



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta biomedicínského inženýrství  
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**

Nakládání s radioaktivními odpady na pracovišti nukleární medicíny

Radioactive Waste Management at Nuclear Medicine Workplace

Bakalářská práce

Studijní program: Specializace ve zdravotnictví

Studijní obor: Radiologický asistent

Vedoucí práce: Ing. Jana Hudzietzová

**Markéta Jenčová**

---

**Kladno 2018**

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Akademický rok: 2017/2018

## Z a d á n í   b a k a l á ř s k é   p r á c e

Student: **Markéta Jenčová**  
Obor: Radiologický asistent  
Téma: **Nakládání s radioaktivními odpady na pracovišti nukleární medicíny**  
Téma anglicky: Radioactive Waste Management at Nuclear Medicine Workplace

Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :

Předmětem bakalářské práce bude problematika radioaktivních odpadů na oddělení nukleární medicíny. Práce bude rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část se bude zabývat obecnou problematikou otevřených zářičů používaných na pracovištích nukleární medicíny a dále nakládáním, monitorováním a likvidací radioaktivních odpadů na oddělení nukleární medicíny.

V praktické části studentka popíše způsob nakládání s radioaktivním odpadem na vybraném pracovišti nukleární medicíny a provede vyhodnocení experimentálního měření vybraných radioaktivních odpadů z konkrétního pracoviště.

Seznam odborné literatury:

- [1] KORANDA, Pavel, Nukleární medicína, Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, ISBN 9788024440316
- [2] KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL, Nukleární medicína, ed. 6., V Praze: P3K, 2015, ISBN 9788087343548
- [3] SEIDL, Zdeněk, Radiologie pro studium i praxi, ed. 1., Praha: Grada, 2012, 368 s., ISBN 978-80-247-4108-6

Zadání platné do: 20.09.2019

Vedoucí: Ing. Jana Hudzietzová

Konzultant: doc. Ing. František Podzimek, CSc.

  
vedoucí katedry / pracoviště

  
děkan

V Kladně dne 10.04.2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Nakládání s radioaktivními odpady na pracovišti nukleární medicíny vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

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

V Kladně dne 16.05.2018

.....  
podpis

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat paní Ing. Janě Hudzietzové, za její ochotu, velmi cenné rady a trpělivost a za čas strávený vedením mé bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat panu doc. Ing. Františkovi Podzimkovi, CSc., který mi jako konzultant předal cenné odborné rady. Nakonec bych chtěla poděkovat paní RNDr. Drahomíře Pecinové, PhD a panu Janovi Paškovi za ochotu a vstřícnost při realizaci praktické části práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou nakládání s radioaktivními odpady na pracovišti nukleární medicíny.

V teoretické části je popsána výroba radionuklidů pro potřeby nukleární medicíny spolu s nejčastěji používanými radiofarmaky. Následující část práce se týká nakládání, monitorování a uvolňování radioaktivního odpadu na pracovišti nukleární medicíny. Teoretická část práce je zakončena popisem radiační ochrany na oddělení nukleární medicíny a programem monitorování.

V praktické části je popsáno vybrané pracoviště nukleární medicíny z hlediska nakládání s radioaktivními odpady na jednotlivých úsecích oddělení. Zároveň je v této části bakalářské práce provedeno vyhodnocení dat pravidelného rutinního monitorování vymíracích jímek a odebraných vzorků odpadní vody z vymíracích jímek.

## **Klíčová slova**

radiofarmaka; radioaktivní odpad; radiační ochrana; nukleární medicína

## **Abstract**

The aim of this bachelor thesis is to explain the problem of radioactive waste management at nuclear medicine workplace.

In the first part there are presented the methods of radionuclide production for nuclear medicine and the most frequent use of radiopharmaceuticals. The next part is aimed to handling, monitoring and releasing of radioactive waste at nuclear medicine workplace. The last part deals with the description of radiation protection at nuclear medicine workplace and a radiation monitoring programme.

In the practical part there is presented a nuclear medicine workplace from the perspective of radioactive waste management in the particular department sections. Further, the data evaluation of regular monitoring of radioactive waste tanks, as well as taking the samples from the radioactive waste tanks is accomplished.

## **Keywords**

radiopharmaceuticals; radioactive waste; radiation protection; nuclear medicine.

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Současný stav řešené problematiky .....	10
2.1	Radiofarmaka .....	10
2.1.1	Nejčastěji využívané radionuklidy .....	10
2.1.2	Výroba radionuklidů .....	12
2.1.3	Nejčastěji používaná radiofarmaka .....	14
2.2	Radioaktivní odpad.....	15
2.2.1	Dělení radioaktivních odpadů .....	16
2.2.2	Nakládání s radioaktivními odpady na pracovištích nukleární medicíny .....	17
2.2.3	Monitorování radioaktivních odpadů na pracovištích nukleární medicíny .....	20
2.2.4	Likvidace a uvolňování radioaktivního odpadu.....	21
2.3	Radiační ochrana na oddělení nukleární medicíny .....	23
2.3.1	Radiační ochrana pracovníků.....	24
2.3.2	Radiační ochrana pacientů.....	25
2.3.3	Radiační limity a uspořádání pracovišť.....	26
2.4	Program monitorování .....	27
2.4.1	Osobní monitorování.....	28
2.4.2	Monitorování pracoviště .....	29
2.4.3	Monitorování výpustí.....	29
2.4.4	Monitorování okolí pracoviště .....	30
3	Cíl práce.....	32
4	Metodika.....	33

4.1	Popis způsobu nakládání s radioaktivním odpadem na vybraném pracovišti nukleární medicíny .....	33
4.2	Zpracování dat pravidelného rutinního monitorování vymíracích jímek za vybrané časové období .....	34
4.3	Popis experimentálního měření.....	34
5	Výsledky .....	41
5.1	Popis vybraného pracoviště nukleární medicíny .....	41
5.1.1	Diagnostická část pracoviště.....	41
5.1.2	Lůžková část pracoviště .....	49
5.1.3	Vymírací jímký .....	52
5.2	Pravidelné rutinní monitorování vymíracích jímek .....	54
5.3	Experimentální měření na vybraném oddělení nukleární medicíny .....	58
6	Diskuze .....	60
7	Závěr .....	66
8	Seznam použitých zkratk.....	67
9	Bibliografie .....	68
10	Seznam použitých obrázků .....	71
11	Seznamu použitých tabulek .....	72



# 1 ÚVOD

Obor nukleární medicína hraje v dnešní době nezastupitelnou roli v diagnostice i terapii pomocí otevřených zářičů. V některých případech jsou diagnostické metody nukleární medicíny využívány jako metoda první volby, jindy se kvůli větší radiační zátěži pacientů volí metody jiné. V obou případech ale nukleární medicína přináší významné informace o výskytu, rozvoji či úspěšnosti léčby mnoha onemocnění. Terapie vybraných nádorových onemocnění pomocí otevřených zářičů je v mnoha případech nenahraditelná jinými metodami léčby.

Na všech pracovištích nukleární medicíny je díky přítomnosti ionizujícího záření řada opatření a je nutné dodržovat příslušné právní předpisy, které s využíváním zdrojů ionizujícího záření souvisí. Velkou pozornost zde musíme věnovat radioaktivnímu odpadu, který vzniká každodenní činností pracovníků (radiofarmaceutů, radiologických asistentů, lékařů aj.) i samotných pacientů.

A právě tímto radioaktivním odpadem se v bakalářské práci budeme zabývat. V teoretické části práce nejdříve popíšeme vznik radionuklidů, poté se budeme zabývat radiofarmaky, radiační ochranou na pracovištích nukleární medicíny a radioaktivním odpadem od jeho vzniku až po jeho likvidaci. V praktické části bakalářské práce popíšeme nakládání radioaktivního odpadu na vybraném pracovišti nukleární medicíny a provedeme vyhodnocení poskytnutých dat pravidelného rutinního monitorování vymíracích jímek spolu s vyhodnocením odběru vzorků odpadních vod z vymíracích jímek.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Ionizující záření nachází uplatnění ve velkém množství odvětví. Nezastupitelnou roli má v průmyslu (např. průmyslová defektoskopie), zemědělství (šlechtitelství) či v ochraně životního prostředí (1). Z hlediska výběru tématu bakalářské práce je nejdůležitější oblastí zdravotnictví, kde má využití ZIZ (zdrojů ionizujícího záření) nezastupitelnou roli. Jedná se především o obory radiodiagnostika a radio terapie, kde je ZIZ ve většině případů mimo tělo pacienta (pozn. výjimka brachy terapie) a o obor nukleární medicína, kde se jako zdroj ionizujícího záření využívají radiofarmaka vpravovaná do těla pacienta.

### 2.1 Radiofarmaka

V nukleární medicíně využíváme otevřených zářičů, což jsou takové zdroje záření, které nevyhovují podmínkám kladeným na uzavřené zářiče (zářič zapouzdřený takovým způsobem, aby nedošlo k úniku RN (radionuklidu) do okolí, kdy se jeho těsnost ověřuje specifickými zkouškami (2)). Molekula radiofarmaka je složena ze dvou komponent. První je část vazebná (chemická sloučenina), která se má za úkol navázat na dané tkáňové a buněčné struktury, a poté se z těla vylučuje. Druhou částí je radionuklid, který se váže na sloučeninu a zviditelňuje ji pro účely zobrazení patologie (3). Radiofarmakum může být buď jako samostatný radionuklid (např.  $^{99m}\text{Tc}$  značené erythrocyty) nebo se radionuklidem značí sloučenina (např.  $^{99m}\text{Tc}$  pertechnetát). Také můžeme radionuklidem značit biologické látky, nejčastěji autologní krevní elementy (4).

#### 2.1.1 Nejčastěji využívané radionuklidy

Otevřené zářiče používáme především ve formě roztoků, prášků a plynů. Radioaktivní preparát můžeme pipetovat a odebírat pouze potřebný objem. Radionuklid volíme podle toho, zda ho použijeme pro diagnostické nebo pro terapeutické účely. Základními určujícími vlastnostmi RN jsou fyzikální poločas přeměny,

druh emitovaného záření a energie (5). K diagnostickým účelům jsou nejvhodnější radionuklidy s krátkým poločasem přeměny (hodiny, dny), emisí záření  $\gamma$  (co nejméně  $\alpha$  a  $\beta$  záření) a vhodnou energií (50 - 300 keV). Pro radiofarmaka, která se využívají pro PET (pozitronová emisní tomografie) je podmínkou emise záření  $\beta^+$ . Mezi požadavky na terapeutická radiofarmaka patří poločas přeměny v řádech dní, emise záření  $\beta^-$ ,  $\alpha$  a Augerovy  $e^-$  a energie by měla být v řádu 100 až několik 1 000 keV (2), (3), (5), (6).

Tabulka 1 shrnuje nejužívanější radionuklidy používané pro terapeutické účely v nukleární medicíně (2), (3), (5), (6).

Tabulka 1 Nejčastější radionuklidy používané k léčbě pomocí otevřených zářičů

Název radionuklidu	Chemická značka radionuklidu	Typ záření	Energie [keV] a zastoupení [%]	Poločas rozpadu [hod]	Výroba
Jód	$^{131}\text{I}$	$\beta$ a $\gamma$	606 (90), 365 (82)	192,96	jaderný reaktor
Samarium	$^{153}\text{Sm}$	$\beta^-$ a $\gamma$	703 (44), 41 (49)	46,8	jaderný reaktor
Stroncium	$^{89}\text{Sr}$	$\beta^-$	1492 (100)	1212	jaderný reaktor
Yttrium	$^{90}\text{Y}$	$\beta^-$	2284 (100)	64	RN* generátor
Jód	$^{123}\text{I}$	$\gamma$	159 (83)	13,3	jaderný reaktor

\*RN – radionuklidový

V Tabulka 2 jsou uvedeny nejčastější radionuklidy používané pro diagnostická vyšetření na pracovištích nukleární medicíny (2), (3), (5), (6).

Tabulka 2 Nejčastěji používané radionuklidy v diagnostice pomocí otevřených zářičů

Název radionuklidu	Chemická značka radionuklidu	Typ záření	Energie záření [keV] a zastoupení [%]	Poločas přeměny [hod]	Výroba
Technecium	<sup>99m</sup> Tc	γ	140 (89)	6,02	RNG*
Fluor	<sup>18</sup> F	β <sup>+</sup>	511 (194)	1,83	cyklotron
Jód	<sup>123</sup> I	γ	159 (83)	13,2	cyklotron
Galium	<sup>67</sup> Ga	γ	93 (40)	48	RNG*
					cyklotron
Krypton	<sup>81m</sup> Kr	γ	190 (67)	0,004	RNG*
Indium	<sup>111</sup> In	γ	245 (94)	67,92	cyklotron
Jód	<sup>131</sup> I	γ a β	365 (82), 606(90)	192,96	JR**
Thallium	<sup>201</sup> Tl	γ a CHRZ***	167 (10), 70 (74)	73,2	cyklotron
Uhlík	<sup>11</sup> C	β	511 (100)	0,34	cyklotron
Kyslík	<sup>15</sup> O	β	511(100)	0,034	cyklotron
Dusík	<sup>13</sup> N	β	511(100)	0,167	cyklotron
Chrom	<sup>51</sup> Cr	γ	320 (10)	664,8	JR**

\*RNG – radionuklidový generátor

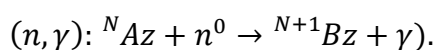
\*\*JR – jaderný reaktor

\*\*\*CHRZ – charakteristické záření

### 2.1.2 Výroba radionuklidů

#### Jaderný reaktor

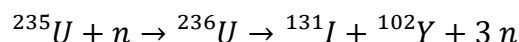
K nejčastějším metodám výroby radionuklidů v jaderném reaktoru patří ozařování jader neutrony. Mezi nejobvyklejší reakce neutronu v jádře patří neutronový záchyt



Během ozařování neutrony vznikají jádra s nadbytkem neutronů, které jsou β-radioaktivní. Nejčastějšími reakcemi výroby radionuklidů ozařováním neutrony

jsou  ${}^6\text{Li}$  ( $n, \alpha$ )  ${}^3\text{H}$  nebo  ${}^{98}\text{Mo}$  ( $n, \gamma$ )  ${}^{99}\text{Mo}$ . Příkladem radionuklidů získaných aktivací tepelnými neutrony jsou  ${}^{131}\text{I}$ ,  ${}^{123}\text{I}$  nebo  ${}^{59}\text{Fe}$ .

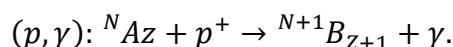
Další způsob výroby radionuklidů v reaktoru je ozařování uranu  ${}^{235}\text{U}$  neutrony, které vyvolá štěpení jader uranu na jádra menší velikosti, která jsou radioaktivní, a to například



a další. Z takto vzniklých štěpných produktů se následně separují potřebné radionuklidy jako je  ${}^{131}\text{I}$  a  ${}^{99}\text{Mo}$  (2) (5) (6).

### ***Urychlovače částic-cyklotrony***

Tato zařízení jsou využívána při výrobě pozitronových  $\beta^+$  radionuklidů. Pro urychlení protonu, aby pronikl do jádra, je zapotřebí jeho urychlení na vysokou energii (100 keV až několik MeV). K tomuto účelu jsou využívány cyklotrony, které urychlují protony prostřednictvím elektromagnetických sil, a to mnoha oběhy po spirále. Díky magnetickému poli je posléze svazek protonů vyveden z této dráhy a dopadá na vhodný terčíkový materiál. Probíhá zde například radiační záchyt protonu



Cyklotrony můžeme rozdělit na velké, kde se získávají radionuklidy jako  ${}^{67}\text{Ga}$ ,  ${}^{201}\text{Tl}$ ,  ${}^{111}\text{In}$  nebo  ${}^{123}\text{I}$  a malé (tzv. „lékařské“) cyklotrony, které jsou používány výhradně k výrobě radionuklidů pro účely nukleární medicíny. Získáváme zde radionuklidy  ${}^{18}\text{F}$ ,  ${}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{N}$  a  ${}^{15}\text{O}$ . (2) (5) (6)

### ***Radionuklidové generátory***

Existují radionuklidy, které se přeměňují na dceřiná jádra, která jsou také radioaktivní (sekundární radioizotopy). Radionuklidový generátor má velký význam hlavně u krátkodobých radionuklidů, které vznikají z mateřských radionuklidů se

znatelně delšími poločasy přeměny. Radionuklidový generátor je systém s vázaným mateřským radionuklidem, z něhož dostáváme dceřiný radionuklid většinou elucí. Nejdůležitějším a nejčastěji používaným zástupcem je molybden-techneciový generátor. Mateřský radionuklid molybden ( $^{99}\text{Mo}$ ) je zakotven na koloně a technecium se z něj vymývá (eluuje) sterilním roztokem chloridu sodného do lékovky. Tento proces může probíhat přímo na oddělení nukleární medicíny. Technecium ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) je pro potřeby nukleární medicíny velmi výhodné - dostatečně krátký poločas rozpadu (6,02 hod), energie záření ( $\gamma$  záření,  $E= 140 \text{ keV}$ ) a díky možnosti přípravy různých typů komplexních sloučenin či značení krevních elementů (2) (5) (6).

