



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

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

Název bakalářské práce

Výroba a příprava radiofarmak z pohledu radiační ochrany

Studijní program: **Radiologická asistence**

Autor: Mgr. Kateřina Hyková, Ph.D.

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

České Budějovice 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem *Výroba a příprava radiofarmak z pohledu radiační ochrany* jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

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

V Českých Budějovicích dne 25.4.2024

.....

podpis

Poděkování

Ráda bych poděkovala paní Ing. Evě Zemanové, Ph.D., MBA, za cenné rady, vstřícnost a pomoc při konzultacích. Mé poděkování patří též zaměstnancům oddělení nukleární medicíny v Nemocnici České Budějovice a.s., kteří se mnou spolupracovali při získávání údajů pro praktickou část práce.

Výroba a příprava radiofarmak z pohledu radiační ochrany

Abstrakt

Bakalářská práce shrnuje poznatky týkající se celého procesu zajištění radiofarmak pro účely pozitron emisní tomografie od výroby radionuklidů, přes jejich transport na oddělení nukleární medicíny, přípravy radiofarmak až k jejich podání pacientovi, a to zejména z pohledu radiační ochrany pracovníků. Popisuje, jaké jsou zásady radiační ochrany v oblasti nukleární medicíny z hlediska platné legislativy a jak vypadá jejich aplikace v praxi.

V bakalářské práci byly stanoveny cíle shrnout poznatky týkající se celého procesu výroby a přípravy radiofarmak pro účely PET a zaměřit se na problematiku ozáření rukou radiačních pracovníků při přípravě a aplikaci radiofarmak pro účely PET.

Pro zpracování bakalářské práce byla zvolena kvantitativní metoda spojená s metodou kvalitativní. Pro kvalitativní část byla provedena analýzy dostupné literatury a právních předpisů týkající se radiační ochrany v oblasti nukleární medicíny. Pro kvantitativní část byla sekundárně analyzována data z dozimetrických měření na oddělení nukleární medicíny Nemocnice České Budějovice a.s. (dále jen „ONM ČB“), dále data z dostupných publikovaných výzkumů v oblasti ozáření rukou pracovníků. Současně bylo na ONM ČB provedeno vlastní měření radiační zátěže rukou pracovníků, které je v této práci analyzováno. Cílem bylo vytvoření systematického přehledu, který by reflektoval zvolené cíle práce. Proces tvorby tohoto přehledu zahrnoval formulaci problému – tedy výzkumné otázky. Výzkumná otázka byla formulovaná jako:

Jaká je úroveň radiační ochrany při přípravě a aplikaci PET radiofarmak na ONM České Budějovice?

Dalším krokem byl sběr a analýza dat, včetně sběru a analýzy dostupné literatury, jejich interpretace a prezentace výsledků. V závěru práce je konstatováno, že hodnoty ekvivalentních dávek na ruce jsou na ONM ČB hluboko pod dávkovými limity na ruce, a není překračována ani dávková optimalizační mez a vyšetřovací monitorovací úroveň stanovená v Programu monitorování kladně posouzeném Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (dále jen „SÚJB“). Na základě získaných hodnot a porovnání s těmito úrovněmi lze konstatovat, že radiační ochrana rukou je na ONM při přípravě a aplikaci PET radiofarmak optimalizovaná.

Bakalářská práce byla koncipována jako edukační, může sloužit jako studijní materiál pro studenty oboru radiologická asistence, výsledky vlastního měření mohou být využity i ONM ČB.

Klíčová slova

Radiofarmaka; pozitron emisní tomografie; nukleární medicína; radiační ochrana; efektivní dávka; fluorodeoxyglukóza; ozáření rukou; dozimetrie; dávkové optimalizační meze; monitorovací úrovně

Production and preparation of radiopharmaceuticals from the point of view of radiation protection

Abstract

The bachelor's thesis summarizes knowledge regarding the entire process of providing radiopharmaceuticals for the purposes of positron emission tomography, from the production of radionuclides, through their transport to the nuclear medicine department, preparation of radiopharmaceuticals and their administration to the patient, especially from the point of view of radiation protection of workers. It describes what the principles of radiation protection in the field of nuclear medicine are in terms of the applicable legislation and how their application looks like in practice.

The following work objectives were set:

1. Summarize knowledge regarding the entire process of production and preparation of radiopharmaceuticals for PET purposes.
2. To focus on the issue of irradiation of the hands of radiation workers during the preparation and application of radiopharmaceuticals for PET purposes.

Quantitative methodology combined with qualitative methodology was chosen for the preparation of the bachelor's thesis. For the qualitative part of the methodology, analyzes of available literature and legal regulations regarding radiation protection in the field of nuclear medicine were chosen. For the quantitative part of the methodology, data from dosimetric measurements at the nuclear medicine department of the České Budějovice Hospital a.s. were secondary analyzed. (hereinafter only ONM ČB), and data from available research in the field of exposure to workers' hands. At the same time, an own measurement of the radiation exposure of workers' hands was carried out at ONM ČB, which is analyzed in this work. The goal was to create a systematic overview that would reflect the chosen goals of the work. The process of creating this overview included the formulation of the problem - that is, the research question. The research question was formulated as:

What is the level of radiation protection during the preparation and application of PET radiopharmaceuticals at ONM České Budějovice?

The next step was data collection and analysis, including collection and analysis of available literature, their interpretation and presentation of results. At the conclusion of the work, it is stated that the values of equivalent doses to the hands are well below the dose limits for the hands at ONM ČB, and the dose optimization limit and investigative monitoring level set in the Monitoring Program positively assessed by the SÚJB are not exceeded either. Based on the obtained values and comparison with these levels, it can be concluded that the radiation protection of the hands is optimized at ONM during the preparation and application of PET radiopharmaceuticals.

The bachelor's thesis was conceived as educational, it can serve as study material for students in the field of radiological assistance, the results of own measurements can also be used by ONM ČB.

Keywords:

Radiopharmaceuticals; positron emission tomography; nuclear medicine; radiation protection; effective dose; fluorodeoxyglucose; hand irradiation; dosimetry; dose optimization limits; monitoring levels

Obsah

Obsah	7
Úvod	9
1 Princip zobrazení PET/CT	10
2 Radiofarmaka	11
2.1 Fyzikální vlastnosti radionuklidů.....	11
2.2 Výroba radionuklidů	12
2.2.1 Výroba PET radionuklidů v cyklotronu.....	13
2.2.2 Výroba PET radionuklidů v radionuklidovém generátoru	13
2.3 Výroba a distribuce radionuklidů v ČR	15
2.3.1 Výroba radiofarmak pro PET	15
2.3.2 Specifické požadavky na transport radiofarmak.....	16
2.3.3 Příprava radiofarmak pro pacienta a skladování.....	17
2.3.4 Manuální a automatizovaná příprava radiofarmak jako nástroj optimalizace radiační ochrany personálu	21
2.3.5 Aplikace pozitronového radiofarmaka pacientovi	24
3 Radiační ochrana v nukleární medicíně.....	26
3.1 Účinky ionizujícího záření	26
3.2 Veličiny a jednotky ochrany před ionizačním zářením.....	28
3.2.1 Principy radiační ochrany	29
3.2.2 Kategorizace radiačních pracovníků.....	32
3.3 Monitorování.....	32
3.3.1 Osobní monitorování	32
3.3.2 Monitorování pracoviště	34
3.3.3 Monitorování výpustí.....	35
3.4 Soustavný dohled nad radiační ochranou.....	35
3.5 Postupy pro bezpečný provoz na pracovišti nukleární medicíny	36
4 Radiační zátěž rukou pracovníků zajišťující přípravu a aplikaci pozitronových radiofarmak	38
4.1 Výstupy projektu CONRAD Evropské skupiny pro radiační dozimetrii.....	39
4.2 Polská studie vystavení rukou ionizujícímu záření pracovníků nukleární medicíny	39

4.3	Mezinárodní studie z roku 2008 o využití končetinových dozimetrů v některých evropských zemích při lékařské aplikaci.....	40
4.4	Projekt ORAMED – Optimization of Radiation Protection of Medical Staff	40
4.5	Studie na oddělení nukleární medicíny univerzitní nemocnice v Bordeaux a nemocnice Côte Basque-Bayonne.....	42
4.6	Studie lokálního ozáření kůže rukou pracovníků na oddělení nukleární medicíny Fakultní nemocnice Hradec Králové.....	43
4.7	Průzkum EANM a EURADOS expozice končetin pracovníků nukleární medicíny	43
5	Praktická část.....	45
5.1	Cíle práce a hypotéza	45
5.2	Metodika práce	45
5.3	Sběr dat.....	46
5.4	Zpracování dat.....	47
5.5	Výsledky	49
6	Diskuse.....	59
7	Závěr.....	63
	Seznam literatury.....	65
	Seznam použitých zkratk:	69
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek	72
	Seznam grafů.....	73

Úvod

Nukleární medicína jako významný obor v moderní medicíně umožňuje specifické terapeutické postupy a také jedinečné diagnostické zobrazovací metody díky aplikaci otevřených radionuklidových zdrojů. Ty jsou do těla pacienta vpraveny v podobě radiofarmaka (dále jen „RF“). RF řadíme do kategorie léčivých přípravků, jsou složena jednak ze specifického radionuklidu s vhodnými fyzikálními vlastnostmi pro daný léčebný účinek, popř. požadovaný děj a dále z biologicky účinné látky (nosiče), na který se daný radionuklid naváže a je díky němu vychytáván v daném orgánu či tkáni na základě fyziologických zákonitostí.

Současná nukleární medicína využívá několik zobrazovacích metod, přičemž mezi ty nejnovější spadá pozitron emisní tomografie (dále jen „PET“). Tato neinvazivní metoda patří v kombinaci s výpočetní tomografií (dále jen „CT“) ke stěžejním zobrazovacím metodám nejen onkologické diagnostiky.

Nejčastěji užívaným RF v PET/CT diagnostice je po celém světě fluorodeoxyglukóza (dále jen „FDG“) značená radioizotopem ^{18}F , ale nabídka vhodných RF pro potřeby PET stále narůstá. Proces vedoucí k využití RF obsahuje několik kroků. Je to jednak produkce požadovaného radionuklidu, příprava a značení biologicky účinné látky, tvorba požadované lékové formy, kontrola kvality připraveného RF, měření aktivity před aplikací pacientovi a vlastní aplikace.

Při práci s RF je nezbytné si uvědomit, že radionuklidy v nich obsažené emitují pronikavé fotonové záření, nebo elektronové či pozitronové záření (tzv. beta záření), resp. alfa záření s nízkou pronikavostí. Radiační ochrana je zaměřena na ochranu radiačních pracovníků před vnějším ozářením, důraz je kladen na ochranu zejména kůže a oční čočky, popř. zamezení vnitřní kontaminaci radiačních pracovníků v důsledku nehodové situace. Důležitým procesem na každém oddělení nukleární medicíny je proto optimalizace radiační ochrany.

Publikované zahraniční výzkumy (např. ORAMED, 2013) ukazují, že při práci s PET RF může dojít k překročení limitů ozáření kůže rukou. Motivací ke vzniku této bakalářské práce byla potřeba zodpovězení otázky, zda i na ONM ČB může dojít, resp. dochází při manipulacích s PET RF k překročení limitu ekvivalentní dávky H_T na kůži rukou pracovníků, resp. zda je radiační ochrana v tomto směru dostatečně optimalizovaná.

Monitorování radiační zátěže personálu se na ONM ČB provádí bez rozlišení, zda daná radiační zátěž pochází z činnosti na úseku lůžkové části, SPECT, či na úseku PET. Bakalářská práce se tak zaměřuje pouze na oblast práce s PET RF a porovnává naměřené výsledky s dozimetrií celého oddělení.

1 Princip zobrazení PET/CT

Před samotným PET/CT vyšetřením pacientovi podáváme radionuklid vázaný na nosič, který se v jeho těle rozvede krevním řečištěm. Tuto distribuci zajišťuje nosič, jehož úkolem je přepravit radionuklid do specifického orgánu nebo tkáně. Díky této látce se radionuklid hromadí v cílové oblasti, kterou mohou tvořit biomarkery specifických procesů, enzymy nebo mozkové receptory. Vybraný nosič s vhodnou farmakokinetikou, může být nosič s malými molekulami, peptidy, proteiny nebo protilátky, podle vyšetřovacího plánu.

Po určité době dojde k akumulaci RF v cílové tkáni, a pak může začít samotné snímání emitovaného záření pomocí PET. Jádra atomů aplikovaných radionuklidů, která se používají pro metodu PET/CT vyšetření, podléhají β^+ přeměně, což znamená uvolnění pozitronů (e^+). Tyto pozitrony interagují s tkáněmi, což vede k tvorbě anihilačního záření. Fotonové páry, vzniklé při anihilaci e^+ a e^- , jsou zaznamenány soustavou detektorů. Systém PET pak rozpoznává a zaznamenává koincidence, což jsou situace, kdy jsou dva fotony anihilace zaznamenány současně na protilehlých detektorech. Tyto tzv. koincidenční události zaznamenané detektory po zpracování dat lokalizují místo, kde k anihilaci pozitronu a elektronu došlo. Pomocí matematické rekonstrukce na základě získaných údajů o velkém množství dvojic anihilačních fotonů vzniká trojrozměrný obraz distribuce radiofarmaka.

PET/CT je hybridní systém, který kombinuje obrazy z PET a CT. Tímto způsobem získáváme informace nejen o funkčních parametrech, ale také o anatomických strukturách. Po přípravě pacienta, včetně dietních a režimových opatření a podání RF či kontrastní látky, leží pacient na posuvném lůžku a postupně vjíždí do gantry CT. Vytvořený topogram, určuje oblast pro další vyšetření. Následně se pořizují CT řezy, a poté se provádí PET snímání. Nakonec se oba obrazy sfúzíjí dohromady, takže získáváme zobrazení struktur s lokalizací kumulace radiofarmaka.

2 Radiofarmaka

Tato kapitola popisuje fyzikální vlastnosti radionuklidů, výrobu RF, jejich distribuci a transport, přípravu RF na jednotlivých pracovištích a vlastní aplikaci pacientovi v souvislosti s radiační ochranou.

