

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Zdravotně sociální fakulta

# **Nakládání s radioaktivními odpady na oddělení nukleární medicíny**

bakalářská práce

Autor práce: Zdeněk Venclík  
Studijní program: Ochrana obyvatelstva  
Studijní obor: Ochrana obyvatelstva se zaměřením na CBRNE  
Vedoucí práce: doc. Dr.rer. nat. Friedo Zölzer

Datum odevzdání práce: 4. 5. 2012



## Abstrakt

Nakládání s radiačními odpady na oddělení nukleární medicíny je složitým procesem, kdy je třeba, aby byla dodržena celá řada zákonných předpisů, které jsou postaveny na základě fyzikálních a chemických vlastností jednotlivých radionuklidových zářičů. V současné době mezi tyto předpisy patří zejména zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění a jeho prováděcí vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně (ruší vyhlášku č. 184/1997 Sb.) ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb., kterou se mění vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. Tato legislativa upravuje nakládání s radioaktivními odpady jako celku a prostřednictvím příloh se zabývá již konkrétními radionuklidy. Je tedy nutné, aby byla dodržena, ať už se jedná o radioaktivní odpady vzniklé při samotné výrobě radionuklidů nebo při jejich aplikaci ve smyslu diagnostiky a terapie. Všechny výrobní i aplikační procesy mají za následek vznik určitých materiálů, kontaminovaných radionuklidovými zářiči, avšak bez možnosti jejich dalšího využití. Takto kontaminované a dále již nepoužitelné materiály se nazývají radioaktivní odpady. Radioaktivní odpady vzniklé provozem nukleární medicíny se v zásadě dělí na pevné, kapalné a plynné. Pevné radioaktivní odpady se shromažďují v lednicích a olověných trezorech v závislosti na tom, zda se jedná o odpad infekční nebo neinfekční. Kapalné odpady se ve většině případů řeší procesem ředění, kdy dochází k poklesu jejich objemové aktivity pod stanovené limity a k následnému vypouštění do kanalizace. A odpady plynného skupenství tvoří zanedbatelnou složku radioaktivních odpadů vznikajících na odděleních nukleární medicíny, tudíž nakládání s nimi není ve většině případů podrobněji řešeno. Ať už se jedná o odpady kteréhokoli skupenství, proces jejich likvidace má společný cíl, kterým je snížení aktivity těchto odpadů pod stanovené limity (uvolňovací úrovně), kdy odpad může být bez větších rizik expozice přemístěn či uvolněn a zlikvidován tak jako jiné, neradioaktivní odpady.

## **Abstract**

Radioactive waste management in the department of nuclear medicine is a complex process in which it is necessary to obey a number of lawful orders. These are based on physical and chemical properties of the radionuclide sources. At present these regulations particularly include Act No. 18/1997 Coll., on Peaceful utilisation of nuclear energy and ionizing radiation (the Atomic Act) and amendment to and alteration of some related acts in the wording and implementing Decree No. 307/2002 Coll., on Radiation Protection (which repeals Decree No. 184/1997 Coll.) in the wording of Decree No. 499/2005 Coll., which amends the Decree of the Czech National Council for nuclear safety No. 307/2002 Coll., on Radiation Protection. This legislation regulates the management of radioactive waste as a whole and deals with specific radionuclides in the annexes. It is necessary to comply with legislation whether the radioactive waste is generated in the actual production of radionuclides or during their diagnostic and therapeutic applications. All production and application processes give rise to certain materials contaminated with radionuclide sources but without the possibility of their further use. These contaminated and unusable materials are called radioactive waste. Radioactive waste arising from operation of nuclear medicine is basically divided into solid, liquid and gaseous. Solid radioactive waste is collected in refrigerators and lead safe deposits, depending on whether the waste is infectious or not. Liquid waste goes through the process of dilution in most cases, when there is a decrease of the volume activity limits and subsequent discharge to sewer. Gaseous waste is a negligible component of radioactive waste produced at nuclear medicine departments, so it is not often dealt with in more detail. No matter what kind of waste, the process of its disposal has a common goal of reducing its activity below specified limits (clearance levels), so that the waste can be without greater risk moved or released and disposed of as other, non-radioactive waste.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

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

V Českých Budějovicích dne 4. 5. 2012

.....

Zdeněk Venclík

## **Poděkování**

Za ochotu a rady bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Dr.rer. nat. Friedovi Zölzerovi. Dále bych rád poděkoval Ing. Jindřichu Pěničkovi z oddělení nukleární medicíny Nemocnice České Budějovice, a.s. a Ing. Jiřímu Bártlovi z oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně za poskytnuté informace, náměty a inspiraci.

# Obsah

Úvod.....	7
<b>1 Současný stav .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Radioaktivní odpady.....</b>	<b>8</b>
1.1.1 Zdroje radioaktivních odpadů.....	9
1.1.2 Shromažďování, třídění a skladování radioaktivních odpadů .....	10
1.1.3 Zpracování radioaktivních odpadů .....	12
1.1.4 Úprava radioaktivních odpadů.....	13
1.1.5 Ukládání radioaktivních odpadů.....	14
1.1.6 Charakterizace radioaktivních odpadů.....	15
<b>1.2 Nukleární medicína (NM) .....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Kategorie pracovišť nukleární medicíny a požadavky na provoz .....	18
1.2.2 Uspořádání pracoviště.....	19
1.2.2.1 Laboratorní část .....	21
1.2.2.2 Ambulantní část .....	21
1.2.2.3 Lůžková část.....	22
1.2.3 Monitorování .....	22
1.2.4 Radionuklidy a radiofarmaka.....	23
1.2.4.1 Zdroje radionuklidů .....	24
1.2.4.2 Charakteristika radiofarmak .....	25
1.2.4.3 Lékové formy radiofarmak.....	26
1.2.4.4 Uchování radiofarmak.....	27
1.2.4.5 Hodnocení jakosti radiofarmak .....	28
1.2.5 Pozitronová emisní tomografie.....	31
1.2.5.1 Pozitronové zářiče .....	32
<b>2 Cíl práce a hypotézy .....</b>	<b>34</b>
<b>3 Metodika.....</b>	<b>35</b>

<b>4 Výsledky</b> .....	37
<b>4.1 Analýza zákonů a vyhlášek</b> .....	37
<b>4.2 Radionuklidy používané na oddělení nukleární medicíny</b> .....	40
4.2.1 Radionuklidy používané na NM v nemocnici České Budějovice .....	41
4.2.2 Radionuklidy používané na NM Masarykova onkologického ústavu .....	42
4.2.3 Chemické formy radiofarmak .....	43
<b>4.3 Specifikace nakládání s radioaktivními odpady na oddělení NM</b> .....	47
4.3.1 Vymírací prostory radioaktivního odpadu .....	47
4.3.2 Pevné odpady .....	47
4.3.2.1 <i>Infekční odpad</i> .....	47
4.3.2.2 <i>Neinfekční odpad</i> .....	48
4.3.3 Kapalné odpady .....	48
4.3.3.1 <i>Odpadní vody z lůžkové části oddělení</i> .....	48
4.3.3.2 <i>Odpadní vody ze zbytku oddělení</i> .....	49
4.3.4 Plynné odpady.....	49
4.3.5 PET Centrum .....	50
4.3.5.1 <i>Cyklotronové pracoviště a prostory přípravy radiofarmak</i> .....	51
4.3.5.2 <i>Oddělení pro diagnostiku a terapii</i> .....	52
<b>5 Diskuze</b> .....	55
<b>6 Závěr</b> .....	60
<b>7 Seznam použitých zdrojů</b> .....	62
<b>8 Klíčová slova</b> .....	65
<b>9 Přílohy</b> .....	66



## Úvod

Obor nukleární medicíny zastřešuje poměrně široké spektrum činností, pro které je společné využívání radionuklidů v medicíně. Služby nukleární medicíny jsou poskytovány na vysoce specializovaných pracovištích, která musí být ve všech směrech připravena pro bezpečné nakládání s radionuklidovými zářiči, a také s následně vzniklým radioaktivním odpadem. Zajištění chodu takového pracoviště je velmi složité, musí splňovat širokou škálu zákonných požadavků kladených na ambulantní či lůžková zdravotnická zařízení, na pracoviště se zdroji ionizujícího záření a v neposlední řadě na lékárenské provozy. Při tak široké škále požadavků, která s provozem oddělení nukleární medicíny souvisí, je jen velmi málo informačních zdrojů, které by poskytly ucelený svazek informací. Ten by měl obsahovat veškeré informace ze související legislativy, tematicky související literatury a praxe.

Proto jsem se rozhodl pro zpracování tohoto tématu, jakož to budoucího studijního materiálu, který poskytne dostatečně ucelený pohled na používání radionuklidů v nukleární medicíně a na radioaktivní odpady, které při jejich použití vznikají.

# 1 Současný stav

## 1.1 Radioaktivní odpady

V současné době existuje široká škála lidských činností, které záměrně využívají radionuklidové zářiče, jako příklady spojené s tématem této bakalářské práce bych uvedl: pozitronový zářič fluor  $^{18}\text{F}$ , gama zářič technecium  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  a v neposlední řadě hojně používaný radionuklidový zářič v terapii  $^{131}\text{I}$ . Při těchto činnostech dochází ke vzniku radioaktivních odpadů, což jsou různě kontaminované materiály obsahující zbytky radionuklidových zářičů. Při nakládání s radioaktivními odpady je třeba dodržovat předem ustanovená a definovaná pravidla, vycházející ze základních principů radiační ochrany. Avšak je třeba podotknout, že radionuklidové zářiče a ostatní předměty kontaminované radioaktivními látkami nemusí být nutně ve všech případech považovány za radioaktivní odpad. „*Radiační ochrana definuje hranici, kdy lze účinek ionizujícího záření na živé organismy a životní prostředí pokládat za nevýznamný.*“ [1] Tyto hranice nám určují, kdy je nutné s kontaminovaným materiálem, či materiálem obsahujícím radionuklidové zářiče nakládat podle určitých pravidel a kdy tato pravidla již nemusí být dodržována. [1]

Jedním z nejdůležitějších pojmů, souvisejících s výše uvedenou problematikou, jsou **uvolňovací úrovně** (clearance levels). Uvolňovací úrovně jsou stanoveny na základě hodnot, které dělí kontaminované materiály na ty, u kterých je třeba dodržovat určitá pravidla a na ty, u kterých již to není třeba. To je podloženo zněním zákona č. 18/1997 Sb. §8 odst. 1, který uvádí: „*Pokud nejsou překročeny uvolňovací úrovně stanovené prováděcím právním předpisem nebo rozhodnutím Úřadu, lze radioaktivní odpady, radioaktivní látky a předměty nebo zařízení obsahující radionuklidy nebo jimi kontaminované uvádět do životního prostředí bez předchozího povolení Úřadu; z hledisek radiační ochrany se dále nesledují a nakládá se s nimi, jako by radioaktivní nebyly. V případě, kdy obsah radionuklidů nebo znečištění radionuklidy přesahuje uvolňovací úrovně, je možné radioaktivní odpady a jiné látky, předměty nebo zařízení obsahující radionuklidy nebo jimi kontaminované uvést do životního prostředí pouze na*

*základě povolení Úřadu podle § 9 odst. 1 písm. h).*“ [2] Avšak blíže specifikované podmínky, za kterých lze využít uvolňovacích úrovní jsou uvedeny ve vyhlášce č. 307/2002 Sb. O radiační ochraně, upravené vyhláškou 499/2005 sb., §57, §56 a v příslušných prováděcích předpisech. [1]

Můžeme tedy obecně konstatovat, že v každém případě lze za radioaktivní odpad považovat látku či materiál, který obsahuje radionuklidové zářiče, které by po uvedení do životního prostředí způsobily překročení průměrné efektivní dávky u kritické skupiny obyvatel, což je 250  $\mu\text{Sv}$  za 1 kalendářní rok. [1]

### ***1.1.1 Zdroje radioaktivních odpadů***

Radioaktivní odpady lze třídit podle různých kritérií, jakými jsou například jejich objemová či hmotnostní aktivita, množství tepla uvolňované rozpadem radionuklidových zářičů obsažených v odpadech, skupenství nebo místa jejich původu. *„Podle místa původu jsou radioaktivní odpady děleny na odpady z jaderněenergetického palivového cyklu a na odpady institucionální.“* [1]

Radioaktivní odpady vzniklé v jaderněenergetickém cyklu jsou výsledkem různých činností, které využívají štěpitelných radionuklidů k získání tepelné nebo elektrické energie. Tato práce se jimi dále nezabývá. [1]

Institucionální radioaktivní odpady mají na rozdíl od radioaktivních odpadů vzniklých v jaderněenergetickém cyklu několik různých sektorů vzniku, a to jest sektor výzkumných pracovišť (univerzitní vědecké ústavy a laboratoře), sektor průmyslového odvětví (např. těžební průmysl) a pro nás podstatný sektor zdravotnictví (nukleární medicína). Všechny činnosti, které jsou prováděné v jednotlivých odvětvích vzniku institucionálních radioaktivních odpadů, mají společné to, že se při nich používá různých radionuklidových zářičů. *„Vlastnosti institucionálních radioaktivních odpadů jsou dány zejména fyzikálními vlastnostmi používaných radionuklidových zářičů a charakterem práce, která je s nimi prováděna.“* [1] Toto tvrzení je podloženo zákonem č. 18/1997 Sb. §24 odst. 1, který říká: *„Každý, kdo nakládá s radioaktivními odpady, je*

*povinen brát v úvahu všechny jejich fyzikální, chemické a biologické vlastnosti, které by mohly bezpečnost nakládání s nimi ovlivnit.*“ [2] Dále je třeba dbát rozdílných požadavků na nakládání s radioaktivními odpady s otevřenými a uzavřenými zářiči, neboť uzavřený radioaktivní zářič je zářič s takovou konstrukcí, která zabezpečuje (zkouškami ověřenou a osvědčením doloženou) těsnost a vylučuje únik radioaktivních látek do okolí za předvídaných podmínek použití a opotřebení, oproti otevřeným zářičům, které tyto podmínky nesplňují. V nukleární medicíně jsou uzavřenými zářiči pouze různé etalony sloužící ke kalibraci měřících přístrojů. [1]

### **1.1.2 Shromažďování, třídění a skladování radioaktivních odpadů**

Shromažďování a třídění radioaktivních odpadů řeší vyhláška č. 307/2002 Sb. O radiační ochraně, upravená vyhláškou 499/2005 sb., konkrétně §48.

