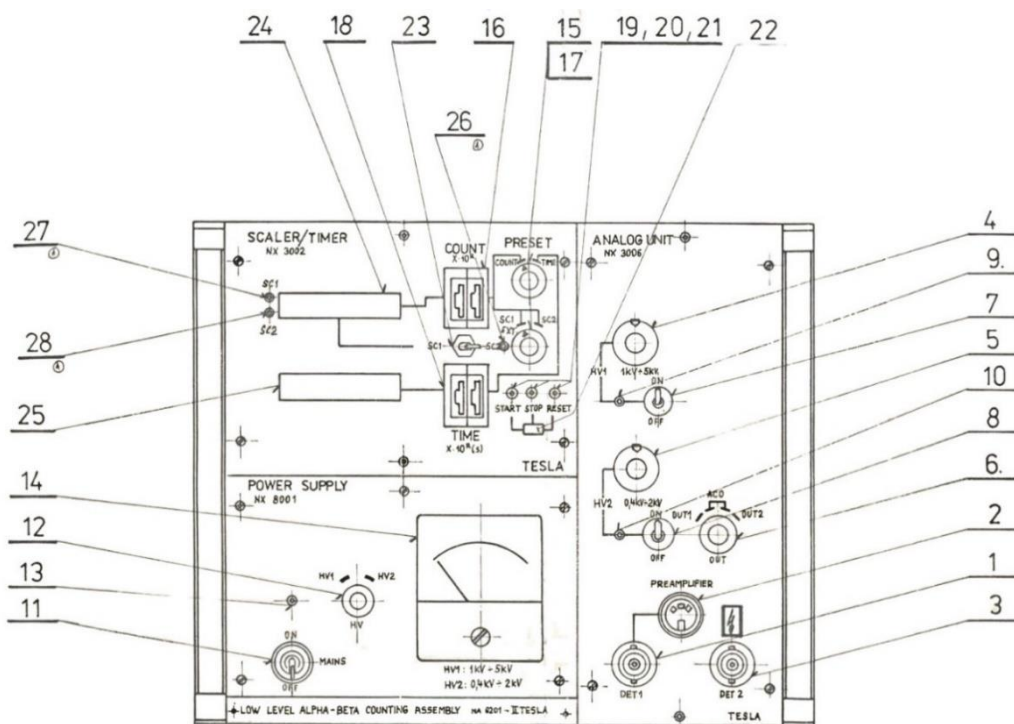
1. Scintilační detekční jednotka	9. Vložka pro aretaci detekční jednotky
2. Proporcionální detekční jednotka	10. Výřez krytu
3. Manuální měnič vzorků	11. Horní kryt
4. Základní deska	12. Objímka
5. 6. 7. 8. Olověné stínící desky různých	13. Kapalinový uzávěr

Zdroj: Tesla výzkumný ústav..., 1983



Obrázek 13: Detekční jednotka (NA 6201-I). Zdroj: Vlastní

Na obrázku 14 je znázorněno schéma ovládacích prvků vyhodnocovací jednotky (NA 6201-II). Jednotlivé ovládací prvky jsou popsány v tabulce 4. Na obrázku 15 je vyhodnocovací jednotka sériové číslo a4-114, která byla dále využívána v této diplomové práci.



Obrázek 14: Schéma vyhodnocovací jednotky. Převzato a upraveno z: Tesla výzkumný ústav... (1983).

Tabulka 4: Části vyhodnocovací jednotky

1. Konektor napětí pro POB 302	15. Přepínač předvolby času/impulsů
2. Konektor signálu z POB 302	16. Přepínač předvolby počtu impulsů
3. Konektor scintilační sondy NKQ 331	17. Přepínač zdroje impulsů
4. HV 1 ovladač napětí pro POB 302	18. Přepínač předvolby měřícího času
5. HV 2 ovladač napětí pro NKQ 331	19. Indikace stavu START
6. Přepínač měřených hodnot	20. Indikace stavu STOP
7. Vypínač napětí pro POB 302	21. Indikace stavu RESET
9. Indikace zapnutého VN pro POB 302	22. Tlačítko pro změnu stavů
10. Indikace zapnutého VN pro NKQ 331	23. Přepínač zdroje zobrazených impulsů
11. Vypínač síťového napětí	24. Displej – počet impulsů
12. Přepínač zobrazeného napětí	25. Displej – čas
13. Indikace zapnutého přístroje	26. Indikace externího ovládní
14. Ručkové měřidlo	27. Indikace zdroje zobrazených impulsů

Zdroj: Tesla výzkumný ústav..., (1983)



Obrázek 15: Vyhodnocovací jednotka (NA 6201-II). Zdroj: Vlastní.

Na obrázku 16 je příslušenství k přístroji s popisem jednotlivých pomůcek.



Obrázek 16: Příslušenství pro NA 6201. Zdroj: Vlastní

4.1.2 Zjištění stavu NA 6201 a vybavení laboratoře

V laboratoři dozimetrie Zdravotně sociální fakulty JU se nachází dvě vyhodnocovací jednotky a dvě detekční jednotky. Jedna z detekčních jednotek již byla sestavená a po vizuálním zhodnocení jednotlivých částí obou jednotek byla vybrána k dalšímu využívání. K tomuto rozhodnutí vedla především trhlina ve folii v nesestavené detekční jednotce.

Proporcionální průtokový detektor potřebuje pro svou funkci průtok metanu v objemu 90 ml.m^{-1} . Metan je dodáván v tlakových lahvích a správný průtok je zajištěn přetlakovým ventilem. Tlaková lahev s metanem ani přetlakový ventil není součástí stálého vybavení laboratoře.

Obě vyhodnocovací jednotky signalizovaly funkčnost po zapnutí zdroje energie i zdrojů vysokého napětí svícením příslušných led.