2.1 Fyzikální vlastnosti radionuklidů

Radiofarmaka (z latinského radius – paprsek a řeckého pharmakon – léčivo) nebo také radiofarmaceutické přípravky jsou specifické léčivé přípravky určené pro použití v oboru nukleární medicíny, a to zejména pro určení diagnózy zpravidla závažných onemocnění (Kováčik et al., 2021). Radiofarmaceutické přípravky vždy obsahují jeden nebo více včleněných radioaktivních izotopů určitého prvku, tzv. radionuklidů s vhodnými fyzikálními vlastnostmi pro zobrazování požadovaného děje nebo požadovaný léčebný účinek. Radionuklid je označení pro nestabilní kombinaci definovaného počtu protonů a neutronů v jádře, která má tendenci se samovolně přeměnit (rozpadat) na další nuklidy. Tento exponenciální rozpad je charakterizován poločasem přeměny vyjadřujícím dobu, za kterou aktivita radionuklidu klesne na polovinu počáteční hodnoty. Tato přeměna na jiné radionuklidy je doprovázena uvolněným zářením, které může být v podobě kladně nabitých iontů helia (záření α), kladně nabitých pozitronů (záření β^+), záporně nabitých elektronů – negatronů (záření β^-) nebo elektromagnetického záření (fotonů), které je výsledkem deexcitace vzbuzených stavů dceřiného jádra radionuklidu (záření γ) (Kováčik et al., 2021)

U RF hrají důležitou roli fyzikální vlastnosti příslušného radionuklidu, především jeho aktivita, fyzikální poločas přeměny i biologický poločas, druh emitovaných částic a jejich energie.

Aktivita označuje počet přeměn za sekundu a je udávána v jednotkách Bq (v kontextu nukleární medicíny v jednotkách kBq, MBq, GBq). Pro dosažení optimálního výsledku vyšetření volíme vhodnou aktivitu, vycházíme přitom ze souhrnu údajů přípravku příslušného RF a Národních radiologických standardů uvedených ve Věstníku MZ ČR. Pro dosažení detekce sledovaného procesu v organismu musí být poločas přeměny dostatečně dlouhý, ale zároveň natolik krátký, aby vyšetřovaný pacient nebyl vystaven

zbytečně dlouhému ozáření. Hodnota poločasu přeměny nejčastěji užívaného pozitronového zdroje ^{18}F je 110 minut a pro většinu sledovaných dějů je tak dostatečně dlouhá. Zároveň zde hraje roli i biologický poločas, který nám udává dobu, za kterou se z organismu vyloučí polovina aplikovaného množství radionuklidu. Biologický poločas ^{18}F se rovná fyzikálnímu poločasu ^{18}F , který je přibližně 110 minut. Veškerá radioaktivita ^{18}F vázaného na FDG (přičemž 20 % je vyloučeno močí a 80 % zůstává v těle pacienta) mizí s fyzikálním poločasem přeměny 110 minut (tedy méně než 2 hodiny). Takže po 24 hodinách (tj. po 13 fyzikálních poločasech přeměny) bude aktivita ^{18}F $2^{-13} = 1/8192$ původní hodnoty. V praxi se pacientům naaplikovaným ^{18}F -FDG, nedoporučuje nejméně 12 hodin (tj. 6,5 poločasů přeměny, kterému odpovídá 90ti násobný pokles aktivity) pohybovat v blízkosti osob se zvýšenou citlivostí na radioaktivitu, jako jsou děti a těhotné ženy.

Energie záření musí být vhodně zvolena tak, aby fotony nebyly pohlceny ve tkáních vyšetřovaného pacienta a mohly být detekovány detekčním zařízením. Zároveň platí, že příliš vysoká energie snižuje účinnost detekce. Energie anihilačních fotonů, které jsou vyvolané pozitrony emitovanými fluorem ^{18}F , je 2×511 keV. Taková energie je pro SPECT kameru příliš vysoká a lze ji tak detekovat jen PET skenery. Současně musíme u pozitronových zdrojů zvažovat také energii vyzářeného pozitronu, protože pokud je energie příliš vysoká, může dojít k prodloužení dráhy letu pozitronu, než dojde k jeho anihilaci a tvorbě koincidenčních fotonů a tím se může zhoršit rozlišení obrazu (^{18}F má energii pozitronů 0,63 MeV např. v porovnání s ^{68}Ga , jehož energie pozitronů 1,9 MeV) (Kubinyi et al., 2018).

2.2 Výroba radionuklidů

Radionuklidy jsou nuklidy s nestabilním jádrem, u nichž se přebytečná energie uvolňuje jako subatomární částice nebo elektromagnetické vlnění – záření gama. Uměle vyrobené radionuklidy se získávají pomocí jaderné reakce, při které se mění stavba atomového jádra a vzniká jádro jiné – radioaktivní. Pro medicínské účely se užívají pouze uměle vytvořené radionuklidy, které jsou získávány v jaderných reaktorech nebo urychlovačích, tj. cyklotronech nebo se izolují jako tzv. dceřiné izotopy v radionuklidových generátorech viz. Tab.č. 1. (Kraft et al., 2012).

Radionuklidy s krátkým poločasem přeměny používané pro potřeby PET se vyrábějí v lékařských cyklotronech - tzv. vysokofrekvenčních urychlovačích těžkých nabitých částic (Komárek et al., 2009). S ohledem na skutečnost, že potřeba množství radionuklidů v nukleární medicíně neustále stoupá, a že v rámci PET jsou využívány radionuklidy s relativně krátkým poločasem přeměny, je tento problém řešen elucí potřebného radionuklidu přímo na oddělení nukleární medicíny z vhodného radionuklidového generátoru (Kubinyi et al., 2018).

2.2.1 Výroba PET radionuklidů v cyklotronu

Cyklotron je kruhový urychlovač, kde pohyb nabitých částic probíhá po zakřivené dráze – spirále. Cyklotron je složen ze dvou polokruhových komor tzv. duantů, které mají tvar D, silného elektromagnetu a zdroje střídavého napětí o vysoké frekvenci. Duanty, k nimž je přivedeno střídavé elektrické napětí, jsou umístěny v silném magnetickém poli. Nabitá částice, která se dostane do prostoru elektrického pole mezi duanty je urychlena. Tak, jak přechází z jednoho duantu do druhého, se její rychlost zvyšuje a současně se zvětšuje poloměr její pohybové křivky. Tento postup se opakuje periodicky (Reichl et al., 2016). Díky změně polarity mezi duanty se částice urychlují, a to až do chvíle, kdy trajektorie částice dosáhne poloměru cyklotronu. V této chvíli opustí částice, která má velkou kinetickou energii, cyklotron a je odchýlena elektrickým polem směrem k terčíku, kde dochází k jaderné reakci (Květina, 1981). Takto vznikají např. pozitronové zářiče ^{18}F , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N a to v závislosti na materiálu ozařovaného terčíku (Koranda et al., 2014).

2.2.2 Výroba PET radionuklidů v radionuklidovém generátoru

Radionuklidový generátor je zařízení, které je určeno k opakovanému získávání krátkodobých radionuklidů. Systém obsahuje vázaný mateřský radionuklid, ze kterého vzniká radionuklid dceřiný, který se odděluje elucí nebo jiným způsobem. Tento dceřiný radionuklid se následně používá pro přípravu RF (Kubinyi et al., 2018). Mateřský radionuklid je předem připraven v urychlovači a má delší poločas přeměny. Ten je fixován v koloně, která je umístěna ve stínící nádobě. Mateřský radionuklid podléhá radioaktivní přeměně a výsledkem této přeměny je nuklid, který má vhodné vlastnosti pro medicínské použití. Dceřiný radionuklid se separuje ve chvíli tzv. radioaktivní

rovnováhy. Radioaktivní přeměně podléhají jak mateřský, tak dceřiný radionuklid, a zatímco v počátku přírůstek dceřiného produktu převažuje nad jeho vlastní přeměnou, dochází postupně k rovnováze mezi oběma procesy. Ve chvíli, kdy dojde k této rovnováze, je vhodná chvíle pro separaci dceřiného radionuklidu. K výrobě pozitronových zářičů slouží galium-germaniové a stroncium-rubidiové generátory (^{68}Ge s poločasem přeměny 271 dnů a dceřiným produktem ^{68}Ga s poločasem přeměny 68 minut, může být eluován z generátoru každé 3-4 hodiny, ale radioaktivní rovnováha nastává po sedmi hodinách). S pomocí chelátorů (látek schopných vázat kovové ionty) se galium ^{68}Ga používá k výrobě RF – zejména ke značení peptidů, jako např. ^{68}Ga DOTATOC pro diagnostiku neuroendokrinních tumorů. Rubidium ^{82}Rb , které vzniká při přeměně stroncia ^{82}Sr , je radionuklid s velmi krátkým poločasem přeměny (1,3 min) a využívá se při zobrazení srdeční perfuze (Gillings, 2013).

Tabulka 1 Běžně používané PET radionuklidy

Radionuklid	$T_{1/2}$	β^+ (%)	Energie pozitronů (max. keV)	Energie gama (keV)
<i>Vyráběné v cyklotronu</i>				
^{15}O	2,05 min	99,9	1720	511
^{13}N	9,97 min	100	1190	511
^{11}C	20,4 min	99,8	960	511
^{18}F	109,7 min	97	635	511
^{64}Cu	12,7 hod	17,4	653	511
^{124}I	4,18 dne	23	2138	511, 603, 723, 1691
<i>Vyráběné v generátoru</i>				
^{82}Rb	1,27 min	95,5	3150	511
^{68}Ga	67,7 min	90	1900	511, 1077

Zdroj: Gillings, 2013

2.3 Výroba a distribuce radionuklidů v ČR

Kapitola popisuje proces přepravy hromadně vyráběných RF, resp. radionuklidů pro přípravu radiofarmak, požadavky pro skladování takových látek, porovnává výhody manuální a automatizované přípravy RF a postup aplikace RF pacientovi.

2.3.1 Výroba radiofarmak pro PET

RF je buď na oddělení nukleární medicíny dopraveno od výrobce jako hromadně vyráběné RF, nebo se připravuje v laboratoři pro přípravu RF navázáním vhodného radionuklidu na biologicky aktivní látku (Kubinyi et al., 2018). U přípravků pro PET se jedná obvykle o hromadně vyráběná RF, tedy hotové kompletní radioaktivní přípravky, které se na oddělení nukleární medicíny jen rozdělí na dávky pro jednotlivé pacienty (Šabata, 2019).

Seznam firem, které splnily v ČR podmínky a získaly oprávnění pro výrobu a distribuci, popř. vývoz a dovoz uzavřených nebo otevřených radionuklidových zdrojů ionizujícího záření určených pro potřeby zdravotnictví, se dají nalézt na stránkách SÚJB. Výrobu a distribuci pozitronových radionuklidových zdrojů ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O zajišťuje majoritně Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s.

V areálu ÚJV Řež funguje od roku 2012 nejmodernější PET Centrum v ČR. Je zacílené na výzkum a vývoj RF. Srdce PET centra tvoří cyklotron (kruhový urychlovač) umístěný v betonové kobce s dvoumetrovou tloušťkou zdí. Nejběžněji vyráběným RF je fluorodeoxyglukóza (FDG) značená radioizotopem ^{18}F . Radionuklid ^{18}F vznikne ozařováním vody obohacené izotopem kyslíku ^{18}O . Z cyklotronu se chráněnými trasami vede do polo horkých komor. Tam dochází k syntéze léčivého přípravku: radioaktivní fluor se sloučí s prekurzorem glukózy. V dispenzačním boxu pak dojde na ředění výsledné tekutiny podle požadavků zákazníka (zdravotnického zařízení) a na sterilizaci přípravku. Tyto činnosti probíhají v tzv. čistých prostorách s velmi přísným režimem. Od okolí jsou chráněny přetlakem, aby se do nich nedostaly nečistoty. Vzorky z vyrobeného léčiva ještě míří do laboratoře kontroly kvality. Tam se provádí předepsaná výstupní fyzikální, chemická i mikrobiologická analýza. Následně přípravek putuje do nemocnic.

Po ukončení analytických kontrol a před aplikací pacientovi se do nemocnic zasílá průvodní list otevřeného radionuklidového zdroje, potvrzující splnění všech požadavků

na kvalitu a aktivitu přípravku. Poločas rozpadu FDG je 110 minut. Celý proces je tedy neustálý závod s časem. Do nemocnic se dostává látka, jejíž aktivita zatím klesla na zhruba pětinu od ukončení ozařování na cyklotronu. Dvacetitonový cyklotron a následný proces chemické syntézy v jedné výrobní šarži vyprodukuje zhruba 20 ml roztoku. Do nemocnic se dostane 5–10 ml FDG, z nichž lze naředit až 10 dávek (Horáková, 2014).

2.3.2 Specifické požadavky na transport radiofarmak

Přeprava radioaktivních látek, kterými jsou i radionuklidy nebo RF, probíhá po veřejných komunikacích, v blízkosti sídel obyvatel, a to ne v zanedbatelné frekvenci (ročně v řádu tisíců přeprav radioaktivních látek) (Kubinyi et al., 2018). Bezpečnost přepravy je tak velmi důležitou otázkou, která je pod drobnohledem nejen SÚJB, ale podléhá mezinárodním doporučením a národní legislativě. Jedním z evropských předpisů je Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road) známá jako ADR, která specifikuje požadavky na transport radioaktivních látek (Štěpán, 2016). V naší vnitrostátní úpravě je tato otázka upravena v obecné rovině jednak atomovým zákonem, v podrobnostech pak SÚJB vydal v dubnu 2011 bezpečnostní návod BN-JB-1.13 Přeprava radioaktivních látek. Směrnice ADR blíže určuje: typy obalů použitých pro radioaktivní materiály; maximální aktivitu v obalu; maximální stupeň radioaktivní kontaminace na obalu; označení, které má být zobrazeno na obalu; dokumentaci, která musí doprovázet zásilku radioaktivního materiálu; tabulky, které mají být umístěny na vozidle; povinnosti řidiče v případě nehody.

Bezpečnost přepravy tak v případě přepravy radionuklidů obsahuje jednak otázky radiační ochrany – schopnost obalového souboru a přepravní obsluhy zabránit nedovolenému úniku ionizujícího záření a nepřipustnému ozáření osob. V neposlední řadě je důležitá připravenost k odezvě na radiační mimořádnou událost (dále jen „RMU“) tj. - schopnost přepravní obsluhy rozpoznat vznik RMU, zvládnout situaci související s jejím vznikem s cílem znovunabytí kontroly nad přepravou a zabránění následkům RMU nebo jejich zmírnění (Štěpán, 2016).

Přeprava radioaktivních látek stanovených prováděcím předpisem (vyhláška č. 379/2016 Sb.) musí být povolena SÚJB podle § 9 odstavec 4 atomového zákona. Obalové soubory pro přepravu radioaktivních materiálů musí být testovány a, jsou-li

určeny k přepravě radioaktivních látek stanovených prováděcím předpisem, musí být typově schváleny SÚJB podle § 137 odst. 1 písm. a) a odst. 5 atomového zákona. Pro každou přepravu, která podléhá povolení, musí být zpracován Havarijní řád a schválen SÚJB. Znalost přepravních instrukcí a havarijního řádu u osob realizujících přepravu radioaktivních materiálů je předmětem pravidelné kontroly prováděné inspektory jaderné bezpečnosti v průběhu přepravy.