### **2.1.3 Nejčastěji používaná radiofarmaka**

Na pracovištích nukleární medicíny se přípravou radiofarmak zabývá nejčastěji farmaceut. Příprava a kontrola radiofarmak má velmi specifický charakter. Při přípravě radiofarmak se musí dodržovat zásady práce s otevřeným zářičem a také zásady při přípravě léku, aby nedošlo k mikrobiální kontaminaci a aby přípravek zůstal sterilní. Radiofarmaka považujeme za léčiva, a díky přítomnosti radioaktivního prvku v přípravku podléhají i speciálním kontrolním metodám (5). Radiofarmaka uchováváme nejčastěji ve vzduchotěsných obalech ze skla (injekční ampulky - vialky), která musí být chráněné před světlem. Ampulky se následně vkládají do olověných obalů, které zajišťují radiační ochranu pracovníků manipulujících s radiofarmakem. Na každé lahvičce s radiofarmakem musí být uvedeno datum spotřeby a případně i expirace (5) (7).

### ***Lékové formy a aplikace radiofarmaka***

Základem výroby a přípravy radiofarmak je jak samotná výroba radionuklidu, tak i jeho transformace a úpravy do požadované sloučeniny, která se v lékové formě aplikuje pacientům. Samotné přípravky, sloužící k přímému podání pacientovi, se vyrábějí hromadně nebo samostatně (5).

Nejdůležitějšími vlastnostmi lékových přípravků jsou netoxicity a bezpečnost. Záření, které radiofarmaka emitují, má být jednoduše detekovatelné a aktivita, kterou pacient obdrží, co nejnižší (v rámci diagnostické či terapeutické výtěžnosti). Vlastnosti nosiče s navázaným radionuklidem a léková forma radiofarmaka ovlivňuje lokalizaci a biodistribuci preparátu v těle pacienta. Důležitý je rovněž samotný pohyb zářiče v organismu a následná depozice radiofarmaka v místě účinku (2) (5).

Samotná aplikace radiofarmaka může probíhat parenterálně, perorálně či ve formě inhalace. Parenterální podání preparátů je na oddělení nukleární medicíny nejčastější. Daná radiofarmaka jsou podávána ve formě roztoků, koloidních disperzí a suspenzí. Radiofarmaka se nejvíce aplikují injekčně a to intravenózně (roztoky, suspenze), subkutánně (koloidní disperze) a intralumbálně (roztoky, plyny). Aplikace radiofarmak může rovněž být intraperitoneální (koloidní disperze, roztoky) a intraartikulární (koloidní disperze) především k terapeutickým účelům (5). Perorální radiofarmaka jsou nejčastěji roztoky, emulze a látky v pevném skupenství. Jedná-li se o tekutinu, je většinou přítomna ve skleněné lékovce se zátkou, kterou lze propíchnout jehlou a odebrat do ní potřebné množství přípravku. Tuhé látky jsou v želatinových tobolkách, nejčastěji je takto aplikován  $^{131}\text{I}$  a  $^{123}\text{I}$  (5). K inhalaci jsou používány radioaktivní plyny. Nejpoužívanějším plynem je  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ , který je získáván přímo na pracovišti generátorovým systémem  $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ . Dále mohou být také použity dispergované roztoky (značené komplexní sloučeniny) (3) (5).

## 2.2 Radioaktivní odpad

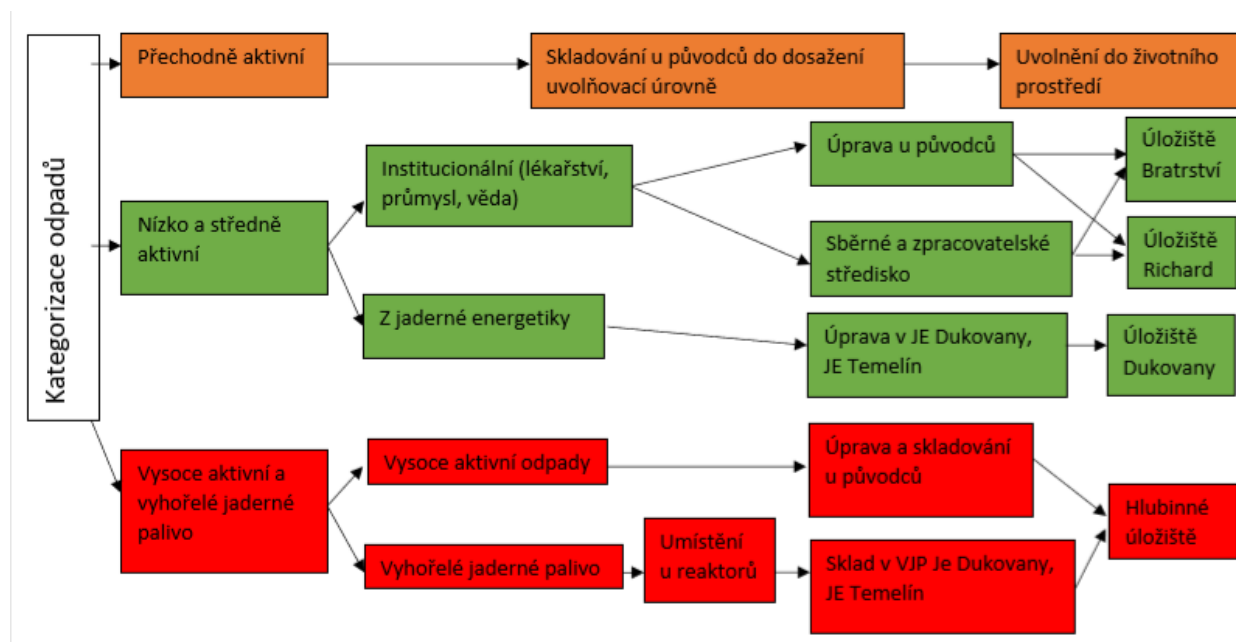
Dle zákona (8) v platném znění je: „radioaktivním odpadem věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahující nebo jí kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené tímto zákonem pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště.“ (8).

Při práci s tímto odpadem musí být zachovány podmínky jaderné bezpečnosti, radiační ochrany či monitorování radiační situace. Vždy, když se s RAO (radioaktivní odpad) manipuluje (úprava odpadu ve smyslu jeho fyzikálních a chemických vlastností nebo vytvoření obalového souboru), musí být vždy dbáno na bezpečnou dopravu, skladování a ukládání (9) (10).

### 2.2.1 Dělení radioaktivních odpadů

Dělení radioaktivního odpadu může být dle skupenství na radioaktivní odpady plynné, kapalně a pevné. Pevné odpady můžeme třídit na stlačitelné a nestlačitelné nebo hořlavé a nehořlavé. Další možností rozdělení je dle způsobu uložení na přechodně aktivní odpad, velmi nízkoaktivní odpad, nízkoaktivní odpad, středně aktivní odpad, a nakonec vysokoaktivní odpad (definici jednotlivých druhů odpadů najdeme ve (11)) (9), (12).

Na Obrázku 1 vidíme schéma nakládání s radioaktivním odpadem (dělení podle aktivity odpadů, původce odpadů) (13).



Obrázek 1 Schéma nakládání s radioaktivním odpadem

Často používaným kritériem pro třídění odpadu je podle původce odpadu. Podle toho se RAO dělí na institucionární a RAO z jaderněenergetického cyklu (jader-



né elektrárny). Mezi nejvýznamnější institucionální odpady patří odpady z oblastí vědeckého výzkumu, zdravotnictví, průmyslu a zemědělství. Tyto odpady jsou charakterizovány podle fyzikálních parametrů využívaných radionuklidových zářičů a také podle konkrétní pracovní činnosti, ke které je zářič použit. Odpady v jaderné energetice vznikají v průběhu celého palivového cyklu (10).

Na správnost ukládání radioaktivního odpadu dohlíží Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), která zajišťuje bezpečnost při nakládání s tímto odpadem s ohledem na ochranu člověka a životního prostředí. Tento úřad dohlíží na činnost související s pevným odpadem (kapalné a plynné odpady se neukládají (12)).

#### **2.2.2 Nakládání s radioaktivními odpady na pracovištích nukleární medicíny**

*„Nakládáním s radioaktivním odpadem se rozumí jeho shromažďování, třídění, zpracování, úprava, skladování a ukládání (14)“.*

Na oddělení nukleární medicíny vzniká především přechodně aktivní odpad v pevném, kapalném i plynném skupenství, který po skladování po určitou dobu (podle fyzikálního poločasu rozpadu RN) vykazuje aktivitu menší, než jsou uvolňovací úrovně. Dále se s ním tedy nakládá jako s neaktivním odpadem (12). Pevný RAO lze dělit na infekční (15) (krví kontaminované jednorázové stříkačky, jehly, infuzní sondy, náplasti, buničina, aj.) a neinfekční (zkumavky a lahvičky se zbytky radiofarmak, aj.). V menší míře vzniká na pracovištích NM také odpad nízko a středně aktivní, který je zastoupen např. generátory radionuklidů (10). Tento institucionální odpad bude řešen v další části bakalářské práce.

#### ***Shromažďování a třídění radioaktivních odpadů***

Ke sběru RAO dochází v místech jeho vzniku na různých místech pracoviště NM (radiafarmaceutická laboratoř, přípravná radiofarmak, aplikační místnost atd.). Poté je odpad tříděn podle toho, zda u něho dochází ještě k úpravám a dal-

šímu zpracování, podle jeho skupenství, podle radionuklidů, kterým byl RAO kontaminován a podle typu odpadu (nebezpečný, biologický, infekční odpad) (10).

Na pracovištích nukleární medicíny jsou pevné RAO ukládány do uzavíratelných stíněných nádob s vloženým jednorázovým PE (polyetylenový) sáčkem nebo do kartonových krabic, které se dále uloží do stíněného kontejneru (boxu). Do jednoho sáčku se ukládá materiál, který byl kontaminován stejným radionuklidem. Na konci pracovní činnosti se tento sáček uzavře a označí (označení laboratoře, datum uložení, radionuklid, hodnota aktivity). U kapalných odpadů dochází ke shromažďování ve stíněných nádobách (malé množství kapalného odpadu) nebo ve speciálních nádržích (velké množství odpadu z lůžkového oddělení NM).

### ***Zpracování, úprava, skladování radioaktivních odpadů***

U zpracování RAO je hlavním cílem co nejvíce zmenšit jeho množství (oddělit dále využitelné materiály od těch nevyužitelných). Zpracování RAO závisí na jeho skupenství. Obecně platí, že u zpracování kapalných odpadů lze využít např. odpařování na odparkách, u zpracování pevných RAO lze využít např. spalování, lisování nebo tavení (10). Plynné radioaktivní odpady, které vznikají na pracovišti nukleární medicíny, mohou být odvětrávány (digestoře) a lze je zachytit ve filtrech HEPA (high efficiency particulate arrestance – vysoce účinné zachytávání mikročástic) nebo zadržet v absorpčních komorách (6).

Úpravou RAO se myslí změna jejich fyzikálních nebo chemických vlastností, či také vložení odpadu do obalového souboru (zajištění bezpečného transportu, skladování nebo uložení) (10).

Skladování RAO je časově omezený proces (10). Podmínkou správného skladování radioaktivního odpadu je separace tohoto odpadu od jiného druhu odpadu či odlišného materiálu. Skladovací prostory pro pevné RAO (tzv. vymírací místnost) jsou součástí oddělení nukleární medicíny. Podmínkou je, že podlaha (spádována

do bezodtokové nepropustné jámy) a stěny skladovacího prostoru musí být nepropustné, a to do takové výše, aby i při úniku největšího množství skladovaného odpadu byla zajištěna bezpečnost před únikem látek do životního prostředí (9). Skladovací prostor musí rovněž odpovídat druhu, formě, aktivitě a množství radioaktivního odpadu a tento sklad musí být periodicky kontrolován. Na pracovišti musí být přítomny rezervní skladovací kapacity, které slouží k přemisťování, přebalování či vyzvedávání radioaktivního odpadu. Všechny skladovací místnosti jsou pravidelně monitorovány a vyhodnocovány z hlediska kapacity a celkového stavu skladu (těsnost bariér, vnitřní podmínky skladování a monitorování – povrchová kontaminace a příkon dávkového ekvivalentu).

U kapalného radioaktivního odpadu záleží hlavně na množství odpadu, které na pracovištích vzniká. Na pracovištích nukleární medicíny II. kategorie a III. kategorie je většinou vybudován samostatný kanalizační rozvod pro vypouštění radioaktivních vod. Tento rozvod je napojen na samostatnou záchyťovou nádrž, odkud je poté, co je splněn požadavek na dodržení uvolňovací úrovně, vypuštěn do běžné kanalizace nebo do čističky odpadních vod. V případě malého množství RAO postačí na skladování pouze nádoby (sběrná nádoba uložená ve stíněné nádobě). Do jedné nádoby se vlévají pouze odpady kontaminované stejným radionuklidem. Dojde-li k naplnění nádoby, uzavře se a označí štítkem jako u pevného odpadu.

Ke skladování většího množství kapalných odpadů slouží velké nádrže umístěné do ochranných jámek, které bezpečně pojmu objem nádrže (10) (9). Obsah těchto nádrží musí být možné plně vyčerpat do prázdné (záložní) nádrže, která se využije v případě havárie. Její objem musí být stejný jako objem největší nádrže systému nádrží přítomných na pracovišti (9). K požadavkům na tyto nádrže patří nepropustnost, ochrana proti korozi, ochrana proti přeplnění a musí být umístěné v ochranných jámkách, které pojmu objem nádrže i s potřebnou rezervou. Ochranné jámy musí splňovat nároky kladené na nepropustnost, signalizaci

v případě úniku radioaktivních látek a musí obsahovat zařízení pro možnost odčerpání obsahu jímký (9). Pomocí monitorování jímek je možné zaznamenat odchylky od běžné, očekávané situace a učinit potřebná opatření.

Radioaktivní odpady jsou většinou skladovány ve skladovacích prostorech po dobu, která je rovna 10 poločasům přeměny příslušného radionuklidu. Po uplynutí 10 fyzikálních poločasů přeměny radionuklidu by mohl být RAO uveden do životního prostředí (6). Veškeré činnosti související s radioaktivním odpadem musí být evidovány a samotný odpad jednoznačně identifikovatelný po celou dobu uchování (9), (10).

### **2.2.3 Monitorování radioaktivních odpadů na pracovištích nukleární medicíny**

Na pracovištích nukleární medicíny dochází k pravidelnému monitorování RAO. Plynné odpady se vyskytují na pracovišti jen omezeně (přítomnost digestoří a laminárních boxů), ale mohou se monitorovat pomocí speciálních filtrů, kde se zachytí částice aerosolů (10).

U pevných RAO se provádí proměření (např. Geiger-Müllerův počítač) aktivity ještě před jeho uložením do vymírací místnosti. Na každý obalový soubor se nalepí štítek, kde se uvedou potřebné informace (např. datum uložení, radionuklid a jeho naměřená hodnota aktivity). Poté dochází ze strany pověřeného pracovníka pracoviště k pravidelnému proměřování RAO a zaznamenávání naměřených hodnot. V případě, že RAO splní požadavky na uvolnění, je označen jako „neradioaktivní“ (rovněž se uvede datum, kdy došlo uvolnění RAO) a dále se s ním může nakládat jako s běžným nemocničním odpadem dle jeho typu. Skladování radionuklidových generátorů se liší v tom, že se skladují ve vymíracích místnostech do té doby, než si je převezme zpět dodavatelská firma. Podobný způsob skladování je i o odpadu s dlouhým poločasem rozpadu (10).

U kapalných odpadů záleží především na jejich množství a přítomných radionuklidech. Většinou je kapalný odpad z lůžkové části pracoviště poskytující terapii radiojódem odváděn do speciálních vymíracích jímek, kde je zadržován a poté vypouštěn. Zde dochází k pravidelnému monitorování odpadních vod, kdy se sleduje a zaznamenává aktivita přítomných radionuklidů (nejčastěji je kapalný RAO z lůžkových oddělení kontaminován  $^{131}\text{I}$ ). Po poklesu aktivity pod uvolňovací úroveň (pro radionuklid přítomný v kapalném RAO) se dále odpadní voda stává neradioaktivní a je vypuštěna do běžné nemocniční kanalizace.