V místě vzniku radioaktivních odpadů jsou tyto odpady sbírány a tříděny, což je vyžadováno vyhláškou č. 307/2002 Sb. §48 odst. 1, který uvádí že: *„Radioaktivní odpady nebo jejich směsi s jinými látkami jsou v místě jejich vzniku sbírány zejména podle použitých způsobů zpracování a úpravy, a pokud je to technicky možné a zdůvodnitelné, i tříděny.*“ [3] Při třídění je nutné přihlížet k rozdílným fyzikálním a chemickým vlastnostem radioaktivních odpadů a k jejich skupenství podle vyhlášky č. 307/2002 Sb. §48 odst. 2: *„Radioaktivní odpady nebo jejich směsi s jinými látkami jsou tříděny podle použitých způsobů zpracování a úpravy. Třídění se provádí podle fyzikálních a chemických vlastností.*“ A odst. 4: *„Radioaktivní odpady se rozlišují na plynné, kapalné a pevné. Pevné radioaktivní odpady se klasifikují do tří základních kategorií, a to na přechodné, nízko a středně aktivní a vysokoaktivní.*“ [3]

Radioaktivní odpady kapalného skupenství jsou shromažďovány do nádob a v případě většího množství se shromažďují v nádržích. Tyto nádoby a nádrže by měly být primárně mechanicky stabilní a zabezpečené proti korozním vlivům, aby byl znemožněn jakýkoli možný nekontrolovatelný únik radioaktivních odpadů do životního prostředí. A sekundárně by měla být vyloučena i velmi nízká pravděpodobnost úniku radioaktivních odpadů za pomoci dalších umělých bariér. Podrobnější podmínky o

skladování kapalných radioaktivních odpadů nalezneme ve vyhlášce č. 307/2002 Sb. §51 odst. 1 písm.:

*„a) nádrže s kapalnými radioaktivními odpady musí být zajištěny proti přeplnění a jejich zaplnění musí být kontrolováno; nádrže musí být umístěny v ochranných jímkách, které pojmu s dostatečnou zálohou objem nádrže; ochranné jímky musí být vodotěsné, opatřené signalizací úniku z nádrží a vybavené zařízením pro jejich odčerpání; výpary z nádrží a jímek musí být odváděny a zpracovávány jako radioaktivní odpady,*

*b) obsah skladovacích a shromažďovacích nádrží musí být možné vyčerpat; každý systém skladovacích nebo shromažďovacích nádrží musí mít vždy, jako havarijní zálohu, prázdnou nádrž o objemu odpovídajícímu největší nádrži systému,*

*c) skladují-li se kapalně radioaktivní odpady v nádobách, musí být podlaha a stěny skladu nepropustné do takové výše, aby bylo zabráněno při úniku maximálního množství skladovaných kapalných radioaktivních odpadů jejich proniknutí do životního prostředí; podlaha musí být spádována do bezodtokové nepropustné jímky,“ [3]*

*„Pevné radioaktivní odpady lze s ohledem na jejich další způsob zpracování, příp. úpravy shromažďovat a třídit buď jako stlačitelné a nestlačitelné, nebo jako hořlavé a nehořlavé.“ [1] U třídění pevných radioaktivních odpadů lze využít institutu uvolňovacích úrovní, který nabízí možnost uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí bez jakýchkoliv omezení, avšak pouze za splnění podmínek stanovených legislativou, tj. vyhláška č. 307/2002 Sb. §56 a §57 odst. 1 písm. a): „při uvolňování pevných látek a předmětů k používání mimo pracoviště I. až IV. kategorie v žádném kilogramu uvolňovaného materiálu není součet podílů průměrných hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů a uvolňovacích úrovní hmotnostní aktivity příslušných radionuklidů uvedených v tabulce č. 1 přílohy č. 2 (viz. Příloha č.1) větší než 1 ani na žádných 100 cm<sup>2</sup> povrchu uvolňovaného materiálu není součet podílů průměrných plošných aktivit jednotlivých uváděných radionuklidů a uvolňovacích úrovní plošné aktivity příslušných radionuklidů uvedených v tabulce č. 1 přílohy č. 2 (viz. Příloha č.1)*

větší než 1,“ [3] Dále vyhláška č. 307/2002 Sb. §48 odst. 5 a 6 nám blíže klasifikují jednotlivé kategorie pevných radioaktivních odpadů, na které se dělí, tj. odst. 5: „*Přechodné radioaktivní odpady jsou takové odpady, které po dlouhodobém skladování (maximálně 5 let) vykazují radioaktivitu nižší, než jsou uvolňovací úrovně. Vysokoaktivními radioaktivními odpady jsou odpady, u kterých musí být při jejich skladování a ukládání zohledněno uvolňování tepla z rozpadu radionuklidů v nich obsažených. Ostatní radioaktivní odpady se klasifikují jako nízko a středně aktivní radioaktivní odpad.*“ [3] A odst. 6: „*Nízko a středně aktivní radioaktivní odpad se dělí na dvě podskupiny, a to na krátkodobé, u nichž počas obsažených radionuklidů je menší než 30 let (včetně Cs-137) a u nichž je omezena hmotnostní aktivita dlouhodobých alfa zářičů (v jednotlivém obalovém souboru maximálně 4000 kBq/kg a střední hodnotě 400 kBq/kg v celkovém objemu odpadů vyprodukovaných za kalendářní rok), a na dlouhodobé odpady, kterými jsou ty odpady, které nepatří do podskupiny krátkodobých radioaktivních odpadů.*“ [3]

A co se radioaktivních odpadů v plynné formě týká, tak jejich částice jsou zachycovány vysoce účinnými filtry pracovišť se zdroji ionizujícího záření. Efekt minimalizace odpadu je značný. Filtry, jež zachycují tyto částice (jsou označovány jako HEPA – High efficiency particulate air filter) a mají i smysl ochranný, tím že zabraňují úniku radionuklidů z pracovišť se zdroji ionizujícího záření do životního prostředí. [1] A rovněž i pro radioaktivní odpady ve formě plynů (aerosolů) platí uvolňovací úroveň dle vyhlášky č. 307/2002 Sb. §57 odst. 1 písm. d): „*při vypouštění do ovzduší v žádném metru krychlovém vypouštěné plynné látky není součet součinů průměrných objemových aktivit jednotlivých vypouštěných radionuklidů a konverzních faktorů  $h_{ing}$  pro příjem těchto radionuklidů vdechováním dospělým jednotlivcem z obyvatelstva podle tabulek přílohy č. 3 větší než  $10^{-7} \text{ Sv}\cdot\text{m}^{-3}$ ,*“ [3]

### **1.1.3 Zpracování radioaktivních odpadů**

Proces zpracování radioaktivních odpadů má obvykle za účel oddělit a vrátit využitelné dávky z odpadů k opětnému použití a zredukovat celkové množství

radioaktivních odpadů. [1] Avšak před započítáním procesu zpracování je třeba zvážit vliv zpracovávaných a vznikajících látek na samotné zařízení (v němž dochází k samotnému procesu zpracování) i vliv okolních systémů, které technologicky souvisejí s procesem zpracování, aby nedošlo k ovlivnění jaderné bezpečnosti nebo radiační ochrany nežádoucím způsobem. Při procesu, zpracování ať už kapalných nebo pevných radioaktivních odpadů, se využívá celá řada různých technologií. [3]

Vodné roztoky kapalných radioaktivních odpadů se zpracovávají mnoha různými metodami, mezi které patří například: odpařování na odparkách, iontová výměna, metoda membránových procesů, či metoda extrakce organickými činidly. Každá z těchto metod má různá omezení svou specifičností, a také svými ekonomickými náklady. [1] Dále je třeba, sledovat, u metod používaných při zpracování radioaktivních odpadů, měniče iontů, filtrační nebo podobné dělicí látky s omezenou životností, jejich funkční účinnost a držitel povolení stanoví nejvyšší hodnoty, při jejichž překročení musí být vyměněny nebo obnoveny. Tyto hodnoty musí být uvedeny v příslušném provozním předpise držitele povolení. [3]

Jako nejrozšířenější způsob zpracování pevných radioaktivních odpadů a organických kapalných radioaktivních odpadů je spalování. „Při spalování dochází k poměrně velké redukci odpadu a popel jako výsledek spalovacího procesu je snadno upravitelný do formy vhodné k uložení.“ [1] Proces spalování se provádí ve spalovnách. Technologický proces spalování se upravuje dle druhu spalovaného materiálu a stupně jeho kontaminace. Každý druh spalovaných radioaktivních odpadů má stanovené technologické postupy spalování, které uvádí držitel povolení v příslušném provozním předpise. Z dalších metod zpracování radioaktivních odpadů organických kapalin bych uvedl například novodobější oxidační metody a z metod zpracování pevných radioaktivních odpadů například metodu lisování, či metodu tavení.

#### ***1.1.4 Úprava radioaktivních odpadů***

Úprava radioaktivních odpadů je procesem, kdy dochází ke změně jejich fyzikálních nebo chemických vlastností. Za úpravu radioaktivních odpadů se také

považuje vpravení do obalových souborů, s cílem zajistit bezpečnou dopravu, skladování nebo uložení jak uvádí vyhláška č. 307/2002 Sb. §49 odst. 1. [3] „*Úprava obvykle zahrnuje také zpevňování radioaktivních odpadů.*“ [4] Radioaktivní odpady jsou vpravovány do hmoty za účelem jejich imobilizace. „*Kapalně radioaktivní odpady jsou již po mnoho let zpevňovány cementací a bitumenací.*“ [5] Avšak dochází také ke zdokonalování těchto zpevňovacích metod. Mezi novější metody patří například vitrifikace. Vyhláška č. 307/2002 Sb. dále upravuje určité specifické případy úprav radioaktivních odpadů, konkrétně §50 odst. 2, který uvádí: „*Při zpevňování radioaktivních odpadů ztužidly, kterými mohou být zejména cement, pevné živice nebo skelná hmota, stanoví držitel povolení technologický postup úprav v provozním předpise, který musí zahrnovat mimo jiné poměr mísení nebo měrné spotřeby ztužidel a podmínky tuhnutí. V provozním předpise musí být stanoveny dále přijímací podmínky pro ztužidla a způsob kontroly těchto podmínek tak, aby byla dodržena jejich požadovaná jakost.*“ [3] Pokud se jedná o úpravu radioaktivních odpadů ve smyslu vpravování do obalových souborů, tak je třeba volit tyto obalové soubory tak, aby vydržely namáhání při všech manipulacích a přepravě. Dále musí tyto obalové soubory odolat působení možných vlivů ze strany radioaktivních odpadů, které mohou mít korozivní účinky, mohou uvolňovat plyny, teplo apod. A při samotném plnění obalů radioaktivními odpady musí být zajištěno, aby nedošlo k jejich přeplnění. [1]

### **1.1.5 Ukládání radioaktivních odpadů**

Ukládání radioaktivních odpadů lze realizovat jen na místech k tomu určených. Těmito místy jsou uložiska radioaktivních odpadů. Úložné systémy jednotlivých uložisk zajišťují izolaci radioaktivních odpadů, limitované uvolňování radionuklidových zářičů do životního prostředí a splňují požadavky na bezpečné nakládání s radioaktivními odpady. Samotná uložiska se z hlediska umístění dělí na povrchová a hlubinná. Radioaktivní odpady z institucionálních zařízení, a tudíž i z oddělení nukleární medicíny, se ukládají do uložisk zřídka, ale pokud už jsou uloženy, tak do povrchového typu uložiska radioaktivního odpadu. [1]



### ***1.1.6 Charakterizace radioaktivních odpadů***

Závěrem této kapitoly bych se chtěl zmínit o termínu *charakterizace radioaktivních odpadů*, který je technickým termínem pro souhrn postupů a analýz k výstižnému popisu vlastností určitého objemu radioaktivního odpadu. Charakterizace radioaktivních odpadů je potřebná ke sledování údajů o radioaktivních odpadech od jejich vzniku až po uložení. A je třeba dokumentovat jejich složení, objem a hmotnost. [1] To je ostatně podloženo i vyhláškou č. 307/2002 Sb., upravené vyhláškou 499/2005 sb., §53 odst. 1 písm. a) až f), která určuje limity a podmínky pro bezpečné nakládání s radioaktivními odpady stanovené na základě bezpečnostních rozborů:

*„a) údaje o přípustných parametrech, při kterých je zajištěna jaderná bezpečnost a radiační ochrana tohoto nakládání,*

*b) způsoby a lhůty jejich měření a hodnocení,*

*c) požadavky na provozní schopnost zařízení pro nakládání s radioaktivními odpady,*

*d) požadavky na nastavení ochranných systémů těchto zařízení,*

*e) limity podmiňujících veličin,*

*f) požadavky na činnost pracovníků a na organizační opatření vedoucí ke splnění všech definovaných podmínek pro projektované provozní stavy.“ [3]*

A odst. 2: *„Součástí limitů a podmínek pro skladování jsou nejvyšší přípustné aktivity radionuklidových zářičů. Součástí limitů a podmínek pro ukládání radioaktivních odpadů na úložišti jsou příslušné podmínky přijatelnosti, které obsahují podmínky a meze pro charakteristické vlastnosti ukládaných radioaktivních odpadů, zejména obsah radionuklidů, nejvyšší přípustné aktivity radionuklidových zářičů, strukturální stabilitu, loužitelnost, tepelné a radiační účinky, možnost tvoření plynů, možnost mikrobiálního rozkladu a vzniku kritického stavu, obsah korozivních,*

*výbušných a samozápalných látek, hořlavin, volných kapalin a komplexotvorných činidel, korozivzdornost a povrchovou kontaminaci obalů a dávkový příkon nebo zdůvodnění toho, proč není charakteristická vlastnost ukládaných radioaktivních odpadů limitována. Podmínky přijatelnosti mohou také obsahovat požadavky na obvyklé rozměry, hmotnost, provedení a značení sudů, kontejnerů a jiných obalových souborů pro ukládání radioaktivních odpadů.*“ [3] A v neposlední řadě charakteristika radioaktivních odpadů musí být prováděna držiteli povolení k nakládání s radioaktivními odpady z důvodu povinnosti pravidelně zasílat Úřadu hodnocení plnění limitů a podmínek bezpečného nakládání s radioaktivními odpady, nejméně však jednou za rok. [3]

*„Radioaktivní odpad je obvykle charakterizován celkovou beta a alfa aktivitou, aktivitou radionuklidových zářičů, jejichž obsah je limitován kritérii přijatelnosti, a dále těch, které jsou obsaženy v množství vyšším než je 1% celkové aktivity, hmotností nebo objemem a chemickou formou.*“ [1] Tyto údaje jsou rovněž vyžadovány i vyhláškou č. 307/2002 Sb. §54, protože každý držitel povolení k nakládání s radioaktivními odpady je povinen vést a uchovávat provozní záznamy o nakládání s radioaktivními odpady, s příslušnou evidencí, dle vyhlášky č. 307/2002 Sb. §54 odst. 1 uvádějící: *“Eviduje se množství a měrné aktivity radionuklidů v radioaktivních odpadech při jejich shromažďování, třídění, zpracování, úpravě, skladování, dopravě a uložení. Tato evidence slouží pro zjišťování materiálového toku radioaktivních odpadů u držitele povolení podle § 9 odst. 1 písm. j) zákona.*“ [3]

## 1.2 Nukleární medicína (NM)

Obor nukleární medicíny zaujímá poměrně široké spektrum činností, pro které je společné využívání radionuklidů v oblasti medicíny. Zahrnuje tedy:

- Diagnostiku metodami in vivo (zde spadají zobrazovací metody)
- Diagnostiku metodami in vitro (zde spadají metody laboratorní)
- Léčbu pomocí radionuklidů

*„Zobrazovací metody, které využívá, se nazývají scintigrafie (podle scintilačního detektoru tvořícího základ klasické scintilační kamery) nebo gamagrafie (podle záření gama emitovaného radionuklidu používaným v diagnostice).“ [6]*

Radiofarmaka, která jsou chemickými sloučeninami, jejichž účinnou složkou je radionuklid, jako zdroj ionizujícího záření, spadající do třídy otevřených zářičů, jež se aplikují jako roztoky, plyny anebo pevné látky, za účelem realizace léčebných nebo častěji zobrazovacích metod. [1]

Služby nukleární medicíny jsou poskytovány na vysoké úrovni specializovaných pracovišť, která jsou ve všech směrech (stavebně, přístrojově, personálně) vybavena pro bezpečné nakládání s otevřenými radionuklidovými zářiči a pro samotnou přípravu léčivých přípravků. Všechny pracoviště nukleární medicíny jsou pod dohledem Státního úřadu pro jadernou bezpečnost a Státního ústavu pro kontrolu léčiv.