Pokud se jedná o přepravu automobilem, z jeho označení musí být jednoznačně zřejmé, že se jedná o radioaktivní zásilku. Všechny přepravované radiofarmaceutické zásilky musí být řádně označeny příslušnou nálepkou podle ADR, kde je vyznačen radionuklid, jeho aktivita a také tzv. transportní index.

Obrázek 1 Označení vozidla na převoz RF



Zdroj: Vlastní fotografie

2.3.3 Příprava RF pro pacienta a skladování

Příprava RF pro jednotlivé pacienty probíhá nejčastěji na odděleních nukleární medicíny nebo ve specializovaném prostoru lékárny, pokud splňuje věcné a technické požadavky pro přípravu RF (Kováčik et al., 2021). Takovéto radiační činnosti musí být povoleny SÚJB, který uděluje pracovišti povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření. Pracoviště oprávněné k přípravě RF musí splňovat požadavky atomového zákona na vybavení pracoviště a zajištění radiační ochrany. Pracoviště i radiační pracovníci musí

být kategorizováni, monitorováni, a zajištěno musí být skladování a likvidace radioaktivního a kontaminovaného odpadu, resp. mnoho dalších povinností vyplývajících z atomového zákona. Dále musí pracoviště dodržovat pokyny Státního ústavu pro kontrolu léčiv (dále jen „SÚKL“) a řídit se požadavky zákona o léčivech a platného Českého lékopisu. Na oddělení nukleární medicíny připravují RF zpravidla farmaceuti nebo také vysokoškolské odborníci se specializací v přípravě radiofarmak. Operace bezprostředně spjaté s přípravou radiofarmaka vyžadují intenzivní trénink přípravy a měly by být optimálně jednoduché a rychlé. Přípravující pracuje v čistých prostorech, jejichž vybavení odpovídá požadavkům na technické a věcné vybavení laboratoří zdravotnických zařízení. Pro přípravu sterilních léčivých přípravků v lékárnách a dalších zdravotnických zařízeních byl vypracován dokument LEK–17 (SUKL, 2016).

Přípravující osoba pracuje v podmínkách aseptické přípravy s využitím laminárních boxů (třída čistoty A). Ty většinou pracují na principu podtlaku vzduchu, tj. vzduch je z boxu odsáván a není recirkulován, na rozdíl od aseptické přípravy neradioaktivních přípravků využívající přetlak v boxech. Osoba, která je odpovědná za přípravu RF, vypočítá dávky pro jednotlivá podání, upraví objemovou aktivitu, a nakonec RF zhotoví a provede kontrolu. Kontrola hotového přípravku je velmi důležitá, jelikož je připraven zcela nový léčebný přípravek.

RF musí splňovat kvalitativní standardy stanovené v Českém lékopisu. Klíčovým faktorem je také kontrola radiochemické čistoty, což znamená kvantitativní posouzení vazby radionuklidu na nosič. Tato kontrola je často prováděna pomocí chromatografických metod. Vedle toho se provádí ověření aseptických postupů a prostředí prostřednictvím mikrobiologického monitoringu, jak je specifikováno v dokumentu LEK–17. V neposlední řadě se odebírají vzorky RF k provedení kontroly sterility léčebného přípravku.

Každý léčebný přípravek má mít signaturu obsahující datum přípravy a aktivitu vztahenou ke konkrétnímu datu a času. Kromě toho je každé připravené RF doplněno o průvodní list, který obsahuje název RF, chemický symbol radionuklidu, celkovou aktivitu k referenčnímu datu, objem v mililitrech, způsob podání a další relevantní informace, obdobné těm, uvedeným na signatuře připravovaných léčivých přípravků.

Je klíčové, aby RF prokázala shodu s předepsanými standardy, zejména co se týče radiochemické čistoty, aseptických postupů a sterility. Kromě toho je nezbytné, aby všechny údaje na signatuře a průvodním listu byly precizní a aktuální, zabezpečující tak bezpečné používání a správnou identifikaci radiofarmak. Tato opatření jsou nezbytná pro zajištění účinnosti a bezpečnosti léčebných postupů, které využívají RF pro diagnostické a terapeutické účely.

Připravená RF jsou skladována v laminárním boxu, což poskytuje sterilní prostředí a zároveň zajišťuje dostatečné stínění proti ionizujícímu záření. Laminární box je navržen tak, aby minimalizoval riziko kontaminace a zabezpečil bezpečné manipulace s radioaktivními látkami. Tato opatření jsou klíčová pro ochranu personálu a prostředí před potenciálními nebezpečími spojenými s ionizujícím zářením.

Obrázek 2 Syntetizační modul KitLab pro přípravu RF značených Ga⁶⁸ v laminárním boxu



Zdroj: Vlastní fotografie

Většina RF je obvykle spotřebována krátce po jejich přípravě, což zohledňuje specifickou dobu použitelnosti každého RF. Doba použitelnosti je pečlivě sledována a dodržována, aby se zajistila maximální účinnost a bezpečnost diagnostických nebo terapeutických procedur. Nespotřebované zbytky RF jsou následně přeneseny do stíněného kontejneru, který slouží k bezpečnému transportu do vymírací místnosti.

Vymírací místnost poskytuje vhodné podmínky pro řízené a bezpečné znehodnocení nespotřebovaných RF. Tato opatření jsou klíčová nejen pro ochranu zdraví zdravotnického personálu, ale také pro minimalizaci rizika kontaminace a zachování bezpečného prostředí pro pacienty a okolí. Celý proces skladování, používání a likvidace RF je pečlivě řízen a monitorován, aby byla zajištěna bezpečnost a kvalita v rámci medicínských postupů využívajících radioaktivní látky (Kubinyi et al., 2018).

Obrázek 3 Materiálová propust RF mezi přípravnou a aplikační místností



Zdroj: Vlastní fotografie

2.3.4 Manuální a automatizovaná příprava radiofarmak jako nástroj optimalizace radiační ochrany personálu

Každodenní příprava RF představuje rutinní manipulaci se zdroji ionizujícího záření, což vyžaduje důkladné dodržování radiační ochrany. Manuální procesy přípravy RF jsou v současné době většinou nahrazovány instrumentálními metodami. Instrumentace a automatizace jsou využívány zejména při práci s vysoce energetickými zdroji, u nichž by manuální zpracování bylo z hlediska radiobiologických účinků obtížné.

Vzhledem k vysoké energii pozitronových zářičů je instrumentace a automatizace považována za vhodný nástroj radiační ochrany při jejich manipulaci. To je zvláště důležité s ohledem na potenciální rizika spojená s těmito vysoce energetickými částicemi. Automatizované procesy nejen minimalizují expozici personálu ionizujícímu záření, ale také eliminují riziko chyb, které by mohly vzniknout při manuální manipulaci.

Každé pracoviště je vybaveno specifickým zařízením podle potřeb a nároků na radiační ochranu. Automatizace přináší nejen efektivitu, ale také zvyšuje bezpečnost a přesnost při manipulaci s RF. S vývojem moderní technologie se stále zdokonalují instrumentální metody, aby lépe odpovídaly aktuálním normám radiační ochrany a minimalizovaly rizika spojená s prací se zdroji ionizujícího záření.

Ve své výzkumné práci popisuje kolektiv autorů z Ústavní lékárny Masarykova onkologického ústavu proces přípravy pozitronových RF manuálně a porovnává tento postup s využitím rozplňovacích zařízení, a tedy postupnému přechodu k automatizované přípravě zavedené v pozdějších letech (Budinský et al, 2020).

Autoři uvádí, že po zavedení PET na brněnském pracovišti Oddělení nukleární medicíny v roce 2003 byla tato RF připravována výhradně manuálně, kdy dávka připravovaného RF byla odebrána ze zásobní lahvičky RF do nestíněné injekční stříkačky. Po provádění orientačního měření aktivity odebraného RF byla injekční stříkačka naředěna fyziologickým roztokem na předem stanovený objem. Následně byla sterilní jehla připojena ke stříkačce, a teprve poté proběhlo přesné měření aktivity připraveného RF. Na závěr byl celý postup zakončen osazením olověného stínícího krytu.

V případě, že došlo k nějaké nepřesnosti během odebrání vzorku, byla aktivita vrácena zpět do zásobní lahvičky, a celý postup byl opakován. Důraz byl kladen nejen na zajištění

přesnosti odebrané aktivity, ale rovněž na pečlivé postupy při manipulaci s RF. Měření a manipulace probíhaly v sterilním prostředí, aby se minimalizovala možnost kontaminace a zajistila bezpečnost celé procedury.

Stupeň expozice ionizujícímu záření byl závislý nejen na množství zpracovávané aktivity RF, ale také na manuální zručnosti a zkušenostech radiačního pracovníka. Významná byla nejen technická dovednost, ale i schopnost přesně a efektivně pracovat v souladu s radiologickými postupy a bezpečnostními směrnicemi. Pro správný a bezpečný průběh manipulace s RF byla klíčová pečlivá kontrola a monitorování všech kroků, aby se zajistila maximální účinnost a minimalizovala rizika spojená s expozicí ionizujícímu záření.

Autoři ve své studii podrobně popisují individuální výsledky prstové dozimetrie u dvou pracovníků, které dosáhly hodnot 789 mSv a 671 mSv během 2 měsíců a byly tak nad legislativním limitem 500 mSv/rok a vedly nejen k dočasnému vyřazení obou pracovníků z provozu přípravy radiofarmak, ale i k nutné optimalizaci radiační ochrany zavedením instrumentace a automatizace přípravy pozitronových radiofarmak.

V následujících letech byly nepřijatelné výsledky prstové dozimetrie vráceny pod legislativní limit a pod touto hodnotou jsou udržovány i nadále. Brněnské pracoviště vystřídalo větší množství zařízení pro přípravu RF – DDS-A, μ DDS-A, KAR1100 (všechna Tema Sinergie, Faenza, Itálie). DDS-A a μ DDS-A představují zařízení k rozplnění jednotlivých dávek RF do injekční stříkačky ve wolframovém stínění. Pro zajištění radiační ochrany personálu, ale i ochrany RF před případným mikrobiologickým znehodnocením pracují tato zařízení v prostředí stíněného boxu NMC 1/50 DSI (Tema Sinergie, Faenza, Itálie) pro přípravu pozitronových radiofarmak, využívajícího 50 mm olova jako stínění.

Tato zařízení umožňují přípravu celé řady RF značených pozitronovým zdrojem, nejčastěji ^{18}F . Neumožňují plnou automatizaci procesu přípravy RF, některé procesy přípravy jsou manuální a vyžadují kontakt farmaceutického pracovníka se zpracovávaným RF. Jde především o vložení a otevření stínícího kontejneru se zásobním roztokem RF a přeměření jeho aktivity. Vložení prázdné injekční stříkačky ve stínění, výdej připravené dávky RF v injekční stříkačce ve stínění a její předání k aplikaci také

vyžaduje kontakt farmaceutického pracovníka s RF. Tyto činnosti jsou spojené s expozicí horních končetin ionizujícímu záření.

Některé operace v zařízení jsou automatizované, což zahrnuje přečerpání RF z transportní lahvičky do systému pro rozplňování, ředění RF na požadovaný objem a jeho následné rozplňování do injekční stříkačky ve stíněné oblasti. Tato forma automatizace má za cíl minimalizovat fyzický kontakt s RF, což v konečném důsledku snižuje riziko možné expozice ionizujícímu záření na ruce radiačního pracovníka. Díky umístění zařízení do stíněného boxu je také sníženo riziko celotělové expozice při běžném provozu.

I přes tuto automatizaci je však důležité si být vědom toho, že existuje nenulové riziko kontaminace a ozáření pracovníka. Jakékoli automatizované zařízení je navrženo s cílem minimalizovat možné nebezpečí, ale není možné eliminovat riziko úplně. Proto je nezbytné dodržovat bezpečnostní směrnice a postupy, a to i při práci s automatizovaným zařízením.

Zařízení KAR1100 umožňuje přípravu RF přímo v aplikační místnosti mimo stíněný box. Svoji konstrukcí splňuje kvalifikaci pro přípravu injekčních přípravků a kombinuje automatizovanou přípravu RF prostřednictvím rozplňovacího zařízení se stínícími vlastnostmi, které odpovídají stíněnému boxu. KAR1100 je určen k přípravě RF značených pozitronovým zdrojem, nejčastěji jde o ^{18}F -FDG. Je zde patrný posun k další automatizaci procesu přípravy RF.

Otevření stínícího kontejneru se zásobním roztokem RF, přečerpání RF ze zásobní transportní lahvičky do systému rozplňovacího zařízení, ředění RF na požadovaný objem a rozplnění do injekční stříkačky ve stínění z wolframu je automatizované. Kontakt farmaceutického personálu s RF je tak omezen na předání připravené dávky RF k aplikaci.

Vzhledem k umístění zařízení v aplikační místnosti, lze očekávat možný kontakt s naaplikovaným pacientem s možností ovlivnění celotělové expozice pracovníků. Při rozplnění individuální dávky RF ^{18}F -FDG pomocí $\mu\text{DDS-A}$ je nutný krátký kontakt s celkovou aktivitou v laminárním boxu. Tento okamžik nastává ve chvíli, kdy je kontejner se zásobním roztokem RF vložen do stíněného boxu, aby byla změřena celková aktivita dodaného RF.

Další možnost kontaktu, zvyšující riziko expozice ionizujícímu záření pracovníků, se vyskytuje při vkládání prázdné injekční stříkačky do stíněného boxu, jejím připojování ke kanyle rozplňovacího zařízení a následném odpojování od kanyly. Tento proces je následovaný vyjmutím již připravené stíněné injekční stříkačky s ^{18}F -FDG z boxu k aplikaci. I když je tento kontakt krátký, s ohledem na počet provedených příprav, který činí 4500 jednotlivých případů za rok, lze s jistotou konstatovat, že v kontextu brněnského Onkologického ústavu je tento aspekt nezanedbatelný.

Při použití KAR1100 je tento krátký kontakt s aktivitou eliminován, připravující pracovník sice vkládá stíněnou injekční stříkačku do zařízení, ale celková aktivita je oddělena v odstíněné komoře, následné napojení kanyly k injekční stříkačce je automatizované. Jediný kontakt s připraveným RF tak zůstává při předávání injekční stříkačky s ^{18}F -FDG k aplikaci. Tato dávka na ruce je redukována použitím stínění z wolframu. Pro přenos připravené injekční stříkačky k aplikaci je navíc využíván stínící kontejner (Budinský et al., 2020).