#### **2.2.4 Likvidace a uvolňování radioaktivního odpadu**

U většiny RAO na pracovišti NM se jedná o přechodně aktivní odpady, kde je nutný pouze krátký čas k jejich vymírání a o jeho likvidaci se stará samotné oddělení. Skladuje se v místnostech tomu určených a po ověření, že je již odpad považován za neradioaktivní, se dále tento odpad likviduje jako běžný odpad podle směrnic nakládání s odpadem na pracovišti (nebezpečný odpad, komunální odpad).

U RAO kontaminovaných radionuklidů s dlouhým poločasem přeměny (například  $^{137}\text{Cs}$ , které má poločas přeměny 30,05 let (6)) se o likvidaci starají autorizované firmy s platným povolením SÚJB (Státní úřad pro jadernou bezpečnost), které je ukládají do úložišť radioaktivního odpadu. Tento RAO se vkládá do obalového souboru. Konečný obalový soubor s radioaktivním odpadem je nutné řádně označit a každé fyzické předání radioaktivního odpadu musí provázet průvodní list, který se vystavuje pro každý obalový soubor, se kterým se může samostatně manipulovat. Tento list musí obsahovat například fyzikální a chemické formy a vlastnosti radionuklidu, popis druhu obalového souboru, počet kusů a aktivitu ukládaných radionuklidových zdrojů, údaje o hmotnostní nebo objemové aktivitě radionuklidů, příkon dávkového ekvivalentu na povrchu obalového souboru, hmotnost radioaktivního odpadu, datum nebo období plnění radioaktivního odpadu, a dále

údaje o předávající nebo přebírající firmě. Následně je nutné vše okolo zpracování a předání odpadu dokumentovat a evidovat (10).

Z hlediska legislativy je nutné zajistit, aby byla dodržena uvolňovací úroveň, která je zjištěna pomocí kontrolního měření. Když je aktivita RAO pod stanovenou úrovní, dále se s ním odpadem nakládá jako s běžným odpadem.

V případě kapalných radioaktivních odpadů z pracoviště nukleární medicíny, které jsou vypouštěny do veřejné kanalizace, by měla být splněna podmínka uvolňovací úrovně dle (11): *„Uvolňovací úrovně pro pracoviště se zdroji ionizujícího záření se považují za překročené při vypuštění odpadních vod do kanalizace pro veřejnou potřebu, pokud součet součinů průměrných objemových aktivit jednotlivých vypouštěných radionuklidů a jejich maximálních konverzních faktorů  $h_{\text{ing}}$  pro příjem požitím dospělým jednotlivcem z obyvatelstva je větší než  $10 \text{ mSv/m}^3$ “* (11).

Pro uvolňování pevných RAO musí být rovněž splněna uvolňovací úrovně pro pevné materiály. Tyto úrovně se považují za překročené: *„pokud v uvolňovaném předmětu nebo v uvolňovaném množství pevné látky je součet podílů průměrných hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů a jejich uvolňovacích úrovní hmotnostní aktivity větší než 1; uvolňovací úrovně hmotnostní aktivity stanoví příloha č. 7 k této vyhlášce, nebo kdekoli na ploše  $300 \text{ cm}^2$  povrchu uvolňovaného předmětu je povrchová kontaminace vyšší než uvolňovací úrovně plošné aktivity; uvolňovací úrovně plošné aktivity; uvolňovací úrovně hmotnostní aktivity stanoví příloha č. 7 k této vyhlášce* (11)“.

Plynné RAO se poté mohou vypouštět do ovzduší, pokud poklesne jejich aktivita pod úroveň limitů, v kterých se bere v úvahu průměrná objemová aktivita vypouštěných radionuklidů a jejich konverzních faktorů pro příjem inhalací (přesné znění (11)).

## 2.3 Radiační ochrana na oddělení nukleární medicíny

Díky využití ionizujícího záření v nukleární medicíně je zapotřebí dodržovat patřičné legislativní předpisy. Mezi nejdůležitější z nich patří Atomový zákon (zákon č. 263/2016 Sb.) a Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje (vyhláška č. 422/2016 Sb.). Lékařské ozáření podléhá Zákonu o specifických zdravotních službách (Zákon č. 373/2011 Sb.) (2).

Jelikož na pracovištích nukleární medicíny využíváme jako ZIZ otevřené zářiče, je zapotřebí se řídit obecnými cíli a principy radiační ochrany (RO). Hlavním cílem RO je zcela vyloučit deterministické účinky ionizujícího záření (IZ) a co nejvíce omezit pravděpodobnost vzniku stochastických účinků (2). Ke splnění těchto cílů je potřeba čtyř hlavních principů radiační ochrany, a to principu zdůvodnění, optimalizace ochrany, aplikace dávkových limitů a zajištění zdroje. Jejich dodržování je podmínkou pro bezpečné využívání ionizujícího záření (15).

### *Principy radiační ochrany*

**Princip zdůvodnění:** Každé jednání s použitím IZ by mělo být odůvodnitelné a přínos z použití tohoto záření by měl převažovat nad rizikem spojeným s jeho užíváním (15).

**Optimalizace ochrany:** Za daných okolností by měla být radiační ochrana vždy na co nejvyšší úrovni (princip ALARA – „as low as reasonably achievable“ – tak nízko, jak je rozumně dosažitelné). Jak vyplývá z uvedeného principu ALARA, při použití ionizujícího záření má být snaha o co nejnižší dávku záření, při kvalitním diagnostickém či terapeutickém prospěchu, tedy zachování co nejvyšší úrovně RO za daných okolností (15).

**Aplikace dávkových limitů:** Dávkové limity pro ozáření vytváří hranici mezi oblastí s dávkami zcela nepřijatelnými a oblastí s dávkami již přijatelnými, jejichž

hodnoty se vytváří na základě optimalizace radiační ochrany (15) (10). Limity budou podrobněji popsány v následující části práce ve spojitosti s monitorováním.

Princip zajištění ZIZ: Tento princip zahrnuje hrozbu zneužití radioaktivních zářičů pro teroristické či jiné zlovolné účely. Je tedy nutné dbát na ochranu radioaktivních zdrojů před jejich odcizením a případným použitím k nepovoleným účelům (15).

### **2.3.1 Radiační ochrana pracovníků**

S prací na oddělení nukleární medicíny se váže riziko vnějšího (externího) ozáření, ale i vnitřního ozáření (vniknutí radioaktivního prvku do organismu). Je tedy bezpodmínečně nutné dodržování fyzikálních způsobů RO z hlediska externího ozáření (čas, stínění, vzdálenost) a provádět opatření, která sníží riziko vnitřní kontaminace na minimum. Zejména se jedná o dodržení níže uvedených pravidel vztahujících se na pracovníky:

- použití pracovního oděvu po příchodu na oddělení;
- použití ochranných pracovních prostředků, jako jsou gumové rukavice, brýle či ochranný oděv apod.;
- použití pinzet, kleští, dálkových manipulátorů a stínících ochranných obalů při manipulaci s radionuklidy;
- využití digestoří a laminárních boxů při manipulaci se zářičem s možností úniku radioaktivní látky do ovzduší;
- použití dekontaminačních prostředků na nástroje ihned po ukončení činnosti s nimi;
- zákaz jídla, pití a kouření v kontrolovaném pásmu (3), (10), (15).

U pracovníků se také pravidelně kontroluje jejich zdravotní stav (vstupní, periodické, mimořádné a výstupní zdravotní prohlídky) (2). Z hlediska radiační ochrany před externím ozářením uplatňují pracovníci na NM ochranu vzdáleností (dávkový příkon klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje), ochranu stíněním (mezi



zdroj záření a pracovníka je vložen vhodný stínící materiál, při manipulaci ZIZ se využívají stínící prostředky vyrobené z vhodného materiálu (10)) a ochranu časem (zdržovat se v blízkosti ZIZ jen po nezbytně nutnou dobu, střídání pracovníků, organizace práce) (3). Tento čas se také odvíjí od zdravotního stavu pacienta a schopnosti jeho spolupráce. Vyšetřovací místnosti (v textu dále už jen jako vyšetřovny) by měly být uspořádány takovým způsobem, aby byl pracovník schopen sledovat pacienta v průběhu vyšetření z ovládací místnosti (v textu dále už jen jako ovladovna) a nebyla přítom nutná jeho přítomnost (fixace pacienta pásy, změna polohy pacienta dálkovým ovladačem) (2), (15).

### **2.3.2 Radiační ochrana pacientů**

V RO pacientů se využívají pouze principy zdůvodnění a optimalizace. Při vyšetřeních s použitím ionizujícího záření se zváží rizika a uváží se možnost využití jiných modalit bez IZ se stejnou diagnostickou či terapeutickou výtěžností. Pokud má být vyšetřovaným pacientem žena v reprodukčním věku, je nutné se dotázat na možné těhotenství nebo kojení. Princip optimalizace je zásadní při volbě množství aktivity radiofarmaka. Musí zde být zajištěna dostatečná aktivita z hlediska diagnostické výtěžnosti a zároveň musí být tato aktivita co nejnižší z hlediska radiační ochrany. Tyto aktivity vychází z diagnostických referenčních úrovní (DRÚ). Další možností optimalizace je zajištění kontroly kvality a aktivity radiofarmaka před jeho aplikací či zajištění kvality zobrazovací techniky (např. zkoušky provozní stálosti) (3).

Snížení radiační zátěže je dosaženo například ovlivněním rychlosti vyloučení radioaktivní látky z těla, tedy dostatečnou hydratací za účelem rychlého vyloučení radioaktivní látky z organismu (radiofarmaka vylučována ledvinami –  $^{99m}\text{Tc}$ -fosfáty,  $^{99m}\text{Tc}$ -DTPA aj.). Další možností je omezit nebo úplně zabránit přítomnosti radiofarmaka v konkrétním orgánu (blokace štítné žlázy pomocí KI,  $\text{KClO}_4$ ) (3) (2).

Na pracovišti nukleární medicíny s lůžkovou částí je nejvýznamnějším zdrojem ionizujícího záření  $^{131}\text{I}$  podávaný pro terapeutické účely.  $^{131}\text{I}$  se podává perorálně (roztok i kapsle) ve formě jodidu sodného, který se specificky vychytává v nádorových buňkách štítné žlázy. Radiojód  $^{131}\text{I}$  emituje záření  $\gamma$  a záření  $\beta$ . Při léčbě hypertyreózy se nejčastěji aplikují aktivity v rozmezí od 300 MBq do 800 MBq (16) a při léčbě diferenciovaného karcinomu štítné žlázy se podaná aktivita pohybuje mezi 3,4 až 10 GBq (16) radiojódu. Kontaminované jsou sliny, pot, dech i moč pacienta. Při propuštění pacienta z nemocnice je nutné, aby aktivita  $^{131}\text{I}$  ve štítné žláze poklesla na méně než 250 MBq a dávkový příkon v 1 m od pacienta byl menší než  $12 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  (13) (16).

### 2.3.3 Radiační limity a uspořádání pracovišť

„Limit ozáření je kvantitativní ukazatel pro omezení celkového ozáření fyzické osoby z činností v rámci plánovaných expozičních situací (8).“ Limity jsou definovány pro obyvatelstvo (obecný limit), radiační pracovníky a pro žáky a studenty (Tabulka 3) (11).

Tabulka 3 Limity obecné, pro radiační pracovníky a pro žáky a studenty

Dávkový limit	Efektivní dávka*	Ekvivalentní dávka		
		Oční čočka	1 cm <sup>2</sup> kůže	Ruce a nohy**
Obecný	1 mSv/rok	15 mSv/rok	50 mSv/rok	Nejsou stanoveny
Pro radiační pracovníky	20 mSv/1 rok, 100 mSv/5 let a současně 50 mSv/1 rok	100 mSv/5 let a současně 50 mSv/1 rok	500 mSv/1 rok	500 mSv/1 rok
Pro žáky a studenty (16-18 let)	6 mSv/rok	15 mSv/rok	150 mSv/rok	150 mSv/rok

\*součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření

\*\*na ruce od prstů po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky

Soustavné monitorování radiačních pracovníků zajišťuje možnost dohledu nad dodržováním předepsaných limitů pro pracovníky, a tedy i možnost následné

optimalizace pracovních podmínek. Při zjištění překročení těchto limitů nesmí tento zaměstnanec na určitou dobu vykonávat pracovní činnost, než je posouzena jeho zdravotní způsobilost k další práci se zdrojem ionizujícího záření.

Pracoviště NM lze rozdělit na pracoviště I., II., III. a IV kategorie. Toto řazení je především podle vybavenosti pracoviště (odvětrávání, laminární boxy, čisté prostory aj. (17)) a podle předpokládaného charakteru práce a velikosti aplikovaných aktivit radionuklidů zde používaných. Pracoviště NM většinou spadají do II. kategorie (používání jednoduchých zdrojů – RN generátory  $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$  a dále radionuklidy  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ). Tam, kde probíhá terapie  $^{131}\text{I}$  může být pracoviště NM řazeno do kategorie III. nebo kategorie IV. (10). Na těchto pracovištích se vymezuje kontrolované pásmo: *„Na pracovišti se zdrojem ionizujícího záření, kde lze předpokládat, že by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně nebo že by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než tři desetiny limitu pro radiačního pracovníka pro kůži anebo končetiny nebo 15 mSv pro oční čočku.“* (8)

V kontrolovaném pásmu mohou samostatně vykonávat pracovní činnost pouze pracovníci kategorie A (ostatní pracovníci pouze pod jejich dohledem (17)). Toto pásmo je nutné řádně označit „Kontrolované pásmo se zdroji ionizujícího záření, nepovolaným vstup zakázán“ a přidat znak radiačního nebezpečí. Do kontrolovaného pásma na pracovištích NM též patří vymírací místnost, která slouží ke skladování radioaktivních odpadů (11) (10).

Na oddělení se též vymezuje sledované pásmo (např. čekárny a toalety pacientů), které je v přesném znění definované ve (11).

## **2.4 Program monitorování**

Na oddělení nukleární medicíny se provádí monitorování osobní, monitorování pracoviště, výpustí a okolí pracoviště. Vše je popsáno v Programu monitorování,

který je součástí Dokumentace pro nakládání se ZIZ. Celý program monitorování podléhá vyhlášce (11).

#### **2.4.1 Osobní monitorování**

Na pracovišti nukleární medicíny jsou zaměstnanci zařazeni do kategorie A: „*Radiačním pracovníkem kategorie A je radiační pracovník, který by mohl obdržet: efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně; ekvivalentní dávku vyšší než 15 mSv na oční čočku; ekvivalentní dávku vyšší než 3/10 limitu ozáření na kůži a končetiny* (11).

Všichni tito pracovníci jsou povinni nosit osobní dozimetr na referenčním místě (levá horní strana hrudníku). Těmito dozimetry se měří osobní dávkový ekvivalent v hloubce 10 mm pod povrchem těla. Používají se filmové dozimetry, TLD (termoluminiscenční dozimetry) nebo dozimetry na principu OSL (opticky stimulovaná luminiscence) (2). Někteří pracovníci mohou být vybaveni i prstovými dozimetry kvůli zvýšené expozici rukou. Tyto dozimetry se u pracovníků kategorie A vyhodnocují za období jednoho měsíce.

Program monitorování musí obsahovat především údaje o provádění měření (druh použitého dozimetru-např. TLD, OSL), doba sledovacího období (měsíc), referenční úrovně (záznamové, vyšetřovací, zásahové úrovně), způsob dokumentace a sledování výsledků měření pracovníkům.

Z důvodu možného vnitřního ozáření se na pracovištích s otevřenými zářiči provádí i monitorování vnitřní kontaminace. Toto měření se uskutečňuje sledováním aktivity radionuklidu v těle pracovníka či v jeho exkretách. Největší riziko vnitřní kontaminace je na oddělení NM, kde se provádí léčba jodem  $^{131}\text{I}$ . Radiojód se dostává do vzduchu při práci s roztoky a také při vydechování pacienta, který podstupuje terapii. Radionuklid  $^{131}\text{I}$  se může zabudovat do štítné žlázy pracovníka, toto záření lze detekovat scintilačním detektorem (10) (2).

#### 2.4.2 Monitorování pracoviště

Na oddělení NM se monitoruje příkon prostorového dávkového ekvivalentu a kontaminace povrchů radioaktivními látkami (plošná aktivita), někde také probíhá měření objemové aktivity v ovzduší pracoviště (11).

Monitorování dávkového příkonu probíhá periodicky ve všech místnostech, kde se pracuje s ionizujícím zářením (laboratoře, aplikační místnosti, vyšetřovny, lůžkové části, místnosti, kde se skladují radiofarmaka, vymírací místnost, někdy chodby). Pro tyto účely se většinou používá přenosných měřičů dávkového příkonu, kterými se měří na specifických místech stanovených v programu monitorování (uprostřed místnosti ve výšce 1 m nad podlahou, na povrchu krytů, stíněných prostor pro skladování zářičů apod.) (10), (11).