4.1.3 Doplnění potřebných komponent a hodnocení vyhodnocovacích jednotek

Pro účely této diplomové práce byla tlaková lahev s metanem, přetlakový ventil a náhradní hliníková folie zapůjčena Státním ústavem radiační ochrany – pobočka v Českých Budějovicích.

Pro zhodnocení funkčnosti vyhodnocovacích jednotek bylo provedeno měření s etalonem $\text{EM } 145 \text{ X } ^{90}\text{Sr}$, kterým je laboratoř vybavena, a měření pozadí za různých pracovních napětí proporcionálního i scintilačního detektoru. Získané hodnoty byly zaneseny do grafu a porovnány. Grafické vyhodnocení bylo provedeno v softwarovém programu MS Excel.

Proporcionální průtokový detektor jsem pomocí silikonové hadičky připojil k výstupu přetlakového ventilu s výstupním tlakem 200 kPa a průtokem 90 ml.m^{-1} .

Napětí proporcionálního detektoru je nastavováno otočným ovladačem HV-1 v rozsahu 1 000 V až 5 000 V, přičemž posun o 10 dílků změní nastavení o 40 V. Příklad nastavení a výpočtu napětí: $650 \text{ dílků} = 1000 + (650 \times 4) = 3600 \text{ V}$.

Napětí scintilačního detektoru je nastavováno otočným ovladačem HV-2 v rozsahu 400 V – 2 000 V při čemž posun o 10 dílků změní nastavení o 16 V. Příklad nastavení a výpočtu napětí: $310 \text{ dílků} = 400 + (310 \times 1,6) = 896 \text{ V}$.

Čas měření je nastavován přepínačem předvolby měřicího času. Přepínač se skládá z černého a červeného číselníku v rozsahu 1–9. Černý číselník nastavuje počet sekund, červený nastavuje index. Nastavením obou číselníků na hodnotu 1 získáme 10 sekund měřicího času (1×10^1).

Vyhodnocovací jednotku sériového čísla A4-114 jsem propojil s detekční jednotkou a zahájil proplachování proporcionalního detektoru metanem podle návodu. Při proplachování nedošlo k probublání oleje v kapalinovém uzávěru. První předpokládanou příčinou byla protržená stínící folie pro funkci v bezokénkovém režimu. Tuto hliníkovou folii o síle pouhých 0,006 mm jsem vyměnil za novou, ale k probublání opět nedošlo, nejspíše z důvodu jiných netěsností v detekční jednotce. Čas měření u jednotlivých napětí byl nastaven na 10 sekund. Naměřené hodnoty z vyhodnocovací jednotky A4-114 jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Test A4-114.

Počet dílků HV-1	Napětí POB 302	Počet impulsů etalon	Počet impulsů pozadí
0	1000	0	0
100	1400	0	0
200	1800	0	0
300	2200	0	0
400	2600	0	0
500	3000	0	0
600	3400	3	0
700	3800	3626	2
800	4200	41720	1
900	4600	74000	2
Počet dílků HV-2	Napětí SPB 81	Počet impulsů etalon	Počet impulsů pozadí
0	400	0	0
100	560	0	0
200	720	29	31
300	880	82	87
400	1040	103	98
500	1200	119	123
600	1360	207	212
700	1520	260	271
800	1680	330	324

Zdroj: Vlastní výzkum

Následně jsem zapojil vyhodnocovací jednotku sériového čísla XO-109 a provedl stejné měření. Naměřené hodnoty z vyhodnocovací jednotky XO-109 jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Test XO-109.

Počet dílků HV-1	Napětí POB 302	Počet impulsů etalon	Počet impulsů pozadí
0	1000	0	0
100	1400	0	0
200	1800	0	0
300	2200	0	0
400	2600	0	0
500	3000	0	0
600	3400	0	0
700	3800	5047	2
800	4200	54420	4
900	4600	85757	4
Počet dílků HV-2	Napětí SPB 81	Počet impulsů etalon	Počet impulsů pozadí
0	400	1	3
100	560	71	102
200	720	111	114
300	880	702	805
400	1040	710	780
500	1200	812	701
600	1360	685	818
700	1520	736	668
800	1680	801	644

Zdroj: Vlastní výzkum

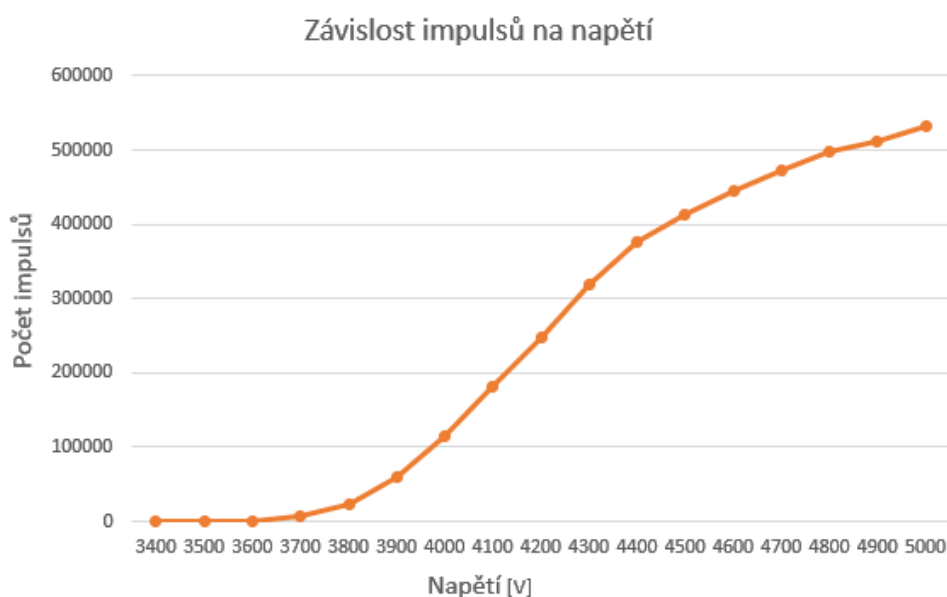
Z naměřených hodnot jsem usoudil, že v případě vyhodnocovací jednotky A4-114 jsou výsledky konzistentnější a více v souladu s očekávanými hodnotami. Tuto vyhodnocovací jednotku jsem proto dále využíval ve všech následujících krocích.