Obrázek 4 Stínění lahvičky pro RF



Zdroj: Vlastní fotografie

2.3.5 Aplikace pozitronového radiofarmaka pacientovi

Obecně lze způsob, jak je RF aplikováno radiačním pracovníkem rozdělit na tři způsoby: tzv. aplikace z ruky, aplikace pomocí poloautomatických systémů a aplikace s využitím automatizovaného aplikačního systému. Zatímco od tzv. aplikace z ruky již většina

pracovišť' ustupuje v rámci optimalizace radiační ochrany, je volba mezi poloautomatickým a automatickým systémem volbou daného pracoviště.

Použití automatizovaného aplikačního systému vede ke snížení radiační zátěže personálu a k přesné aplikaci předepsaných aktivit RF proti manuálním způsobům aplikace radioaktivity (Häringová K., 2022). Při přípravě dávek v poloautomatické stanici dochází k částečnému kontaktu radiačního personálu se zpracovávaným RF, jako je překlad RF z přepravního kontejneru do aplikační stanice. Tato činnost je spojena s expozicí horních končetin ionizujícímu záření.

Jedním z hledisek při volbě systému pro přípravu a aplikaci RF je i ekonomické hledisko. Lze tedy říct, že automatické systémy jsou obecně výhodnější s ohledem na expozici obsluhujícího personálu. Totéž lze říct i z hlediska časové úspory. Naopak nevýhodou automatických systémů může být občasná ztráta dávky, případně nutnost vyměnit zdrojový aplikační set.

Obrázek 5 Poloautomatický aplikátor RF



Zdroj: Vlastní fotografie

3 Radiační ochrana v nukleární medicíně

Následující kapitola se zaměřuje na zákonný rámec radiační ochrany, včetně popisu monitorování pracovníků a pracovišť, jednotlivých limitů ozáření a postupů při překročení limitů, resp. tzv. monitorovacích úrovní.

Atomový zákon, účinný od 1.1.2017, tvoří spolu s vyhláškou č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, základní legislativní rámec radiační ochrany nejen v nukleární medicíně. Jednotlivé detaily postupů radiační ochrany konkrétního pracoviště nukleární medicíny jsou rozpracovány v několika dokumentech pro povoloanou činnost, které posuzuje SÚJB v rámci správního řízení ve věci povolení používání ZIZ. Těmi je Program monitorování, Program zajištění radiační ochrany, Vnitřní havarijní plán, Postupy optimalizace, Analýza RMU, Specifikace zdrojů záření, Odůvodnění činnosti, zajištění soustavného dohledu nad radiační ochranou atd.

3.1 Účinky ionizujícího záření

Účinky ionizujícího záření (dále jen IZ) na živý organismus se liší v závislosti dávce, kterou částice předají objemu látky, ale také na typu a energii částic (Súkupová, 2012). Při ozáření člověka dochází k biologickým změnám v těle, které se mohou projevit v průběhu dnů až týdnů, jiné v průběhu let až desítek let. Biologické účinky ozáření se dělí na deterministické a stochastické. Deterministické se dnes označují také jako tkáňové. Stochastické znamená pravděpodobnostní.

Deterministické účinky jsou podmíněny buněčnými ztrátami v důležitých buněčných populacích. Tyto účinky se zákonitě projeví při překročení určitého dávkového prahu pro danou tkáň. Míra, jakou se tyto účinky projeví, je závislá na dávce, s rostoucí dávkou roste i míra projevu, tj. počet usmrcených buněk.

Mezi nejznámější projevy deterministických poškození patří akutní nemoc z ozáření, akutní poškození kůže, sterilita a zákal oční čočky. Akutní nemoc z ozáření, akutní poškození kůže a sterilita patří mezi následky časné (projevují se řádově po dnech až týdnech), zákal oční čočky patří mezi následky pozdní (projevují se řádově po půl roce).

Akutní nemoc z ozáření vzniká po jednorázovém celotělovém ozáření vyšší dávkou než 1 Gy. Tato nemoc byla popsána hlavně u obětí jaderného útoku na Japonsko v roce 1945, v běžné praxi je velmi výjimečná. Klinický obraz akutní nemoci z ozáření závisí na dávce. Podle velikosti dávky se nejprve projeví příznaky podmíněné poruchou krvetvorných orgánů, dále poruchou trávicího ústrojí, a nakonec poruchou centrálního nervového systému.

Akutní poškození kůže je nejčastější typ poškození při nehodách s přenosnými zdroji ionizujícího záření. Toto postižení se dělí na několik forem v závislosti na dávce, kterou kůže obdržela. Nejlehčí formou je zarudnutí, při vyšších dávkách se vytvoří zarudnutí postupně přecházející v zánětlivý stav a tvorbu puchýřů. Nejtěžší formou je vytvoření nekrotické (mrtvé) tkáně a vředy. Prahovou hodnotou pro vznik nejlehčí formy poškození kůže je dávka cca 3 Gy, zarudnutí se projeví v období 1–3 týdny po ozáření.

Sterilita v důsledku ozáření zárodečného epitelu se liší pro muže a ženy. Muži jsou citlivější, přechodná sterilita u nich byla zjištěna pro dávky 0,5 – 2 Gy. V průběhu 1–3 let dojde k regeneraci. Trvalou sterilitu způsobují dávky 3 Gy a vyšší. U žen je trvalá sterilita způsobena dávkami v rozmezí cca 2,5 – 8 Gy.

Zákal oční čočky (katarakta) postihuje útvar, který nemá přímou výživu a vlastní buněčný substrát. Proto je doba od ozáření k vytvoření změn dlouhá (6 měsíců a více). Ke vzniku může dojít již po jednorázovém ozáření dávkou 1,5 Gy.

Stochastické účinky jsou účinky podmíněné mutacemi buněk a mají za následek vznik nádoru nebo přenesení mutace do další generace. Buď se jedná o mutace somatické, tj. mutace v tkáních mimo gonády, nebo o mutace gametické, tj. v zárodečných buňkách. Mutace jako takové se vyskytují i spontánně v populaci, ale bylo prokázáno, že působení IZ zvyšuje výskyt těchto mutací. Nicméně klinické příznaky nádorů vzniklých spontánně nejsou odlišitelné od klinických příznaků nádorů vzniklých v důsledku ozáření. Jedná se o bezprahové účinky, přičemž s rostoucí dávkou stoupá pravděpodobnost vzniku poškození. Samotný projev poškození však není závislý na dávce. Mezi účinky stochastické patří vznik zhoubných nádorů a řadí se sem i genetické změny. Genetické změny způsobené ozářením však nebyly u lidí statisticky významně prokázány. Mechanismy, kterými vznikají nádorová onemocnění, nejsou přesně známy. Pro

hodnocení je důležitá doba mezi ozáření a projevem poškození neboli doba latence. Pro leukémie je doba latence 5-15 let, u některých typů jsou to 2 roky. U solidních nádorů je doba latence 10-60 let.

3.2 Veličiny a jednotky ochrany před IZ

Dávka D (absorbovaná dávka) je definovaná jako poměr střední energie předané IZ látce o dané hmotnosti. Základní jednotkou absorbované dávky je **gray** (Gy) - odpovídá J.kg^{-1} . Je to energie 1 joule absorbovaná v kilogramu látky.

Kerma je definovaná jako podíl kinetické energie všech nabitých částic uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi v uvažovaném objemu látky o dané hmotnosti. Jednotkou je **gray** (Gy). *Kerma* se používá v oblasti měření nepřímo ionizujícího záření; charakterizuje energii předanou nepřímo ionizujícím zářením (fotony, neutrony) při první srážce nabitým částicím (elektrony, protony).

Ekvivalentní dávka H_T je definována jako součin radiačního váhového faktoru W_R a střední absorbované dávky D v orgánu nebo tkáni pro IZ (nebo součet takových součinů, jestliže je pole složeno z více druhů nebo energií). Jednotkou je Sv [sievert]. Ekvivalentní dávka H_T je veličina, která má vztah k účinkům deterministickým a vypočítá se jako: $H_T = W_R \cdot D$ [Sv], kde W_R vyjadřuje relativní biologickou účinnost daného druhu záření.

Efektivní dávka E_T je definována jako součet součinů váhových tkáňových faktorů W_T a ekvivalentní dávky H_T v ozářených orgánech nebo tkáních. Jednotkou je Sv [sievert]. Efektivní dávka E je veličina, která má vztah k účinkům stochastickým a vypočítá se jako: $E_T = \sum W_T \cdot H_T$ [Sv], kde W_T vyjadřuje relativní radiosenzitivitu dané ozářené tkáně.

Dávkový ekvivalent H_p je bodová veličina. Dávkovým ekvivalentem je součin absorbované dávky D v určitém bodě tkáně a jakostního faktoru Q vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů IZ. Jednotkou je Sv [sievert] a vypočítá se jako: $H_p = D \cdot Q$ [Sv] Hodnoty jakostních faktorů jsou uvedeny v příloze 2- vyhlášky o radiační ochraně.

Osobní dávkový ekvivalent $H_p(D)$ je definován jako dávkový ekvivalent v určitém bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně. Jednotkou je Sv [sievert]. Většinou se používá osobní

dávkový ekvivalent v hloubce- 0,07 mm tkáně: $H_{p(0,07)}$, 3 mm tkáně: $H_{p(3)}$ nebo 10 mm tkáně: $H_{p(10)}$.

Úvazek efektivní/ekvivalentní dávky $E_{(\tau)}$, $H_{(\tau)}$ je počítán v případě vnitřního ozáření a je definován jako časový integrál příkonu efektivní/ekvivalentní dávky po dobu τ ($\tau= 50$ let pro dospělé, 70 let pro děti) od příjmu radionuklidu. Jednotkou je Sv [sievert].

Kolektivní efektivní, popř. ekvivalentní dávka je definována jako součet efektivních, popř. ekvivalentních dávek všech jednotlivců v určité sledované skupině. Jednotkou je Sv [sievert].

3.2.1 *Principy radiační ochrany*

K dosažení radiační ochrany byly v české legislativě zavedeny čtyři základní principy:

Princip odůvodnění znamená, že každý druh radiační činnosti by měl být odůvodněn z hlediska ekonomického, společenského nebo jiného přínosu v porovnání s potenciální zdravotní újmou, kterou by mohl způsobit. V případě lékařského ozáření platí, že diagnostické a terapeutické přínosy v důsledku použití radiačních metod dostatečně převyšují možné škodlivé účinky. Vždy se však přihlíží k možnostem použití alternativních metod bez použití ionizujícího záření.

Princip optimalizace ukládá zajištění co nejlepší ochrany za daných okolností tak, aby velikost a pravděpodobnost ozáření i počet ozářených osob byly co možná nejnižší s přihlédnutím k ekonomickým a sociálním faktorům. V kontextu nukleární medicíny to znamená např. aplikace takového množství RF, které zajistí účinek (diagnostický nebo terapeutický), ale nepřesahuje jeho potřebu.

Pro optimalizaci radiační ochrany pracovníků při jednotlivých činnostech s danými zdroji IZ jsou stanoveny Dávkové optimalizační meze (dále jen „DOM“), jejichž překročení je podnětem k přezkoumání optimalizace radiační ochrany. Jsou to referenční hodnoty, které jsou níže než limity ozáření a představují hodnotu nejhorší varianty ozáření na pracovišti při dodržení všech optimalizovaných postupů, jak je pro pracoviště standardní a nejlepší. Pracoviště si je stanovuje samo vzhledem k používaným zdrojům IZ a rozsahu činnosti v dokumentu pro povolenou činnost Program monitorování.

Princip zabezpečení radionuklidového zdroje má zásadní význam pro ochranu před jeho možným zneužitím, nevhodnou manipulací nebo jeho použitím pro teroristické účely. Pozornost je těmto zdrojům věnována jak z hlediska výroby, přepravy, skladování a likvidace, tak zabezpečení před neoprávněnou manipulací, odcizením nebo zneužitím. Vyhláška o radiační ochraně kategorizuje radionuklidové zdroje podle nebezpečnosti a požadavků na jejich zabezpečení do pěti kategorií. Otevřené radionuklidové zdroje používané k výrobě radiofarmak na ONM patří zpravidla do 3.-4. kategorie podle maximálních zpracovávaných aktivit na pracovišti.

Princip limitování upravuje vyhláška č. 422/2016 Sb., kde jsou stanoveny limity ozáření, které dělíme na obecné limity pro obyvatele, limity pro radiační pracovníky a limity pro učně a studenty. Limity jsou hodnoty dávek, které odpovídají společensky přijatelnému riziku z ozáření, jsou stanoveny prospektivně, a slouží jako nástroj pro plánování a regulaci činností se zdroji IZ. Při plánování těchto činností mají být provedena veškerá opatření tak, aby tyto hodnoty za normální situace a při dodržení všech zásad radiační ochrany nemohly být překročeny. Limit však není v žádném případě hranicí mezi „bezpečným“ a „nebezpečným“ ozářením, resp. optimalizovaným a neoptimalizovaným.

Limitem ozáření je kvantitativní ukazatel pro omezení celkového ozáření fyzické osoby z činností v rámci plánovaných expozičních situací. Je udáván v efektivní dávce E_T , kterou vztahujeme ke stochastickým účinkům a v ekvivalentní dávce pro jednotlivé orgány H_T , kterou vztahujeme k deterministickým účinkům.

Pro stanovení dávek radiačních pracovníků a odvrácení překročení limitů se v radiační ochraně, používají tzv. monitorovací úrovně.

Rozlišujeme:

- úrovně *záznamové* – **určující** od jaké hodnoty dávky nebo jí odpovídající měřené veličiny, se mají výsledky monitorování zaznamenávat; zpravidla jsou stanoveny na 0,1 příslušného limitu

- *úrovně vyšetřovací* – **indikující** šetření důvodu zvýšené dávky a zda byly radiačním pracovníkem dodrženy postupy optimalizace, použity ochranné pomůcky atd. O šetření je proveden záznam. Zpravidla jsou stanoveny na 0,3 limitu ozáření v příslušné měřené veličině.

- úrovně zásahové, jejichž dosažení je pokynem k provedení nápravného opatření – zásahu, za účelem odvrácení překročení limitu ozáření v dalším sledovaném období. Zpravidla jsou stanoveny jako hodnoty vyšší než vyšetřovací úroveň a nižší než limit ozáření.

Tabulka 2 Přehled obecných limitů, limitů pro radiační pracovníky, učně a studenty

Veličiny	Limity (mSv)		
	Obecné	Pro radiační pracovníky	Pro studenty
Efektivní dávka za kalendářní rok	1	20	6
Efektivní dávka za 5 po sobě jdoucích let	-	100 mSv za 5 po sobě jdoucích kalendářních let a současně nejvýše 50 mSv za jeden kalendářní rok, pokud schválil SÚJB	-
Ekvivalentní dávka v oční čočce	15	100 mSv za 5 po sobě jdoucích kalendářních let a současně max. 50 mSv v jednom kalendářním roce	15
Ekvivalentní dávka na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky	-	500	150
Průměrná ekvivalentní dávka v 1cm ² kůže za rok	50	500	150

Zdroj: Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje

3.2.2 Kategorizace radiačních pracovníků

V oblasti radiační ochrany jsou pracovníci kategorizováni do kategorií A nebo B v souladu s právními předpisy, přičemž toto zařazení závisí na očekávaném ozáření při běžném provozu a při předvídatelných poruchách a odchylkách od běžného provozu. Tyto kategorie reflektují potenciální riziko expozice IZ.