Povrchová kontaminace (kterou se rozumí přítomnost radioaktivních látek na pracovních plochách, pomůckách, oděvu či povrchu těla) je monitorována pomocí veličiny plošná aktivita  $A_s$  ( $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). Smyslem monitorování povrchové kontaminace je zjištění odchylek od stanovených pracovních postupů, špatné funkce či úplné selhání bariér. Dodržováním tohoto programu lze zabránit mimořádným radiologickým událostem, jako je např. rozptyl radioaktivních látek (11), (10). Pro měření povrchové kontaminace používáme buď samostatný přístroj či vyhodnocovací jednotku s velkoplošnou sondou. Tyto měřiče jsou schopny měřit povrchovou kontaminaci zářiči  $\alpha$  a  $\beta$  (průtokové plynové detektory) a také kontaminaci zářiči  $\beta$  a  $\gamma$  (velkoplošný proporcionální detektor plněný xenonem, Geiger-Müllerův počítač) (10).

#### 2.4.3 Monitorování výpustí

Výpustě se monitorují sledováním, měřením, zapisováním a vyhodnocením veličin (parametrů), které popisují uvolňované radioaktivní látky. V programu monitorování je zahrnuto pravidelné monitorování radionuklidů přispívajících k celkovému ozáření obyvatelstva. Trvalé monitorování probíhá i u radionuklidů

na pracovišti IV. kategorie za provozu, kde je i malá odchylka od běžně naměřených hodnot zaznamenána a případně prověřena. Též se provádí operativní monitorování dalších možných cest uvolňování radioaktivní látky z pracoviště. V případě zaznamenání odchylky od běžně naměřených hodnot by došlo k následnému prověření naměřených dat a k případným opatřením (zaznamenání do celkové bilance výпустí, oznámení Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) (11).

V programu monitorování jsou vymezeny referenční úrovně (hodnoty nebo kritéria u vybraných dopředu určených postupů nebo opatření (18)). Rozlišujeme celkem 3 referenční úrovně, které jsou v přesném znění popsány ve vyhlášce (11) - Monitorování výпустí. Úrovně záznamové stanovují nejnižší hodnotu monitorované veličiny, kdy je již významné tuto hodnotu vyhodnotit a dokumentovat. Stanovují se většinou jako nejnižší možná hodnota monitorované veličiny, kterou lze měřit nebo hodnota pozadí. Hodnocení záznamových úrovní je závislé na druhu monitorované veličiny, podmínkách měření a na charakteristice měřicího přístroje. Pokud se dosáhne vyšetřovacích úrovní, znamená to ne zcela běžnou situaci na pracovišti. Je nutné šetření této situace, aby se zjistily příčiny a důsledky překročení. Tyto úrovně se určují jako horní hranice normálně se vyskytujících hodnot (u osobních dávek jako 3/10 limitu pro radiační pracovníky). A nakonec zásahové úrovně, které signalizují mimořádnou událost nebo radiační nehodu. Zaznamenáme zde větší radiační riziko a za této situace je neprodleně nutné varování a ochrana osob a životního prostředí. Pro tyto účely je na pracovišti havarijní řád, podle kterého se postupuje v zmíněných situacích (6).

#### **2.4.4 Monitorování okolí pracoviště**

Toto monitorování probíhá v okolí pracovišť, z nichž jsou vypouštěny nebo jinými cestami uvolňovány radioaktivní látky. Probíhá zde sledování, měření a ná-

sledné vyhodnocení veličin a parametrů, které charakterizují pole ionizujícího záření a přítomnost radionuklidů v okolí pracoviště. Jedná se o příkon prostorového dávkového ekvivalentu, objemovou aktivitu a hmotnostní aktivitu radionuklidů. Stanovují se zde také záznamové, vyšetřovací a zásahové úrovně (11).

### 3 CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části bakalářské práce bude popsat problematiku radiofarmak a dále popsat problematiku radioaktivních odpadů na oddělení nukleární medicíny, dále samotné nakládání s radioaktivními odpady a také budou v práci popsány příslušné požadavky kladené na radiační ochranu na oddělení nukleární medicíny.

Cílem praktické části práce bude popsat nakládání s radioaktivními odpady na konkrétním pracovišti nukleární medicíny a provést experimentální měření vybraných radioaktivních odpadů. Vybrané oddělení patří mezi několik pracovišť České republiky, která provádí terapii pomocí  $^{131}\text{I}$ , ale rovněž je zde ambulantní část a úsek s pozitronovou emisní tomografií. Cílem bakalářské práce bude popsat jednotlivé úseky pracoviště a jejich nakládání s radioaktivními odpady. V rámci práce budou provedeny odběry vzorků z jímek a jejich měření s cílem stanovit objemovou aktivitu v době odběru. V práci budou také vyhodnocena data pravidelného rutinního monitorování vymírání jímek za vybrané časové období.



## 4 METODIKA

Zpracování praktické části bakalářské práce probíhalo ve třech etapách. Pro samotnou realizaci praktické části byla nejprve po souhlasu dohlížející osoby nad radiační ochranou (fyzik) prostudována interní data z vybraného pracoviště nukleární medicíny (Oddělení nukleární medicíny Fakultní nemocnice Hradec Králové) týkající se nakládání s radioaktivními odpady. Následně nás během návštěvy vybraného pracoviště nukleární medicíny seznámil dohlížející pracovník s chodem pracoviště. Poté jsme navštívili provozně technický úsek čističky odpadních vod, kde jsme byli seznámeni s provozem vymíracích jímek a rovněž nám byla pracovníkem z tohoto úseku poskytnuta data o pravidelném rutinním monitorování vymíracích jímek za vybrané časové období. Na závěr byly pod dohledem výše uvedených pracovníků realizovány odběry vzorků z vymíracích jímek a provedeno jejich následné vyhodnocení.

### **4.1 Popis způsobu nakládání s radioaktivním odpadem na vybraném pracovišti nukleární medicíny**

Popsání nakládání s RAO na vybraném pracovišti proběhlo na základě několikadenní návštěvy daného pracoviště. Během návštěvy jsme se seznámili s jednotlivými úseky vybraného pracoviště (ambulanti část pracoviště, úsek s PET/CT a lůžková část), ale také s technickým vybavením či s vyšetřeními probíhajícími na ambulanti úseku a úseku s PET/CT vybraného oddělení nukleární medicíny a s léčebnými postupy probíhajícími na lůžkovém oddělení tohoto pracoviště. Byli jsme seznámeni s činnostmi, při kterých RAO na jednotlivých úsecích vzniká, s jeho skladováním a následnou likvidací.

Sběr potřebných informací probíhal na základě ústního sdělení dohlížejícího pracovníka za radiační ochranu a také na základě prostudování interní dokumentace pracoviště (19) (20). Získané informace jsme následně zpracovali.

## 4.2 Zpracování dat pravidelného rutinního monitorování vymíracích jímek za vybrané časové období

Při návštěvě provozně technického úseku čističky odpadních vod jsme od pracovníka odboru energetiky a odpadového hospodářství získali data týkající se pravidelného monitorování vymíracích jímek. Vybraná data jsme zpracovali ve formě tabulky a grafů.

## 4.3 Popis experimentálního měření

V praktické části bakalářské práce bylo provedeno a vyhodnoceno experimentální měření vybraných radioaktivních odpadů (vzorky odpadní vody z vymíracích jímek) z konkrétního pracoviště.

### *Příprava experimentu*

Pro odběr vzorků jsme si připravili 100 ml lahvičky, u kterých jsme provedli zkoušku těsnosti víčka. Dále jsme tyto lahvičky označili pomocí permanentního fixu čísly 1 až 6, tedy podle počtu jímek. Každou lahvičku jsme navíc vložili do gumové rukavice, aby nedošlo k záměně vzorků, tyto měly vždy jeden prst zastrčený dovnitř vzhledem k tomu, jakou jímku daná rukavice reprezentovala (např. jímka č. 1 měla zastrčený palec, jímka č. 6 neměla zastrčený žádný prst) (Obrázek 2).



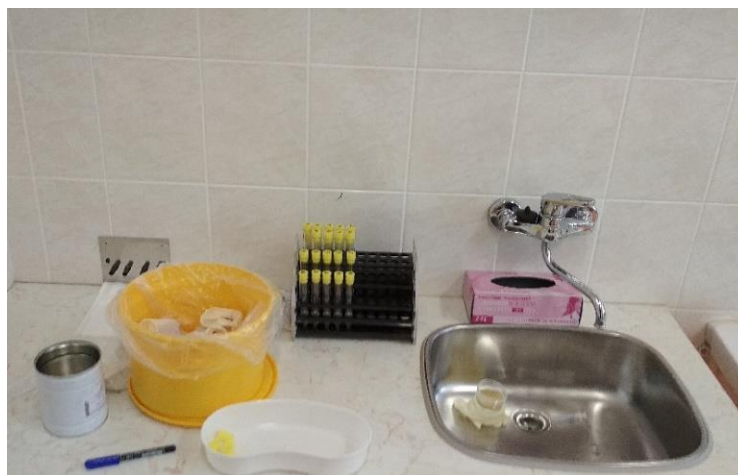
Obrázek 2 Plastová nádoba s vloženými lahvičkami se vzorky z vymíracích jímek

### ***Provedení odběru vzorků z vymíracích jímek***

Samotný odběr probíhal v prostorách čistící stanice u vymíracích jímek. Zde se ve dvou šachtách umístěných pod zemí nachází potrubí s kohouty pro odběr vzorků z jednotlivých jímek. V jedné šachtě se nachází potrubí pro 3 jímky. Odběr byl tedy proveden postupně v jedné i druhé šachtě. Po provedení odběru ze všech šesti jímek jsme tyto lahvičky vložili do uzavíratelné nádoby a odnesli jsme je na oddělení nukleární medicíny k dalšímu zpracování.

### ***Úprava vzorků pro měření***

Vzorky jsme odnesli na lůžkové oddělení nukleární medicíny do místnosti sousedící s vymírací místností. K provedení odběru jsme si připravili 30 zkumavek, 6 stříkaček (objem 5 ml), stojan na zkumavky a gumové rukavice (ochrana před povrchovou kontaminací). Před zahájením úpravy vzorků z jímek jsme si číselně označili zkumavky pro vzorky z jednotlivých jímek, např. 2. vzorek z jímky č. 3 byl označen 2/3 (Obrázek 3).



*Obrázek 3 Příprava k úpravě vzorků*

Před zahájením úpravy vzorků jsme si nasadili gumové rukavice a zástěru. Poté jsme vyndali z přenosové nádoby jednu z gumových rukavic, ve které byla lahvička se vzorkem. Následně jsme lahvičku se vzorkem otevřeli a pomocí 5 ml stříkačky jsme odebrali 3 ml vzorku do zkumavky.

Zkumavku se vzorkem jsme uzavřeli a vložili do připraveného stojanu, který jsme obsazovali vkládáním vzorků z jedné jímky do jedné řady vždy zleva, aby nedošlo k záměně vzorků (Obrázek 4).



Obrázek 4 Umístění zkumavek do stojanu

Po odebrání všech pěti vzorků z jedné jímky, jsme vzali novou stříkačku a celý proces jsme opakovali. Po naplnění a umístění všech třiceti zkumavek do stojanu jsme lahvičky se zbývajícím vzorkem uložili do vymírací místnosti, stejně jako použité stříkačky a gumové rukavice. Celý prostor pracovní plochy, kde byly vzorky z odpadních jímek odebrány do zkumavek, jsme řádně očistili a přeměřili pomocí plošného měřiče aktivity (Obrázek 5).



Obrázek 5 Měřič plošné aktivity používaný na vybraném pracovišti

## Měření

Samotné měření vzorků jsme prováděli v laboratoři na oddělení. Nejdříve jsme se seznámili s přístrojem na měření, kterým byl univerzální digitální vícekanálový

analyzátor spekter Genie 2000 se studnovým scintilačním detektorem od firmy Canberra industries, inc. (Obrázek 6).



*Obrázek 6 Měřicí přístroj s počítačovou technikou*

Následně jsme se naučili pracovat s počítačovým programem OSPRAY Genie, kde jsme zadali požadavky na měření. V programu jsme zvolili měření radionuklidu  $^{131}\text{I}$  a následně jsme zadali frekvenci měření jednoho vzorku (5 opakování – cyklů proměřování), přičemž délku trvání jednoho cyklu měření jsme zvolili 180 s (1 vzorek – 15 minut měření). Když byl program nastaven do potřebného režimu, zkumavku jsme odebrali ze stojanu a umístili do detektoru. Následně bylo stiskem tlačítka „start“ zahájeno měření. Po ukončení celého cyklu jednoho měření jsme vždy vzorek vyměnili za vzorek následující a zahájili jsme nové měření následujícího vzorku. Již proměřený vzorek jsme opět vložili do stojanu, tentokrát z pravé strany stejné řady, aby nedošlo k záměně vzorků (Obrázek 7).



*Obrázek 7 Systém řazení zkumavek se vzorky*

Na závěr jsme změřili také aktivitu pozadí, která byla zohledněna při určení kalibrační křivky (převod mezi měřeným počtem impulsů a objemovou aktivitou vzorku (Bq/l)). Měření probíhalo pomocí zkumavky stejného typu, jako byly zkumavky se vzorky z jímek. Tuto zkumavku jsme naplnili 3 ml čisté kohoutkové vody a uzavřeli víčkem. Následně jsme zkumavku umístili do detektoru a měřili stejným principem jako u měření vzorků z jímek, tedy 5 cyklů měření, každý po 180 s.

Fyzik z vybraného oddělení provedl ještě před naší návštěvou kalibraci studnového scintilačního detektoru a rovněž nám poskytl kalibrační křivku, jejíž rovnici jsme použili během výpočtů.

Po ukončení všech měření a následné kontrole naměřených hodnot jsme zbylé vzorky ponechali v původních nádobkách a přemístili je do vymírací místnosti. Zkumavky, které byly kontaminované vzorky z jímek, se uložili do centrální vymírací místnosti v PE sáčku k vymírání. Gumové rukavice, v nichž byly lahvičky se vzorky, a zástěry, ve kterých jsme se vzorky manipulovali, se umístily do řádně popsané stíněné nádoby na odpad.

### **Úprava naměřených hodnot**

Naměřené hodnoty pomocí digitální vícekanálového analyzátoru spekter se studnovým scintilačním detektorem byly udávány v počtech impulsů (countů). Z jedné jímkou jsme v rámci každého experimentálního měření stanovili 25 hodnot, z nichž byla vypočtena průměrná hodnota, která následně reprezentovala danou jímkou.

Ve výpočtech jsme rovněž zohlednili čas, který uplynul mezi odběrem vzorku a jeho proměřením (vzhledem k fyzikálnímu poločasu přeměny  $^{131}\text{I}$  obsaženého ve vzorcích odpadní vody), neboť aktivita (v našich výpočtech počet impulsů) radionuklidu klesá exponenciálně s časem  $t$  podle rovnice:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t}$$

$A(t)$ ...Aktivita v době měření (počet impulsů v čase měření)

$A_0$ ...Aktivita v době odběru (počet impulsů v době odběru)

$T_{1/2}$ ...fyzikální poločas přeměny  $^{131}\text{I}$  (8,04 dne = 192,96 hod (16) )

$t$ ...časový rozdíl mezi okamžikem měření a odběru

Potřebovali jsme přepočítat počet impulsů (aktivitu) v čase odběru ( $A_0$ ), a proto jsme si rovnici upravili.

$$A_0 = A(t) \cdot e^{\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t}$$

Po úpravě rovnice jsme dostali konkrétní hodnoty počtu impulsů (aktivity) v době odběru. Ty jsme museli následně upravit a zohlednit v nich přítomné radionuklidy. Vypočítané hodnoty jsme dále dosadili do rovnice z kalibrační křivky, která byla vytvořena pracovníkem vybraného oddělení. V rovnici již byly hodnoty získané z kalibrační křivky pro radionuklid  $^{131}\text{I}$  (z hlediska fyzikálního poločasu přeměny a energie nejvýznamnější ze všech radionuklidů v odpadní vodě obsažených). Přepočet impulsů na aktivitu měřeného vzorku v jednotkách [Bq] byl stanoven na základě kalibrační křivky, která udává vztah měřeného počtu impulsů za 60 s a objemové aktivity vzorku v Bq/3 ml. Tato kalibrace byla provedena proti čisté vodě (3 Bq/ml) a odpovídá 165 impulsů za minutu:

$$\frac{X + 152}{21\ 104} = A(\text{Bq})$$

$X$ ...počet měřených impulsů za 60 s (aktivita je vztažena na 3 ml vzorku)

### ***Vyhodnocení výsledků***

Všechny naměřené hodnoty z experimentálního měření jsme přepočítali na hodnoty v jednotkách Bq/l, abychom výslednou hodnotu experimentu mohli porovnat s hodnotou uvolňovací úrovně objemové aktivity radiojódů  $^{131}\text{I}$ , kterou lze dle požadavků SÚJB vypustit do veřejné kanalizace. Objemová aktivita odpadní vody kontaminované  $^{131}\text{I}$  musí být pod úrovní uvolňovací úrovně, konkrétně 454 Bq/l (vypočtena na základě definice této úrovně ve vyhlášce (11) a jejich přílohách pro konkrétní radionuklid  $^{131}\text{I}$ ). Z ostatních radionuklidů se do vymírací jímky dostává jen  $^{18}\text{F}$  (poločas rozpadu 110 min), který celkovou aktivitu odpadní vody téměř neovlivňuje.