4.1.4 Stanovení pracovního napětí

Stanovení pracovního napětí POB 302 pro měření aktivity beta

Po zhodnocení vyhodnocovacích jednotek bylo dalším krokem nastavení pracovního napětí proporcionálního detektoru. Pracovní napětí nelze určit univerzálně pro všechny jednotky POB 302 z důvodu velkého množství vnějších faktorů, které jej ovlivňují. Stanovení pracovního napětí bylo provedeno následujícím způsobem.

Vyhodnocovací jednotka byla zapnuta hlavním vypínačem a bylo zahájeno proplachování detekční jednotky metanem. Do nosiče misek byla vložena niklová miska, ve které byl vložený etalon EM 145 X ^{90}Sr (součástí vybavení laboratoře). Nosič s etalonem byl zaveden manuálním měničem vzorků na měřenou pozici v detekční jednotce. Po 5 minutách od začátku proudění metanu byly zapnuty zdroje vysokého napětí pro oba kanály detekční jednotky. Měřený čas byl nastaven na 60 sekund, přepínač zdroje impulsů byl nastaven do polohy OUT1. Po nastavení vyhodnocovací jednotky a 30 minutách proplachování metanem byla změřena a zaznamenána aktivita za zvyšujícího se napětí v intervalu 100 V. Napětí bylo měněno otočením ovladače HV1 o 25 dílků. Z předchozího měření při výběru vyhodnocovací jednotky jsem zjistil, že impulsy etalonu začne proporcionální detektor zaznamenávat od napětí 3 400 V, proto je měření započato právě u této hodnoty. Hodnoty byly následně zaneseny do grafu. Hodnoty z měření jsou uvedeny v tabulce 7, graf je na obrázku 17.



Obrázek 17: Graf závislosti impulsů na napětí. Zdroj: Vlastní výzkum.

Tabulka 7: Stanovení pracovního napětí.

Napětí POB 302 [V]	Počet impulsů
3 400	7
3 500	28
3 600	862
3 700	7 077
3 800	22 782
3 900	60 528
4 000	115 246
4 100	181 939
4 200	248 459
4 300	318 100
4 400	375 259
4 500	412 754
4 600	445 932
4 700	471 782
4 800	498 865
4 900	510 741
5 000	531 258

Zdroj: Vlastní výzkum

Jelikož hodnoty aktivity nevykazovaly očekávané ustálení, bylo měření dvakrát opakováno z důvodu ověření vlivu doby proplachování na výsledné hodnoty. Hodnoty a doba od začátku proplachování k počátku měření jsou uvedeny v tabulce 8. Výsledky měření stále nenaznačovaly ustálení a jednoznačné určení pracovního napětí.

Po konzultaci s vedoucí diplomové práce a pracovníky Státního ústavu radiační ochrany jsem zjistil, že diagnostika a případná úprava proporcionálního detektoru zařízení přesahuje rámec této diplomové práce. Pro další práci s měřičem NA6201 bylo vybráno pracovní napětí 4 200V pro zjištění účinnosti měření standardu KCl, a porovnání s obdobnými přístroji.

Tabulka 8: Test stálosti impulsů.

Napětí POB 302 [V]	Počet impulsů po 60 min.	Počet impulsů po 120 min.
3 400	21	19
3 500	44	51
3 600	1 107	1 150
3 700	8 104	8 311
3 800	28 011	28 210
3 900	71 821	72 011
4 000	125 132	126 600
4 100	191 874	190 544
4 200	263 502	262 954
4 300	341 217	340 505
4 400	399 877	400 188
4 500	439 990	440 284
4 600	471 140	472 101
4 700	489 562	491 877
4 800	513 947	514 801
4 900	529 107	528 470
5 000	547 455	544 577

Zdroj: Vlastní výzkum

Nastavení pracovního napětí scintilačního detektoru

Dalším krokem pro přípravu přístroje pro měření bylo nastavení pracovního napětí scintilační detekční jednotky anti koincidenčního kanálu. Vyhodnocovací jednotka byla pro stanovení pracovního bodu nastavena přepínačem měřených hodnot na pozici OUT2, přepínačem zobrazovaných hodnot na pozici SC2. Čas měření byl ponechán na 60 sekund. Následně byla změřena a zaznamenána aktivita za zvyšujícího se napětí v intervalu 48 V. Napětí bylo měněno otáčením ovladače HV2 o 30 dílků. Hodnoty byly následně zaneseny do grafu. Hodnoty z měření jsou uvedeny v tabulce 9, graf je na obrázku 18. Správné pracovní napětí scintilačního detektoru je podle výrobce v oblasti, kde se nachází impulsy v intervalu 400–600 impulsů za minutu. Z naměřených hodnot bylo určeno pracovní napětí scintilačního detektoru na 896 V.



Obrázek 18: Graf scintilační jednotky. Zdroj: Vlastní výzkum.

Tabulka 9: Nastavení pracovního napětí scintilační sondy.

Napětí SPB 81 [V]	Počet impulsů
400	0
448	0
496	0
544	0
592	0
640	0
688	51
736	182
784	294
832	408
880	429
928	478
976	526
1 024	581
1 072	620
1 120	728
1 168	793
1 216	864
1 264	942
1 312	1 011
1 360	1 224
1 408	1 230
1 456	1 344
1 504	1 450
1 552	1 581
1 600	1 723
1 648	1 878

Zdroj: Vlastní výzkum

4.2 Stanovení spolehlivosti účinnosti stanovení pro stanovení objemové aktivity beta

4.2.1 Výsledky přístroje NA 6201

Výsledky měření aktivity z přístroje NA 6201 jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Měření s NA 6201.