Pracovníci kategorie A jsou definováni jako ti, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně nebo ekvivalentní dávku vyšší než 15 mSv pro oční čočku, nebo tři desetiny limitu ozáření na kůži a končetiny. Ostatní radiační pracovníci spadají do kategorie B.

3.3 Monitorování

Nezbytnou součástí každého pracoviště NM je monitorování osob a radiační situace na pracovišti, ale také monitorování výпустů a okolí pracoviště (Kubinyi et al., 2018). Tato monitorování probíhají v souladu s programem monitorování, což je dokument pro povolovanou činnost posuzovaný nebo schvalovaný SÚJB. Program monitorování musí dle vyhlášky o radiační ochraně obsahovat způsob a četnost monitorování pro běžný provoz pracoviště, předvídatelné odchylky od běžného provozu pracoviště a radiační nehodu.

3.3.1 Osobní monitorování

Radiační zátěž personálu oddělení nukleární medicíny je hodnocena dozimetrickou službou, která vyhodnocuje dávky osobních nebo prstových dozimetrů. Každý pracovník je povinen nosit osobní dozimetr na levé horní části hrudníku a na nukleární medicíně může být vybaven i prstovým dozimetrem (popř. dvěma – na každé ruce), pro ověření a stanovení zvýšené radiační zátěže prstů. (Šabata, 2019).

Osobní monitorování radiačních pracovníků (dále jen „RP“) musí být prováděno k určení osobních dávek RP sledováním, měřením a hodnocením jeho zevního a vnitřního ozáření. Na pracovištích nukleární medicíny se monitorování vnitřního ozáření provádí pouze při

podezření na vnitřní kontaminaci. Osobní a prstové dozimetry jsou vyhodnocovány v měsíčním intervalu zvolenou dozimetrickou službou, která má pro tuto činnost povolení SÚJB. Za výměnu, odeslání dozimetrů a sledování dávek radiačního pracovníka odpovídá jmenovaná dohlízející osoba na pracovišti (viz. Kap. Soustavný dohled nad radiační ochranou – kap. 3.4). Způsob monitorování je popsán v Programu monitorování.

Pro účely hodnocení ozáření pracovníků a radiační situace na pracovišti, resp. aktivit vypustí se v Programu monitorování stanovují odstupňované monitorovací úrovně (viz. kap. 3.2.1).

Každý měsíc se osobní dozimetry posílají na vyhodnocení autorizované dozimetrické službě. Při optimalizovaných podmínkách na pracovišti lze říct, na základě sledování některých velkých pracovišť, že RP neobdrží efektivní dávku za rok více než 5 mSv, avšak nemusí to být pravidlo. Významnější je sledování situace v případě ozáření prstů, kdy v některých případech dochází k obavám, že by limit pro ekvivalentní dávku RP mohl být překročen. Právě otázce ozáření prstů je věnována další část bakalářské práce.

V rámci přešetření překročení limitů ozáření se primárně posuzuje, zda překročená dávka byla nebo nebyla osobní. Závěry každého přešetření musí být podepsány dohlízející osobou držitele povolení a samotným dotčeným RP. Tímto postupem se zajistí, že příčiny překročení budou důkladně vyhodnoceny, prošetřeny a přijatá opatření budou odpovídající a účinná. Dochází tak k transparentnímu vyhodnocení situace a k prevenci před dalšími případnými překročeními monitorovacích úrovní v oblasti IZ (Petrová, 2014).

Pracovník, u kterého bylo zjištěno překročení limitů ozáření, je dočasně vyřazen z práce se zdroji IZ, a to do doby, než je posouzena jeho zdravotní způsobilost. Zaměstnavatel RP kategorie A má povinnost zajistit zdravotní dohled prostřednictvím poskytovatele pracovnělékařských služeb, se kterým uzavírá smlouvu za tímto účelem. Lékařem musí být praktický lékař nebo všeobecný lékař, který vydává posudek o zdravotní způsobilosti RP k práci se zdroji IZ v kontrolovaném pásmu (dále jen „KP“). Zdravotní dohled zahrnuje vstupní a periodickou lékařskou prohlídku minimálně jednou ročně a výstupní, resp. mimořádnou prohlídku, pokud dojde k překročení limitů ozáření pro RP, k RMU nebo změně zdravotního stavu RP. Posuzuje se zdravotní způsobilost pracovníka vyšetřeními, která jsou specifikována vyhláškou č. 79/2013 Sb., o pracovněprávních

službách a některých druzích posudkové péče. Posuzující lékař může stanovit podmínky pro další práci se zdroji IZ. Pokud lékař neshledá závažné zdravotní důvody nebo změnu zdravotního stavu pracovníka, není zaměstnavatel oprávněn ho vyřadit z další činnosti se zdroji IZ (pokud k tomu nejsou jiné nesouvisející příčiny).

3.3.2 *Monitorování pracoviště*

Pracoviště se zdroji IZ se dělí do čtyř základních kategorií (I.- IV.) zejména dle používaného zdroje IZ, očekávaného provozu pracoviště, prováděné radiační činnosti a zajištění radiační ochrany, možnosti kontaminace pracoviště, možnosti vzniku odpadů a dalších kritérií. V České republice jsou pracoviště nukleární medicíny podle vybavení pracoviště obvykle zařazeny do II. kategorie – přičemž kategorizace pracoviště je provedena podle kritérií uvedených ve vyhlášce o radiační ochraně.

Podle roční efektivní dávky se vymezuje **sledované pásmo** (dále jen „SP“) a **kontrolované pásmo** (dále jen „KP“). Ve SP se předvídá, že roční efektivní dávka může překročit 1 mSv nebo ekvivalentní dávka může být vyšší než 1/10 limitu ozáření pro kůži, oční čočku či končetiny a došlo by k překročení obecných limitů. Vymezeno může být v jakékoli kategorii pracoviště, je označeno popisem v souladu s vyhláškou o radiační ochraně a zajištěno monitorováním. Na pracovišti NM se jedná například o čekárny pro pacienty nebo prostory přilehlé kontrolovanému pásmu, sklady kontaminovaného odpadu, prostory se sběrnými jímkami kontaminovaného a radioaktivního odpadu.

V KP se už může jednat o překročení 6 mSv za rok a ekvivalentní dávka by mohla být vyšší než 3/10 limitu ozáření. Je rovněž označeno znakem radiačního nebezpečí a nápisy v souladu s vyhláškou o radiační ochraně. V KP jsou předepsána již režimová opatření podle vyhl. o radiační ochraně např. do KP smí vstupovat pouze osoby poučené o tom, jak se tam mají chovat, v doprovodu RP A, činnosti se zdroji IZ zde smí vykonávat jen RP A, kteří musí být monitorováni osobním dozimetrem s jednoměsíční lhůtou vyhodnocení, resp. dalšími dozimetry jako je prstový dozimetr. Nesmí se zde pohybovat osoby mladší osmnácti let a těhotné ženy, pokud to není nezbytné kvůli vyšetření. Jako KP se označují například aplikační místnosti RF nebo laboratoře pro výrobu RF, vyšetřovna PET/CT, resp. lůžkové oddělení pro naaplikované pacienty terapeutickými aktivitami RF.

Monitorování pracoviště musí být podle druhů používaných zdrojů IZ prováděno:

- monitorováním příkonu prostorového dávkového ekvivalentu na pracovišti
- monitorováním objemových aktivit v ovzduší pracoviště a plošných aktivit na pracovišti, nebo
- měřením neužitečného záření.

Měřené veličiny musí být měřeny tak, aby signalizovaly odchylky od běžného provozu, nedostatečnou funkci nebo selhání bariér bránících rozptylu a potvrzovaly nepřekročení hodnot pro radioaktivní kontaminaci povrchu, které jsou udané ve vyhlášce o radiační ochraně. Způsob, četnost a místa, kde je monitorováno pracoviště, jsou popsány v Programu monitorování – dokumentace pro povolovanou činnost.

3.3.3 Monitorování výpustí

Důležitou součástí Programu monitorování je také monitorování výpustí a okolí pracoviště (Kubinyi et al., 2018). Na každém pracovišti s otevřenými radioaktivními zdroji je třeba zajistit likvidaci radioaktivních a kontaminovaných odpadů jejich řízeným vypouštěním tak, aby nebyly překročeny uvolňovací úrovně pro příslušný radionuklid, které jsou stanovené vyhláškou o RO. Protože by mohlo dojít k úniku určitého množství odpadu do okolí a životního prostředí, je důležité monitorovat tyto výpusti, a prokazatelně zajistit, že uvolňovací úrovně nebudou překračovány. Pro případ nehodové situace držitel povolení zpracovává Analýzu radiační mimořádné události a Vnitřní havarijní plán se zásahovými instrukcemi, kde stanovuje, jak postupovat v případě překročení uvolňovacích úrovní a úniku radioaktivního nebo kontaminovaného kapalného odpadu do životního prostředí a okolí pracoviště.

3.4 Soustavný dohled nad radiační ochranou

Na každém oddělení nukleární medicíny musí být v souladu s atomovým zákonem určeni pracovníci odpovědní za kontrolu a dohled nad radiační ochranou. Jsou to:

Osoba s přímým dohledem nad radiační ochranou – musí to být osoba, která je RP kategorie A (tam, kde je vymezeno KP, což je v případě ONM vždy). Trvale dohlíží na radiační činnosti na pracovišti. Z hlediska radiační ochrany plánuje, připravuje pracovní postupy, zpracovává dokumenty pro diagnostiku a léčbu pomocí RF, informuje RP o

aktuální radiační situaci, prověřuje dodržování pravidel radiační ochrany, podílí se na šetření RMU a plní řadu dalších funkcí uvedených v Programu zajištění radiační ochrany.

Dohlížející osoba je takéž RP kategorie A (tam, kde je vymezeno KP) a je jmenovaná do této funkce statutárním zástupcem zdravotnického zařízení. Tato osoba vykonává dohled nad radiační ochranou sledováním a hodnocením plnění povinností vyplývajících z atomového zákona a příslušných prováděcích předpisů pro bezpečné nakládání se zdroji IZ. Zajišťuje spolupráci při přípravě a zavádění nových činností, které souvisí se zajištěním radiační ochrany, při nákupu zdrojů IZ, ochranných pomůcek a prostředků nebo měřicích přístrojů. Zajišťuje rovněž optimalizaci radiační ochrany ve spolupráci s klinickým radiologickým fyzikem, informovanost pracovníků o rizicích práce s IZ, vzdělávání pracovníků o bezpečném nakládání se zdroji IZ a ověřování způsobilosti RP k vykonávání své činnosti, vede evidenci osobních dávek, hodnotí je a šetří překračování monitorovacích úrovní, navrhuje opatření a postupy optimalizace pro jejich snížení, vede dokumentaci pro povolenou činnost, evidenci zdrojů IZ, vyšetřuje radiační mimořádné události, provádí analýzu radiologických událostí (chybné ozáření pacienta) a stanovuje opatření pro jejich minimalizaci, zajišťuje metodické vedení osoby s přímým dohledem nad radiační ochranou atd. dle ustanovení vyhlášky o radiační ochraně a konkrétního výčtu odpovědností a kompetencí uvedených v Programu zajištění radiační ochrany držitele povolení.

3.5 Postupy pro bezpečný provoz na pracovišti nukleární medicíny

Obecně, a nejen v nukleární medicíně jsou aplikovány tři základní zásady ochrany před IZ:

- ochrana časem – obdržená dávka je přímo úměrná době expozice, tj. čím je kratší čas pobytu u zdroje IZ, tím je nižší obdržená dávka. V přítomnosti naaplikovaného pacienta se tak snažíme pobývat jen nezbytně nutnou dobu. Před vlastní aplikací máme vše pečlivě připravené, pro snížení pobytové doby v blízkosti RF. Instruktaž k vlastnímu vyšetření se snažíme provádět před vlastní aplikací RF, popř. pomocí telefonu do kabinky.
- ochrana bezpečnou vzdáleností – čím je větší vzdálenost od zdroje IZ, tím je nižší radiační zátěž pro RP (intenzita záření tedy i dávkový příkon jsou nepřímo úměrné

druhé mocnině vzdálenosti od zdroje IZ – platí pro bodové zdroje IZ). K manipulaci s radiofarmakem používáme pinzety s dlouhou rukojetí, nikdy nebereme do rukou lahvičku s RF, od pacienta se snažíme držet v co největší vzdálenosti.

- ochrana účinným stíněním – používáme vhodné absorpční materiály ke stínění – vhodné pro daný typ záření. Pro gama záření musí mít materiály velkou měrnou hmotnost, jako je zejména olovo, ze stavebních materiálů pak dostatečná tloušťka betonu, který může být s příměsí barytu apod. Beta záření stíníme lehčími materiály jako je hliník, plexisklo, plasty – úměrně energii beta záření. Stínění radioaktivních zdrojů IZ, s nimiž pracovník manipuluje, může výrazně snížit jak celotělové ozáření, tak zejména lokální ozáření. Stíněny jsou tak přepravní nádoby pro radionuklidy, jsou používány laminární boxy pro přípravu radiofarmak, stíněné stříkačky a zařízení pro aplikaci RF. Důležité jsou také ochranné pomůcky RP jako např. rutinní používání pracovních oděvů, používání rukavic bránících kontaminaci rukou zejména při přípravě a aplikaci RF, využití ochranných olověných zástěr, ochranných límců, brýlí apod.

4 Radiační zátěž rukou pracovníků zajišťující přípravu a aplikaci pozitronových radiofarmak

PET je relativně mladou vyšetřovací metodou. Díky vyšší aktivitě používaných RF vyvstávala od počátku jejího užívání nová témata a otázky, zejména z oblasti radiační ochrany. Tato kapitola se zaměřuje na určitý průřez studii a výzkumy realizovanými v oblasti radiační zátěže rukou při práci s PET radiofarmaky.

Dne 25. srpna 1999 proběhlo v pražské Nemocnici Na Homolce historicky první vyšetření pacienta pomocí PET v ČR. Toto vyšetření představovalo první využití této moderní metody nukleární medicíny v postkomunistické Evropě. V druhé polovině devadesátých let vybudovala Nemocnice Na Homolce společně s Ústavem jaderného výzkumu Řež jedinečné PET centrum Praha. Tento projekt byl zvláštní tím, že získal podporu Mezinárodní agentury pro atomovou energii, a ukázal se jako modelový. Úspěšné využití PET technologie v klinické praxi otevřelo cestu pro další rozšíření této metody v zdravotnických zařízeních nejen v České republice, ale i v zahraničí.