Zajištění správného chodu pracoviště nukleární medicíny je jedním z nejsložitějších procesů ze všech lékařských oborů, protože musí být naplněna celá řada zákonných požadavků kladených na běžné ambulantní a/nebo lůžkové zdravotnické zařízení, zároveň musí být splněny požadavky na pracoviště s otevřenými zdroji ionizujícího záření a na lékárenské provozy. V neposlední řadě musí být splněny požadavky kladené na odpovídající vzdělání a specializaci pracovníků v mnoha různých směrech nezbytných pro chod pracoviště.

Dle statistických údajů Ústavu zdravotnických informací a statistiky České republiky je v současné době na území ČR 49 registrovaných pracovišť nukleární medicíny. [7]

### ***1.2.1 Kategorie pracovišť nukleární medicíny a požadavky na provoz***

Pracoviště nukleární medicíny spadají do skupiny pracovišť s jednoduchými nebo významnými zdroji ionizujícího záření. Každé pracoviště nukleární medicíny je zařazeno do I., II. nebo III. kategorie podle předpokládaného charakteru prací a zpracovávaných aktivit radionuklidů. V neposlední řadě musí splňovat základní požadavky na standardní vybavení pracoviště. Přesné předměty posouzení pro zařazení do I., II. či III. (a IV.) kategorie nám udává vyhláška č. 307/2002 Sb. §11 odst. 1 písm. a) až h), podle kterých se kategorizuje pracoviště na základě:

*„a) klasifikace zdrojů ionizujícího záření, o nichž se předpokládá, že se s nimi bude na pracovišti nakládat,*

*b) očekávaného běžného provozu pracoviště a související míry možného ozáření pracovníků a obyvatelstva,*

*c) zaměření radiační činnosti a náročnosti na zajištění radiační ochrany a jakosti při této činnosti,*

*d) vybavení a zajištění pracoviště pro bezpečnou práci se zdroji ionizujícího záření, zejména ochrannými pomůckami, izolačními a stínicími zařízeními, provedením ventilace a kanalizace,*

*e) možnosti radioaktivní kontaminace pracoviště nebo jeho okolí radionuklidy,*

*f) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,*

*g) potenciálního ohrožení plynoucího z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu,*

*h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.“ [3]*

A dále ve vyhlášce č. 307/2002 Sb., upravené vyhláškou 499/2005 sb., §12, §13 a §14 nám blíže specifikují jednotlivé typy pracovišť spadajících do samotných kategorií I. až III. [3]

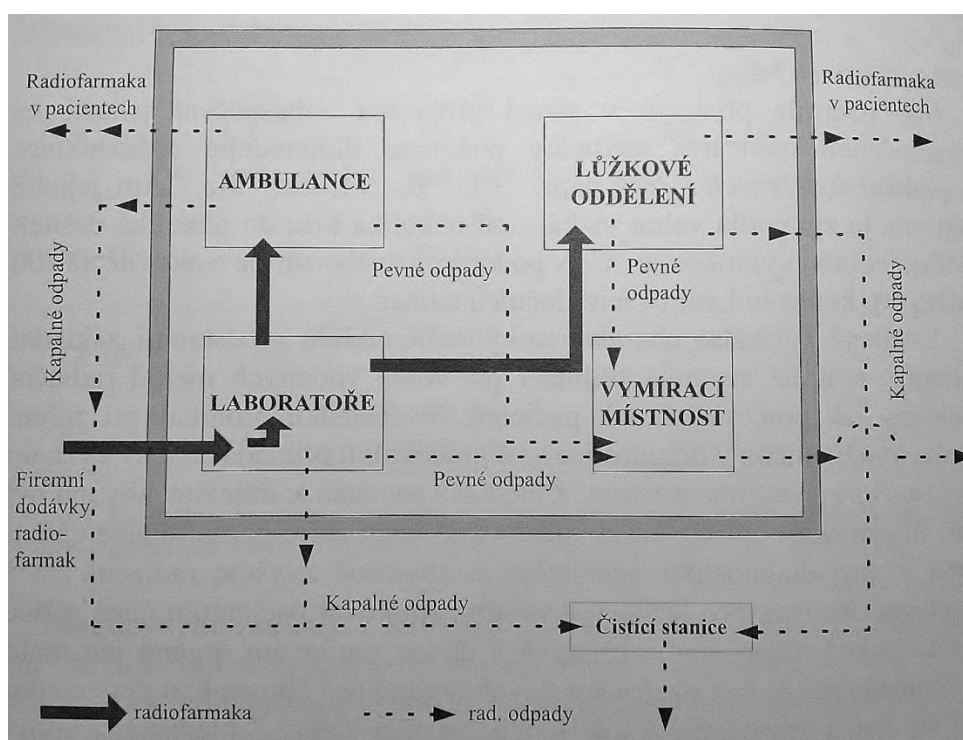
Pro cíl této práce, je třeba zmínit, že na pracovištích s otevřenými radionuklidovými zářiči III. kategorie a zpravidla i II. kategorie, pokud není v podmínkách povolení stanoveno jinak, má být zřízen samostatný kanalizační rozvod pro vypouštění radioaktivních vod z pracoviště, jež vede dále do samostatné záchytné nádrže, která je obvykle součástí čističky odpadních vod z celého zdravotnického zařízení. U pracovišť nukleární medicíny I. kategorie a některých pracovišť nukleární medicíny zařazených do II. kategorie se odpadní vody znečištěné radionuklidy vypouští průběžně do kanalizace areálu zdravotnického zařízení, kterého jsou součástí. Pokud ústí samotná kanalizace zdravotnického zařízení do veřejné kanalizace či vodoteče, využívá se principu naředění radioaktivních odpadních vod jinou odpadní vodou z jiných částí areálu zdravotnického zařízení napojených na kanalizaci. Odpadní vody z určitých oddělení nukleární medicíny, která nakládají s vyššími aktivitami otevřených zářičů v terapii a diagnostice (např.  $^{131}\text{I}$ ), mají zpravidla po naředění z areálu zdravotnického zařízení objemové aktivity vyšší, než jsou uvolňovací úrovně umožňující vypouštění odpadních vod kontaminovaných radionuklidy do životního prostředí. Proto se tyto odpadní vody, obsahující aktivity radionuklidů vyšší než povolují uvolňovací úrovně, jímají v záchytných vymíracích nádržích, které byly zmíněny výše, v kapitole **2.1.2 Shromažďování, třídění a skladování radioaktivních odpadů**. Jakmile dojde k poklesu objemových aktivit pod uvolňovací úrovně, je možné vypustit odpadní vody s radionuklidy do veřejné kanalizace nebo vodotečí. [3] [1]

### **1.2.2 Uspořádání pracoviště**

Typické uspořádání pracoviště nukleární medicíny sestává ze tří úseků (**viz. obr. 1**): úsek pro příjem, přípravu a kontrolu radiofarmak (laboratorní část) a pro další

laboratorní práce, úsek radionuklidové diagnostiky (ambulantní část) a úsek pro léčbu hospitalizovaných nemocných (lůžková část). Všechny tři úseky pracoviště nukleární medicíny, tedy laboratorní, ambulantní a lůžkový, jsou většinou zahrnuty do kontrolovaného pásma. Do kontrolovaného pásma je většinou zařazena vymírací místnost, v níž jsou skladovány látky a předměty znečištěné radionuklidy, radioaktivní odpady, určené k likvidaci. Kontrolované pásmo se vymezuje za účelem regulace pohybu osob, vytvořením ochranných bariér, jiného režimu práce a za účelem dalších opatření proto, aby bylo zajištěno, že se zdroji ionizujícího záření budou nakládat zdravotně a odborně způsobilé osoby a že důsledky případné radiační nehody zůstanou co nejvíce omezeny. Podrobnější podmínky související s kontrolovaným pásmem jsou určeny vyhláškou č. 307/2002 Sb., upravené vyhláškou 499/2005 sb., § 30. [1]

**Obrázek 1: Obecné schéma pracoviště nukleární medicíny**



*Zdroj: Principy a praxe radiační ochrany. [1]*

### ***1.2.2.1 Laboratorní část***

Na laboratorním úseku dochází k příjmu radiofarmak, dodávaných firmami s příslušným povolením k distribuci (**viz. obr. 1**). Provádí se zde kontroly dodávek, jejich shodnost s příslušnými průvodními listy radioaktivních látek, jež jsou nedílnou součástí každé dodávky radiofarmak. Vede se zde přesná evidence spotřebovávané aktivity jednotlivých radiofarmak včetně rozpisů spotřeby a data likvidace zbytků jako odpadu. Pak zde probíhá samotná příprava radiofarmak, která zahrnuje při individuální přípravě v nemocnicích manipulaci s generátorem radionuklidu, převedení získaného radionuklidu do lékové formy značené sloučeniny, kontrolu hotového přípravku a následné rozdělení pro klinickou aplikaci. Samotná příprava má být prováděna ve sterilním laminárním boxu. Při skladování radiofarmak musí být dodržovány určité zásady, aby nedošlo k jejich znehodnocení. Způsob a doba uchovávání je uveden v lékopisu každého radiofarmaka. Pro celou řadu činností prováděných na různých odděleních nukleární medicíny jsou vypracovány „standardní operační postupy“ neboli SOP dle specifických podmínek každého pracoviště, aby se předešlo možným nedopatřením. [1]

### ***1.2.2.2 Ambulantní část***

Na ambulantním úseku pracoviště se radiofarmaka aplikují v podobě roztoků pacientům. Aplikace intravenózně probíhají v tzv. aplikačních místnostech, ale pro některá vyšetření se radiofarmaka aplikují přímo na vyšetřovnách v závislosti na druhu vyšetření a dalších okolnostech. [1]

Na vyšetřovnách ambulantního úseku se tedy nejčastěji provádí různá scintigrafická vyšetření, vyšetření jednofotonovou emisní tomografií SPECT a v neposlední řadě se zde provádí, jako nejmladší metoda v ČR, pozitronová emisní tomografie PET. [1]

### **1.2.2.3 Lůžková část**

Lůžková část je součástí větších pracovišť nukleární medicíny a nejčastěji se zde provádí terapie některých maligních onemocnění, zejména nádorů štítné žlázy radioaktivním jódem  $^{131}\text{I}$ . Dále se zde provádí například léčba kloubních výpotků (tzv. radiační synovektomie) podáním radioaktivního yttria  $^{90}\text{Y}$  a mnohé další. [1]

### **1.2.3 Monitorování**

Dle vyhlášky č. 307/2002 Sb. §2 písm. j) definice monitorování je určena jako cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a hodnocení výsledků těchto měření pro účely usměrnění ozáření. [3]

Program monitorování se zavádí na všech pracovištích nukleární medicíny s jednoduchými a významnými zdroji ionizujícího záření. Obvykle sestává ze tří částí – osobní monitorování, monitorování výpustí, monitorování okolí. Ale jeho celkový rozsah je přímo závislý na způsobu a rozsahu samotného nakládání se zdroji ionizujícího záření nebo s radioaktivními odpady jak uvádí vyhláška č. 307/2002 Sb. §73 odst. 1. V neposlední řadě program monitorování musí vyhovovat požadavkům uvedeným ve vyhlášce č. 307/2002 Sb. §73 odst. 2, 3. Podrobnosti k realizaci jednotlivých částí programu monitorování jsou uvedeny ve vyhlášce č. 307/2002 Sb., upravené vyhláškou 499/2005 sb., §76, §77, §78, §79. S cílem této práce souvisí zejména §78 *Monitorování výpustí*, který uvádí: „(1) *monitorování výpustí a jiných cest uvolňování radioaktivních látek do životního prostředí se uskutečňuje sledováním, měřením, zaznamenáváním a hodnocením veličin a parametrů charakterizujících uvolňované látky, zejména jejich celkovou, hmotnostní nebo objemovou aktivitu. Zavádí se na všech pracovištích, kde dochází ke zneškodňování látek znečištěných radionuklidy jejich řízeným uvolňováním nebo kde existuje možnost úniku závažného množství radionuklidů do okolí. Slouží ke kontrole dodržování povolených výpustí nebo podmínek povolení a k včasnému zjištění a zhodnocení případných úniků a jejich důsledků na obyvatelstvo v okolí pracoviště a na životní prostředí. (2) Monitorování výpustí a jiných cest uvolňování radioaktivních látek do životního prostředí z pracovišť IV. kategorie a*



*z těch pracovišť III. kategorie, u nichž je to vyžadováno Úřadem v podmínkách povolení, zahrnuje jak soustavné bilanční měření všech radionuklidů, které se nezanedbatelně podílejí na ozáření obyvatelstva, tak i nepřetržité měření reprezentativních radionuklidů, které je schopné rychle signalizovat odchylky od běžného provozu. Existuje-li možnost nepřípustných úniků radionuklidů do ovzduší, zajišťuje se také soustavné monitorování všech potenciálních cest těchto úniků.“ [3]*

V závěru této podkapitoly bych chtěl uvést, že pravidelné monitorování dávkového příkonu na pracovištích nukleární medicíny je třeba provádět ve všech prostorách, v nichž se provádí pracovní činnost se zdroji ionizujícího záření, např. laboratoře pro přípravu radiofarmak v laboratorní části, aplikační místnosti v ambulantní části či místnosti v lůžkové části. Taktéž musí být sledovány místnosti pro skladování radiofarmak a vymírací místnosti s radioaktivními odpady, kontaminovaných radionuklidy. Pravidelné monitorování dávkového příkonu je součástí monitorovacího programu, konkrétně části *Monitorování pracoviště*, která je řešena (ve smyslu realizace) vyhláškou č. 307/2002 Sb., upravené vyhláškou 499/2005 sb., §76. [1] [3]

#### ***1.2.4 Radionuklidy a radiofarmaka***

V nukleární medicíně se využívá pouze umělých radionuklidů, které jsou vyhovující svými fyzikálními charakteristikami jako je: fyzikální poločas (rozmezí hodin až desítek dnů), emise záření beta a gama (případně charakteristické rentgenové záření) a energie záření gama (případně charakteristického rentgenového záření) v rozmezí od 30 KeV do 511 KeV. [1]