Na závěr byly okomentovány vypočtené hodnoty objemové aktivity v den odběrů vzorků z jednotlivých vymíracích jímek. U jímky, která byla v den měření vypouštěna, bylo provedeno srovnání s objemovou aktivitou, kterou lze vypustit do veřejné kanalizace.



## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Popis vybraného pracoviště nukleární medicíny

V této části bakalářské práce budeme popisovat vybrané pracoviště nukleární medicíny. Během návštěvy tohoto pracoviště nukleární medicíny, kde probíhala i experimentální část práce, jsme byli obeznámeni s úsekem radiofarmak, s chodem v ambulantní části pracoviště a s lůžkovým oddělením, kde probíhá terapie pomocí radiojódu  $^{131}\text{I}$ . Také jsme byli seznámeni s technickým vybavením, diagnostickými či léčebnými metodami, které se na vybraném pracovišti provádí. Hlavním cílem naší návštěvy bylo zjistit, jakým způsobem se nakládá s RAO na pracovišti od jeho vzniku po jeho likvidaci na jednotlivých úsecích pracoviště a provést experimentální měření a vyhodnocení vzorků odpadní vody z vymírácích jímek.

#### 5.1.1 Diagnostická část pracoviště

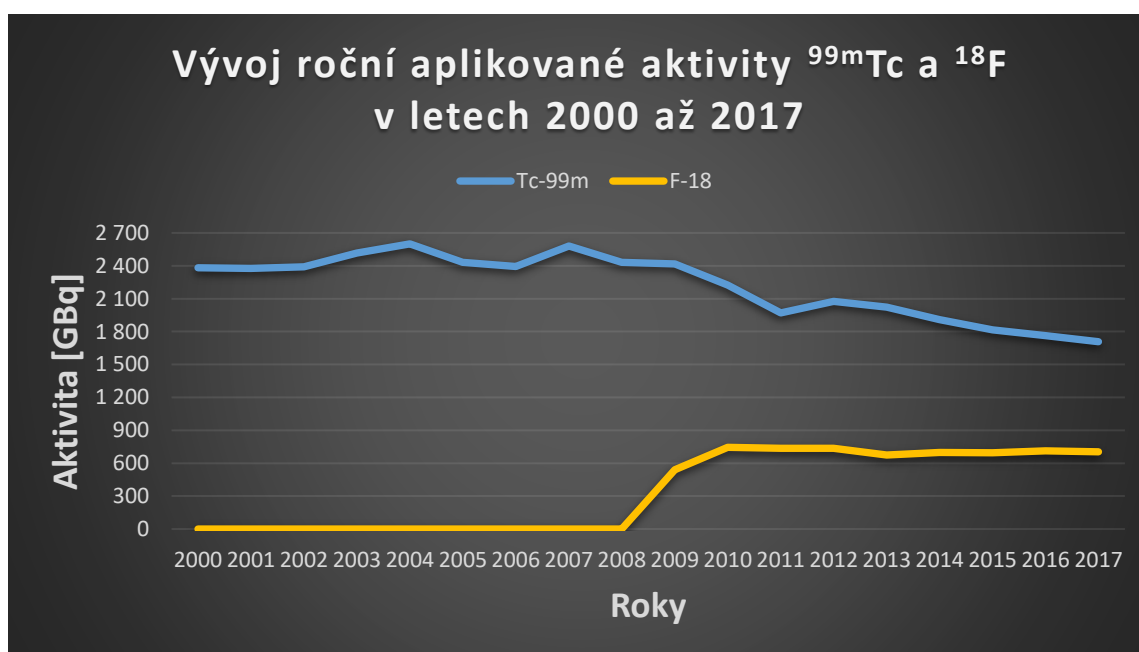
Navštívené pracoviště oddělení nukleární medicíny (ONM) provádí v současné době většinu diagnostických výkonů NM (konvenční scintigrafické a vyšetření pomocí PET. Jedná se o řadu přínosných metod v celé řadě medicínských oborů (onkologii, kardiologii, hematologii, pneumologii, nefrologii, gastroenterologii a dalších). Mezi nejčastěji prováděná vyšetření na tomto pracovišti patří scintigrafická vyšetření skeletu, ledvin, plic, štítné žlázy, perfuse myokardu a mozku, zobrazování nádorů a zánětů. Vybrané pracoviště disponuje jednou jednodetektorovou gamakamerou a dvěma hybridními přístroji SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography), které jsou doplněny CT. Dále je na pracovišti v provozu hybridní zobrazovací přístroj PET/CT, který hraje nezastupitelnou roli v diagnostice a sledování léčby u řady nádorů a zánětů.

Pro diagnostické potřeby se na tomto pracovišti připravují nejčastěji radiofarmaka značená radionuklidy  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , používají se zde ale i s radiofarmaky značenými radionuklidy  $^{111}\text{In}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ , nebo  $^{123}\text{I}$ . Na pracovišti také probíhá in vitro značení krev-

ních elementů pomocí  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$  a  $^{51}\text{Cr}$  (značení leukocytů, trombocytů). Nejčastějším radiofarmakem používaným pro vyšetření pomocí PET/CT je fluorodeoxyglukóza ( $^{18}\text{F}$ -FDG), značená radioizotopem fluoru  $^{18}\text{F}$ .

Léčba nádorových i nenádorových onemocnění pomocí radiofarmak emitujících záření  $\beta^-$  může být na daném pracovišti prováděna částečně ambulantně (paliativní léčba kostních metastáz, radiosynovektomie, aj.), převážně však terapie probíhá na speciální lůžkové části pracoviště (především se zde provádí terapie pomocí  $^{131}\text{I}$ ). Pro veškerou činnost má vybrané oddělení nukleární medicíny platná povolení od SÚJB.

Vývoj roční aplikované aktivity za roky 2000 až 2017 je na Obrázku 8 pro radionuklidy  $^{99m}\text{Tc}$  a  $^{18}\text{F}$ . Právě tyto RN patří k nejpoužívanějším ke značení radiofarmak na vybraném pracovišti (21).



Obrázek 8 Vývoj roční aplikované aktivity ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{18}\text{F}$ ) v letech 2000 až 2017

Na Obrázku 8 vidíme vývoj roční aplikované aktivity nejpoužívanějšího radionuklidu v nukleární medicíně, kterým je  $^{99m}\text{Tc}$ . Na tomto obrázku lze vidět, že množství aplikované aktivity  $^{99m}\text{Tc}$  na vybraném pracovišti v posledních letech mírně klesá a průměrná hodnota aplikované aktivity za 17 let je přibližně

2 220 GBq. Na Obrázku 8 je též zobrazen vývoj aktivity u radionuklidu  $^{18}\text{F}$ , který se začal na vybraném pracovišti používat v roce 2009, kdy byl na pracovišti instalován hybridní přístroj PET/CT a jeho průměrná hodnota aplikované aktivity za 9 let je okolo 690 GBq.

Na pracovišti se kromě výše uvedených RN používají i jiné v menší míře. Je to např. radionuklid  $^{123}\text{I}$ , který se začal na vybraném pracovišti používat od roku 2016, a jeho průměrná hodnota roční aplikované aktivity je zhruba 3,5 GBq. Radionuklid  $^{201}\text{Tl}$  se používal na pracovišti v letech 2000 až 2004, kdy byla průměrná hodnota roční aplikované aktivity 8 GBq, nyní se už nepoužívá. Dalším radionuklidem používaným na vybraném oddělení je  $^{67}\text{Ga}$ , který se nejvíce používal v letech 2000 až 2004, kdy jeho hodnota průměrné roční aktivity byla přibližně 68 GBq. Naopak v letech 2013 až 2017 se tento radionuklid používal již jen zřídka, hodnota průměrné roční aktivity byla v těchto letech 2 GBq. Radionuklid  $^{111}\text{In}$  se v letech

2000 až 2017 stále používá v podobném množství, hodnota roční aplikované aktivity se v průběhu všech 17 let pohybuje okolo 4 GBq.

### ***Radioaktivní odpad na diagnostické části pracoviště***

Na pracovišti ONM se při nakládání s ZIZ v rámci výše uvedených činností skladují a likvidují pevné a tekuté RAO. Plynné odpady tvoří na tomto ONM zanedbatelnou část, protože se všechna radiofarmaka připravují v laminárních boxech nebo digestořích. Monitorování těchto odpadů tedy na vybraném pracovišti není nutné (veškerá činnost popsána v dokumentaci předkládané SÚJB (19)) a tyto odpady nejsou v rámci bakalářské práce podrobněji řešeny.

Základní rámec pro nakládání s odpady a jejich likvidaci je dán vnitřní směrníci fakultní nemocnice, do které ONM patří (20). Dle této směrnice odpad obsahující radioaktivní látky patří mezi nebezpečný zdravotnický odpad. RAO je soustředěn do vymíracích místností, vybrané pracoviště ONM disponuje třemi. Jedna se na-

cháží na ambulantním úseku a je stavebně včleněná do úseku PET/CT. Druhá centrální vymírací místnost, je největší a patří do úseku radiofarmak. Třetí vymírací místnost je součástí lůžkového oddělení terapeutické části ONM. Všechny vymírací místnosti jsou stíněné, stavebně oddělené od ostatních místností, s dveřmi stíněnými olovem. RAO je likvidován jako neaktivní dle uvedené směrnice po proměření, které ověří, že došlo k poklesu aktivity pod uvolňovací úroveň. Tyto hodnoty jsou stanoveny vyhláškou (11) v platném znění. Kontrolní měření RAO provádí pověřený pracovník. Po likvidaci odpadu je následně proveden záznam do knihy o likvidaci odpadu. V této knize je uvedena přesná evidence odpadu, jeho množství, datum uložení odpadu nebo např. datum uvolnění odpadu. Dále se do knihy odpadů uvádí, kolik nádobek s jehlami bylo naplněno nebo kolik pytlů prádla se posílá k dalšímu zpracování. Pro již nepoužitelné generátory odpadu je na vybraném pracovišti zvláštní záznamová kniha, kam se uvádí například datum, kdy si pro generátory přijíždí autorizovaná firma.

Vybrané pracoviště tedy disponuje ambulantní částí a částí lůžkovou (terapie  $^{131}\text{I}$ ) a úsekem radiofarmak. Další část pracoviště tvoří zázemí pro zdravotnický personál pracující na vybraném oddělení. V následující části práce popíšeme nakládání s RAO na jednotlivých částích pracoviště.

### ***Ambulantní část pracoviště a vznikající radioaktivní odpad***

Součástí ambulantního úseku jsou recepce, čekárna pacientů včetně sociálního zařízení, část, kde jsou umístěny tři gama kamery s vyšetřovnými a ovladovnými, aplikační místnosti radiofarmak a ambulance. Dále se zde nachází technické místnosti a zázemí pro zdravotnický personál. V ambulantní části je stavebními úpravami vyčleněn PET/CT úsek speciálně pro diagnostiku pomocí pozitronových radiofarmak. V tomto úseku se nachází vyšetřovna s PET/CT zařízením, ovladovna, aplikační místnost, stíněné boxy pro pacienty (včetně sociálního zařízení), technické zázemí a přípravná pozitronových radiofarmak.

Na tomto úseku vzniká nejvíce radioaktivního odpadu v pevném skupenství. Radionuklidy kontaminovaný pevný odpad je v pracovní době operativně skladován v aplikačních místnostech a vyšetřovných ambulantní části. K tomuto účelu slouží stíněné trezorky a nádoby na pevný RAO (stříkačky, tampony kontaminované krví, sety kanyl, gumové rukavice kontaminované radiofarmaky, aj.), které jsou umístěné vždy v blízkosti pracovních ploch celé ambulantní části (včetně PET/CT). Dále se na těchto místech nachází stíněné kontejnery na jehly a stíněné koše na ostatní odpad. RAO se vždy vkládá do polyetylenového (PE) sáčku, který je vložen do stíněné nádoby (koše). Po naplnění těchto obalových souborů je odpad přemístěn do vymírací místnosti na úseku PET/CT (určené pro odpad kontaminovaný  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{123}\text{I}$  a  $^{18}\text{F}$ ). Tato vymírací místnost je umístěna tak, aby byla dostupná všem pracovníkům ambulantní části pracoviště. Jelikož je tato vymírací místnost malá, dojde-li k jejímu naplnění, RAO se poté ukládá do centrální vymírací místnosti. Jakékoliv přemístění RAO nebo radiofarmak probíhá v ochranném stínění. Odpad kontaminovaný ostatními radionuklidy je přemístěn a uložen v centrální vymírací místnosti. Tento odpad se dále dělí na infekční (náplasti, buničina, jehly od krve) a neinfekční (prázdné vialky od radiofarmak).

### ***Kapalný RAO***

Kapalný RAO ve formě zbytků radiofarmak, který zůstává ve vialkách, se po použití ihned přemístí dle druhu radionuklidu, a to buď do centrální vymírací místnosti, nebo do vymírací místnosti v ambulantní části. Tam se nechává do poklesu na uvolňovací úroveň a poté se s ním nakládá jako s ostatními zbytky farmak. Tekutý aktivní odpad, vylučovaný pacienty na sociálních zařízeních ambulantní části (mimo PET/CT úseku), je odváděn kanalizací, v níž dochází k jeho mísení s další odpadní vodou nemocnice. Je prokázáno, že při běžném denním provozu nemůže být překročena uvolňovací úroveň používaných radionuklidů. Z úseku PET/CT je odpad ze sociálního zařízení sveden do odpadních jímek, které jsou popsány v následující kapitole.

### **Radioaktivní odpad z úseku radiofarmak**

V těchto prostorách se provádí příprava radiofarmak před jejich aplikací pacientům. Úsek radiofarmak má 3 části, které jsou na pracovišti ONM rozmístěny dle potřeby. Patří do něj:

1. hlavní úsek radiofarmak s moderně vybavenou radiofarmaceutickou laboratoří („čisté prostory“) a centrální vymírací místností;
2. část užívána pro přípravu pozitronových radiofarmak vyčleněná na PET/CT úseku a vymírací místností;
3. část na lůžkové části specializovaná na přípravu radiofarmak značených radionuklidem  $^{131}\text{I}$  a vymírací místnost.

### **Hlavní úsek radiofarmak**

Na tomto úseku se připravují radiofarmaka značená radionuklidy (nejčastěji  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ) a také zde probíhá in vitro značení krevních elementů ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ). Při práci v úseku radiofarmak vzniká pevný i kapalný RAO podobného charakteru, jako na ambulantní části a nakládá se s ním stejným způsobem. Všechna práce s radiofarmaky probíhá ve stíněných klimatizovaných digestořích a laminárních boxech. Při práci v čistých prostorech úseku radiofarmak je vznikající RAO odpad (stříkačky, gumové rukavice kontaminované radiofarmaky, vialky od radiofarmak) operativně skladován na pracovních místech ve stíněných schránkách, které jsou umístěné uvnitř těchto prostor. Po naplnění jejich kapacity je odpad uložen do centrální vymírací místnosti (Obrázek 9).



*Obrázek 9 Stíněné trezory na radioaktivní odpad v centrální vymírací místnosti*

Již nepoužitelné generátory ( $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) se skladují v trezoru v centrální vymírací místnosti, odkud si je specializovaná firma odváží k bezpečné likvidaci (Obrázek 10).



*Obrázek 10 Uskladnění již nepoužitelných radionuklidových generátorů ve stíněném trezoru v centrální vymírací místnosti*

Odpad rozřazujeme v centrální vymírací místnosti podle materiálu do jednotlivých barevně odlišených nádob, v kterých se navíc nacházejí barevně odlišené PE sáčky (Obrázek 11).



*Obrázek 11 Umístění radioaktivního odpadu v barevně odlišených polyethylenových sáčcích a nádobách*

V této místnosti se nachází i stíněné trezory. Ty jsou označeny názvy radionuklidů, které jsou v nich skladovány (např.  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ). V trezorech jsou umístěny vialky od radiofarmak buď prázdné, nebo se zbytky radiofarmak, popsané PE sáčky s obsahem stříkaček, náplastí, buničiny a dalšího odpadu (Obrázek 12).