Od počátku 21. století se množství vyšetření pomocí PET technologie výrazně zvýšilo. S tímto nárůstem se rovněž zvýšila potřeba věnovat se specifickým otázkám týkajících se radiační ochrany, zejména při využití PET RF. Tato technologie přináší nové výzvy a vyžaduje pečlivou pozornost k zajištění bezpečného provozu a minimalizaci radiologické expozice, což zahrnuje i aktualizaci a zdokonalení postupů radiační ochrany v souladu s nejnovějšími poznatky a standardy.

Manuální příprava pozitronových RF může představovat riziko v podobě překročení legislativních limitů pro RP především v prstové dozimetrii. Díky instrumentalizaci a přechodu k automatizaci přípravy a aplikace sice došlo k významnému poklesu dávek na prsty, přesto je potřeba uvedenému otázkám nadále věnovat pozornost a usilovat o optimalizaci.

4.1 Výstupy projektu CONRAD Evropské skupiny pro radiační dozimetrii

Již v roce 2008 byly publikovány první významnější studie, které poukazovaly na nutnost monitorování radiační zátěže rukou v oblasti nukleární medicíny, a to v souvislosti se zavedením PET do běžné lékařské praxe. Evropskou komisí byla např. financována aktivita EURADOS (Evropské skupiny pro radiační dozimetrii) - projekt CONRAD, v jehož rámci jedna z pracovních skupin hodnotila pracovní expozici pracovníků nukleární medicíny a ve svých závěrech konstatovala: „Problematika dozimetrie končetin v lékařském prostředí představuje výzvu vzhledem k rozmanitým charakteristikám radiačního pole. Přesné měření lokální dávky, reprezentující maximální kožní expozici, je komplikované, zejména vzhledem k široké škále radiačních parametrů, které jsou přítomny v diagnostické a terapeutické nukleární medicíně a PET. Tato situace je dodatečně komplikována skutečností, že obvyklá praxe využívá pouze jeden detektor pro měření těchto dávek.“ (Vanhavere et al., 2008).

V rámci projektu CONRAD se podskupina 1 zaměřila na problematiku dozimetrie končetin a provedla pečlivý literární přehled dosavadních studií. Jejich analýza ukázala, že existují obtíže s přesným měřením lokální dávky, a že některé studie naznačují možné překročení ročních dávkových limitů, pokud nebudou přijata adekvátní ochranná opatření, zejména v oblasti nukleární medicíny. Tato zjištění zdůraznila naléhavou potřebu zvýšené pozornosti v oblasti radiační ochrany a důležitost adekvátního školení v této oblasti. Uvedla dále, že školení a přijímání opatření pro radiační ochranu jsou klíčovými prvky zajištění bezpečné a odpovědné praxe v lékařském prostředí (Vanhavere et al., 2008).

4.2 Polská studie vystavení rukou ionizujícímu záření pracovníků nukleární medicíny

Kolektiv polských autorů z Ústavu jaderné fyziky a radiační bezpečnosti na Univerzitě v Lodži se také zaměřil na téma vystavení rukou pracovníků nukleární medicíny IZ. V rámci své studie, kterou publikoval v roce 2008 konstatuje, že specifická povaha práce na odděleních nukleární medicíny, značně přispívá k vysoké hodnotě ekvivalentní dávky obdržené zejména konečky prstů. Dále uvádí, že standardní oddělení nukleární medicíny

používá prstýnkové dozimetry umístěné obvykle u kořene prostředníku. Hlavním cílem studie bylo zjistit, zda existuje vztah mezi dávkami zaznamenanými termoluminiscenčními detektory umístěnými na různých místech na ruce a dávkami zaznamenanými standardními prstýnkovými dozimetry, a určit charakter tohoto vztahu. Korekční faktor představuje korekční hodnotu, která se má použít k výpočtu dávek, které mohou být obdrženy na místech ruky z dávky zaznamenané prstýnkovým dozimetrem. Studie uvádí, že dávka zaznamenaná prstýnkovým dozimetrem je v průměru pětkrát nižší než dávka, kterou obdrží konečky prstů palce, ukazováčku a prostředníčku (Wrzesień et al. , 2008).

4.3 Mezinárodní studie z roku 2008 o využití končetinových dozimetrů v některých evropských zemích při lékařské aplikaci

K obdobným závěrům dochází i rozsáhlejší studie z téhož roku, která konstatuje, že je zjevné, že končetiny – konkrétně ruce, jsou v případě nukleární medicíny a radiační ochrany limitujícím orgánem. Současně uvádí, že dosud nebyly shromážděny a analyzovány žádné údaje o rutinním monitorování radiační zátěže konečků prstů. Studie zveřejňuje data shromážděná ze sedmi evropských zemí. Jejich analýza pak ukazuje, že specializované studie vedly k výrazně vyšším dávkám pro končetiny, což naznačuje, že nastavený způsob monitorování radiační zátěže je nedostatečný, tj. že buď nejexponovanější pracovníci nejsou monitorováni, nebo dozimetry nejsou nošeny na vhodných pozicích (Donadille et al., 2008).

4.4 Projekt ORAMED – Optimization of Radiation Protection of Medical Staff

Velkou pozornost v oblasti problematiky ozáření rukou pracovníků při výrobě a aplikaci RF získal projekt ORAMED organizace EURADOS (European Radiation Dosimetry Group), kterého se v letech 2008-2011 účastnilo 7 evropských zemí. V rámci projektu bylo monitorováno celkem 124 pracovníků z 32 různých pracovišť nukleární medicíny. Česká republika do tohoto výzkumu zapojena nebyla.

Jednou z částí projektu bylo i téma ozáření kůže rukou pracovníků nukleární medicíny. Tento výzkum konstatoval, že na různých pracovištích existuje velká šíře individuálních

postupů, různého vybavení, prostředků a nástrojů radiační ochrany. Těto šíři odpovídaly i zjištěné rozdílné expozice. Bylo konstatováno, že u mnohých pracovníků může docházet k překročení ročního limitu dávky na kůži, a to zejména tam, kde je standard radiační ochrany nízký. Bylo uvedeno, že je v nukleární medicíně akutní potřeba monitorování dávek na kůži. V rámci konkrétních doporučení vznikl Průvodce snížení dávky na ruce (Guidelines for reducing dose to the hands during standard nuclear medicine procedures).

Mezi nejpodstatnější závěry patří, že monitorování končetin je v nukleární medicíně zásadní. Další doporučení se týkala umístění prstýnkového dozimetru, kdy na základě zjištěné rozdílné praxe při některých úkonech, bylo doporučeno, aby určení polohy dozimetru vyplývalo z individuálního měření u každého pracovníka a pokud tato měření nejsou možná, aby dozimetr byl umístěn na ukazováček nedominantní ruky s citlivou částí dozimetru umístěnou směrem k vnitřní straně ruky. V rámci tohoto projektu probíhalo porovnání naměřených osobních dávek pomocí dozimetrů umístěných na zápěstí, prstýnkovým dozimetrem na proximální článku ukazováčku a dozimetrem na distálním článku ukazováčku. Naměřené hodnoty ukázaly výrazné rozdíly. Vzhledem k tomu, že z praktických důvodů nelze dozimetr umístit v běžné praxi na špičku prstu, je nejvhodnější polohou základna ukazováčku nedominantní ruky. V této pozici je průměrné podhodnocení přibližně šestinásobné. K odhadu maximální dávky by se měl použít odečet dozimetru a korigován faktorem 6.

Dále doporučení obsahovala konstatování, že jakýkoli nástroj zvyšující vzdálenost (například kleště, automatický injektor) mezi rukama/prsty a zdrojem je velmi účinný pro snížení dávky.

Zajímavým zjištěním bylo, že školení a vzdělávání v osvědčených optimalizovaných postupech (např. plánování postupů, opakování postupů, použití neradioaktivních zdrojů, odhad dávek) jsou podstatnějším parametrem než úroveň zkušeností pracovníka.

Doporučení ORAMED souhlasí s většinou doporučení ICRP (ICRP, 2007). ICRP je mezinárodní komise pro radiologickou ochranu, která ve prospěch veřejnosti rozvíjí vědu o radiační ochraně, zejména poskytováním doporučení a pokynů ohledně všech aspektů ochrany před IZ.

Přesto na základě studie ORAMED vyplynuly dva hlavní rozdíly: ICRP doporučila v roce 2007 umístit rutinní dozimetr na proximální článek prostředníku dominantní ruky s detektorem umístěným na dlani, když nelze použít umístění na distálním článku, zatímco výsledky ORAMED ukazují, že umístění detektoru na bázi ukazováčku nedominantní ruky s dlaní je vhodnější. Druhý rozdíl souvisí s korekčním faktorem navrženým pro odhad maximální dávky. ICRP doporučuje použít korekční faktor 3, zatímco ORAMED navrhuje faktor 6.

4.5 Studie na oddělení NM univerzitní nemocnice v Bordeaux a nemocnice Côte Basque-Bayonne

Studie financovaná francouzským Ministerstvem zdravotnictví v letech 2011-2013 se zaměřila na otázku, zda dávka záření měřená prstýnkovým termoluminiscenčním dozimetrem, který se obvykle nosí na proximálním článku (P1) ukazováčku, měří dávky, které jsou reprezentativní pro skutečné dávky přijaté horními končetinami pracovníků. Byla provedena prospektivní individuální dozimetrická studie, ve které byla měřena osobní ekvivalentní dávka Hp (0,07) obdržená během specifického postupu manuálního dávkování (^{18}F -FDG) - pomocí párového provedení dvou operativních osobních elektronických dozimetrů umístěných na proximální m článku ukazováčku, a to v poloze P1 a na distálním článku P3. Studie se účastnilo deset pracovníků nukleární medicíny. Byly porovnány osobní ekvivalentní dávky záření obdržené dlaní proximálního článku ukazováčku [Hp (0,07)_{P1}] a dávky přijaté distálním článkem [Hp (0,07)_{P3}].

Předkládaná studie radiační ochrany při práci s FDG prokázala významný potenciální nepoměr (67 %) mezi dávkami záření naměřenými v proximální a distální poloze článku ukazováčku. Zjištění zdůrazňují důležitost volby polohy koncového dozimetrického senzoru při radiačním monitorování (tj. ruka, prst, článek prstu) a požadavek provádět na pracovišti dozimetrické studie přizpůsobené každému radiofarmaku a manipulaci, s cílem zaručit optimální schémata dozimetrického monitorování pracovníků (Salesses et al., 2016).

4.6 Studie lokálního ozáření kůže rukou pracovníků na Oddělení nukleární medicíny Fakultní nemocnice Hradec Králové

Cílem studie bylo stanovit lokální ozáření kůže rukou pracovníků na vybraném pracovišti s PET v České republice během přípravy a aplikace radiofarmaka značeného ^{18}F . (Hudzietzová et al, 2014).

Pomocí rukavic s 12 termoluminiscenčními dozimetry byla provedena měření u dvou pracovníků připravujících a čtyř pracovníků aplikujících radiofarmakum značené ^{18}F . U každého pracovníka proběhly tři cykly měření (jeden cyklus měření činil 25 natažení či aplikací). Průměrná aktivita na jedno měření činila 9–13 GBq. U každého pracovníka byla zjištěna poloha a hodnota maximálního lokálního ozáření kůže ruky, ze kterého byl proveden odhad maximálního lokálního ozáření za 1 rok.

Průměrné lokální ozáření kůže rukou pracovníků připravujících pozitronové radiofarmakum činilo $0,16 \pm 0,11$ mSv/GBq (levá ruka) a $0,23 \pm 0,05$ mSv/GBq (pravá ruka). U pracovníků, kteří aplikovali radiofarmakum značené ^{18}F , bylo naměřeno průměrné lokální ozáření kůže ruky $0,41 \pm 0,10$ mSv/GBq (levá ruka) a $0,11 \pm 0,06$ mSv/GBq (pravá ruka). Nejčastější poloha výskytu lokálního maxima ozáření kůže ruky byla špička ukazováčku.

Z maximálních lokálních hodnot ozáření kůže ruky bylo odhadnuto, že za předpokladu ročního počtu přibližně 600 natažení nebo 260 aplikací radiofarmakau sledovaných pracovníků nedojde k překročení stanovené vyšetřovací úrovně (150 mSv/rok) ani dávkového limitu na kůži (500 mSv/rok) (Hudzietzová et al, 2014).

4.7 Průzkum EANM a EURADOS expozice končetin pracovníků nukleární medicíny

Cílem této studie bylo získat vzhled do stavu expozice kůže rukou a monitorování dávek v Evropě. Průzkum byl proveden na konci roku 2020 mezi komunitou Evropské asociace nukleární medicíny. Obsahoval 24 otázek týkajících se charakteristik oddělení, úkolů pracovníka, použití dozimetru, typické dávky na končetiny pracovníka, zátěže oddělení pro vybrané radionuklidy ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{18}F , ^{68}Ga , ^{177}Lu , ^{90}Y) a ochranných opatření.

Bylo obdrženo celkem 106 odpovědí, které popisovalo devadesát devět oddělení nukleární medicíny pro celkem 1.335 pracovníků. Většina pracovníků (95 %) nosí prstýnkový dozimetr, obvykle na nedominantní ruce, a z tohoto počtu 44 % na ukazováčku. Měsíční dávky byly obecně nízké (střední hodnoty na různých pozicích kruhu: 0,4-1,8 mSv), ačkoli byly hlášeny vyšší dávky (20,8-38,8 mSv). Přibližně 1/3 pracovníků vykonávala celý rozsah úkolů (příprava, výdej, administrativa RF). Podávání je spojeno s významně nižšími dávkami pro končetiny. Zajímavé je, že nebyla nalezena žádná korelace mezi pracovní zátěží oddělení a kolektivní dávkou. Běžné bylo použití stínění lahvíček a stříkaček, stejně jako distančních nástrojů. Pracovníci vydávající PET nuklidy bez automatizovaného systému dostali výrazně vyšší dávku. Nezdálo se, že by manipulace s ^{68}Ga , ^{177}Lu a ^{90}Y měla vliv na uváděné dávky.

Studie tak učinila závěr, že ochranná opatření hrají významnou roli při snižování dávek na končetiny, přičemž pracovní zátěž oddělení a nově zaváděné radionuklidy se nezdají být hlavními determinanty dávek (Kollaard et al., 2021).