Diagnostické metody v nukleární medicíně se rozdělují, jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly **3 Nukleární medicína**, na vyšetření in vivo a in vitro. Při vyšetření in vivo se do těla vpravují převážně radiofarmaka intravenózní cestou a následně se (za pomoci vhodných přístrojů detekující záření gama) studují neinvazivním způsobem fyziologické a biochemické procesy v těle, za účelem lokalizace a diferenciací patologických změn. Vyšetření in vitro, nazývajících se také jako radiosaturační analýza nebo také radioimunoanalýza, zahrnuje metody využívající radioaktivních látek ke

stanovení např. koncentrací hormonů či protilátek v krvi. Podstatné je zmínit to, že u in vitro vyšetření se pracuje jen se vzorkem krve a samotná radioaktivní látka se pacientovi neaplikuje. [1]

Radionuklidy emitující záření beta se využívají v terapii u některých maligních onemocnění. Hlavním důvodem užití radionuklidů emitujících záření beta k terapeutickým účelům je velmi malý dolet jejich částic ve tkáních, řádově několik milimetrů. Díky krátkému doletu se veškerá energie záření beta absorbuje v cílovém ložisku. [1]

#### ***1.2.4.1 Zdroje radionuklidů***

Radionuklidy, jež jsou potřebné k samotné výrobě radiofarmak, se dají získat různými způsoby. Mezi jejich hlavní zdroje patří jaderné reaktory, urychlovače částic a generátorové systémy. Každý zdroj má své klady i zápory. Například při přípravě radionuklidů ozařováním v reaktoru se dají připravit pouze některé zářiče, na druhou stranu lze ozařovat velká množství materiálů a tím i snížit náklady na produkci. Některé z radionuklidů, potřebné pro výrobu radiofarmak, jsou připravovány ze štěpných produktů. Dále bych chtěl zmínit, že produkce radionuklidů na urychlovačích částic je poměrně dražší než produkce v reaktorech. Hlavním důvodem vyšších nákladů výroby radionuklidů v urychlovačích částic je způsob ozařování, kdy se ozařuje obvykle jeden a výjimečně dva terče o malé hmotnosti, tzn. malé množství. Nejrozšířenějším urychlovačem částic pro výrobu radionuklidů je v současnosti cyklotron. A závěrem bych zde zmínil generátorové systémy, prostřednictvím kterých velká většina oddělení nukleárních medicín získává zpracovanou radioaktivitu. Základním principem generátorových systémů je existence určitých radioaktivních prvků (tzv. mateřský prvek, je jich známo cca 80). Ty se radioaktivní přeměnou změní v prvek jiný dceřiný a ten se dále přeměňuje na prvek, který je již stabilní, nebo alespoň má dlouhý poločas rozpadu.

#### ***1.2.4.2 Charakteristika radiofarmak***

Dle učebního textu Nukleární Medicína od pana doc. MUDr. Karla Kupky, CSc., definice radiofarmaka zní: „*Radiofarmakum je jakýkoliv léčivý přípravek, který obsahuje jeden nebo více radionuklidů (radioaktivních izotopů) včleněných pro lékařské účely.*“ [6] Tato definice je ostatně zmíněna také v zákoně č. 378/2007 Sb. §2 odst. 1 písm. h). Radiofarmaka spadají do skupiny léčiv radioaktivních přípravků, a tedy je třeba při jejich výrobě, přípravě, manipulaci a používání splňovat zvláštní požadavky uvedené ve vyhlášce č. 307/2002 Sb., vyhlášce 84/2008 sb. a také v zákoně č. 18/1997 Sb. a v zákoně č. 378/2007 Sb. zmíněného již výše. Obecně řečeno, při manipulaci s radioaktivními látkami a při jejich přetváření na léčiva je třeba respektovat požadavky na práci se zdroji ionizujícího záření, a také kritéria kladená na léčivé přípravky vyžadující specifické postupy a výrobu v prostorách vysoké čistoty. [6] [9]

„*Zvláštností radiofarmak je skutečnost, že množství radionuklidu, který tvoří nezbytnou součást radiofarmaka, se vlivem radioaktivní přeměny exponenciálně s časem snižuje.*“ [6] Tudíž můžeme s jistotou říci, že jednou z důležitých charakteristik radionuklidů, obsažených v radiofarmaku, je poločas přeměny. Dále pak k podstatným veličinám, charakterizující radionuklidy obsažené v radiofarmacích, patří druh a energie ionizujícího záření, kterou emitují. Energie ionizujícího záření radionuklidu se udává v elektronboltech (eV) a jejich násobcích. Množství radionuklidu je vyjádřeno jeho aktivitou v becquerelech (Bq). V praxi se setkáme rovněž častěji s jejich násobky (kBq, MBq, GBq). [6]

„*Radiofarmaka obsahují radionuklidy v požadované radiochemické formě.*“ [6] Radiofarmaka jsou jednoduché anorganické látky, různé organické molekuly, peptidy, proteiny, krevní elementy, buňky apod., které jsou označeny radionuklidy. Radionuklid je vázán nejčastěji v iontové podobě, případně může být vázán kovalentně nebo ve formě komplexu nebo chelátu a takovým navázáním radionuklidu se daná látka označí. Značené látky se posléze zpracovávají do různých lékových forem k aplikaci (např. injekce, plyny, roztoky, tobolky). [6]

### ***1.2.4.3 Lékové formy radiofarmak***

Jak již bylo naznačeno výše, příprava aplikační formy vyráběného radiofarmaka probíhá za stejných podmínek jako při výrobě jiných léčiv, avšak za předpokladu, že jsou dodržovány všechny předpisy a požadavky pro manipulaci s radioaktivními látkami. V této části procesu výroby se radioaktivní látky a neaktivní materiály přeměňují na léčiva. [6]

#### ***Parenterální radiofarmaka***

Jedná se o nejpoužívanější druh radiofarmaka v klinické praxi. Dle fyzikálních struktur je lze rozdělit: na pravé roztoky, koloidní disperze a suspenze. Nejčastější cestou podání je cesta intravenózní, subkutánní, intralumbální. Za účelem terapie se rovněž podávají parenterální radiofarmaka cestou intraperitoneální a intraartikulární. Konkrétní příkladem parenterálních radiofarmak jsou injekční radiofarmaka s obsahem technecia ( $^{99m}\text{Tc}$ ). Jsou to zpravidla komplexní sloučeniny s redukčním činidlem, které zajišťuje redukci přidaného technecianu ( $^{99m}\text{Tc}$ ) sodného do nižšího valenčního stavu a jeho vazbu na tyto látky. Vzhledem k afinitě tohoto druhu radiofarmak pro určité orgány a tkáně je orgánová distribuce radionuklidu usměrněna přímo na místo určení. [6]

#### ***Perorální radiofarmaka***

Perorální radiofarmaka mohou být ve formě roztoků i tuhých látek. Vodné roztoky se mohou podobat svými vlastnostmi parenterálním roztokům a mohou obsahovat různé stabilizátory typu antioxidantů a bakteriostatik. [6]

Tuhé perorální radiofarmaka jsou většinou podávána ve formě želatinových tobolek, které jsou naplněny indiferentní látkou nesoucí radionuklid/y. Jako příklad bych uvedl jodid sodný  $^{131}\text{I}$  a cyanokobalamin  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ . Indiferentními nosiči jsou ve většině případů bezvodý fosforečnan sodný, laktóza a prášková celulóza. [6]

### ***Inhalační radiofarmaka***

Inhalační radiofarmaka jsou radioaktivní plyny. Slouží k provádění scintigrafie plic nebo k provádění pozitronové emisní tomografie za účelem sledování distribuce radiofarmaka v organismu a k dalším podobným výkonům. Jako příklad inhalovaného radionuklidu bych uvedl krypton  $^{81m}\text{Kr}$ . Nověji se k diagnostice používají plyny obsahující radionuklidy v podobě pozitronových zářičů s poměrně velmi krátkým poločasem přeměny, v řádech minut. Jedná se zejména o oxid uhličitý značený  $^{11}\text{C}$  nebo  $^{15}\text{O}$ . Inhalační přípravky se rovněž získávají dispergováním roztoků značených  $^{99m}\text{Tc}$ , jako například DTPA a koloidy. [6] [10]

#### ***1.2.4.4 Uchování radiofarmak***

Všechna radiofarmaka jsou uchovávána ve vzduchotěsných obalech, na místech, které jsou dostatečně odstíněné, aby byla zajištěna ochrana pracovníků před primárním nebo sekundárním zářením. Dále při uchování radiofarmak musí být splněny národní a mezinárodní předpisy o uchovávání radioaktivních látek.

Každé takto uchovávané radiofarmakum musí být mít příslušné označení, které obsahuje:

- 1) *Název přípravku*
- 2) *Jméno výrobce*
- 3) *Identifikační číslo*
- 4) *U kapalných přípravků: celková radioaktivita ve vnitřním obalu nebo koncentrace radioaktivity na 1 mililitr, vztažené k referenčnímu datu (je-li to nutné, tak i času) a dále celkový objem kapaliny ve vnitřním obalu*
- 5) *U tuhých přípravků: celková radioaktivita vztažená k referenčnímu datu (je-li to nutné, tak i času)*
- 6) *U přípravků v tobolkách: radioaktivita každé tobolky vztažená k referenčnímu datu (je-li to nutné, tak i času) a počet jednotlivých kusů tobolek v obalu*

- 7) *Příslušné označení, že přípravek je určen do rukou lékaře*
- 8) *Dobu použitelnosti*
- 9) *Název a koncentraci jednotlivých přidávaných protimikrobiálních přísad*
- 10) *Informace o zvláštních podmínkách skladování [10]*

Tyto informace, uváděné na každém radiofarmaku, jsou vyžadovány vyhláškou 84/2008 sb. která konkrétně uvádí dle §25: „(1) *Vnitřní obal připravených radiofarmak se před vydáním označí štítkem, na kterém je uveden název, chemický symbol radionuklidu, množství v mililitrech s celkovou aktivitou, jméno, případně jména a příjmení připravujícího, datum a hodina. Obdobným způsobem se označí i vnější obal. Pokud se vydává radiofarmakum v injekční stříkačce pro konkrétního pacienta, označí se jeho jménem, případně jmény a příjmením nebo jinak nezaměnitelným způsobem. (2) K připravenému radiofarmaku se připojuje průvodní list, který vedle údajů uvedených v odstavci 1 dále obsahuje:*

- a) *způsob podání,*
- b) *jméno, případně jména a příjmení osoby, která provedla kontrolu připraveného radiofarmaka.“ [6]*

#### **1.2.4.5 Hodnocení jakosti radiofarmak**

Zákon č. 18/1997 Sb., který v § 4 ukládá každému, kdo provádí činnosti vedoucí k ozáření, povinnost přednostně zajišťovat radiační ochranu a zavést systém jakosti, a to v rozsahu stanoveném vyhláškou SÚJB č. 132/2008 Sb. Držitel povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření, či žadatel o ně, musí popsat zavedený systém v Programu zabezpečování jakosti, jehož náplň stanoví výše uvedená vyhláška v § 10. [11] To znamená, že na všech pracovištích nukleární medicíny s jednoduchými a významnými zdroji ionizujícího záření musí být zaveden systém zabezpečování jakosti, který především zajišťuje, aby bylo dosaženo (využíváním radiofarmak) kvalitních diagnostických a léčebných výsledků, při splnění požadavků na radiační ochranu pracovníků, pacientů a životního prostředí. Můžeme tedy říci, že systém zabezpečování jakosti se týká radiofarmak především, tzn. objednávání radiofarmak, jejich přepravy,

přejímání, skladování, přípravy k aplikaci a hlavně jejich kontroly. Dále se systém zabezpečování jakosti týká dodržování směrných hodnot a volby optimálních aktivit radiofarmak aplikovaných pacientům, volby aktivit radiofarmak pro léčebné účely a kontroly kvality přístrojové techniky. [1]

*„Jakost – kvalita celkový souhrn parametrů položky, které ovlivňují schopnost uspokojovat stanovené a předpokládané potřeby (např. vhodná forma, aktivita a emitované záření radiofarmaka, umožňující optimální zobrazení nebo terapii, při minimální zátěži pacienta). V oblasti RO jsou tyto potřeby většinou specifikovány legislativou.“ [11]*

Zabezpečování jakosti radiofarmak se tedy provádí určitými kontrolními metodami, mezi které patří jak postupy obecně platné pro injekční přípravky (průzračnost, aktuální acidita, stanovení totožnosti složek, sterilita, bezpyrogenost aj.), tak metody hodnocení obsahu radioaktivních látek. [6]

### ***Fyzikální a chemické metody hodnocení jakosti radiofarmak***

Mezi hlavní fyzikální a chemické metody hodnocení jakosti radiofarmak patří stanovení aktivity, radionuklidová čistota a radiochemická čistota. [6]

*„Stanovení aktivity. Aktivita je základní veličina charakterizující radioaktivní přípravek.“ [6]* Její hodnoty se stanovují měřičem aktivity a výsledná hodnota se může pohybovat v rozmezí 90 – 110% původní deklarované hodnoty. Detektorem, používaným k měření aktivity, je převážně studnová ionizační komora, avšak na měření nižších aktivit se používá scintilačních detektorů. [6]

*„Radionuklidová čistota je podíl aktivity deklarovaného radionuklidu k součtu všech aktivit radionuklidů přítomných v přípravku. Znečištění představují další radionuklidy téhož prvku nebo i jiných prvků.“ [6]* Kontrola čistoty, a tedy i zjišťování nečistot, se provádí spektrometrickým měřením záření gama za využití

mnohokanálového spektrometru se scintilačním NaI(Tl) nebo polovodičovým Ge(Li) detektorem.

*„Radiochemická čistota je podíl aktivity požadované radiochemické formy k součtu aktivit všech radiochemických forem v přípravku.“ [6]* Tato metoda se provádí z důvodů výskytu malého množství nežádoucích složek v radiofarmaku (např. koloidní produkty a další nežádoucí radiochemické formy), které nejsou nositeli diagnostické informace nebo terapeutického účinku. Tyto nežádoucí složky se v radiofarmacích vyskytují, protože žádná z reakcí, kterou jsou radiofarmaka vyráběna, neproběhne se 100% výtěžkem.