	Chlorid draselný	etalon EM 145 X
Impulsy pozadí	4	
Impulsy měření č. 1	44	220 141
Impulsy měření č. 2	32	261 398
Impulsy měření č. 3	44	271 004
Impulsy měření č. 4	43	290 110
Impulsy měření č. 5	50	267 097
Impulsy měření č. 6	45	262 981

Zdroj: Vlastní výzkum

Účinnost stanovení chloridu draselného podle vztahu je uvedena v tabulce 11.

$$\eta = \frac{\frac{N_z}{t_z} - \frac{N_p}{t_p}}{14,4 \cdot m_z}$$

Tabulka 11: Účinnost stanovení NA 6201.

	Účinnost stanovení
Měření č. 1	0,140
Měření č. 2	0,098
Měření č. 3	0,140
Měření č. 4	0,137
Měření č. 5	0,161
Měření č. 6	0,144

Zdroj: Vlastní výzkum

V tabulce 12 a 13 jsou výsledky Deanova a Dixonova Q testu pro NA 6201

Tabulka 12: Deanův a Dixonův Q test pro účinnost stanovení chloridu draselného

Variační rozpětí R	0,063
Q minimální	0,586
Q maximální	0,270
Hodnota kritického poměru	0,560

Zdroj: Vlastní výzkum

Jelikož došlo k překročení hodnoty kritického poměru, byla nejnižší hodnota odstraněna a test opakován.

Tabulka 13: 2. Deanův a Dixonův Q test pro účinnost stanovení chloridu draselného

Variační rozpětí R	0,026
Q minimální	0,077
Q maximální	0,654
Hodnota kritického poměru	0,642

Zdroj: Vlastní výzkum

Jelikož došlo k překročení hodnoty kritického poměru i v druhém testu, lze výsledky měření považovat za nestabilní.

Účinnost stanovení etalonu typu EM 145 X je uvedena v tabulce 14. Aktivita etalonu v době měření byla stanovena na 13 341 Bq.

Tabulka 14: Účinnost stanovení etalonu.

	Účinnost stanovení
Měření č. 1	0,165
Měření č. 2	0,195
Měření č. 3	0,202
Měření č. 4	0,217
Měření č. 5	0,200
Měření č. 6	0,197

Zdroj: Vlastní výzkum

V tabulce 15 a 16 jsou výsledky Deanova a Dixonova Q testu pro NA 6201

Tabulka 15: Deanův a Dixonův Q test pro účinnost stanovení etalonu typu EM 145 X.

Variační rozpětí R	0,052
Q minimální	0,580
Q maximální	0,290
Hodnota kritického poměru	0,560

Zdroj: Vlastní výzkum

Jelikož došlo k překročení hodnoty kritického poměru, byla nejnižší hodnota odstraněna a test opakován.

Tabulka 16: 2. Deanův a Dixonův Q test pro účinnost stanovení etalonu typu EM 145 X.

Variační rozpětí R	0,022
Q minimální	0,090
Q maximální	0,682
Hodnota kritického poměru	0,642

Zdroj: Vlastní výzkum

Jelikož došlo k překročení hodnoty kritického poměru i v druhém testu, lze výsledky měření rovněž považovat za nestabilní.

4.2.2 Výsledky přístroje EMS 3

Výsledky měření aktivity z přístroje EMS 3 jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17: Výsledky měření s EMS 3.

	Chlorid draselný	Etalon EM 145 X
Impulsy pozadí	36	
Impulsy měření č. 1	138	509 626
Impulsy měření č. 2	159	615 020
Impulsy měření č. 3	143	593 674
Impulsy měření č. 4	170	573 663
Impulsy měření č. 5	160	546 981
Impulsy měření č. 6	166	525 636

Zdroj: Vlastní výzkum

Účinnost stanovení chloridu draselného podle vztahu je uvedena v tabulce 18.

$$\eta = \frac{\frac{N_z}{t_z} - \frac{N_p}{t_p}}{14,4 \cdot m_z}$$

Tabulka 18: Účinnost stanovení s EMS 3.

	Účinnost stanovení
Měření č. 1	0,396
Měření č. 2	0,434
Měření č. 3	0,378
Měření č. 4	0,472
Měření č. 5	0,437
Měření č. 6	0,458

Zdroj: Vlastní výzkum

Výsledky Deanova a Dixonova Q testu pro účinnost stanovení jsou uvedeny v tabulce 19 a 21.

Tabulka 19: 2. Deanův a Dixonův Q test pro účinnost stanovení chloridu draselného.

Variační rozpětí R	0,1
Q minimální	0,2
Q maximální	0,2
Hodnota kritického poměru	0,560

Zdroj: Vlastní výzkum.

Jelikož nedošlo k překročení hodnoty kritického poměru, jsou výsledky měření stabilní.

Účinnost stanovení etalonu je uvedena v tabulce 20.

Tabulka 20: Účinnost stanovení etalonu.

	Účinnost stanovení
Měření č. 1	0,382
Měření č. 2	0,461
Měření č. 3	0,445
Měření č. 4	0,430
Měření č. 5	0,410
Měření č. 6	0,394

Zdroj: Vlastní výzkum

Tabulka 21: 2. Deanův a Dixonův Q test pro účinnost stanovení etalonu typu EM 145 X.

Variační rozpětí R	0,08
Q minimální	0,15
Q maximální	0,20
Hodnota kritického poměru	0,560

Zdroj: Vlastní výzkum

Jelikož opět nedošlo k překročení hodnoty kritického poměru, jsou výsledky měření považovány za stabilní.