*Obrázek 12 Uskladnění radioaktivního odpadu kontaminovaného stejným radionuklidem ve stíněném trezoru*

### **PET/CT úsek**

Nejčastějším radiofarmakem používaným pro vyšetření pomocí PET/CT je fluoroxyglukóza ( $^{18}\text{F}$ -FDG), značená radioizotopem fluoru  $^{18}\text{F}$ . Jeho příprava



před aplikací pacientům probíhá na PET/CT úseku, kde vzniká i RAO. Postup zpracování pevného i kapalného RAO při přípravě radiofarmak je stejný, jako je popsán výše u ambulantní části pracoviště. Jedinou výjimkou je to, že RAO ze sociálního zařízení pacientů na tomto úseku je potrubím veden do vymíracích jímek. Úsek PET/CT má vlastní malou vymírací místnost, která je vidět na Obrázku 13.



Obrázek 13 Vymírací místnost na úseku PET/CT

#### 5.1.2 Lůžková část pracoviště

V lůžkové části oddělení se výhradně provádí léčba radiojódem některých nádorových i nenádorových onemocnění (hypertyreóza, diferenciovaný karcinom štítné žlázy). Pacienti jsou hospitalizováni na oddělení, kde jim je přidělen jeden z šesti jednolůžkových pokojů. V něm tráví veškerý čas potřebný k léčbě. Pacienti po aplikaci  $^{131}\text{I}$  již svůj pokoj neopouštějí až do jejich propuštění.

K podání radiofarmak značeného  $^{131}\text{I}$  dochází v aplikační místnosti na lůžkovém oddělení. Tato místnost je rozdělena na část, kde radiofarmaceut připravuje požadované množství aktivity radiojódu (množství aktivity pro jednotlivé pacienty je stanoveno lékařem) a na část, kde ji pacient obdrží a perorálně užije buď ve formě roztoku, nebo kapsle, či jsou tyto dvě metody kombinovány.

Ihned po požití radiofarmak značeného  $^{131}\text{I}$  se pacient odebírá na svůj pokoj, který má vlastní sociální zařízení, telefon, televizi a rádio. Tento pokoj má odstíněné stěny vrstvami barytového betonu. V průběhu terapie pacient používá pouze nemocniční prádlo (povlečení, prostěradla, oděv), které se poté zpracovává jako aktivou kontaminovaný odpad.

Na oddělení se nachází automatická pračka, kde se toto prádlo může předepírat (za použití dekontaminačních prostředků). Místnost s pračkou je vybavena spádovanou podlahou, aby při nežádoucím úniku vody z pračky všechna стекла do odpadu, který je sveden do vymíracích jímek. Po přeprání se prádlo může přemístit do prádelny nemocnice, pokud je dávkový příkon záření  $\gamma$  naměřený ve vzdálenosti 1 cm od povrchu prádla menší než  $5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  (16). Další možností je kontaminované prádlo ukládat do látkových nebo igelitových pytlů ve vymírací místnosti přítomné na oddělení, než dojde k poklesu aktivity na požadovanou úroveň. Následné odeslání prádla do prádelny je možné opět po proměření dávkového příkonu jako v předchozím případě (16).

Pacient léčený pomocí radiofarmak značených radionuklidem  $^{131}\text{I}$  by měl v průběhu hospitalizace přijímat větší množství tekutin z důvodu vylučování přebytečné aktivity močí, slinami, potem a exkrementy (16). Rovněž je mu doporučováno, aby zvýšil frekvenci osobní hygieny (pot) a snížil tak svoji radiační zátěž. Pokud se jedná o stravování, pacientovi je předepsána určitá dieta (dle jeho onemocnění) a zbytky stravy se skladují v lednici ve vymírací místnosti nebo se drtí pomocí drtičky na oddělení, odkud je nadrcený odpad sveden do vymíracích jímek.

V této části oddělení vzniká především radioaktivní odpad ve formě kapalné, v daleko menší míře potom pevný radioaktivní odpad. Veškerý kapalný RAO (sociální zařízení, veškerá umyvadla na oddělení, voda z pračky, myčky) z tohoto oddělení je sveden do speciálního systému nádrží (vymíracích jímek). Největší množ-

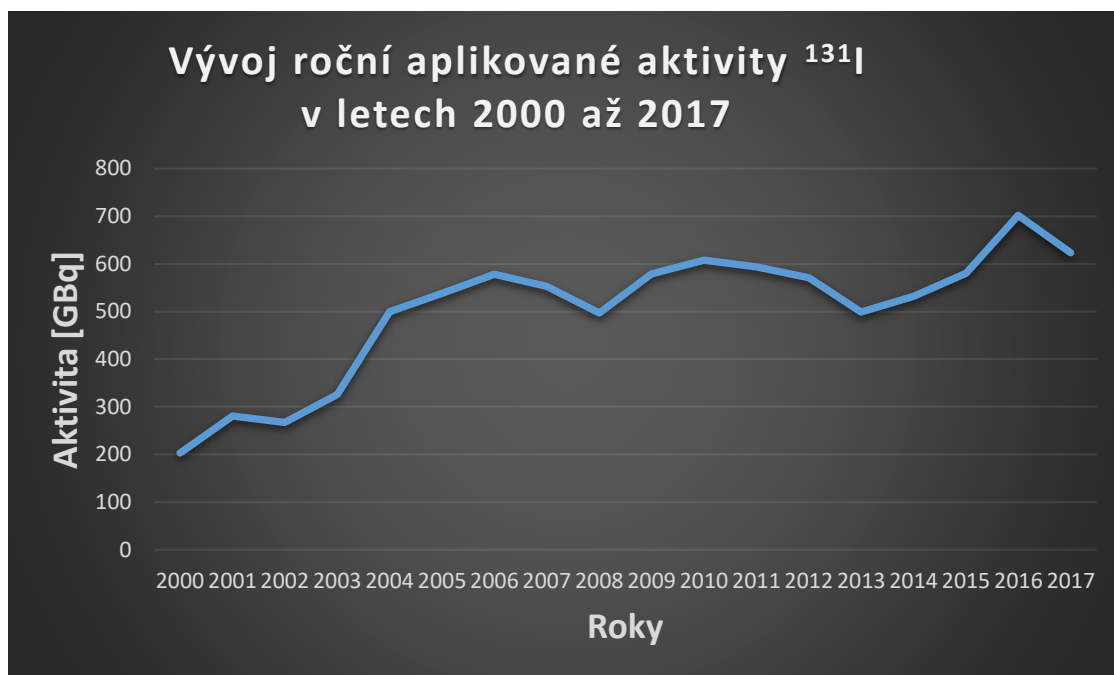
ství kapalného radioaktivního odpadu v jímkách je tedy z terapeutického úseku nukleární medicíny a v menší míře přispívá i část diagnostická (PET/CT). Pevný odpad zde vzniká ze zbytků jídla pacientů, jejich lůžkovin a prádla. Zbytky potravin se ukládají v PE sáčcích do lednice přítomné v malé vymírací místnosti na lůžkovém oddělení (Obrázek 14).



*Obrázek 14 Vymírací místnost na lůžkovém oddělení vybraného pracoviště*

Jedná-li se o textil, ten se buď předepírá v pračce, nebo se uskladní v látkových pytlích ve vymírací místnosti. Na oddělení také vzniká odpad ze sekce radiofarmaceutické, a to po podání potřebné dávky aktivity ve formě roztoků a kapslí. Zbytky radiofarmak se ponechávají ve vialkách a jsou umístěny do stíněných trezorů k vymírání a pevný odpad (vialky) se ukládá k vymírání do vymírací místnosti.

Na Obrázku 15 je vidět vývoj roční aplikované aktivity radionuklidu  $^{131}\text{I}$  v letech 2000-2017 na vybraném pracovišti (21). Z grafu je vidět, že za sledované období dochází k nárůstu množství aplikované aktivity na pracovišti. Průměrná roční hodnota aplikované aktivity za 17 let je přibližně 500 GBq.



Obrázek 15 Vývoj množství aplikované aktivity<sup>131</sup>I v letech roky 2000 až 2017

Dále se na pracovišti v menší míře používá radionuklid <sup>90</sup>Y. Průměrná hodnota roční aplikované aktivity radionuklidu <sup>90</sup>Y se v letech 2000-2017 pohybuje okolo 2 GBq. Od roku 2000 do roku 2009 se na vybraném pracovišti uskutečňovala i léčba <sup>153</sup>Sm (<sup>153</sup>Sm-EDTMP), kdy byla v těchto 9 letech hodnota průměrné roční aktivity 30 GBq, nyní už na pracovišti tímto radionuklidem neléčí. V letech 2004 až 2009 se na pracovišti používal radionuklid <sup>186</sup>Re, kdy byla hodnota průměrné roční aktivity 9 GBq a v letech 2016 a 2017 se k léčbě na pracovišti používal i radionuklid <sup>223</sup>Ra, kdy se průměrná hodnota roční aplikované aktivity pohybuje okolo 0,03 GBq.

### 5.1.3 Vymírací jímky

Přímo z lůžkového oddělení je sveden odpad do přijímací jímky, kde setrvává do doby, než je naplněna do stanoveného objemu. Ten je určen výškou hladiny jímky (na zvoleném pracovišti od 60 cm do 172 cm). Dosáhne-li hladina jímky stanovené výšky, dojde pomocí čerpadla k přečerpání obsahu jímky do jímky vymírací (výška hladiny se měří pomocí speciální ultrazvukové sondy plovoucí na hladině). K naplnění jedné zásobní jímky je potřeba zhruba 25 čerpání z jímky přijímací.

Oddělení nukleární medicíny na zvoleném pracovišti disponuje 6 vymíracími jímkami. Téměř vždy se plní jen jedna jímka, jejíž reálný objem je 21 m<sup>3</sup> (v praxi se plní zhruba do 17 - 18 m<sup>3</sup>). Po dosažení tohoto objemu se jímka uzavírá a dochází k vymírání radionuklidů, které jsou v odpadu obsaženy. Při tomto období je jímka uzavřena, a pouze se každodenně kontroluje aktivita v jímce pomocí na její stěně připojeného měřiče aktivity ve vodotěsném obalu. Období „vymírání“ je cca 2 - 4 měsíce. Po uplynutí této doby by aktivita v jímkách měla poklesnout pod uvolňovací úroveň danou legislativou (11) a obsah jímek se dále přečerpává do šachty (každé tři jímky mají společnou šachtu) a následně se tento odpad dostává do chlorovacího okruhu čističky odpadních vod a dále do kanalizace odpadních vod odtékajících z nemocnice. Ta je poté vedena do nedaleké čističky odpadních vod.

Kaly, které se usazují na dně jímek, jsou odváděny z výstupní jímky na kalová pole, kde se po určitou dobu skladují a po odebrání vzorků a proměření potřebných aktivit je s nimi nakládáno jako s běžnou zeminou. Jímka se čistí proudem vody a také ji lze vyvětrat otevřením poklopu.

Celý proces od plnění jímky po její vypuštění je sledován technickými pracovníky nemocnice v řídicím centru čističky odpadních vod nacházející se v areálu nemocnice. Každý den pomocí měřících systémů v jímkách sledují a zaznamenávají výšku hladiny vody (ultrazvukové měřidlo) a objemovou aktivitu v každé jímce (Geiger-Müllerův počítač). Vždy musí být minimálně jedna jímka zcela prázdná, aby v případě havárie nebo odchylky od normální situace mohl být celý její obsah přečerpán do prázdné jímky. Z dokumentace lze zjistit, od kdy se jímka plní, jak dlouho vymírá či jaké jsou momentální aktivity v jímce. Z této dokumentace jsme čerpali při zpracování dat.

## 5.2 Pravidelné rutinní monitorování vymíracích jímek

Z poskytnutých dat pravidelného rutinního monitorování vymíracích jímek jsme vytvořili tabulku a grafy, které znázorňují vývoj objemové aktivity v jednotlivých vymíracích jímkách.

V Tabulce 4 je uvedeno období, po které byly dané jímky plněny (zahájení plnění až po vypuštění).

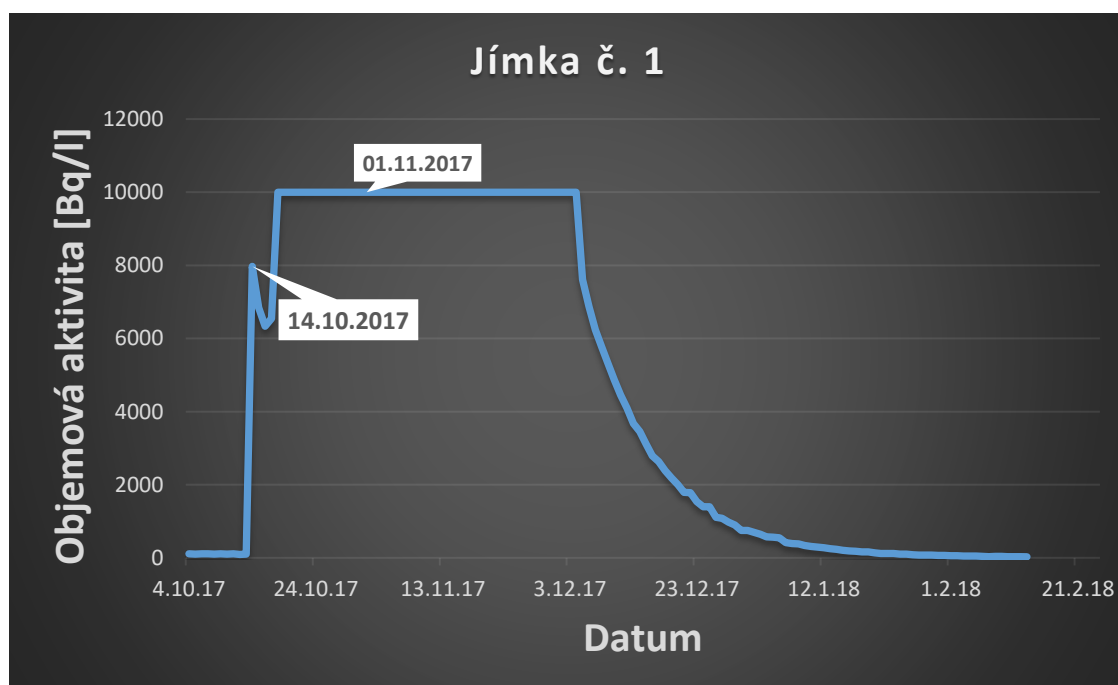
Tabulka 4 Data o začátcích plnění, uzavření a případném vypuštění vymíracích jímek

Jímka	Datum zahájení plnění jímky	Datum uzavření jímky	Datum vypuštění jímky
Jímka č. 1	14.10.2017	3.11.2017	Vymírání jímky
Jímka č. 2	1.11.2017	13.12.2017	Vymírání jímky
Jímka č. 3	15.12.2017	24.1.2018	Vymírání jímky
Jímka č. 4	27.1.2018	*V době měření byla jímka ještě plněna	*V době měření byla jímka ještě plněna
Jímka č. 5	11.7.2017	22.9.2017	22.1.2018
Jímka č. 6	22.9.2017	14.10.2017	13.2.2018