5 Praktická část

5.1 Cíle práce a hypotéza

Cílem této práce je: Shrnout poznatky týkající se celého procesu výroby a přípravy radiofarmak pro účely PET. Tento cíl byl naplněn v teoretické části práce. Praktická část se zaměřuje na problematiku ozáření rukou radiačních pracovníků při přípravě a aplikaci radiofarmak pro účely PET.

Byla definována výzkumná otázka:

Jaká je úroveň radiační ochrany při přípravě a aplikaci PET radiofarmak na ONM České Budějovice?

Byly definovány výzkumné podotázky:

Překračují hodnoty Ekvivalentních dávek na ruce personálu ONM ČB při přípravě a aplikaci PET radiofarmak dávkové limity dle platné legislativy?

Překračují hodnoty Ekvivalentních dávek na ruce personálu ONM ČB při přípravě a aplikaci PET radiofarmak stanovené dávkové optimalizační meze?

Jaký je poměr hodnot Ekvivalentních dávek na ruce personálu ONM ČB obdržených při přípravě a aplikaci PET radiofarmak a z činnosti z celého oddělení v porovnání s poměrem zpracovávaných aktivit při těchto činnostech?

5.2 Metodika práce

V teoretické části byla analyzována dostupná literatura a právní předpisy týkající se radiační ochrany v oblasti nukleární medicíny a data z dostupných publikovaných výzkumů v oblasti ozáření rukou pracovníků. V praktické části byla zvolena kvantitativní metoda. Byla sekundárně analyzována data z dozimetrických měření na ONM ČB. Současně bylo na ONM ČB provedeno vlastní měření radiační zátěže rukou pracovníků při přípravě a aplikaci PET radiofarmak, jehož výsledky jsou v této práci analyzovány a hodnoceny.

ONM ČB se rozděluje na část laboratorní, ambulantní, lůžkovou a tzv. vymírací místnost (část pro likvidaci radioaktivního odpadu). Na pracovišti se nachází dobře vybavená chemická laboratoř, digestoř pro ventilaci radioaktivních látek a kanalizace napojená na samostatně záchytnou nádrž. V prvním laboratorním úseku ONM ČB se radiofarmaka připravují a kontrolují. Místnost je vybavena sterilním laminárním boxem pro převedení radionuklidu do lékové formy značené sloučeniny a laminární box pro značení krevních buněk. Ambulantní část zahrnuje samotná diagnostická vyšetření a dispenzarizaci léčených pacientů, stavebně je rozdělena na část, která využívá jedno fotonovou emisní výpočetní tomografii (dále jen „SPECT“) a část, kde se provádí vyšetření pomocí PET. Kromě toho je na ONM ČB provozována i lůžková část, kde je prováděna například léčba radioaktivním jódem při karcinomu štítné žlázy, léčba kloubních výpotků aplikací radioaktivního ^{90}Y koloidu a léčba postižení kostí při onemocnění prostaty podáním ^{153}Sm a další. Každý zaměstnanec je vybavený osobním termoluminiscenčním dozimetrem (dále jen „TLD“). Zaměstnanci, kteří jsou vystaveny zvýšené expozici na ruce, používají navíc i prstový TLD (Daňová, 2015). Výsledky osobní dozimetrie jsou zaznamenávány u jednotlivých pracovníků za celý kalendářní měsíc, není rozlišováno, zda dané dávky pocházejí z činností v lůžkové (terapeutické) části, nebo části pro SPECT či PET. Z tohoto důvodu byla práce fokusována pouze na radiační zátěž pracovníků, kteří připravují nebo aplikují RF pro PET, aby bylo možné odlišit radiační zátěž vztaženou k jednotlivým metodám.

5.3 Sběr dat

Ke zpracování výsledků byly použity retrospektivní údaje – hodnoty celkově zpracované aktivity RF za celé ONM ČB (tj. jak z lůžkové části, PET i SPECT vyšetření) v letech 2019–2024, dále údaje vlastního měření – hodnoty aplikované, resp. zpracovávané aktivity u PET vyšetření ve dvou referenčních měsících – listopad 2023 a únor 2024. Tyto měsíce byly vybrány proto, že reprezentují měsíce s plnou pracovní zátěží, a tudíž maximálními hodnotami zpracovávané aktivity. Do těchto měsíců nezasahuje letní prázdninový provoz, kde je množství vyšetření díky čerpání dovolených zaměstnanců nižší, ani prosincové vánoční období, kdy je rovněž provoz díky státním svátkům omezený, leden 2024 byl také ze sběru dat vynechán, a to kvůli odstávce galiového generátoru v tomto měsíci.

Hodnoty aplikovaných aktivit a současně obdržená ekvivalentní dávka na ruce byla zjištěna vlastním měřením na pracovišti ONM ČB. Pracovníci byli se souhlasem jejich nadřízených požádáni o součinnost v tom směru, aby při přípravě a aplikaci PET RF vyplňovali připravenou tabulku. Tabulka byla určena jednak pro pracovníky laboratoře, tj. farmaceutické pracovníky zajišťující přípravu RF a jednak pro aplikující odborníky. Obě skupiny byly vybaveny 2 páry prstýnkových dozimetrů, které byly mimo pracovní dobu umístěny ve stínění. Při přípravě/aplikaci PET RF měl příslušný pracovník dozimetry nasazené na obou rukách spolu se svým vlastním prstýnkovým dozimetrem a do přiložené tabulky zaznamenával typ RF (^{18}F , ^{68}Ga) a zpracovávanou aktivitu. Jedním prstýnkovým dozimetrem byla získána dozimetrická data z činností na celém pracovišti (lůžková část, SPECT i PET) a druhým prstýnkovým dozimetrem zároveň výlučně z práce s PET RF v příslušných referenčních měsících.

Hodnocené výsledky prstové dozimetrie radiologických farmaceutů a aplikujících odborníků, kteří se podílejí na přípravě PET radiofarmak do aplikační formy a následné aplikaci pacientovi, jsou následně vyjádřené jako kolektivní dávky. Výsledná data tak nejsou zatížena možnými individuálními výkyvy dozimetrie jednotlivých pracovníků z důvodu odlišných pracovních směn (nemoci, dovolené, nepřítomnosti na pracovišti apod.) a výsledky vyjádřené v kolektivních dávkách mohou sloužit k posouzení optimalizace radiační ochrany.

5.4 Zpracování dat

Pro zpracování zdrojových dat byl použit softwarový balík MS-Office. Pro vyjádření radiační zátěže na prsty v podmínkách proměnlivého počtu vyšetření, aplikované aktivity a počtu pracovníků byla použita kolektivní dávka H_T pro farmaceutické pracovníky, která byla vztažena na jednotku zpracované aktivity, a dále kolektivní dávka H_T pro aplikující pracovníky, která byla rovněž vztažena na jednotku zpracované aktivity. Byly vyhodnoceny kolektivní dávky H_T za celé pracoviště, tj. z činností s RF v lůžkové části, v části SPECT i PET a odlišena pak byla data z činností s RF pro PET získaná vlastním měřením v měsících listopadu 2023 a únoru 2024.

Zdrojová data byla zpracována do přehledných tabulek a grafů, které obsahují:

- Zpracovaná aktivita v referenčních měsících (listopad a únor) jednotlivých let 2019–2024 na celém ONM ČB
- Zpracovaná aktivita v referenčních měsících (listopad a únor) jednotlivých let 2019–2024 pro účely PET
- Počet pracovníků při přípravě a aplikaci RF v referenčních měsících (listopad a únor) let 2019-2024
- Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty farmaceutických pracovníků v mSv v referenčních měsících (listopad a únor) let 2019-2024
- Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty aplikujících pracovníků v mSv v referenčních měsících (listopad a únor) let 2019-2024
- Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty farmaceutických pracovníků z jednoho zpracovaného GBq ze všech RF v referenčních měsících (listopad a únor) let 2019-2024
- Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty aplikujících pracovníků z jednoho zpracovaného GBq v referenčních měsících (listopad a únor) let 2019-2024 na celém ONM ČB
- Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty farmaceutických a aplikujících pracovníků – listopad 2023 a únor 2024 pro účely PET, vypočítaná na základě vlastního dozimetrického měření na ONM ČB
- Hodnoty zpracovaných a aplikovaných aktivit pro účely PET – listopad 2023 a únor 2024

5.5 Výsledky

Tabulka č. 3 a 4 ukazuje množství zpracované aktivity v GBq v letech 2019- 2024 v referenčních měsících listopad a únor (modře označeny radionuklidy pro přípravu PET RF). Je patrné, že celkové množství zpracovávané aktivity na ONM ČB tj. pro účely terapeutické, SPECT i PET vyšetření mírně klesá, přičemž zpracovávaná aktivita pro účely PET vyšetření je relativně konstantní. Vizually to ukazují **grafy č. 1 a č. 2**. **Graf č. 3** znázorňuje poměr celkově zpracované aktivity a aktivity pro účely PET. Množství zpracované aktivity pro účely PET je dlouhodobě na přibližně stejné úrovni, ve vztahu k celkově zpracované aktivitě tvoří její podíl 1/4 až 1/3.

Tabulka 3 Zpracovaná aktivita v GBq na celém ONM ČB v měsíci listopad v jednotlivých letech

RF/ listopad roku	2019	2020	2021	2022	2023
^{99m} Tc	271,023	239,493	216,129	93,32	181,818
²⁰¹ Tl	0,17	0	0	0	0
¹¹¹ In	0	0	0	0	0
¹⁸⁶ Re	0	0	0	0	0
⁹⁰ Y	0	0	0	0,185	0,185
¹⁵³ Sm	0	0	0	0	0
²²³ Ra	0,0066	0	0,0132	0	0,0066
¹³¹ I	27,01	18,5	28,628	11,9325	10,693
¹⁸ F	101,5	103,5	104	105,5	104,5
Ge/ ⁶⁸ Ga	0	0	0	4,769	4,42
^{81m} Kr	0,333	0,444	0,444	0,222	0,333
¹²³ I	0	0	0,185	0	0,555
¹²⁵ I	0	0	0	0	0,04625
¹⁷⁷ Lu	0	0	0	0	0
Celkem	400,0426	361,937	349,3992	215,9285	302,5569

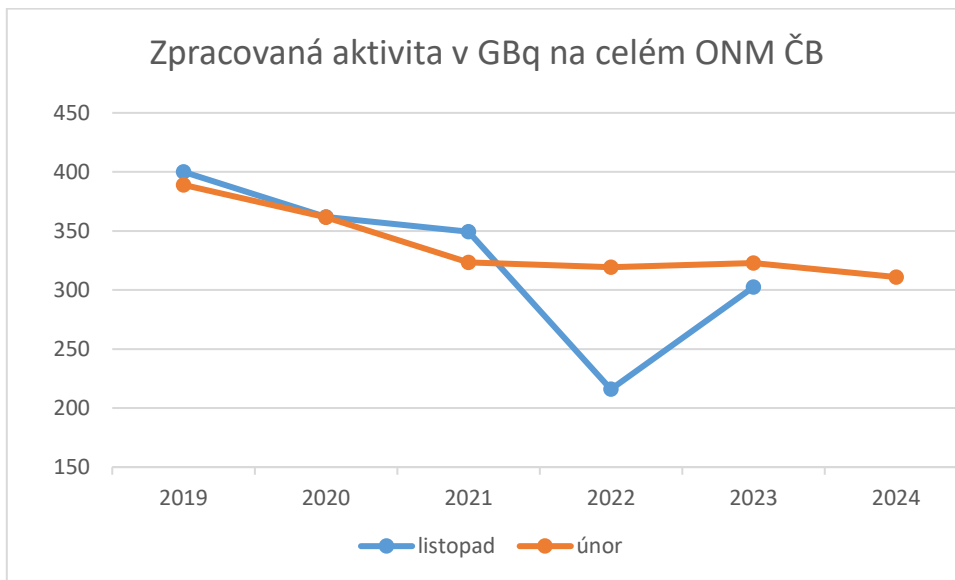
Zdroj: Bilance spotřebované aktivity pracoviště ONM ČB

Tabulka 4 Zpracovaná aktivita v GBq na celém ONM ČB v měsíci únor v jednotlivých letech

RF/únor roku	2019	2020	2021	2022	2023	2024
^{99m} Tc	260,008	237,374	208,4	212,024	194,109	172,493
²⁰¹ Tl	0	0	0	0	0	0
¹¹¹ In	0	0	0	0	0	0
¹⁸⁶ Re	0	0	0	0	0	0
⁹⁰ Y	0,296	0	0	0,185	0,185	0,37
¹⁵³ Sm	0	6,5	0	0	0	0
²²³ Ra	0,0066	0	0	0,0132	0	0
¹³¹ I	28,453	22,348	16,391	6,512	18,27985	24,457
¹⁸ F	100	95	98	100	99	101
Ge/ ⁶⁸ Ga	0	0	0	0	1,929	11,179
^{81m} Kr	0,222	0,333	0,444	0,444	0,407	0,444
¹²³ I	0	0	0	0	0,185	0,925
¹²⁵ I	0	0	0	0	0	0,09768
¹⁷⁷ Lu	0	0	0	0	8,737	0
Celkem	388,9856	361,555	323,235	319,1782	322,8319	310,9657

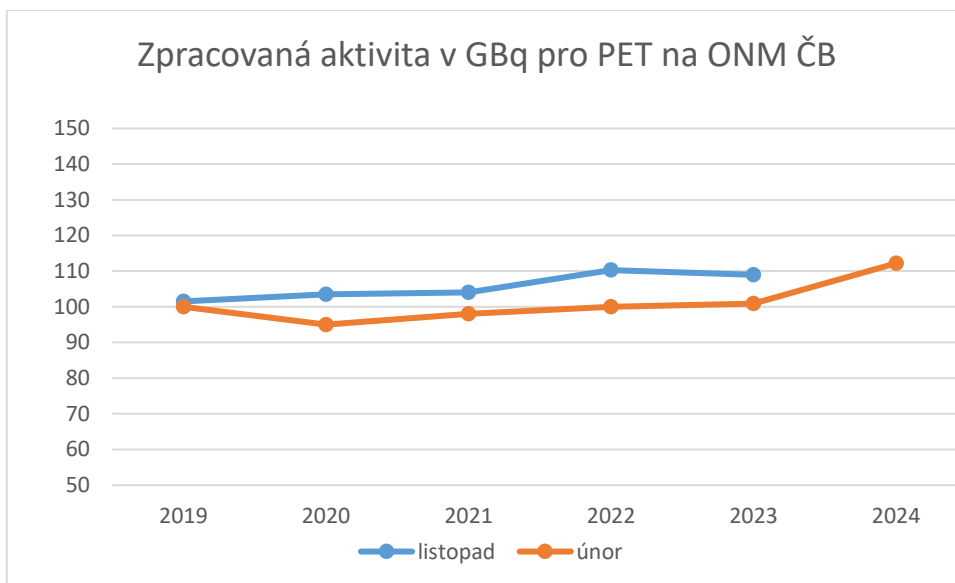
Zdroj: Bilance spotřebované aktivity pracoviště ONM ČB