4.3 Měření celkové objemové aktivity beta

Celková objemová aktivita je z naměřených hodnot vypočítána vztahem

$$C_{beta} = \frac{\frac{N_v}{t_v} - \frac{N_p}{t_v}}{\eta \cdot V \cdot R}$$

N_v – počet impulsů za celkovou dobu měření vzorku

N_p – počet impulsů za celkovou dobu měření pozadí

t_v – čas měření vzorku v sekundách

t_p – čas měření pozadí v sekundách

V – objem vzorku vody v litrech zpracovaného na odparek

R – korekční faktor, který získáme podle vztahu:

$$R = \frac{m_2}{m_1}$$

m_2 – hmotnost zbytku po žíhání objemu V v gramech

m_1 – hmotnost navážky zbytku pro měření v gramech

η – účinnost měření, kterou získáme podle vztahu

$$\eta = \frac{\frac{N_z}{t_z} - \frac{N_p}{t_p}}{14,4 \cdot m_z}$$

N_z – počet impulsů za celkovou dobu měření preparátu KCl

t_z – celková doba měření v sekundách

m_z – hmotnost KCl pro stanovení účinnosti v gramech

14,4 – součin zastoupení přeměny beta s emisí elektronů ^{40}K a měrné aktivity ^{40}K v KCl

N_p – počet impulsů za celkovou dobu měření pozadí

t_p – čas měření pozadí v sekundách

Naměřené hodnoty pro výpočet celkové objemové aktivity jsou uvedeny v tabulce 22.

Tabulka 22: Hodnoty pro výpočet celkové objemové aktivity beta.

EMS 3	N EMS3	N NA6201	Čas	Navážka	Hmotnost po žíhání
Odparek Tábor	1484	398	500	0,198	0,812
Odparek Lišov	1410	322	500	0,201	0,966
KCl	713	175	500	0,193	n/a
Prázdná miska	185	21	500	n/a	n/a

Zdroj: Vlastní výzkum

Výpočtem získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23: Výsledné hodnoty měření.

Použitý přístroj	C _{beta} Tábor	C _{beta} Lišov	Účinnost stanovení
NA6201	0,847 Bq/l	0,573 Bq/l	0,11 s ⁻¹ Bq ⁻¹
EMS3	0,833 Bq/l	0,677 Bq/l	0,380 s ⁻¹ Bq ⁻¹

Zdroj: Vlastní výzkum

5 Diskuse

Měřič nízkých aktivit alfa-beta NA 6201 je komplexním zařízením, jehož dílčí prvky lze zaměřovat, což dalo v případě laboratoře dozimetrie ZSF, ve které se nachází dva měřiče, možnost jednotlivé prvky porovnat, posoudit, a v případě problémů identifikovat možnou příčinu.

Z uživatelského hlediska je vyhodnocovací jednotka po prvotním seznámení s ovládacími prvky s pomocí návodu snadná na obsluhu a po nastavení jednotky je samotné měření na vyhodnocovací jednotce ovládané jedním tlačítkem.

Vyhodnocovací jednotka je však v kontextu dnešní doby poměrně zastaralá. Moderní vyhodnocovací jednotky jsou propojeny s osobními počítači a množství funkcí je přes grafické prostředí ovládáno, některé z nich jsou plně automatizované. V kontextu výuky může být zpomalení procesu a provádění všech kroků manuálně vhodné pro jejich demonstraci a pochopení.

V porovnání vyhodnocovací jednotky NA6201-I s vyhodnocovací jednotkou měřiče alfa – beta automat typ EMS 3, na kterém bylo prováděno srovnávací měření, disponuje EMS3 automatizovaným stanovením pracovního napětí, a získané výsledky jsou již v digitální podobě, což eliminuje možnost uživatelské chyby při odečítání impulsů.

Při hodnocení stavu vyhodnocovacích jednotek jsem při zkoušení funkčnosti regulace vysokého napětí pro oba detektory zjistil, že se výsledky u vyhodnocovacích jednotek liší. Naměřené hodnoty z proporcionálního detektoru byly u obou jednotek podobné. Rozdílnost mohlo způsobit delší proplachování metanem, a tedy zlepšená detekční účinnost, a také rozdílné úrovně šumu ve vyhodnocovacích jednotkách. Výsledky ze scintilačního detektoru byly velmi rozdílné. Výsledky ze scintilačního detektoru z vyhodnocovací jednotky XO-109 byly po překročení napětí 800 V konstantní a v hodnotách očekávaných při měření po dobu 6x delší. Možnou příčinou je nefunkční regulace vysokého napětí pro scintilační detektor, či velký šum způsobený poškozením vnitřních komponent vyhodnocovací jednotky.

Detekční jednotka i její jednotlivé části jsou z uživatelského hlediska vyhovující, některé dílčí úkony při práci s ní však mohou být překážkou při jejím dalším využití. Komplikované je například manuální nasouvání vzorků pod detektor. Zde je potřeba udržovat přehled v počtu zasouvaných nosičů vzorků, z čehož je odvozeno, který vzorek je pod detektorem. Detekční jednotka jako celek je využitelná pro měření menšího množství vzorků. Moderní detekční jednotky jako například EMS 3 využívají automatické posouvání misek pod detektor. Další překážkou pro využití detekční jednotky, převážně pro výuku, je časová náročnost na přípravu přístroje. Scintilační detektor potřebuje minimálně 15 minut pro ustálení po zapnutí zdroje vysokého napětí, průtokový proporcionální detektor je potřeba před zahájením měření proplachovat metanem minimálně 30 minut.

Samostatnou pozornost je potřeba věnovat detektoru pro hlavní kanál v detekční jednotce. Průtokový proporcionální detektor POB 302 je stále využíván v laboratořích v České republice (Sedlářová et al., 2016) a v případě správné funkce je z hlediska detekčních vlastností vyhovující. Asi největší překážkou pro běžné využívání tohoto typu detektoru, a tím pádem NA 6201 jako celku, je bezpečnost používání metanu.