### ***Biologické metody hodnocení jakosti radiofarmak***

*„Biologicky se hodnotí především sterilita a bezpyrogenost parenterálních radiofarmak, případně jejich toxicita.“ [6]*

Orgánová distribuce je nejčastěji kontrolována prostřednictvím malých laboratorních zvířat a určuje se akumulované množství radioaktivního přípravku v jednotlivých orgánech, vyjádřené jako procento podané aktivity. [6]

Někdy se také provádí sledování rychlosti kumulace a vylučování těchto látek, což lze vyjádřit pomocí efektivního poločasu rozpadu  $T_{ef}$ , který vyjadřuje celkový úbytek radionuklidu z orgánu či z celého organismu. [6]

Sterilita hromadně vyráběných radiofarmak je deklarována výrobcem. Radiofarmaka s obsahem krátkodobých (generátorových) radionuklidů se mohou dále testovat na sterilitu obvyklým způsobem v určitých zdravotnických zařízeních. [6]

*„Nepřítomnost pyrogenních látek se u parenterálních radiofarmak hodnotí běžnými metodami, včetně zkoušky na bakteriální endotoxin (LAL-test).“ [6]*

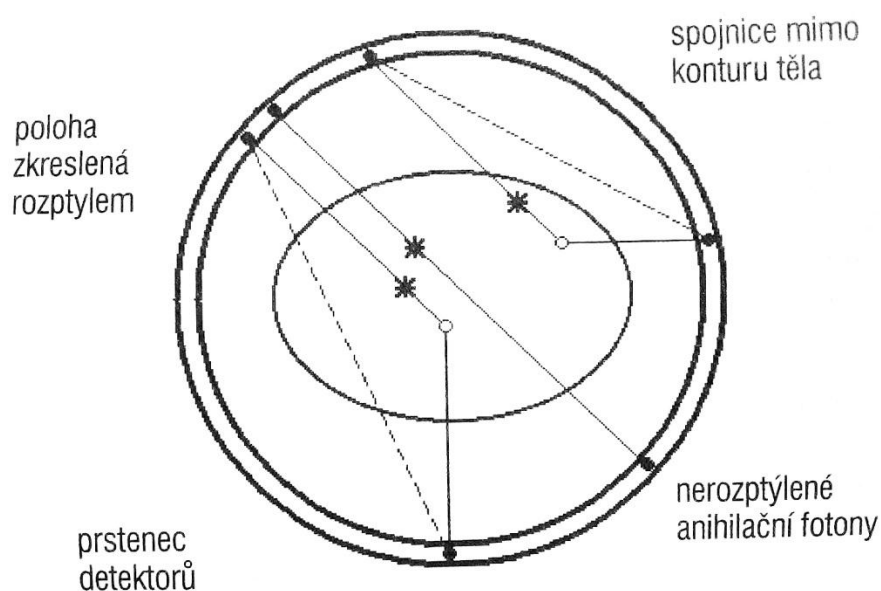


### 1.2.5 Pozitronová emisní tomografie

Existují některé radionuklidy, emitující při svém rozpadu jader kladně nabitě elektrony, nazývané pozitrony.

„Pozitrony v hmotném prostředí ztrácejí svoji energii podobným způsobem jako elektrony, tj. excitací elektronů, ionizací a produkcí brzděného záření.“ [10] Pozitrony jako takové mají velmi malý dolet ve tkáních, který činí cca 3 – 4 mm. Většina pozitronů zaniká do vzdálenosti cca 1 mm od původního atomu. Jak již bylo uvedeno výše, pozitron při průchodu hmotným prostředím ztrácí svoji energii, přesněji svoji kinetickou energii. Jakmile je tato energie vyčerpána dochází k samotnému zániku pozitronu. Zánik pozitronu probíhá tak, že zanikající pozitron interaguje s elektronem v procesu zvaném anihilace pozitronu. Při tomto procesu obě částice zanikají a jejich hmota se mění v energii dvou fotonů gama o energii 511 keV, které se z místa anihilace vzdalují po přímce opačnými směry (**viz. obr. 2**). [10]

Obrázek 2: PET



Zdroj: Nukleární medicína. [6]

Vysoká energie fotonů vzniklých procesem anihilace, někdy také nazývaných „anihilační fotony“, je mimo rozsah standardní účinnosti scintilačních krystalů NaI (Tl). Proto se při jejich detekci užívá scintilátorů s větší hustotou a vyšším atomovým číslem, příkladem je germaniová sůl bismutu (BGO) a fluorid barnatý. [10]

#### ***1.2.5.1 Pozitronové zářiče***

„Pozitronové zářiče mají velmi krátké poločasy rozpadu (řádově minuty).“ [10] Ve spojení se specifiky vysokou aktivitou pozitronových zářičů a rovněž velmi citlivou detekcí PET lze nemocným aplikovat nižší aktivity radionuklidů. Výsledkem těchto vlastností je poměrně nižší dávka ze záření a možnost v krátké době vyšetření opakovat. Z toho však plynou i určité nevýhody, jako je například nutnost provádět samotnou přípravu většiny radiofarmak přímo v místě vyšetření, neboť zářiče mají, jak jsem uvedl výše, velmi krátké poločasy rozpadu. K jejich výrobě v místech vyšetření (oddělení nukleární medicíny) se užívá speciálních lékařských cyklotronů. [10]

Určitou výjimkou mezi pozitronovými zářiči je fluor  $^{18}\text{F}$ , který se používá především ke značení deoxyglukózy a jeho poločas rozpadu je téměř 2 hodiny. Díky delšímu poločasu rozpadu lze  $^{18}\text{F}$ -fluorodeoxyglukózu (FDG) dopravit různými dopravními prostředky na poměrně delší vzdálenost, to je důležité zejména z toho pohledu, že fluor  $^{18}\text{F}$  je za poslední roky, vedle technecia  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , nejrozšířenějším radionuklidem používaným ve scintigrafii. [10]

Mezi další výhody fluoru  $^{18}\text{F}$  patří v neposlední řadě relativní dostupnost, která je výhodná ve směru využití levnějších (než PET) hybridních systémů. [10]

Mezi další vlastnosti PET a pozitronových zářičů patří skutečnost, že jako pozitronové zářiče lze připravit biologicky významné prvky, jako jsou uhlík  $^{11}\text{C}$ , kyslík

$^{15}\text{O}$  a dusík  $^{13}\text{N}$ , které jsou součástí molekul radiofarmak a biogenních sloučenin, jejichž metabolismus lze za využití PET kvantitativně vyšetřit. [6]

## 2 Cíl práce a hypotézy

Cílem bakalářské práce je zjistit, jakým způsobem a podle jakých dokumentů se nakládá s radioaktivním odpadem na oddělení nukleární medicíny. V dnešní době je nedostatek materiálů, které obsahují řešení pouze této konkrétní problematiky.

Informace související s touto problematikou začínají u specifických zákonů a vyhlášek, úzce souvisí s používanými radiofarmaky a v nich obsaženými radionuklidy a končí u samotného vzniku radioaktivního odpadu na oddělení nukleární medicíny a procesem jeho likvidace. Analýzou příslušných zákonů, vyhlášek a literatury bude vytvořen ucelený svazek obsahující veškeré teoretické informace v kombinaci s informacemi získanými prostřednictvím návštěv různých oddělení nukleární medicíny a PET center.

Tedy mým konkrétním cílem práce je:

1. Analyzovat zákony a vyhlášky týkající se oddělení nukleární medicíny z hlediska nakládání s radiačními odpady.
2. Popsat radiofarmaka a v nich obsažené radionuklidy používané na oddělení nukleární medicíny, s jejich základními fyzikálními a chemickými vlastnostmi.
3. Specifikovat nakládání s radioaktivními odpady na ambulantních a lůžkových odděleních nukleární medicíny a na pracovištích s PET.

**Hypotéza 1:** *Na lůžkovém oddělení nukleární medicíny je rozdílný systém likvidace radiofarmak a odpadů než na ambulantním oddělení nukleární medicíny.*

Souhrnným výsledkem by měla být bakalářská práce obsahující široké spektrum informací z různých odvětví, specifikující problematiku nakládání s radiačními odpady na oddělení nukleární medicíny.

### 3 Metodika

Metodika zpracování mé bakalářské práce na téma „**Nakládání s radiačními odpady na oddělení nukleární medicíny**“ proběhla v několika krocích.

Počátečním krokem ke zpracování mé bakalářské práce byl sběr různorodých informací z legislativních, literárních a webových zdrojů souvisejících, s danou problematikou. Nesmím opomenout ani sběr dat z databáze Ústavu zdravotnických informací a statistiky ČR.

Následujícím krokem bylo tyto zdroje analyzovat, za účelem zúžení poměrně širokého spektra informací, na informace související hlavně s radioaktivním odpadem a nukleární medicínou. To mělo za následek, že některé druhy informací se začaly jevit z větší části jako nevyužitelné pro zpracování mé bakalářské práce (např. již zmíněné data z databáze Ústavu zdravotnických informací a statistiky ČR).

Po seznámení se podrobněji s radioaktivními odpady a nukleární medicínou, prostřednictvím teoretických informací, bylo dále zapotřebí provést návštěvu konkrétních oddělení nukleární medicíny, za účelem získání faktů. Tyto návštěvy byly realizovány v okresní nemocnici Uherské Hradiště, krajské nemocnici České Budějovice a oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně. Všechny návštěvy proběhly prostřednictvím sezení s příslušnými radiologickými fyziky daných oddělení, kde mi byla sdělena potřebná fakta související s danou problematikou. Dále mé návštěvy byly doplněny o prohlídku oddělení, seznámení se s dalšími pracovníky, kteří mi sdělili ještě konkrétnější informace související s danou problematikou.

Závěrečným krokem zpracování mé bakalářské práce byla sumarizace všech získaných teoretických informací, jejich roztržení a uspořádání do uceleného přehledu, vyhodnocení všech faktů a informací získaných prostřednictvím návštěv jednotlivých oddělení nukleární medicíny s příslušným komentářem.

Práce byla zpracována tak, aby podala odpovídající pohled na danou problematiku a bylo možné ji využít v budoucnu jako studijní materiál.

## 4 Výsledky

### 4.1 Analýza zákonů a vyhlášek

Analýzou zákonů a vyhlášek, které by se mohly týkat oddělení nukleární medicíny z hlediska nakládání s radioaktivními odpady, bylo zjištěno, že mezi tyto zákony a vyhlášky zejména patří: Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění a jeho prováděcí vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně (ruší vyhlášku č. 184/1997 Sb.) ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb., kterou se mění vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. Toto jsou dva stěžejní legislativní zdroje, které řeší problematiku radioaktivních odpadů, vzniklých nejen na oddělení nukleární medicíny.

Zákon č. 18/1997 Sb. i vyhláška 307/2002 Sb. byly rozebrány v průběhu kapitoly **1 Současný stav**, kde je možné nalézt konkrétně citované paragrafy, odstavce i písmena, ale také další informace vycházející ze zmíněné legislativy. Avšak pro přehlednost, zde uvádím dílčí paragrafy, jak zákona 18/1997 Sb. (viz. **tabulka 1**), tak vyhlášky 307/2002 Sb. (viz. **tabulka 2**), které souvisejí s problematikou radioaktivních odpadů na oddělení nukleární medicíny.

**Tabulka 1: Analýza zákona 18/1997 Sb.**

Hlava I	Úvodní ustanovení
§ 1	Předměty úpravy
§ 2	Základní pojmy
Hlava II	Obecné podmínky pro vykonávání činností souvisejících s využitím jaderné energie, činností vedoucích k ozáření a zásahů ke snížení ozáření
§ 8	Uvádění radionuklidů do životního prostředí
Hlava III	Podmínky pro využití jaderné energie a ionizujícího záření
§ 9	Povolení k jednotlivým činnostem
§ 13	Žádost o povolení
§ 17	Všeobecné povinnosti držitelů povolení
§ 18	Povinnosti z hlediska jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti
Hlava IV	Nakládání s radioaktivními odpady
§ 24	-
§ 25	-
§ 26	-
§ 27	-
§ 31	-

*Zdroj: zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření*



**Tabulka 2: Analýza vyhlášky 307/2002 Sb.**

Hlava I	Úvodní a obecná ustanovení
§ 1	Předměty úpravy
§ 2	Základní pojmy
Hlava I	Podmínky bezpečného provozu zdrojů ionizujícího záření a pracovišť s nimi
§ 24	Obecné podmínky bezpečného provozu
§ 34	Zvláštní podmínky bezpečného provozu pracoviště s otevřenými radionuklidovými zřídly
Hlava III	Nakládání s radioaktivními odpady
§ 46	Obecné požadavky na nakládání s radioaktivními odpady
§ 47	Požadavky na zařízení používaná při nakládání s radioaktivními odpady
§ 48	Shromažďování a třídění radioaktivních odpadů
§ 49	Zpracování radioaktivních odpadů
§ 50	Úprava radioaktivních odpadů
§ 51	Skladování radioaktivních odpadů
§ 52	Ukládání radioaktivních odpadů
§ 53	Limity a podmínky bezpečného nakládání s radioaktivními odpady
§ 54	Evidence radioaktivních odpadů
§ 55	Průvodní list radioaktivních odpadů
Hlava IV	Uvádění radionuklidů do životního prostředí
§ 56	Obecná pravidla pro uvádění radionuklidů do životního prostředí
§ 57	Uvolňovací úrovně
Hlava VI	Podrobnosti podmínek lékařského ozáření
§ 65	Léčebné aplikace radionuklidů
Hlava VII	Sledování, měření, hodnocení, ověřování a zaznamenávání veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany
§ 69	Rozsah sledování, měření, hodnocení, ověřování a zaznamenávání veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany
§ 78	Monitorování vypustí

Zdroj: vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

## **4.2 Radionuklidy používané na oddělení nukleární medicíny**

V ČR se používá celá řada radionuklidů, které mohou být nalezeny v příloze vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb. Avšak ne všechny radionuklidy se používají na oddělení nukleární medicíny a také ne všechny byly používány na odděleních, které jsem osobně navštívil. Proto zde uvádím přehled radionuklidů používaných na oddělení nukleární medicíny v nemocnici v Českých Budějovicích a na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně.

#### 4.2.1 Radionuklidy používané na NM v nemocnici České Budějovice

Radionuklidy používané na oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, mi byly poskytnuty včetně fyzikálních vlastností tamním radiologickým fyzikem oddělení. Jednalo se o radionuklidy uvedené v **tabulce 3**.

**Tabulka 3: Radionuklidy používané na oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice**

Radionuklid	Rozpad <sup>1</sup>	Poločas	Energie fotonů [MeV] a zastoupení (%)	$\beta$ -Max <sup>2</sup> [MeV]	Vrstva materiálu olova [mm] zeslabující dávkový příkon o 50%
<sup>32</sup> P	$\beta$ -	14,3 dní	1,71 (100)	1,71	-
<sup>51</sup> Cr	EC	27,7 dní	320 (10)	-	1,7
<sup>57</sup> Co	EC	271,8 dní	122 (86); 136 (10)	-	0,2
<sup>58</sup> Co	EC, $\beta$ +	70,8 dní	0,511 (31); 0,810 (99)	-	9
<sup>67</sup> Ga	EC	3,26 dní	0,093 (38); 0,185 (24); 0,300 (16)	-	0,66
<sup>89</sup> Sr	$\beta$ -	50,5 dní	1,492 (100)	1,488	-
<sup>90</sup> Y	$\beta$ -	64,08 hod	2,284 (100)	2,28	-
<sup>99m</sup> Tc	IT	6,01 hod	0,140 (88)	-	0,17
<sup>111m</sup> In	IT	7,7 min	0,53722 (100)	-	0,68
<sup>125</sup> I	EC	59,4 dní	0,027 x-ray (115); 0,035 (6,7)	-	0,017
<sup>131</sup> I	$\beta$ -	8,01 dní	0,284 (5,8); 0,364 (82); 0,637 (6,5)	0,606	2,4
<sup>153</sup> Sm	$\beta$ -	46,27 hod	0,103 (29)	0,71	0,1
<sup>169</sup> Yb	EC	32,026 dní	0,909(100)	-	5,4
<sup>186</sup> Re	$\beta$ -	89,2 hod	0,137 (9)	1,07	2,5
<sup>201</sup> Tl	EC	72,94 hod	0,068 - 0,080 x-ray (94); 0,167 (10)	-	0,006

Zdroj: Oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice

#### 4.2.2 Radionuklidy používané na NM Masarykova onkologického ústavu

Radionuklidy používané na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně mi byly sděleny taktéž radiologickým fyzikem oddělení, kde se jednalo o radionuklidy uvedené v **tabulce 4**.