\*13.2.2018 bylo provedeno měření, jímka se poté plnila dále

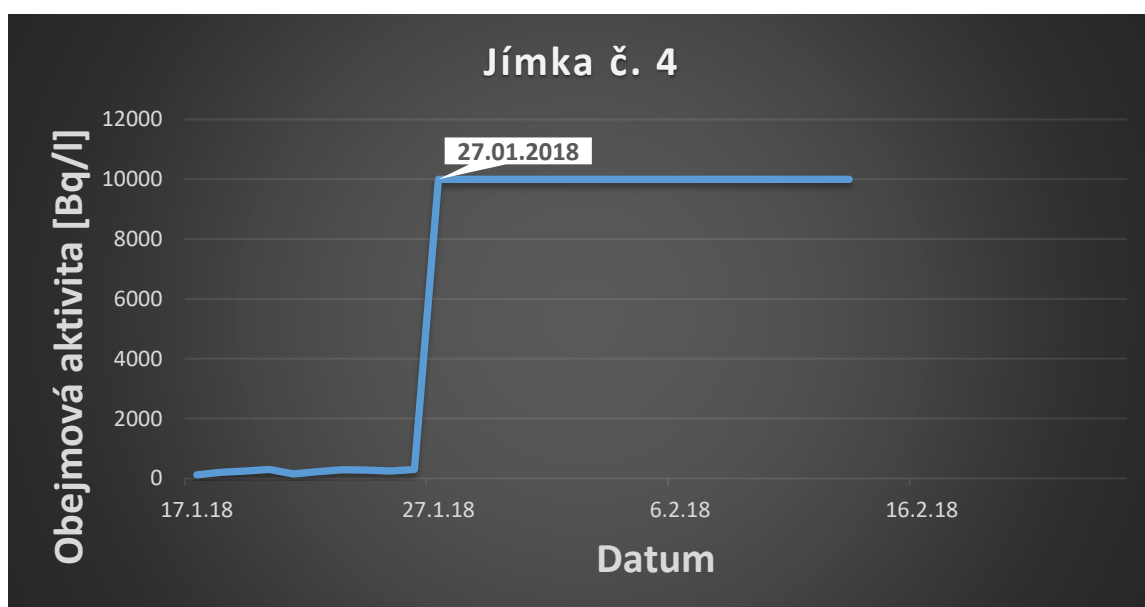
Obrázek 16 až Obrázek 19 podávají informaci, jak se vybrané jímky plní, vymírají a jak velká je objemová aktivita v závislosti na čase. První graf (Obrázek 16) znázorňuje jímku naplněnou ve stádiu vymírání, na druhém vidíme aktuálně (13.2.2018) se plnící jímku (Obrázek 17). Na třetím grafu (Obrázek 18) je znázorněna jímka obsahující pouze kalovou vodu a na posledním z grafů je vidět graf vývoje aktivity v jímce, která je těsně před vypuštěním (Obrázek 19). Tyto grafy byly zpracovány z dat poskytnutých jedním z pracovníků oboru energetiky a odpadového hospodářství z provozně technického úseku čističky odpadních vod, kde se každodenně zaznamenávají údaje o jímkách. V těchto záznamech jsou uvedeny například hodnoty minimální aktivity, stavu hladin nebo počtu čerpání. Z těchto záznamů lze vyčíst, kdy se jímka začala plnit, kdy byla uzavřena k vymírání, kdy

byla vypuštěna, jaká je její aktuální hladina nebo minimální aktivita. Také je zde uvedena informace o tom, zda v daný den proběhlo čerpání ze vstupní jímky do jímky vymírací, která se aktuálně plní. K vytvoření těchto grafů jsme použili data o objemové aktivitě v závislosti na určitém období (vždy jsme zahrnuli 10 dní před začátkem plnění jímky až do data, kdy proběhlo měření). Všechny hodnoty na ose  $y$  v grafu končí u čísla 9 999, protože na vybraném pracovišti display měřícího zařízení ukazuje maximálně 4 číslice. I když je ve skutečnosti naměřeno více než 9 999 impulsů minimální aktivity, display stále ukazuje pouze 9 999. Na grafech je vždy zobrazeno datum začátku plnění jímky a datum uzavření jímky, kdy už do jímky žádný odpad nepřitékal, ale jímka pouze „vymírala“. Po uplynutí určité doby (na vybraném pracovišti nejčastěji 2 - 3 měsíců v závislosti na počtu pacientů a velikosti aplikovaných aktivit), kdy objemová aktivita odpadní vody poklesne pod uvolňovací úroveň danou vyhláškou (11), která je 454 Bq/l (hodnota vypočítaná pro radiojód  $^{131}\text{I}$ ) lze tento odpad vypustit do veřejné kanalizace.



Obrázek 16 Vývoj objemové aktivity v jímce č. 1

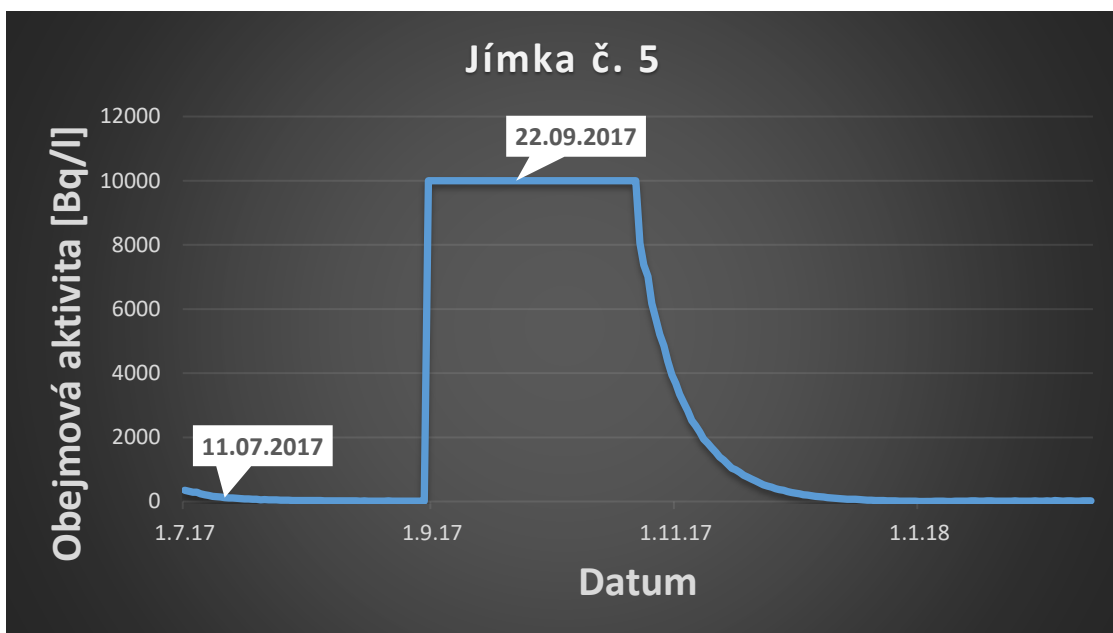
Na Obrázku 16 je vidět vývoj objemové aktivity v závislosti na čase (datumu), např. dne 17. 10. 2017 došlo k podání celkové dávky 13,4 GBq (17). To se projevilo hned druhý den zvýšením objemové aktivity v jímce – hodnota nad 9 999 Bq/l. V období od uzavření jímky (1. 11. 2017) je vidět exponenciální pokles dle rozpadového zákona. Po uplynutí cca 60-70 dní klesá aktivita pod hodnotu uvolňovací úrovně pro radiojód  $^{131}\text{I}$ . Celkem bylo během otevření jímky č. 1 pacientům podáno 60,4 GBq během 4 týdnů (17. 10. 2017, 25. 10. 2017 a 1. 11. 2017) (17). Jímka č.2 i jímka č.3 jsou ve fázi vymírání, pro znázornění trendu vymírání nám postačí grafické znázornění jímek č. 1 a č.6.



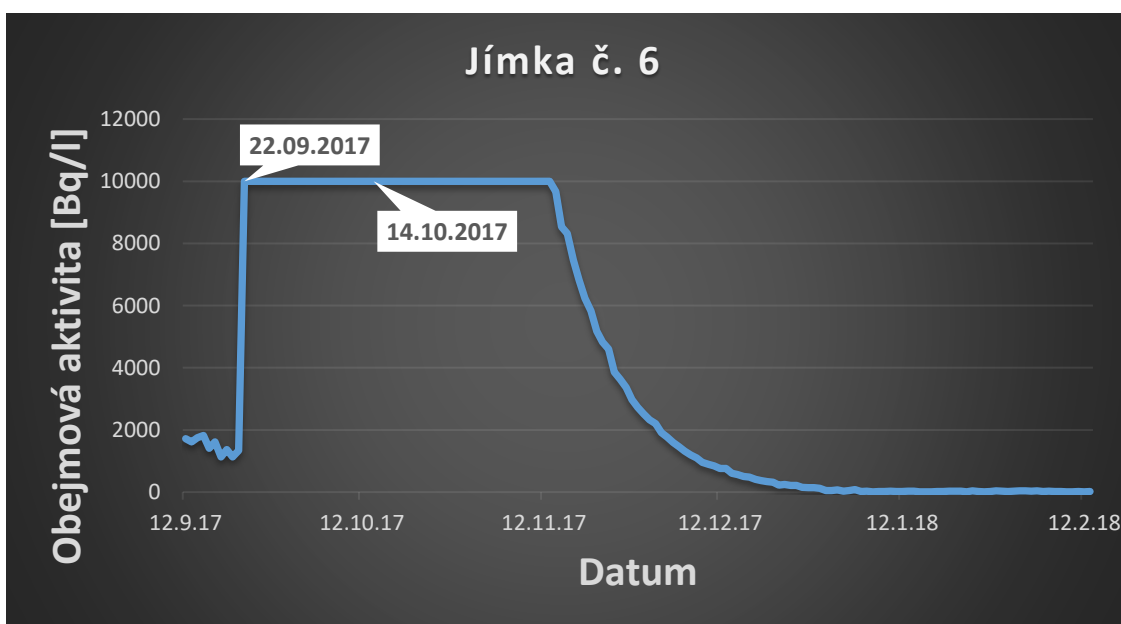
Obrázek 17 Vývoj objemové aktivity v jímce č. 4

Na Obrázku 17 vidíme jímku č. 4, která byla v době měření aktivně plněna, proto je aktivita na maximální možné zobrazitelné hodnotě.





Obrázek 18 Vývoj objemové aktivity v jímce č. 5



Obrázek 19 Vývoj objemové aktivity v jímce č. 6

Na Obrázku 18 a Obrázku 19 vidíme jímky č. 5 a č. 6, kde po jejich uzavření došlo k exponenciálnímu poklesu aktivity dle rozpadového zákona. Jímka č. 5 je již vypuštěna a měření bylo provedeno na vzorku kalové vody ze dna jímky. U jímky č. 6 jsme odebrali vzorky před jejím vypuštěním v dopoledních hodinách dne, kdy probíhal odběr (13. 2. 2018).

### 5.3 Experimentální měření na vybraném oddělení nukleární medicíny

Po odběru vzorků z vymíracích jímek v čistící stanici jsme proměřili objemovou aktivitu odpadní vody a naměřené hodnoty dále zpracovali. V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty objemové aktivity, které byly vypočteny na základě měření.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty objemové aktivity vzorků z vymíracích jímek

Jímka	Objemová aktivita vzorku [Bq/l]
Jímka č. 1	4
Jímka č. 2	8
Jímka č. 3	92
Jímka č. 4	762
Jímka č. 5	3*
Jímka č. 6	3*

\*Úroveň pozadí

Naměřené hodnoty odpovídají záznamům vedeným o každé jínce pracovníky provozně technického úseku. U jímký č. 4 je oproti ostatním jímkám vidět větší hodnota objemové aktivity z důvodu aktuálního plnění jímký. U jímký č. 3 je větší hodnota oproti jímkám č. 1, č. 2, č. 5 a č. 6 z toho důvodu, že její období vymírání je teprve na svém začátku. Je nutné dodat, že objemová aktivita v jímkách se liší s ohledem na konkrétní počet pacientů hospitalizovaných na oddělení, kterým je podávána aktivita. Také záleží na velikosti aplikované aktivity pacientovi, která se liší podle typu onemocnění a léčebného záměru.

Relativní odchylka těchto hodnot se pohybuje kolem 20 %. Jelikož jsme vzorek z každé jímký rozdělili do pěti vzorků a každý měřili 5x, snížili jsme relativní chybu měření pod 1 %. Největší chybu do výpočtu v oblasti takto nízkých aktivit vnáší kalibrace scintilační studny použité k měření. Pro praktické potřeby zjištění, zdali objemová aktivita vzorku z jímký nepřesahuje uvolňovací úroveň, je tato použitá technika dostačující (17).

U jímky č. 6 je možné porovnat naměřenou hodnotu s hodnotou vypočtenou na základě uvolňovací úrovně (454 Bq/l), protože ta byla vypouštěna ve stejný den jako proběhlo měření vzorků (13. 2. 2018). Při porovnání jsme ověřili, že jímka může být bezpečně vypuštěná do čističky odpadních vod, protože její hodnota objemové aktivity byla 3 Bq/l.

## 6 DISKUZE

Cílem praktické části bakalářské práce bylo popsat chod vybraného pracoviště v souvislosti s radioaktivními odpady, které zde vznikají. Z důvodu, že se na daném pracovišti nachází jak diagnostická část (klasická scintigrafie, PET/CT úsek) i lůžková část, můžeme porovnat nakládání s pevným a kapalným odpadem s jinými vybranými pracovišti v České republice.

### *Námi vybrané pracoviště (pevný a kapalný odpad)*

V ambulantní části pracoviště a na pracovišti PET/CT se aplikují radiofarmaka s nízkou aktivitou v porovnání s lůžkovou částí pracoviště. Odpad, který zde vzniká, je v pevné formě a je skladován ve stíněných trezorech v centrální vymírací místnosti v případě ambulantní části a ve vlastní vymírací místnosti pracoviště PET/CT. Tyto odpady jsou pravidelně monitorovány (několikrát týdně) a výsledná naměřená aktivita je porovnávána s uvolňovací úrovní danou legislativou. Poté se s odpadem zachází podle směrnic vybrané nemocnice (20). Naopak v lůžkové části oddělení se šesti pokoji, kde se ročně léčí zhruba 240 pacientů (17) vzniká pevný odpad jen ve velmi malém množství (zbytky potravin od pacientů, vialky od aplikovaných radiofarmak, prádlo) v porovnání s množstvím odpadu a ambulantním a PET/CT úseku pracoviště. Na druhou stranu je zde nejvíce zastoupen kapalný odpad. K jeho likvidaci vypuštěním do běžné kanalizace z vymíracích jímek dochází až poté, kdy jeho aktivita poklesne ve vymíracích jímkách pod uvolňovací úroveň (11). Dodržování této úrovně je zaručeno sledováním a zaznamenáváním hodnot z Geiger-Müllerova počítače přítomného v každé z šesti jímek pracovníky odboru energetiky a odpadového hospodářství z provozně technického úseku čističky odpadních vod.

Množství radioaktivních odpadů na pracovištích nukleární medicíny je obecně ovlivněno několika faktory. K nejdůležitějším z nich patří počet vyšetřovaných (diagnostická část pracoviště) a léčených (lůžkové oddělení) pacientů. Kapacity jed-

notlivých oddělení se liší v závislosti na počtu diagnostických přístrojů (počet SPECT/CT přístrojů, PET/CT přístrojů, gamakamer) a přítomnosti či nepřítomnosti lůžkového oddělení. Když má pracoviště nukleární medicíny také lůžkové oddělení, je nutné zajistit prostory pro skladování kapalného i pevného RAO. Podle počtu léčených pacientů se odvíjí počet těchto skladovacích prostor a jejich objem. Dále se množství RAO odvíjí od používaných radionuklidů. Záleží hlavně na jejich počtu (vyšetření s  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{57}\text{Cr}$ ), množství aplikované aktivity (aplikovaná aktivita se většinou odvíjí od hmotnosti pacienta a typem vyšetření, které podstupuje) a poločasu přeměny (delší poločas přeměny – delší doba skladování). Do jisté míry množství RAO ovlivňuje i biokinetika radiofarmaka v lidském těle (závislost na fyziologickém stavu pacienta).

### ***Porovnání s jinými pracovišti – pevný odpad***

Při zacházení s RAO musí být dodržována pravidla pro bezpečné nakládání s RAO, která jsou dána legislativou, ale mohou nastat případy, kdy se nakládání s RAO může drobně lišit mezi jednotlivými pracovišti NM. K odlišnostem může docházet např. v případech skladování pevných odpadů (některá oddělení používají kartonové krabice (22), jiné plastové nádoby nebo PE sáčky (19)). Vždy ale daný obalový soubor musí být řádně označen a umístěn ve vymírací místnosti. Na některých pracovištích se nacházejí ve vymíracích místnostech stíněné trezory (19), kam se odpad ukládá např. v PE sáčcích nebo v plastových nádobkách. Jinde jsou odpady v kartonových boxech uloženy do neprostupného olověného kontejneru a následně do vymírací místnosti (22). Radionuklidy kontaminované penicilíny se mohou ukládat samostatně do stíněných trezorů ve vymírací místnosti (19), nebo se vkládají do olověné stínící nádoby, který je poté uložen do vymírací místnosti (22). Pro nakládání s infekčním odpadem má dané nemocnice vždy vypracované svoje směrnice, podle kterých se s již neaktivní odpadem dále pracuje. Rozdíl nastává také např. v systému dokumentace odpadu. Na některých pracovištích je odpad označován elektronicky pro počítačové zaznamenání informací o od-

padu (22) na jiných jsou na obalových souborech štítky s informacemi o odpadu a vše je zaznamenáváno do dokumentačních knih (19).

### ***Porovnání s jinými pracovišti – kapalný odpad***

V Nemocnici České Budějovice, a.s. se rovněž provádí terapie radiojódem na lůžkovém oddělení s 12 pokoji. Kapalný odpad z oddělení je sveden do vymíracích nádrží umístěných ve sklepních prostorách budovy. Na oddělení jsou celkem 3 vymírací nádrže, každá o objemu 3 m<sup>3</sup>. Pro skladování kapalného odpadu ve vymíracích jímkách se zde používá tzv. „třítýdenní cyklus“, kdy se v období jednoho týdne po aplikaci pacientů odpad shromažďuje v jedné jímce, druhý týden je ponechán v nádrži k poklesu aktivity (vymírání) a v průběhu třetího týdne se nádrže 3x denně po dobu pěti dnů vypouští kanalizací do nádrže čističky odpadních vod přítomné v nemocničním areálu. Ke kontrole aktivity odpadní vody dochází po přepuštění odpadu do vypouštěcí nádrže, než je odpadní voda uvolněna do městské kanalizace (23).