Metan je vysoce hořlavý plyn dodávaný v tlakových lahvích různých objemů. Unikající metan může působit jako zdroj rizika výbuchu. Je ovšem nutné si uvědomit, že metan je výbušný pouze mezi koncentracemi – LEL (Lower explosive limit) 5,4 % a UEL (Upper explosive limit) 17 %. V případě laboratoře dozimetrie ZSF, která má cca 60 m³, by muselo dojít k úniku minimálně 3,4 m³ metanu. Pokud by k úniku došlo neuzavřením tlakové lahve a plyn by unikl rychlostí 90ml.m⁻¹, spodního explozivního limitu by bylo dosaženo za 26 dní. Pravděpodobnějším nebezpečím je tak patrně převržení lahve a uražení ventilu. Tomu lze zabránit upevněním lahve na vhodné místo, což bylo provedeno při její instalaci. Pro absolutní jistotu je možné dozimetrickou laboratoř vybavit detektorem metanu s akustickou signalizací.

Další nevýhodou detektoru POB 302 pro jeho využívání při výuce je přecházení mezi měřeními aktivity alfa a beta. Změna se provádí nasazením, popřípadě odstraněním, tenké hliníkové folie, která je náchylná na poškození. Možným řešením v případě dalšího využívání je zprovoznění druhé detekční jednotky a každou využívat specificky k měření jednoho druhu záření.

Malou nevýhodou měřiče jako celku, související s jeho stářím, je stav a struktura návodu, který počítá s pravidelným využíváním přístroje a jeho znalostí. V rámci přehlednosti a správného nastavení měřiče pro jednotlivé úkony jako nastavení pracovních bodů detektorů či měření aktivity beta a alfa studenty je vhodné vypracovat pracovní postupy. Ty mohou být v případě vyřešení problému s pracovním napětím použity studenty při praktické výuce i výzkumu.

V praktické části této diplomové práce se měřič NA 6201 podařilo zprovoznit po krok nastavení pracovního napětí. V tomto kroku jsem narazil na problém neustálení impulsů s narůstajícím napětím průtokového proporcionálního detektoru. Bez ustálení nelze přesně určit pracovní napětí detektoru a nelze s jistotou předpokládat, zda pracuje v oblasti proporcionality, a zda výsledky odpovídají skutečné aktivitě měřených vzorků. Pro porovnání s obdobnými přístroji pro měření alfa a beta aktivity bylo provedeno vzorové měření celkové objemové aktivity beta vzorků vody a deanův a dixonův Q test pro účinnosti stanovení používaných standardů – chloridu draselného a etalonu obsahující ^{90}Sr .

Účinnost stanovení pro standardy se mezi porovnávanými přístroji značně lišila, NA 6201 v intervalu $0,09 - 0,28 \text{ s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$ a EMS 3 v intervalu $0,384 - 0,47 \text{ s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$. Deanův a dixonův Q test prokázal, že měřič NA 6201 není schopen stabilně měřit aktivitu beta. Účinnost stanovení obdobných detektorů při stanovení celkové objemové aktivity beta, při využití chloridu draselného jako standardu se pohybuje v intervalu $0,25 - 0,39 \text{ s}^{-1}\text{Bq}^{-1}$ (Sedlářová et al., 2016).

V případě měření aktivity beta v bezokénkovém režimu se jako možná příčina nestability měření nabízí špatný průtok metanu, na který by ukazovala absence probublávání v minerálním oleji v kapalinovém uzávěru. V aparatuře zajišťující průtok metanu jsou nejpravděpodobnějšími místy úniku spoje na přetlakovém ventilu, na přívodu do detekční jednotky a na přívodu do kapalinového uzávěru. Tyto spoje byly ovšem překontrolovány a nejevily známky úniku. Dalším možným místem úniku je protržená folie okénka, ta byla pohledem překontrolována a případný únik metanu perforací by pravděpodobně měření neovlivnil, protože v režimu pro měření alfa aktivity dochází k volnému prostupu prostorem měniče vzorků.

Plnému využití přístroje brání chybějící zázemí pro přípravu vzorků. Dovybavení laboratoře potřebným zařízením by bylo finančně nákladné i prostorově neproveditelné. Příprava vzorků v laboratořích SÚRO nebo Zemědělské fakulty JU a jejich převoz do laboratoře dozimetrie by vystavil vzorky zbytečnému riziku kontaminace či jinému znehodnocení. Lepším alternativním řešením by bylo rozšíření spolupráce s katedrou chemie Zemědělské fakulty JU a přesunutí NA 6201 do laboratoří v budově ZO. Laboratoře katedry chemie mají potřebné přístrojové vybavení pro přípravu vzorků, jako jsou analytické váhy, muflová pec a odpařovací desky. Laboratoře dále disponují potřebným zázemím i chemickými látkami a vyučující a personál mají zkušenost s dílčími činnostmi pro zpracování vzorků. V laboratořích jsou využívány plyny z tlakových lahví včetně hořlavých, což by usnadnilo zajištění provozu přístroje.

V případě tohoto řešení by se práce s přístrojem a příprava vzorků mohly stát součástí výuky a praktických cvičení. Popřípadě by zde mohla být prováděna výzkumná činnost v oblasti radioaktivity životního prostředí nejen v rámci bakalářských a diplomových prací.

6 Závěr

Cíli této diplomové práce bylo zprovoznění měřiče nízkých aktivit alfa-beta NA6201 a ověření jeho funkce zkušebním provozem. Zprovoznění proběhlo zhodnocením dílčích komponent, vybráním těch nejvhodnějších a zapojení do kompletní sestavy. Zprovoznění zahrnovalo zajištění chybějícího příslušenství pro funkci průtokového proporcionálního detektoru. Zkušební provoz zahrnoval stanovení pracovního napětí a srovnávací měření příkladných vzorků.