**Tabulka 4: Radionuklidy používané na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně**

Radionuklid	Rozpad <sup>1</sup>	Poločas	Energie fotonů [MeV] a zastoupení (%)	$\beta$ -Max <sup>2</sup> [MeV]	Vrstva materiálu olova [mm] zeslabující dávkový příkon o 50%
<sup>18</sup> F	$\beta^+$	109,8 min	0,511 (181)	0,635	5
<sup>32</sup> P	$\beta^-$	14,28 dní	-	1,71	-
<sup>51</sup> Cr	EC	27,7 dní	320 (10)	-	1,7
<sup>67</sup> Ga	EC	78,26 hod	0,093 (38); 0,185 (24); 0,300 (16)	-	0,66
<sup>89</sup> Sr	$\beta^-$	50,52 dní	-	1,488	-
<sup>99m</sup> Tc	IT	6,02 hod	0,140 (88)	-	0,2
<sup>111</sup> In	EC	2,8 dní	0,023 x-ray (68); 0,026 x-ray (15); 0,172 (90); 0,247 (94)	-	0,7
<sup>123</sup> I	EC	13,2 hod	0,027 x-ray (71); 0,031 x-ray (16); 0,159 (84)	-	0,05
<sup>131</sup> I	$\beta^-$	8,02 dní	0,284 (5,8); 0,364 (82); 0,637 (6,5)	0,606	2,5

Zdroj: Oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně

<sup>1</sup> EC – záchyt elektronu, IT – izomerní přechod

<sup>2</sup>  $\beta$ -Max – podíl maximální hodnoty energie a emitované energie fotonů

### 4.2.3 Chemické formy radiofarmak

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4.2 *Charakteristika radiofarmak* radionuklidy jako takové, musí být navázány na chemické přípravky, aby je bylo možné použít k diagnostickým nebo terapeutickým aplikacím. Na oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice a také na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně mi byly poskytnuty informace o chemických formách látek obsahující používané radionuklidy k diagnostickým (viz. **tabulka 5.1, 5.2, 5.3**) i terapeutickým (viz. **tabulka 6**) aplikacím.

**Tabulka 5.1: Diagnostická vyšetření a aplikované chemické formy Radionuklidů – část1.**

Diagnostické vyšetření	Radionuklid	Látka, chemická forma	Aplikovaná aktivita na 1 vyšetření [MBq]
onemocnění			
nádory	$^{18}\text{F}$	FDG	750
	$^{67}\text{Ga}$	citrát	300
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	MIBI, depreotid, fosfonáty, tetrofosmin, protilátky	800
	$^{111}\text{In}$	pentetreoid, protilátky	190
	$^{123}\text{I}$	MIBG	400
	$^{201}\text{Tl}$	chlorid	100
zánět	$^{67}\text{Ga}$	citrát	150
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	leukocyty, HIG, protilátky	600 - 800
	$^{111}\text{In}$	leukocyty, HIG, protilátky	30

*Zdroj: Oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně*

**Tabulka 5.2: Diagnostická vyšetření a aplikované chemické formy radionuklidů – část 2.**

Diagnostické vyšetření	Radionuklid	Látka, chemická forma	Aplikovaná aktivita na 1 vyšetření [MBq]
orgán, systém			
kosti	$^{99m}\text{Tc}$	fosfáty, fosfonáty	800
kostní dřev	$^{99m}\text{Tc}$	nanokoloidy	550
mozek	$^{18}\text{F}$	FDG	400
	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$ , DTPA, HMPAO, ECD	600 - 800
	$^{111}\text{In}$	DTPA	40
	$^{123}\text{I}$	Ioflupan, IBMZ	200
	$^{169}\text{Yb}$	EDTA	40
štítná žláza	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$ , MIBI, DMSA (V)	200 - 800
	$^{123}\text{I}$	jodid	20
	$^{131}\text{I}$	jodid	0,5 - 185
	$^{201}\text{Tl}$	chlorid	80 - 100
příštítná tělíska	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$ , MIBI	200 - 800
	$^{201}\text{Tl}$	chlorid	80
plíce	$^{99m}\text{Tc}$	aerosol, technegas, MAA, mikrosféry	200 - 3000
srdce	$^{18}\text{F}$	FDG	500
	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$ , MIBI, tetrafosmin, erytrocyty, DTPA	800 - 1400
	$^{123}\text{I}$	MIBG	400
	$^{201}\text{Tl}$	chlorid	40 - 110

*Zdroj: Oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně*

**Tabulka 5.3: Diagnostická vyšetření a aplikované chemické formy radionuklidů – část 3.**

Diagnostické vyšetření	Radionuklid	Látka, chemická forma	Aplikovaná aktivita na 1 vyšetření [MBq]
orgán, systém			
lymfatický systém	$^{99m}\text{Tc}$	nanokoloidy	150
cévy	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$ , erythrocyty, trombocyty, DTPA, MAA, HSA	200 - 800
krev	$^{51}\text{Cr}$	erythrocyty, trombocyty	6
	$^{99m}\text{Tc}$	HSA	80
	$^{111}\text{In}$	trombocyty	10
	$^{131}\text{I}$	HSA	6
slezina	$^{99m}\text{Tc}$	alterované erythrocyty	100 - 200
hepatobilární systém	$^{99m}\text{Tc}$	koloidy, IDA deriváty	150 - 300
gastrointestinální trakt	$^{51}\text{Cr}$	erythrocyty	4
	$^{57}\text{Co}$	monocyanocobalamin	1
	$^{58}\text{Co}$	monocyanocobalamin	1
	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$ , erythrocyty, koloidy	50 - 700
	$^{125}\text{I}$	HSA	6
	$^{131}\text{I}$	HSA	6
ledviny	$^{51}\text{Cr}$	EDTA	3
	$^{99m}\text{Tc}$	EC, DMSA (III), DTPA, glukonát, MAG3	20 - 500
	$^{131}\text{I}$	hippuran	0,5 - 1
močový měchýř	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$ , MAG3	50 - 200
varlata, šourek	$^{99m}\text{Tc}$	$\text{TcO}_4$	600

*Zdroj: Oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně*

**Tabulka 6: Terapeutické aplikace radionuklidů a jejich chemických forem**

Terapie	Radionuklid	Látka, chemická forma	Aplikovaná aktivita na 1 dávku [GBq]
paliativní léčba	$^{89}\text{Sr}$	chlorid	0,15
	$^{153}\text{Sm}$	EDTM	0,1 - 4
	$^{186}\text{Re}$	HEDP	1,4
hematologicky maligní onemocnění	$^{32}\text{P}$	fosfáty	0,2 - 0,5
radioimunoterapie	$^{90}\text{Y}$	tiuxetan	1
nádorová onemocnění štítné žlázy	$^{131}\text{I}$	jodid	1,1 - 3,7<

*Zdroj: Oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně*



### **4.3 Specifikace nakládání s radioaktivními odpady na oddělení NM**

Při přípravě a aplikaci radiofarmak pacientům a při vyšetřovacích metodách vznikají na pracovištích nukleární medicíny odpady, které jsou kontaminovány radionuklidovými zářiči. Jde o nevyužitelné odpadové materiály, které se dle skupenství dělí na pevné, kapalné a plynné. Vzhledem k obsahu radioaktivních látek, které se v těchto odpadních materiálech nachází, není možné je likvidovat způsobem běžným pro likvidaci odpadů ze zdravotnických zařízení.

#### ***4.3.1 Vymírací prostory radioaktivního odpadu***

Radioaktivní odpad na oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, ať už na lůžkové či ambulantní části, je shromažďován, tříděn a uložen do skladu (vymírací místnost) ve vymíracím prostoru radioaktivního odpadu. Sklad radioaktivního odpadu je součástí kontrolovaného pásma. V tomto skladu je odpad uložen po dobu, než dojde k samovolnému poklesu (uplynutím několika poločasů přeměny, v praxi 6 až 10 poločasů) jeho aktivity pod uvolňovací úroveň, aby jej bylo možné považovat za odpad neaktivní. O tom však rozhoduje příslušná dohlížející osoba (**viz. příloha č. 2**).

#### ***4.3.2 Pevné odpady***

Nejvíce, myšleno do množství aktivity, vzniká na oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích pevných (tuhých) odpadových materiálů. Pevné odpady jsou ukládány ve vymírací místnosti oddělení, kde jsou kontrolovány, zda při jejich likvidaci není překročena jejich hmotnostní aktivita uvolňovacích úrovní dle tab.1 přílohy 1 vyhlášky č. 307/2002 Sb., ve znění vyhlášky 499/2005 Sb. Tyto vzniklé pevné odpadové materiály se v případě oddělení nukleární medicíny dále dělí na infekční (biologické) a neinfekční.

##### ***4.3.2.1 Infekční odpad***

Infekční odpad je převážně tvořen jednorázovými stříkačkami a jehlami, infuzními sadami aj., ale také zbytky kontaminované stravy, kontaminovanými jídelními

potřebami a vším, s čím pacienti, podstupující terapii na lůžkové části, přišli do styku. Tedy pevné infekční odpadové materiály jako jsou stříkačky, jehly, infuzní sady, zkumavky aj. se umisťují do uzavíratelných nádob (např. malé plastové kontejnery), které se shromažďují v igelitových pytlích uložených v lednicích, situovaných ve vymíracích místnostech. Materiály, kontaminované prostřednictvím pacientů podstupující terapii na lůžkové části nukleární medicíny, se dekontaminují klasickými způsoby, jako je oplachování, mytí a praní, avšak pouze lze-li je opět plnohodnotně použít.

#### ***4.3.2.2 Neinfekční odpad***

Neinfekční odpad tvoří hlavně zkumavky a lahvičky pouze se zbytky radiofarmak (např.  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) bez přítomnosti dalších biologických materiálů, které se (na rozdíl od infekčních odpadů) ukládají do malých kontejnerů a ty se uloží do olověných trezorů situovaných ve vymíracích místnostech.

#### ***4.3.3 Kapalné odpady***

Nejvíce kapalného odpadu, myšleno do množství objemu, vzniká na oddělení nukleární medicíny, a to zejména v lůžkové části. Jedná se tedy o odpadní vody z patientského WC lůžkové části oddělení (**viz. příloha č. 2**).

##### ***4.3.3.1 Odpadní vody z lůžkové části oddělení***

Tyto odpadní vody jsou silně kontaminovány fekáliemi s obsahem zbytků radionuklidů (zejména v případě přítomnosti  $^{131}\text{I}$  mohou být aktivity podstatně vyšší), používaných k terapii pacientů. Takto kontaminovaná voda by i po naředění v nemocniční čističce stále překračovala povolenou referenční úroveň pro výpusť odpadní vody, tzn. v případě oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích 455 Bq/l (**viz. příloha č. 3**). Je tedy nutné tyto odpadní vody vedené z patientských WC lůžkové části jímat do příslušných nádrží, kde musí setrvat tak dlouho, dokud jejich aktivita (po naředění) překračuje již zmíněných 455 Bq/l.

Na oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích se jednalo o 3 nádrže, které jsou střídavě (v rozmezí jednotlivých týdnů) plněny a vypouštěny. Každá ze tří nádrží tedy prochází stejným harmonogramem, avšak v jinou dobu, tzn.: 1. týden plnění, 2. týden stání, 3. týden výpust' (výpust' je rozložena do průběhu celého dne na 5 dávek, aby došlo k dostatečnému naředění v nemocniční čističce a nebyly přesáhnuty již výše zmíněné limity). Celý harmonogram nádrží je řízen automatizovanou jednotkou CPU.

#### ***4.3.3.2 Odpadní vody ze zbytku oddělení***

Před tím, než se určí, které odpadní vody budou svedeny do vymíracích nádrží, je třeba vypracovat „úvahu“ o tom, které odpadní vody budou mít natolik vysokou aktivitu, že i po naředění v nemocniční čističce budou stále překračovat stanovený limit.

Ty kapalně odpady, jež jsou vedeny z oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích přímo do nemocniční čističky a po naředění vypouštěny do městské kanalizace, se musí podrobovat pravidelnému monitorování. To je zajišťováno, pro kanalizační výpust' nemocniční čističky odpadních vod do městské kanalizace, odběrem 250 ml odpadní vody. Tento odebraný vzorek se měří ve velkoobjemovém studnovém krystalu (analyzátor je kalibrován jednou ročně jodovým etanolem). Měření je prováděno dohlízející osobou periodicky – týdně. Data z měření jsou následně zaznamenána do deníku odpadních vod.

#### ***4.3.4 Plynné odpady***

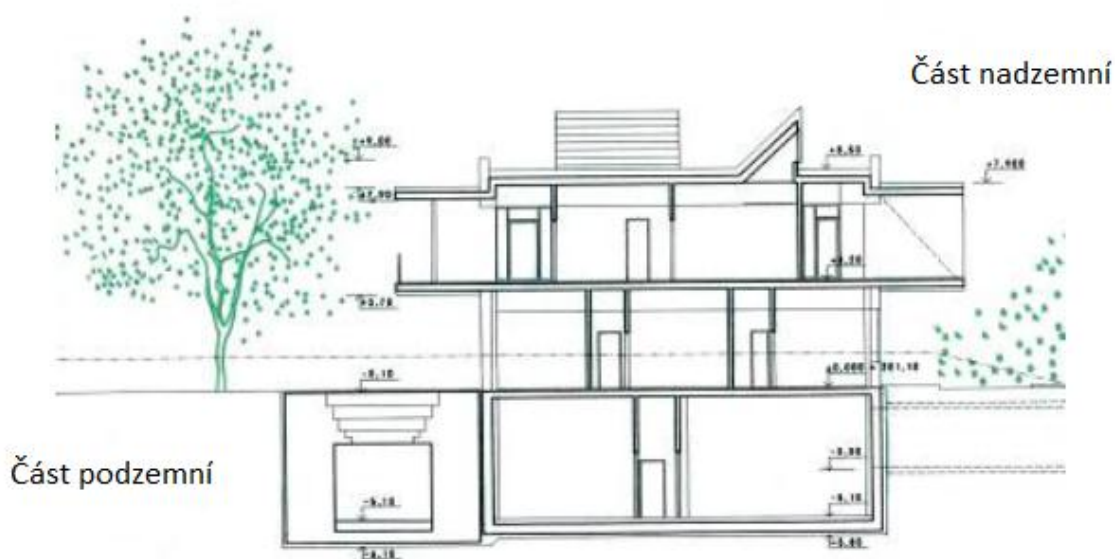
Plynné odpady tvoří v případě oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice zanedbatelnou položku a nejsou podrobněji řešeny ve smyslu jejich likvidace.