Ve Fakultní nemocnici v Olomouci je kapalný odpad z lůžkového oddělení poskytující terapii <sup>131</sup>I odváděn kanalizací přímo do přečerpávací nádrže čističky, odkud je odpadní voda přečerpávána do jedné z osmi vymíracích jímek o objemu 25 m<sup>3</sup>. Také zde dochází ke kontrole stavu jímek Geiger-Müllerovými počítači jako je to i u námi vybraného pracoviště. Po uplynutí 60-90 dní se objem jímky přečerpá do kontrolní a měřicí nádrže, v níž se na základě odebraných vzorků stanoví objemová aktivita odpadní vody a pokud je pod uvolňovací úrovní, může se vypustit do městské kanalizace (23).

Na Klinice nukleární medicíny a endokrinologie Fakultní nemocnice Motol provádějí rovněž terapii radiojódem na lůžkovém oddělení s 9 pokoji, kde se ročně hospitalizuje 950 pacientů (24). Je zde instalováno 9 jímek, z nichž každá má objem 18 m<sup>3</sup>. K vypuštění kapalného RAO do čističky odpadních vod a poté do veřejné kanalizace dochází zhruba po 3 týdnech, kdy je splněna podmínka nepřekročení

uvolňovací úrovně. Odpad z hlediska jeho množství a aktivity kontinuálně hlídá počítač (světelné i zvukové znamení v případě neočekávané změny) (23), (25).

Ve Fakultní nemocnici v Ostravě se nachází lůžkové oddělení (10 pokojů s vlastním sociálním vybavením), kde se ročně léčí zhruba 700-800 pacientů (26)) je radioaktivní kapalný odpad odváděn kanalizací do 4 vymíracích jímek o celkovém objemu 80 m<sup>3</sup>. Zde je odpad zadržován až do poklesu pod stanovenou úroveň a poté je přečerpán do čističky odpadních vod a následně do veřejné kanalizace (27), (28).

Rozdílný systém kontroly nádrží můžeme vidět v Masarykově onkologickém ústavu (nachází se zde pouze diagnostické oddělení (klasická scintigrafie) a úsek PET/CT), kde je kapalný odpad (toalety) z celého areálu sveden do dvou jímek, které jsou automaticky monitorovány pomocí speciálního systému. Tento systém je vypracován tak, aby automaticky kontroloval hladinu odpadní vody v jímce a po překročení stanovené hodnoty přepnul systém napouštění do druhé jímky. Následně samostatně dle hodnot aktivity odpouští odpadní vody do kanalizačního systému (22).

V Masarykově nemocnici v Ústí nad Labem, o.z. (Krajská zdravotní, a.s.) probíhá jak konvenční nukleární medicína, tak se zde nachází i pracoviště s PET/CT a terapeutická část oddělení se 4 lůžky (29). Pracoviště disponuje 6 jímkami, z nichž každá má objem 7 m<sup>3</sup>. Aktuálně se pro ukládání kapalného RAO používají 2 vymírací jímky (dříve se na pracovišti prováděla terapie <sup>131</sup>I, nyní už ne). V jímkách se odpad nechává vymírat a po uplynutí doby potřebné k vymření radionuklidů technický pracovník odebere vzorek a změří jej ve studnovém detektoru. Pokud je naměřená hodnota pod hodnotou uvolňovací úrovně stanovené pro určitý radionuklid, vypouští se jímka do veřejné kanalizace (30).

Z výše uvedených prací a ostatních zdrojů ( (17), (25), (26), (29), (30), (31)) můžeme porovnat některé hlavní aspekty činnosti s kapalným RAO. Počet léčených a vyšetřovaných pacientů se v jednotlivých nemocnicích může lišit ( (24), (26), (31)), z toho důvodu jsou počty jímek ( (22), (26), (27), (30) , (31)) a jejich objemy odlišné. Odlišné jsou i techniky zaznamenávání hladin jímek a objemové aktivity ((19), (22), (23) , (28), (30)).

V rámci bakalářské práce jsme na základě měření vzorků odpadních vod z jímek ověřili, že stávající režim monitorování vymíracích jímek na vybraném pracovišti nukleární medicíny je plně dostačující a vyhovuje platné legislativě.

### ***Radioaktivní odpady z pohledu pacientů***

Stejně tak důležitá je informovanost pacientů o RAO, a to hlavně na lůžkovém oddělení provádějícím terapii radiojódem. V ambulantní části pracoviště, kde jsou většinou aplikovány pouze radionuklidy s nízkými hodnotami aktivity a s krátkými poločasy rozpadu, je také důležitá informovanost pacientů, především z hlediska biokinetiky radiofarmaka (zvýšený příjem tekutin pacientů k časnému vyloučení radiofarmaka z těla) a také je vhodné jim doporučit, aby se v den vyšetření vyvarovali kontaktu s těhotnými ženami nebo dětmi. Na lůžkovém oddělení je informovanost pacientů nezbytně nutná z důvodu aplikace mnohem vyšších aktivit (3,4 – 10 GBq radiojódu (16)). U těchto pacientů je nutné podat veškeré informace o způsobu léčby a pravidel, která musí dodržovat nejen po dobu léčby, ale i bezprostředně po ukončení hospitalizace. Je nutné, aby sám pacient informoval své nejbližší okolí o léčbě, které je podroben (není možnost návštěv při hospitalizaci). Před propuštěním pacienta do domácí péče je nutná jeho informovanost o nezbytných opatřeních, která musí dodržovat nejméně po dobu 10 dní. Jedná se např. o dodržování odstupu alespoň 1 m od ostatních osob, vyhýbání se kontaktu s těhotnými ženami a dětmi, je vhodné nocování v oddělené místnosti, velmi pečlivě dodržovat pravidla osobní hygieny (vlastní ručník, důkladné mytí rukou), nebo používání vlastního příboru (32).



Důslednost v informování pacientů před léčbou, během léčby a seznámení pacienta s pravidly, která by měl dodržovat i těsně po ukončení léčby je velmi žádoucí. Lze tak především snížit radiační zátěž pacienta i jeho okolí.

Po návštěvě vybraného pracoviště jsme zhodnotili, že informovanost pacientů na námi zvoleném pracovišti je prováděna důkladně a je dostačující.

## 7 ZÁVĚR

Cílem teoretické části bakalářské práce bylo seznámit se s obecnou problematikou otevřených zářičů v nukleární medicíně. Tento cíl byl splněn popisem výroby radionuklidů, přípravy radiofarmak, radiační ochrany na oddělení nukleární medicíny a popisem radioaktivních odpadů.

Cílem praktické části práce bylo popsat nakládání s radioaktivním odpadem na vybraném oddělení nukleární medicíny. Tento cíl byl splněn několikadenní návštěvou vybraného oddělení, kde došlo k seznámení s ambulantním a s lůžkovým oddělením pracoviště. Díky této exkurzi a spolupráci se zaměstnanci oddělení jsme získali potřebná data a informace o daném pracovišti, především o nakládání s radioaktivním odpadem. Součástí návštěvy bylo i provedení odběru a měření vzorků radioaktivního odpadu z vymíracích jímek.

Všechny cíle bakalářské práce byly splněny a bylo ověřeno, že současný systém nakládání s radioaktivním odpadem na vybraném pracovišti nukleární medicíny je v souladu s příslušnými požadavky SÚJB.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

zkratka	vysvětlení pojmu
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
CHRZ	Charakteristické ionizující záření
CT	Computed Tomography
DRÚ	Diagnostické referenční úrovně
HEPA	High Efficiency Particulate Arrestance
IZ	Ionizující záření
JE	Jaderná elektrárna
NM	Nukleární medicína
ONM	Oddělení nukleární medicíny
OSL	Opticky stimulovaná luminescence
PE	Polyethylenový
PET	Pozitronová emisní tomografie
RAO	Radioaktivní odpad
RN	Radionuklid
RO	Radiační ochrana
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa uložišť radioaktivních odpadů
TLD	Termoluminescenční dozimetr
ZIZ	Zdroj ionizujícího záření

## 9 BIBLIOGRAFIE

1. Miniencyklopedie Jaderná energetika, Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE, RNDr. Jaroslav Kusala, 2004. *www.cez.cz*. [Online] [Citace: 20. únor 2018.] <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k23.htm>.
2. KORANDA, Pavel. *Nukleární medicína*. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. str. 201. 9788024440316.
3. KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína*. Praha : Nakladatelství P3K, 2015. str. 160. 9788087343548.
4. SEIDL, Zdeněk. *Radiologie pro studium i praxi*. Praha : Grada, 2012. str. 372. ISBN 978-80-247-4108-6.
5. KRAFT, Otakar a Jan PEKÁREK. *Radiofarmaka*. Ostrava : Ostravská univerzita v Ostravě, Lékařská fakulta, 2012. str. 97. 978-80-7464-183-1.
6. ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. Ostrava : Ostravská univerzita v Ostravě, 2009. str. 173. 978-80-7368-669-7.
7. Miroslava Sýkorová, Emil Havránek. *Rádiofarmaká*. Bratislava : Vydavateľstvo UK, 2009. str. 96. ISBN 9788022327138.
8. SÚJB. Zákon č. 263/2016 Sb. v platném znění - atomový zákon, přijat dne 14.července 2016.
9. Vyhláška 377/2016 Sb. v platném znění - Vyhláška o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie, ze dne 7. listopadu 2016.
10. Vladislav Klener, ed. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha : Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. str. 619. 80-238-3703-6.
11. SÚJB. Vyhláška č. 422/2016 Sb. v platném znění - Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, ze dne 14. prosince 2016. str. 288.
12. Správa uložišť radioaktivních odpadů. *www.surao.cz*. [Online] [Citace: 16. leden 2018.] <https://www.surao.cz/rao/deleni-radioaktivnich-odpadu>.
13. Podzimek, František. *Radioaktivní odpad - přednáška z předmětu Radiologická fyzika II*. Kladno :2015.

14. SÚJB. *www.sujb.cz*. [Online] [Citace: 10. květen 2018.]  
<https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-radioaktivnimi-odpady/terminologie/>.
15. Podzimek, František. *RADIOLOGICKÁ FYZIKA: Fyzika ionizujícího záření*. Praha : České vysoké učení technické, 2013. str. 334. ISBN 978-80-01-05319-5.
16. SÚJB. Požadavky SÚJB při provádění terapie onemocnění štítné žlázy radiojódem na pracovištích nukleární medicíny. březen 2000. str. 15.
17. Pecinová, D. *Osobní sdělení*. Hradec Králové, únor až květen 2018.
18. *www.sujb.cz*. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost*. [Online] 2007. [Citace: 20. březen 2018.] [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/28-dozimetrie\\_zevni\\_2007.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/28-dozimetrie_zevni_2007.pdf).
19. Fakultní nemocnice Hradec Králové. Interní dokumentace oddělení nukleární medicíny Fakultní nemocnice Hradec Králové: Program monitorování: Dokumentace k nakládání se zdroji ionizujícího záření, 18 s., 2018.
20. Interní dokument Fakultní nemocnice Hradec Králové: Nakládání s odpady - vnitřní směrnice FN HK. 2016.
21. Pecinová, D., Fakultní nemocnice Hradec Králové. Interní dokument: Bilance spotřebovaných radionuklidů na ONM FN HK. 2017.
22. Antonín, Bradáč. Radioaktivní odpad v nemocničních zařízeních, Brno, 2013, bakalářská práce (Bc.), Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství.
23. Kampsheimerová, Šárka. Závislost objemové aktivity <sup>131</sup>I v čističce odpadních vod nemocnice na množství léčebného <sup>131</sup>I podanémna oddělení nukleární medicíny, České Budějovice, 2013, bakalářská práce (Bc.), Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta,
24. Fakultní nemocnice v Motole. *www.fnmotol.cz*. [Online] [Citace: 14. duben 2018.] <http://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-pro-dospELE/klinika-nuklearni-mediciny-a-endokrinologie-uk-2-1/historie/>.

25. Vlasta, Míková. *Nukleární medicína: průřez vyšetřovacími metodami v oboru nukleární medicína*. Praha : Galén, 2008. str. 118. 978-80-7262-533-8.
26. Fakultní nemocnice Ostrava. *www.fno.cz*. [Online] [Citace: 16. duben 2018.] <http://www.fno.cz/klinika-nuklearni-mediciny/luzkova-cast-2>.
27. Mgr. Golisová, Jana. *Péče o zdraví zaměstnanců se zdroji ionizujícího záření z pohledu managementu*, Olomouc 2011, disertační práce (Ph.D), Uiverzita Palckého v Olomouci, Lékařská fakulta, Ústav sociálního lékařství a zdravotní politiky.
28. Bc. Kociánová, Martina. *Ochrana osob před ionizujícím zářením při manipulaci s radiofarmaky*, Ostrava 2015, diplomová práce (Mgr.), Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Katedra bezpečnostních služeb .
29. Krajská zdravotní, a.s., Masarykova nemocnice v Ústí nad Labem. *www.kzcr.eu*. [Online] 2. květen 2018. <http://www.kzcr.eu/cz/ul/pro-pacienty/zdravotnicka-pracoviste/nuklearni-medicina>.
30. Svatková Lenka, DiS., vedoucí radiologický asistent oddělení nukleární medicíny. *elektronická korespondence*. 5. květen 2018.
31. Fakultní nemocnice Hradec Králové. *www.fnhk.cz*. [Online] [Citace: 3. březen 2018.] <https://www.fnhk.cz/onm-amb>.
32. Králové, Fakultní nemocnice Hradec. Interní dokument: Pokyny pacientovi po léčbě radioaktivním jodem 131I před propuštěním z nemocnice.
33. Státní zdravotní ústav - Metodika pro nakládání s odpady zezdravotnických, veterinárních a jim podobných zařízení . *www.szu.cz*. [Online] [Citace: 20. březen 2018.] [http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/puda/legislativa\\_odpady/metodika.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/puda/legislativa_odpady/metodika.pdf).
34. Vanclík, Zdeněk. *Nakládání s radiačními odpady na oddělení nukleární medicíny*, České Budějovice, 2012, bakalářská práce (Bc.), Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma nakládání s radioaktivním odpadem .....	16
Obrázek 2 Plastová nádoba s vloženými lahvičkami se vzorky z vymíracích jímců .....	34
Obrázek 3 Příprava k úpravě vzorků .....	35
Obrázek 4 Umístění zkumavek do stojanu .....	36
Obrázek 5 Měřič plošné aktivity používaný na vybraném pracovišti .....	36
Obrázek 6 Měřicí přístroj s počítačovou technikou .....	37
Obrázek 7 Systém řazení zkumavek se vzorky .....	37
Obrázek 8 Vývoj roční aplikované aktivity ( $^{99m}\text{Tc}$ , $^{18}\text{F}$ ) v letech 2000 až 2017 .....	42
Obrázek 9 Stíněné trezory na radioaktivní odpad v centrální vymírací místnosti .....	47
Obrázek 10 Uskladnění již nepoužitelných radionuklidových generátorů ve stíněném trezoru v centrální vymírací místnosti .....	47
Obrázek 11 Umístění radioaktivního odpadu v barevně odlišených polyethylenových sáčcích a nádobách .....	48
Obrázek 12 Uskladnění radioaktivního odpadu kontaminovaného stejným radionuklidem ve stíněném trezoru .....	48
Obrázek 13 Vymírací místnost na úseku PET/CT .....	49
Obrázek 14 Vymírací místnost na lůžkovém oddělení vybraného pracoviště ....	51
Obrázek 15 Vývoj množství aplikované aktivity $^{131}\text{I}$ v letech roky 2000 až 2017 ..	52
Obrázek 16 Vývoj objemové aktivity v jímcě č. 1 .....	55
Obrázek 17 Vývoj objemové aktivity v jímcě č. 4 .....	56
Obrázek 18 Vývoj objemové aktivity v jímcě č. 5 .....	57
Obrázek 19 Vývoj objemové aktivity v jímcě č. 6 .....	57

## 11 SEZNAMU POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Nejčastější radionuklidy používané k léčbě pomocí otevřených zářičů .....	11
Tabulka 2 Nejčastěji používané radionuklidy v diagnostice pomocí otevřených zářičů .....	12
Tabulka 3 Limity obecné, pro radiační pracovníky a pro žáky a studenty .....	26
Tabulka 4 Data o začátcích plnění, uzavření a případném vypuštění vymíracích jímek .....	54
Tabulka 5 Naměřené hodnoty objemové aktivity vzorků z vymíracích jímek .....	58