Na výzkumné otázky můžeme odpovědět takto: Měřič nízkých aktivit alfa-beta NA6201 nacházející se v laboratoři dozimetrie Zdravotně sociální fakulty Jihočeské Univerzity není v současném stavu schopen spolehlivě stanovit celkovou beta aktivitu příkladných vzorků vod.

Zpracování vzorků také sloužilo k posouzení potenciálu měřiče nízkých aktivit alfa-beta NA6201 pro další využití při výuce a výzkumu. Využití kromě nestability stanovení aktivit brání chybějící laboratorní zázemí pro přípravu vzorků a problematika využívání metanu.

7 Seznam použitých zdrojů

1. ALIAGA KELLY, D. a W. BOYES, 2010. Nuclear Instrumentation Technology. Instrumentation Reference Book [online]. Elsevier, 2010, s. 521-547 [cit. 2021-4-28]. ISBN 9780750683081. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-7506-8308-1.00029-2
2. ATWOOD, David A., 2010. Radionuclides in the Environment. ISBN 978-0-470-71434-8.
3. BORREGO-SOTO, Gissela, Rocío ORTIZ-LÓPEZ a Augusto ROJAS-MARTÍNEZ, 2015. Ionizing radiation-induced DNA injury and damage detection in patients with breast cancer. Genetics and Molecular Biology [online]. 38(4), 420-432 [cit. 2021-5-3]. ISSN 1678-4685. Dostupné z: doi:10.1590/S1415-475738420150019
4. Buesseler KO, Jayne SR, Fisher NS, et al. Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan. Proc Natl Acad Sci U S A. 2012;109(16):5984-5988. doi:10.1073/pnas.1120794109
5. CANTONE, Marie Claire a Christoph HOESCHEN, ed., 2011. Radiation Physics for Nuclear Medicine [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg [cit. 2021-04-14]. ISBN 978-3-642-11326-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-11327-7
6. CLAY, R, 2001. Cold war, hot nukes: legacy of an era. Environmental Health Perspectives [online]. 109(4) [cit. 2021-02-23]. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.109-a162
7. CLEMENTS, Bruce a Julie CASANI, 2016. Disasters and Public Health [online]. Second Edition. Butterworth-Heinemann [cit. 2021-4-28]. ISBN 9780128019894.
8. COLLUM, Bill, 2017. Nuclear Facilities: A Designer's Guide. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-08-101938-2.
9. CONNOR, Nick, 2019. What is Proportional Region – Ionization Detector – Definition. Radiation Dosimetry [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-proportional-region-ionization-detector-definition/>
10. Counting systems. Radiology Key [online]. 2016 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://radiologykey.com/counting-systems/>
11. ČSN 75 7612 Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity beta
12. FAANU, Augustine, James H. EPHRAIM a Emmanuel O. DARKO, 2011. Assessment of public exposure to naturally occurring radioactive materials from mining and mineral processing activities of Tarkwa Goldmine in Ghana. Environmental Monitoring and Assessment [online]. 180(1-4), 15-29 [cit. 2021-5-9]. ISSN 0167-6369. Dostupné z: doi:10.1007/s10661-010-1769-9
13. GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA, 2011. Detektory ionizujícího záření. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-04710-1.
14. GIROLAMO, B.D. a M. NESSI, 2014. Silicon Trackers. Comprehensive Biomedical Physics [online]. Elsevier, 2014, s. 409-418 [cit. 2021-4-24]. ISBN 9780444536334. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-53632-7.00628-6
15. HÁLA, Jiří. Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. První vydání. Nakladatelství Konvoj, spol. s.r.o.: Brno, 1998. 311 s. ISBN 80-85615-56-8.
16. HASEGAWA, A., T. OHIRA, M. MAEDA, S. YASUMURA a K. TANIGAWA, 2016. Emergency Responses and Health Consequences after the Fukushima Accident; Evacuation and Relocation. Clinical Oncology [online]. 28(4), 237-244 [cit. 2021-02-23]. ISSN 09366555. Dostupné z: doi:10.1016/j.clon.2016.01.002

17. How Geiger Counters Work and Detect Nuclear Radiation. In: *Imagesco* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.imagesco.com/articles/geiger/fig2.jpg>
18. CHEN, Guan-Yu a Yue-Feng WANG, 2017. Soft X-ray detectors for pulsar navigation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [online]. 69 [cit. 2021-4-28]. ISSN 1755-1307. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/69/1/012099
19. CHERRY, Simon R., Michael E. PHELPS a James A. SORENSON, 2012. Physics in nuclear medicine. 4th ed. Philadelphia: Elsevier/Saunders. ISBN 978-1-4160-5198-5
20. Instrumentation tools: Ionization chamber Principle, 2021. Instrumentation tools [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/ionization-chamber-principle/>
21. ISHII, Keizo, 2006. Continuous X-rays produced in light-ion-atom collisions. Radiation Physics and Chemistry. 75(10), 1135-1163. ISSN 0969806X. Dostupné z: doi:10.1016/j.radphyschem.2006.04.008
22. KÓNYA, József a Noémi NAGY, 2012. Nuclear and Radiochemistry. London: Elsevier. ISBN 978-0-12-391430-9.
23. KUNA, Pavel a Leoš NAVRÁTIL, 2005. *Klinická radiobiologie*. Praha: Manus. ISBN 80-865-7109-2.
24. L'ANNUNZIATA, Michael F., 2020. Solid scintillation analysis. Handbook of Radioactivity Analysis [online]. 4th. Elsevier, 2020, s. 899-1045 [cit. 2021-4-25]. ISBN 9780128143971. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-814397-1.00009-1
25. LEHTO, Jukka, 2017. *Basicis of nuclear physics and of radiation detection and measurment*. Helsinki.
26. LUIG, Heribert, Albrecht KELLERER a Jurgen GRIEBEL, 2011. Radionuclides: 1. Introduction. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
27. MARTIN, Alan, Sam HARBISON, Karen BEACH a Peter COLE, 2019. An Introduction to Radiation Protection. Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-138-33307-9.
28. MARTIN, James E., 2013. Physics for Radiation Protection. 3. Wiley-VCH. ISBN 9783527411764.
29. MASTERSON, Robert, 2018. Introduction to nuclear reactor physics. Boca Raton: Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4987-5148-3.
30. Měříč nízkých aktivity alfa-beta NA 6201: návrh návodu k údržbě a obsluze, 1983. Tesla, výzkumný ústav přístrojů jaderné techniky [cit. 2021-5-3].
31. MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY. The Subcommittee on Handling of the ALPS Treated Water Report [online]. 2020 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20200210_alps.pdf
32. MURRAY, Raymond a Keith HOLBERT, 2020. Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes [online]. Eighth Edition. San Diego, CA: Elsevier [cit. 2021-4-28]. ISBN 9780128128817. Dostupné z: doi:10.1016/C2016-0-04041-X
33. Národní registr pramenů a studánek [online]. Mladí ochránci přírody, 2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.estudanky.eu/>
34. NATALE, Simone, 2011. A Cosmology of Invisible Fluids: Wireless, X-Rays, and Psychical Research Around 1900. Canadian Journal of Communication. 36(2). ISSN 1499-6642. Dostupné z: doi:10.22230/cjc.2011v36n2a2368