#### 4.3.5 PET Centrum

V případě oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně, byly zjištěny některé ne příliš markantní rozdíly v procesu nakládání s radioaktivními odpady v porovnání s oddělením nukleární medicíny v Českých Budějovicích.

Oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně se skládá ze dvou hlavních částí – z části nadzemní (**viz. obr. 3**), kde probíhají diagnostická a některá terapeutická vyšetření a z části podzemní (**viz. obr. 3**), kde je umístěno cyklotronové pracoviště a probíhá zde výroba radiofarmak a radionuklidů v nich obsažených.

**Obrázek 3: Plán budovy pracoviště**



*Zdroj: oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně*

Tedy radioaktivní odpad není produkován jen částí ambulantní, ale také při výrobním procesu radionuklidů a radiofarmak v podzemních prostorách areálu.

#### ***4.3.5.1 Cyklotronové pracoviště a prostory přípravy radiofarmak***

Jak již bylo naznačeno, radioaktivní odpad vzniká i v této části oddělení. Jedná se především o radioaktivní odpad pevného skupenství bez přítomnosti biologických částic, tzn. odpad neinfekční.

##### ***Pevný odpad***

Pevný odpad je tedy tvořen zejména součástkami z různých slitin a materiálů, které jsou vystaveny enormním aktivitám (v řádech desítek až stovek GBq) přímo uvnitř cyklotronu (např. součástky pro uchycení terčů, krycí fólie). Další odpad vzniká při samotné výrobě radiofarmak, kde se spotřebovává poměrně větší množství různých hadiček, lahvíček, zkumavek a jim podobných předmětů, které přichází do kontaktu s radionuklidy při výrobě a dávkování radiofarmak. Nakládání s takto vzniklými odpady je v zásadě stejné jako na všech odděleních nukleární medicíny s minimálním rozdílem. Tedy vzniklé odpady se roztřídí do polyetylenových sáčků a kontejnerů, které jsou pak uloženy do vymíracích boxů ve vymíracích místnostech s příslušným označením (datum, nuklid, pořadové číslo, počet). Výjimku tvoří dlouhodobé radioaktivní odpady s vysokou aktivitou v podobě materiálů kontaminovaných zejména radioizotopy wolframu a kobaltu, které jsou uloženy přímo v místnosti cyklotronu. Tato místnost je velmi důkladně odstíněna a zabezpečena.

##### ***Kapalný odpad***

Součástí cyklotronového pracoviště a pracoviště výroby radiofarmak jsou jímací nádrže, které zabezpečují zachyt odpadních vod, kontaminovaných radionuklidy. Konkrétně z části cyklotronového pracoviště a pracoviště výroby radiofarmak, jako takové, jsou radioaktivní kapalné odpady zanedbatelnou položkou. Na rozdíl od nukleárního oddělení v nemocnici České Budějovice, je zde na tyto jímky napojeno veškeré odpadní potrubí z celého oddělení (celá budova). A tedy majoritní podíl kapalných radioaktivních odpadů produkuje nadzemní část oddělení pro diagnostiku a terapii.

### ***Plynné odpady***

Jako v případě kapalných radioaktivních odpadů jsou i plynné radioaktivní odpady z cyklotronového pracoviště a pracoviště výroby radiofarmak produkovány v zanedbatelném množství. Jejich likvidace je zajištěna vzdušnou ventilací, kde jsou umístěny filtry pro záchyt prašných částic, které by mohly být kontaminovány. Tyto filtry jsou neustále monitorovány a v případě, že by došlo k jejich zanesení větším množstvím radioaktivních odpadových částic, byly by vyměněny. K tomu ovšem, jak mi bylo zmíněno správcem PET centra, za 5 let aktivního provozu pracoviště nedošlo.

#### ***4.3.5.2 Oddělení pro diagnostiku a terapii***

Druhou částí (nadmírná část) nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně je tedy část pro diagnostiku a terapii. Jedná se o podobně zařízené oddělení jako v případě oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích, jen bez lůžkové části a kromě scintigrafie se zde provádí i pozitronová emisní tomografie.

Nakládání s radioaktivním odpadem je, stejně jako na oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích, řešeno v plánu zabezpečování jakosti a v plánu monitorování, dle kterého se dělí na odpad pevný spalitelný a odpad tekutý.

#### ***Odpad pevný spalitelný***

Shromažďování a likvidace pevného spalitelného odpadu se řídí pravidly uvedenými v programu monitorování. Tedy s pevným spalitelným odpadem se nakládá tak, že přímo na pracovišti jsou kontaminované aktivní materiály ukládány do polyetylenových sáčků a poté do kontejnerů. Na konci pracovní činnosti jsou okamžitě naplněné polyetylenové sáčky přesunuty ve stínících kontejnerech do vymíracích boxů lokalizovaných ve vymíracích místnostech. Každý polyetylenový sáček i kontejner má na sobě uvedeny příslušné informace: druh radionuklidu, datum uložení do vymíracího boxu, číslo polyetylenového sáčku, pod kterým se dává do vymíracího boxu. Jednotlivé

boxy jsou rozděleny dle nuklidů v nich uložených. Kontejnery, sloužící pro přesun, jsou po vyprázdnění přeměřeny a vráceny zpět na pracoviště k dalšímu použití.

Obsahy jednotlivých vymíracích boxů jsou uváděny do životního prostředí nejdříve po uplynutí 10 poločasů rozpadu od data uzavření. Každý sáček je před samotnou likvidací proměřen v měřicí místnosti, zda splňuje kritérium pro uvolnění, tj. na žádných 100 cm<sup>2</sup> povrchu uvolňovaného materiálu není součet plošných aktivity přítomných radionuklidů (viz. **tabulka 7**) větší než 1 a současně dávkový příkon ve vzdálenosti 1 m menší než 0,1 μSv/h. Likvidaci řídí dohlížející osoba a vede o ní záznamy.

**Tabulka 7: Uvolňovací úrovně**

Nuklidy	Uvolňovací úrovně – plošná aktivita [Bq/cm <sup>2</sup> ]
<sup>223</sup> Ra	3
<sup>18</sup> F, <sup>111</sup> In, <sup>131</sup> I, <sup>67</sup> Ga	30
<sup>51</sup> Cr, <sup>99m</sup> Tc, <sup>123</sup> I, <sup>32</sup> P, <sup>89</sup> Sr	300

*Zdroj: Masarykův onkologický ústav – Program monitorování*

### ***Tekutý odpad***

Tekutý odpad se dělí na dvě třídy a to na odpad v podobě radiofarmak v uzavřených ampulkách, které jsou uchovány a společně likvidovány s pevným odpadem a dále na odpad v podobě odpadních vod kontaminovaných radionuklidy.

Jak již jsem naznačil v kapitole **4.3.5.1.2 Kapalný odpad**, je v budově instalována jímka pro záchyt, měření a řízení vypouštění odpadních vod z celé budovy. Jímka se nachází tedy v prvním podzemním podlaží. Tvoří ji tři nerezové nádrže, každá o objemu 10 m<sup>3</sup>. Každá z nádrží může samostatně sloužit pro jímání odpadních vod, jejich ředění a vypouštění do odpadní kanalizace, avšak vše lze kombinovat, tedy je možné, aby některé nádrže sloužily jako jímací a jiné k ředění odpadních vod. Všechny tři nádrže

jsou dále vybaveny kalovými čerpadly pro účely přečerpávání a míchání obsahu a také sondami pro měření aktivity radionuklidů obsažených v odpadní vodě. Dle naměřené aktivity je prováděno, pomocí řídicího systému, doředování a řízené vypouštění obsahu jímky. To vše probíhá tím způsobem, aby v žádném m<sup>3</sup> odpadní vody, vypouštěné do kanalizace, nebyl součet součinů průměrných objemových aktivit jednotlivých vypouštěných radionuklidů a maximálních konverzních faktorů  $h_{ing}$  pro příjem pozitívním dospělým jednotlivcem z obyvatelstva větší než  $10^{-2}$  Sv/m<sup>3</sup>. Jímka se vypouští každý den v 6 hodin ráno. Řídicí systém umožňuje automatický provoz i ruční ovládání s nezbytným blokováním.



## 5 Diskuze

Na nakládání s radioaktivním odpadem na oddělení nukleární medicíny lze pohlížet z několika směrů. Můžeme se jím zabývat jako předmětem legislativním, fyzikálním či chemickým. Avšak všechny tyto vzájemně odlišné oblasti se zde spojují a vzájemně ze sebe vychází. Jak již bylo zjištěno analýzou zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně (ruší vyhlášku č. 184/1997 Sb.) ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb., legislativa pevně stanovuje určité hranice. Tyto hranice vymezují nejenom pojmy a obecné podmínky (např. povolení, žádosti, všeobecné povinnosti) související s problematikou radioaktivních odpadů a ionizujícího záření, ale také určují, které konkrétní radionuklidy mohou být používány. Vymezují, kde mohou být použity a za jakých konkrétních podmínek s nimi může být nakládáno (např. množství aktivity, doba poločas rozpadu, emitované záření). Tedy souhrnně řečeno, legislativa, týkající se radioaktivních odpadů, nám vymezuje, dle chemických a zejména fyzikálních aspektů, jak s těmito odpady bezpečně nakládat, aby riziko neúmyslné expozice pro člověka a životní prostředí bylo co nejnižší.

Radionuklidy a jimi kontaminované odpady, s kterými se v současné době nakládá na oddělení nukleární medicíny, nemají predispozice k tomu, aby byly velkým rizikovým faktorem, který by markantním způsobem ohrožoval člověka nebo životní prostředí. Naznačuje tomu zejména velmi krátký fyzikální poločas rozpadu a množství aktivity aplikovaných radionuklidů, používaných na oddělení nukleární medicíny.

Nejpoužívanějším radionuklidem v diagnostice nukleární medicíny na území ČR je jednoznačně  $^{99m}\text{Tc}$ , což bylo zmíněno na všech třech navštívených pracovištích nukleární medicíny (České Budějovice, Brno, Uherské Hradiště). Ostatně i z tabulek (viz. **tab. 5.1**, **tab. 5.2**, **tab. 5.3**) je na první pohled vidět, že  $^{99m}\text{Tc}$  je aplikováno ve většině prováděných diagnostických vyšetřeních. Důvody, proč tomu tak je, jsou dle literárních zdrojů charakterizující ideální radiofarmakum slovy: „*Ideální radiofarmakon musí být snadno dostupný, musí mít přiměřenou cenu a dostatečně vysokou měrnou*

*aktivitu, aby jeho podání nevyvolalo fyziologickou, farmakologickou nebo toxicou odpověď.*“ [10] jsou zjevné. Tedy kromě již citovaných důvodů proč je  $^{99m}\text{Tc}$  nejběžněji používaným radionuklidem v oblasti diagnostiky nukleární medicíny, sem spadá také energie emitovaného záření a dostatečně dlouhý poločas přeměny (v řádu hodin), aby nedocházelo ke zbytečné zátěži vyšetřovaného. A ačkoli tato práce je zaměřena i na oblast nukleární medicíny využívající pozitronovou emisní tomografii neboli PET, je na místě uvést nejhojněji využívaný radionuklid touto metodou  $^{18}\text{F}$  v chemické formě známé také jako FDG. Tento radionuklid je nejrozšířenějším v oblasti diagnostiky, využívající pozitronovou emisní tomografii, pravděpodobně ze dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem je, že ze škály radionuklidů emitující pozitronové záření, má poměrně dlouhý poločas přeměny, činící téměř 2 hodiny, což oproti ostatním pozitronovým zářičům je opravdu dlouhá doba (např. pozitronový zářič  $^{11}\text{C}$  má fyzikální poločas přeměny 20,3 minuty). A tedy je možné, aby byl dopraven i na oddělení nukleární medicíny, která nedisponují svým vlastním cyklotronovým pracovištěm, potřebným pro jeho výrobu. To již dokládá ta skutečnost, že cyklotronové pracoviště na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně vyrábí a vyváží z 90% všech produkovaných radionuklidů právě  $^{18}\text{F}$  ve formě FDG. A druhým důvodem je možnost jeho použití u hybridních systémů, které z finančního hlediska nemají tak vysokou pořizovací cenu jako PET samotná.

V souvislosti s výše zmíněnými radionuklidy, které mají krátký fyzikální poločas rozpadu, bych chtěl upozornit na radionuklid, používaný na oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, který se výrazně liší svým poločasem rozpadu. Tím je  $^{57}\text{Co}$ . Jako jeden z mála radionuklidů používaných na oddělení nukleární medicíny spadá do kategorie dlouhodobých zářičů - fyzikální poločas přeměny je 271,8 dní. Je třeba ale uvést, že jeho aplikované aktivity při vyšetření gastrointestinálního traktu se pohybují do 1 MBq, což v porovnání s aktivitami aplikovaných např. při terapii nádorových onemocnění štítné žlázy, kde se aplikují řádově jednotky gigabecquerelů  $^{131}\text{I}$ , je zanedbatelné množství. Tedy v případě  $^{131}\text{I}$  by nakumulování takto vysokých aktivit, již mohlo znamenat určitou hrozbu pro kritickou

skupinu obyvatel, u kterých by dávka, za určitých předpokladů, mohla přesáhnout legislativně stanovené limity. Proto na základě těchto skutečností není možné spoléhat jen na to, že nedojde k nashromáždění většího množství aktivity, uvolňované radionuklidy, v jednom bodě. Proto radiační ochrana definuje, jak tomu předejít. Tedy v našem případě, jak nakládat s radioaktivním odpadem vznikajícím na oddělení nukleární medicíny.

Proces nakládání s radioaktivními odpady má jádro věci zejména ve fyzikálních aspektech (fyzikální poločas přeměny, aktivita, druh emitovaného záření). To již vychází z kapitoly **4.3 Specifikace nakládání s radioaktivními odpady na oddělení nukleární medicíny**. Na oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice i na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně bylo zjištěno systémově téměř identické nakládání s radioaktivním odpadem, vzniklým v důsledku provozu oddělení. Avšak proč tomu tak je, když na oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích používají některé jiné radionuklidy a mají jinou strukturu pracoviště, než na oddělení nukleární medicíny a PET centra v Brně? Oddělení nukleární medicíny a PET centra v Brně nedisponuje lůžkovou částí, kde by provádělo terapeutické aplikace řádově vyšších dávek, oproti aplikacím diagnostickým, nachází se zde cyklotronové pracoviště, které denně produkuje stovky gigabecquerelů nutných pro výrobu a zajištění kvality radiofarmak. Důvodem produkce takto vysoké aktivity je závislost mnoha oddělení nukleární medicíny, nedisponujících vlastním cyklotronovým pracovištěm pro výrobu radionuklidů, právě na cyklotronovém pracovišti Masarykova onkologického ústavu v Brně. Tedy produkují se zde radionuklidy a radiofarmaka pro řadu oddělení nukleární medicíny v ČR, ale také dokonce pro oddělení nukleární medicíny na Slovensku. A pokud se zamyslím nad délkou fyzikálních poločasů rozpadu radionuklidů emitující pozitronové záření a nad vzdáleností, kterou musí urazit na místo spotřeby, tak zjistíme, že aby to bylo vůbec možné, musí být počáteční aktivity vyšší, než aktivity potřebné pro samotnou aplikaci. Z toho jasně vychází, proč se na cyklotronovém pracovišti Masarykova onkologického ústavu v Brně produkují tak velká množství aktivit. Nejspíš i to je jedním z důvodů,

proč jsou zde veškeré odpadní vody svedeny do jímacích nádrží, kde jsou proměřovány, ředěny a následně vypouštěny přímo do veřejné kanalizace. A to i přesto, že majoritní podíl zachycených odpadních vod je tvořen, odpadními vodami kontaminovanými radionuklidy z WC umístěných na ambulantní části. Je zde asi jisté riziko, že při úniku, byť jen malého množství takto vysoké aktivity, z části pro výrobu radiofarmak do odpadních vod, by mohlo znamenat překročení stanovených limitů pro výpusť, tzn. v žádném  $\text{m}^3$  odpadní vody vypouštěné do kanalizace nesmí být součet součinů průměrných objemových aktivit jednotlivých vypouštěných radionuklidů a maximálních konverzních faktoru  $h_{\text{ing}}$  pro příjem požitím dospělým jednotlivcem z obyvatelstva větší než  $10^{-2} \text{ Sv/m}^3$ . Proto tedy jsou veškeré odpadní vody na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně jímány, proměřovány, ředěny a vypouštěny.

Nakládání s kontaminovanými odpadními vodami v případě oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice je v zásadě velmi podobné. Odpadní vody jsou zde jímány pouze z pacientského WC na lůžkové části a to z důvodů rizika vyšších aktivit (zejména vyšších aktivit aplikovaného radionuklidu  $^{131}\text{I}$  za účely terapie na lůžkové části), které by mohly zapříčinit překročení stanovených limitů, tzn. v případě oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice 455 Bq/l. Systém jímání odpadních vod je téměř identický se systémem jímání odpadních vod na oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně. Ambulantní část oddělení nukleární medicíny v Českých Budějovicích není na tyto jímací nádrže napojena. Bylo zjištěno, že po naředění odpadních vod s obsahem radionuklidů z ambulantní části v nemocniční čističce, nedojde k překročení stanovených limitu (455 Bq/l) a tudíž není třeba, aby byly jímány.

Likvidace pevných radioaktivních odpadů byla v případě všech oddělení stejná. Probíhala prostřednictvím jejich sběrů, třídění a uložení. Zde vyvstává otázka, kde je hranice této vědecké práce, neboť pevný radioaktivní odpad vznikající na oddělení nukleární medicíny, je radioaktivním odpadem pouze do doby, dokud překračuje limity stanovené uvolňovacími úrovněmi. Po poklesnutí aktivit pod tyto úrovně lze říci, že

odpad již radioaktivní není a tedy je s ním nakládáno, tak jako se zbytkem odpadů vznikajících ve zdravotnických zařízeních.

## 6 Závěr

Bakalářská práce měla za cíl: *posoudit nakládání s radioaktivními odpady na oddělení nukleární medicíny*, jak z hlediska teoretického, tak i praktického a zjistit, zdali je rozdíl v nakládání s radioaktivními odpady na ambulantních a lůžkových částí nukleární medicíny.

Nakládání s radioaktivním odpadem je řešeno zákonem č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a o změně a zejména jeho prováděcí vyhláškou č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb., která je v oblasti nukleární medicíny považována za legislativní základní kámen.

Bylo zjištěno, že ať jsou oddělení nukleární medicíny na území ČR rozdílné svou strukturou, či spektrem používaných radionuklidů nebo prováděných diagnostických a terapeutických výkonů, vždy budou vycházet právě z vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Ne všechna oddělení nukleární medicíny mají povoleno používat stejné radiofarmaka a v nich obsažené radionuklidy, vykonávat stejná diagnostická vyšetření či terapie. Proto je nutné, aby každé takové oddělení mělo zpracováno svoji odpovídající dokumentaci. Z této dokumentace vychází i nakládání s radioaktivním odpadem, vzniklým na konkrétním oddělení nukleární medicíny. Konkrétně se jedná o dokumenty: Program zabezpečování jakosti a Program monitorování. Program zabezpečování jakosti stanovuje, jakým způsobem se bude s radioaktivními odpady nakládat. Program monitorování řeší již nakládání s radioaktivním odpadem na základě konkrétních hodnot (aktivita, dávkový ekvivalent, poločas rozpadu).

Po návštěvě oddělení nukleární medicíny v nemocnici České Budějovice, Uherské Hradiště a oddělení nukleární medicíny a PET centra Masarykova onkologického ústavu v Brně, bylo zjištěno, že radioaktivní odpad se dělí dle svého skupenství, obsahu biologických částic a fyzikálních aspektů (poločas rozpadu, druh emitovaného záření).

Toto dělení probíhá bez ohledu na to, zdali radioaktivní odpad vzniklý na oddělení nukleární medicíny pochází z části ambulantní nebo lůžkové.

Proces likvidace radioaktivních odpadů, ať už kapalných, pevných nebo plynných, má společný cíl, kterým je pokles aktivity těchto odpadů na takovou úroveň, kdy je bude možné zlikvidovat bez větších rizik, tak jako jiné odpady ze zdravotnických zařízení.

## 7 Seznam použitých zdrojů

1. KLENER, Vladislav a kol. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Azin CZ, 2000. ISBN 80-238-3703-6
2. Zákon č. 18/1997 Sb. ze dne 24. ledna 1997, o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění.
3. Vyhláška č. 307/2002 Sb. ze dne 13. června 2002, o radiační ochraně (ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.)
4. IAEA 1993a Technical Reports Series No. 355 Containers for Packaging of Solid and Intermediate Level Radioactive Waste, IAEA, Vienna 1993.
5. IAEA 1993b Technical Reports Series No. 352 Bituminization Processes to Condition Radioactive Waste, IAEA, Vienna 1993.
6. KUPKA, Karel; KUBINYI, Jozef; ŠÁMAL, Martin. *Nukleární medicína*. 1. vydání. Příbram: P3K, 2007. ISBN 978-80-903584-9-2
7. *Činnost společných vyšetřovacích a léčebných složek 2010.: Zdravotnická statistika*. Praha: Ústav zdravotnických informací a statistiky, 2011. ISBN 978-80-7280-949-3
8. Vyhláška 84/2008 sb. ze dne 26. února 2008, o správné lékařské praxi, bližších podmínkách zacházení s léčivy v lékárnách, zdravotnických zařízeních a u dalších provozovatelů a zařízení vydávajících léčivé přípravky.
9. Zákon č. 378/2007 Sb. ze dne 6. prosince 2007, o léčivech a o změnách některých souvisejících zákonů.



10. URBÁNEK, Jan a kol. *Nukleární medicína*. 3. vydání. Jilemnice: Gentiana, 2000. ISBN 80-902133-9-1
11. *Zpracování programu zabezpečování jakosti pro používání zdrojů ionizujícího záření v lékařských aplikacích.: Pracoviště nukleární medicíny*. [online] Praha: Státní úřad jaderné bezpečnosti, 2001. [1. 5. 2012] Dostupné z [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Nukl\\_med.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Nukl_med.pdf)
12. Vyhláška č. 132/2008 Sb. ze dne 4. dubna 2008, o systému jakosti při provádění a zajišťování činností souvisejících s využíváním jaderné energie a radiačních činností a o zabezpečování jakosti vybraných zařízení ohledem na jejich zařazení do bezpečnostních tříd.
13. *Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření (sborník učebních textů)*. Ostrava: Dům techniky Ostrava s.r.o., 2003. ISBN 80-02-01529-0
14. ULLMAN, Vojtěch; ULLMANOVÁ, Ludmila; PUCHÁLKOVÁ, Zdenka. *Radiační ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření v nukleární medicíně*. In: AstroNuklFyzika [online]. Ostrava.[1. 5. 2012] Dostupné z <http://astronuklfyzika.cz/RadOchrana.htm>
15. KOMÁREK, Pavel. Radiofarmaka v nemocniční praxi. *Praktické lékárenství*. Praha: IPVZ, 2006, 5, 231-235.
16. Nemocnice České Budějovice, a.s., oddělení nukleární medicíny
17. Masarykův onkologický ústav Brno, oddělení nukleární medicíny a PET centrum
18. *Program monitorování*. Nemocnice České Budějovice, a.s., oddělení nukleární medicíny, 2003

19. KARÁSEK, Karel. *Program zabezpečování jakosti*. Masarykův onkologický ústav, oddělení nukleární medicíny a PET centrum Brno, 2010
20. KARÁSEK, Karel. *Program monitorování*. Masarykův onkologický ústav, oddělení nukleární medicíny a PET centrum Brno, 2010

## **8 Klíčová slova**

Radiační ochrana

Institucionální radioaktivní odpad

Charakterizace radioaktivního odpadu

Radiofarmakum

Ambulantní část

Lůžková část

Monitorování

## 9 Přílohy

### Příloha č. 1

#### Uvolňovací úrovně a směrné hodnoty pro radioaktivní kontaminaci materiálů a jejich povrchů

Pro radionuklidy neuvedené v tabulce nebo pro jiné způsoby uvádění radionuklidů do životního prostředí stanoví zprošťovací úrovně v případě potřeby Úřad.

Posuzované místo znečištění	Třída radionuklidu podle tabulky č. 2				
	1	2	3	4	
Materiály, pevné látky a předměty vynášené z pracovišť se zdroji ionizujícího záření nebo jinak uváděné do životního prostředí	Uvolňovací úrovně hmotnostní aktivity [kBq/kg]				
	0,3	3	30	300	
Povrchy materiálů a předmětů vynášených z pracovišť se zdroji ionizujícího záření nebo jinak uváděných do životního prostředí	Uvolňovací úrovně plošné aktivity [kBq/m <sup>2</sup> ]				
	3	30	300	3000	
Povrchy podlah, stěn, stropů, nábytku, zařízení, ap. v kontrolovaném pásmu pracovišť s otevřenými zářiči, Vnější povrchy ochranného a provozního zařízení, osobních ochranných prostředků	Směrné hodnoty povrchové aktivity pro radioaktivní kontaminaci [kBq/m <sup>2</sup> ]				
	30	300	3000	3.10 <sup>4</sup>	
Povrch těla a vnitřní povrchy osobních ochranných prostředků Pracovní povrchy mimo kontrolované pásmo	3	30	300	3000	

Zdroj: Příloha č. 2 k vyhlášce č. 307/2002 Sb.

## Příloha č. 2

### Radioaktivní odpady

499/2005

Na oddělení nukleární medicíny vznikají při provozu radioaktivní odpady, se kterými je třeba nakládat v souladu s vyhláškou č. 307/2002 Sb.

Dále se předpokládá uvolňování krátkodobých radionuklidů do životního prostředí cestou odpadních vod z WC, především J-131, v množství, které nepřekročí uvolňovací úroveň dané vyhláškou 307/2002 Sb.

**Rozdělení odpadu -** plynný  
pevný  
kapalný

#### Manipulace s odpady

Manipulace s radioaktivními odpady spočívá v jejich sběru, třídění a uložení do vymíracího prostoru radioaktivního odpadu. Sklad radioaktivního odpadu je součástí kontrolovaného pásma (viz příloha „Kontrolované pásmo“). Zde je odpad skladován po dobu, než se jeho aktivita sníží pod uvolňovací úroveň, aby bylo možné považovat odpad za neaktivní - rozhodne dohlízející osoba.

**Plynné odpady -** znečištění ovzduší může vzniknout nepředvídatelnou událostí při ventilačním vyšetření plic.

**Pevné odpady -** infekční  
neinfekční  
- Tc generátory, tyto jsou na základě smlouvy s dodavatelem odváženy při dodávce nového generátoru (viz SOP č. 801/99/RF)

Infekční	- půlroční	- zkumavky $^{125}\text{I}$ (RIA)
	- třídní	- jehly (MEDIBOX) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ - stříkačky $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (nádoby k tomu určené)
	- tříměsíční	- jehly (MEDIBOX), stříkačky, všechny ostatní používané radioizotopy
Neinfekční	- třídní	- lahvičky $^{99\text{m}}\text{Tc}$
	- půlroční	- lahvičky $^{125}\text{I}$ , $^{131}\text{I}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{201}\text{Tl}$ , $^{111\text{m}}\text{In}$ , $^{153}\text{Sm}$ , $^{186}\text{Re}$ , $^{90}\text{Y}$ , $^{169}\text{Yb}$
	- dvouletý	- $^{51}\text{Cr}$ , $^{32}\text{P}$ , $^{58}\text{Co}$ , $^{89}\text{Sr}$
	- dlouhodobý	- $^{57}\text{Co}$

**Kapalné odpady** – jedná se o odpadní vody u patientského WC lůžkové části oddělení (viz Monitorovací plán).

*Zdroj: Příloha č. 2 Programu monitorování. Nemocnice České Budějovice, a.s., oddělení nukleární medicíny*

### Příloha č. 3

#### Monitorování odpadů znečištění radionuklidy

**Tuhé odpady** – jsou ukládány ve vymírací místnosti ONM. Zde se kontroluje, zda při likvidaci odpadu jeho hmotnostní aktivita nepřekračuje uvolňovací úroveň dle tab.1 přílohy 1 vyhlášky č.307/2002 Sb. (příloha č.3 - Radioaktivní odpady).

<sup>499</sup>  
**Kapalné odpady** – jedná se o odpadní vody u patientského WC lůžkové části oddělení. V současné době se odpadní vody vedou do nemocniční čističky a pak do městské kanalizace.

zajištění: pro kanalizační výpusť nemocniční čističky odpadních vod do městské kanalizace  
způsob: odběr 250 ml odpadní vody  
umístění: vzorek odpadní vody se měří ve velkoobjemovém studnovém krystalu  
analyzátor je kalibrován jednou ročně jodovým etalonem  
provádí: dohlízející osoba, radiologický asistent  
frekvence: periodicky – týdně  
předávání: výsledků: deník měření odpadních vod

#### Referenční úroveň pro odpadní vody

	vyšetřovací
	455 Bq/l
činnost	Záznam na ONM + zjistit příčinu , prověřit dodržování SOP

#### Monitorování okolí

Vzhledem k charakteru prováděné činnosti a množství radionuklidů na ONM nepředpokládá se únik závažného množství radionuklidů do okolí.

*Zdroj: Programu monitorování. Nemocnice České Budějovice, a.s., oddělení nukleární medicíny*