35. O radiačním monitorování: 6.2. voda. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/aplikace/monras/?lng=cs_CZ
36. Podrobné informace o RADONU v používané vodě. Státní ústav radiační ochrany v.v.i [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/radon-ve-vode/podrobne-informace-o-radonu-v-pouzivane-vode>
37. RAHMAN, Shahinur, Wayne D. HUTCHISON a Heiko TIMMERS, 2020. Measurements of Scintillation Light Yield Non-proportionality in NaI(Tl) 1 Detector.
38. REISZ, Julie A., Nidhi BANSAL, Jiang QIAN, Weiling ZHAO a Cristina M. FURDUI, 2014. Effects of Ionizing Radiation on Biological Molecules—Mechanisms of Damage and Emerging Methods of Detection [online]. 21(2), 260-292 [cit. 2021-5-3]. ISSN 1523-0864. Dostupné z: doi:10.1089/ars.2013.5489
39. SACKS, Bill, Gregory MEYERSON a Jeffry A. SIEGEL, 2016. Epidemiology Without Biology: False Paradigms, Unfounded Assumptions, and Specious Statistics in Radiation Science. Biological Theory. Springer, (11), 69-101. Dostupné z: doi:10.1007/s13752-016-0244-4.
40. SEDLÁŘOVÁ, B., HANSLÍK, E. a JURANOVÁ, E. Rychlá metoda stanovení celkové objemové aktivity beta. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 2016, roč. 58, č. 1, str. 28–33. ISSN 0322-8916
41. STABIN, Michael G., 2010. Radiation Protection and Dosimetry: An Introduction to Health Physics. 4th edition. Springer. ISBN 978-3527411764.
42. STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST, 2017. Doporučení: Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu a v balené vodě. DR-RO-5.1(Rev. 0.0). Praha.
43. STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST, 2017. Doporučení: Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu a v balené vodě. DR-RO-5.1(Rev. 0.0). Praha.
44. SUSLOVA, K G, S A ROMANOV, A V EFIMOV, A B SOKOLOVA, M SNEVE a G SMITH, 2015. Dynamics of body burdens and doses due to internal irradiation from intakes of long-lived radionuclides by residents of Ozyorsk situated near Mayak PA. Journal of Radiological Protection [online]. 35(4), 789-818 [cit. 2021-04-22]. ISSN 0952-4746. Dostupné z: doi:10.1088/0952-4746/35/4/789
45. THOENNESSEN, Michael, 2016. The Discovery of Isotopes [online]. Cham: Springer International Publishing [cit. 2021-04-22]. ISBN 978-3-319-31761-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-31763-2
46. THORNTON, Stephen T. a Andrew REX, 2013. Modern Physics for Scientists and Engineers. 4th. Boston, MA: Cengage Learning. ISBN 978-1133103721
47. Vyhláška č. 360/2016 Sb. o monitorování radiační situace, 2016. In: Sbíрка zákonů České republiky. částka 143. ISSN 1211-1244.
48. Vyhláška č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, 2016. In: Sbíрка zákonů České republiky. částka 172. ISSN 1211-1244.
49. WAGNER, Vladimír, 2021. Tritiová voda z Fukušimy I skončí v oceánu. Osel [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/11694-tritiova-voda-z-fukusimy-i-skonci-v-oceanu.html>
50. YUE, A. T., M. S. DEWEY, D. M. GILLIAM, G. L. GREENE, A. B. LAPTEV, J. S. NICO, W. M. SNOW a F. E. WIETFELDT, 2013. Improved Determination

- of the Neutron Lifetime. *Physical Review Letters* [online]. 111(22) [cit. 2021-04-18]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.111.222501
51. Zákon č. 263/2016 Sb. Atomový zákon, 2016. In: *Sbírka zákonů České republiky*. částka 102. ISSN 1211-1244.

8 Seznam zkratek

CZT detektory – Kadmium-Zinek-Teluridové detektory

ČR – Česká republika

DNA – deoxyribonukleová kyselina

JU – Jihočeská univerzita

LEL – Lower explosive limit (Dolní mez výbušnosti)

MVS – mean square voltage

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

UEL – Upper explosive limit (horní mez výbušnosti)

ZSF – Zdravotně sociální fakulta