Graf 1



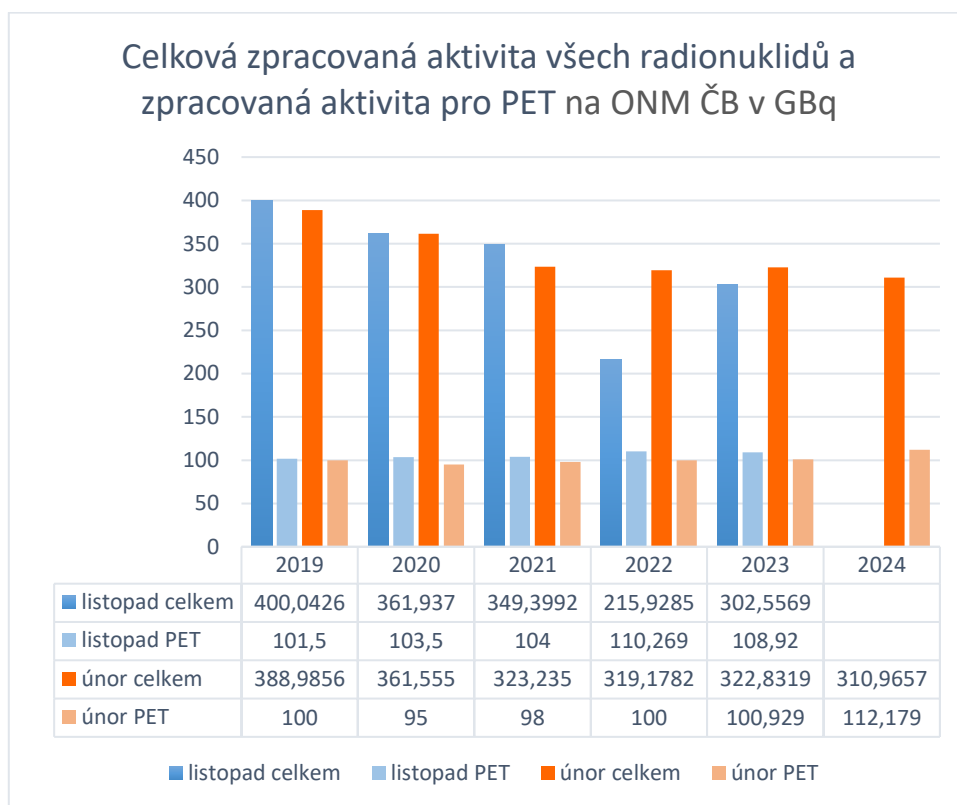
Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Graf 2



Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

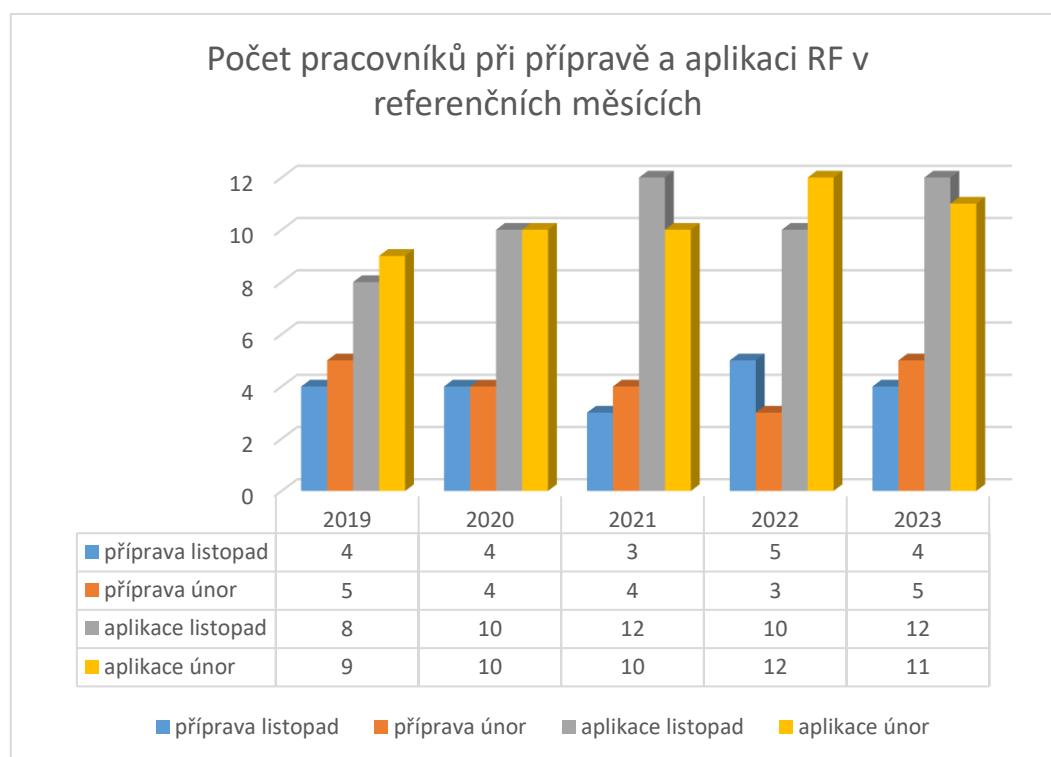
Graf 3



Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Z následného **grafu č. 4** je patrné, že počet pracovníků podílejících se na přípravě PET RF, tedy farmaceutického personálu se pohybuje mezi 3-5 pracovníky a počet aplikujících pracovníků se v referenčních měsících pohyboval mezi 8-12 pracovníky. Počet pracovníků byl důležitý pro výpočet kolektivních dávek jednotlivých profesních skupin – tedy farmaceutických pracovníků a aplikujících pracovníků.

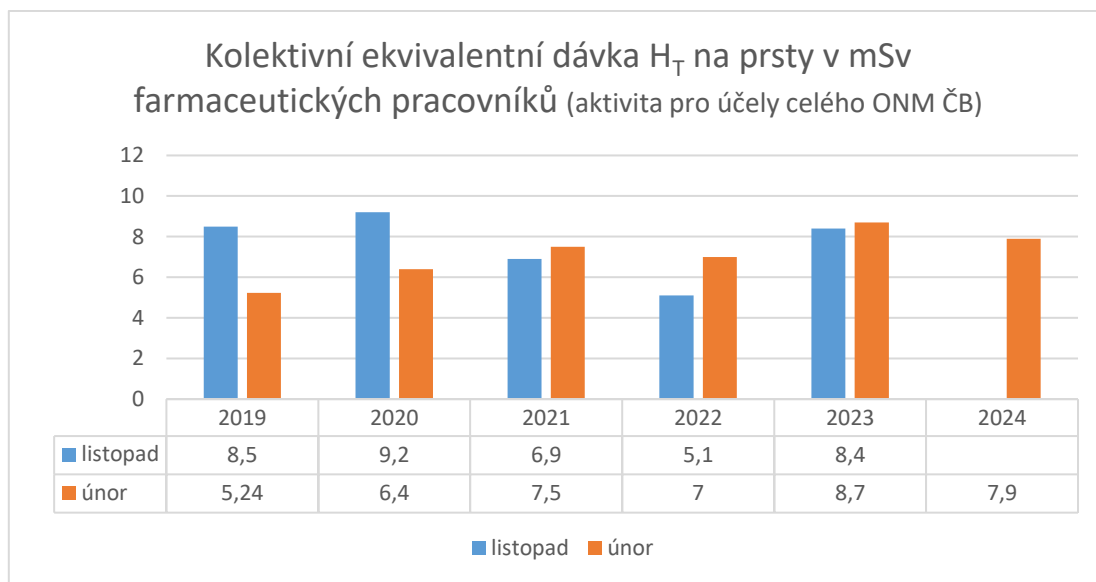
Graf 4



Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Graf č. 5 znázorňuje kolektivní ekvivalentní dávku **farmaceutických pracovníků** ze všech zpracovávaných aktivit (tedy pro účely lůžkové části, SPECT i PET). V grafu č. 5 je patrný pokles zaznamenané kolektivní ekvivalentní dávky u farmaceutických pracovníků v listopadu 2022, což koresponduje s nižší zpracovanou aktivitou v tomto měsíci.

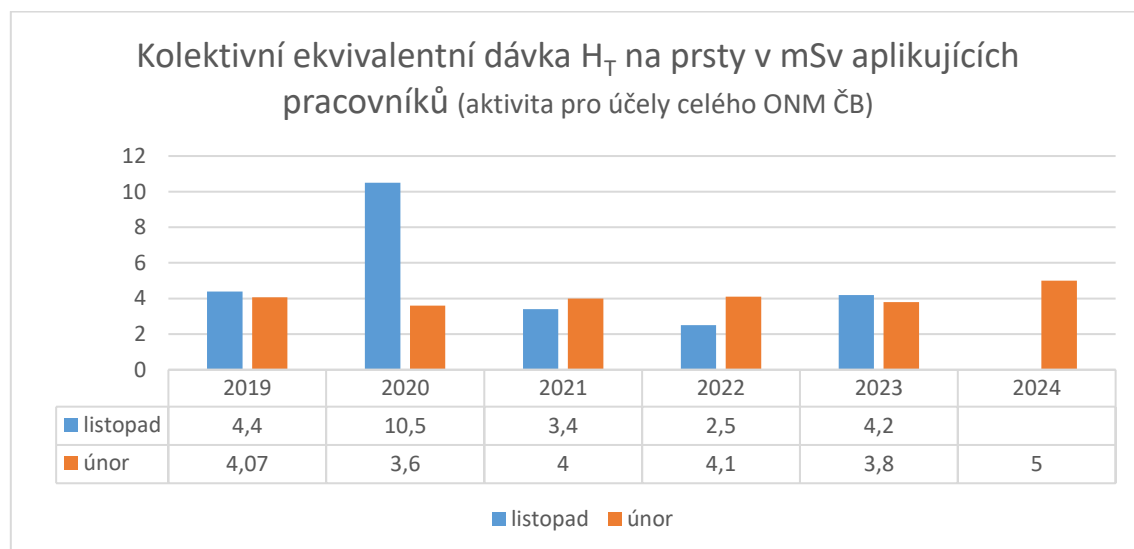
Graf 5



Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Z následného **grafu č. 6**, který znázorňuje kolektivní ekvivalentní H_T dávku na prsty u **aplikujících pracovníků** vidíme jediný markantní výkyv v listopadu 2020, který ovlivnila naměřená dávka H_T v hodnotě 5,2 mSv/měs. u jedné radiologické asistentky.

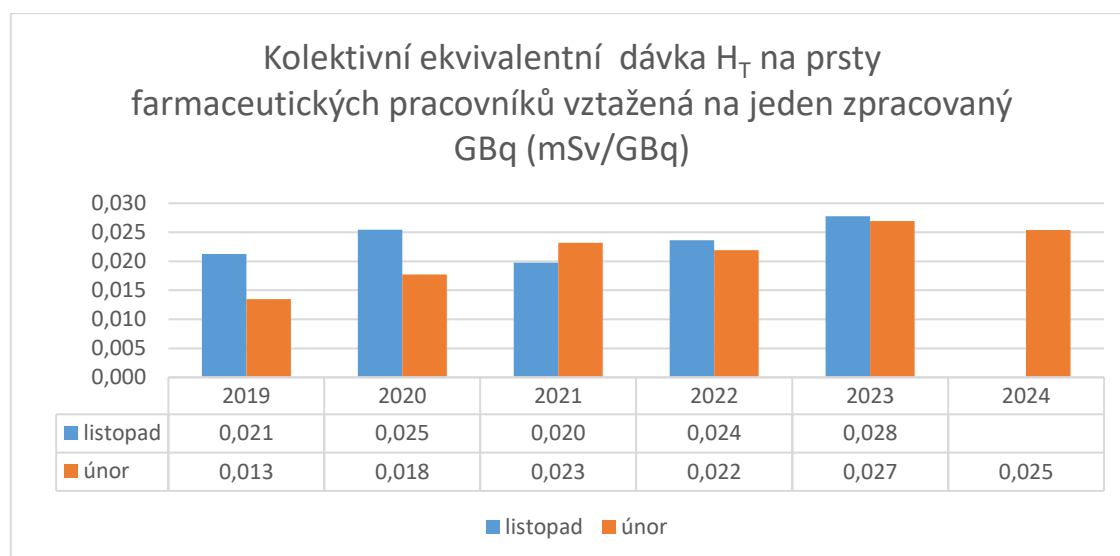
Graf 6



Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Graf č.7 znázorňuje kolektivní ekvivalentní dávku H_T na prsty **farmaceutických pracovníků** z jednoho zpracovaného GBq.

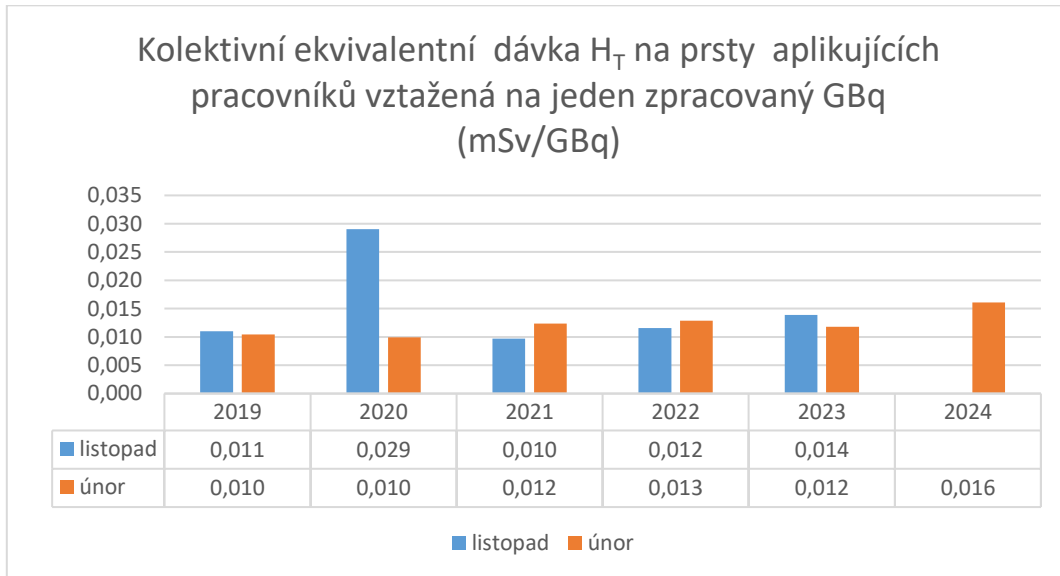
Graf 7



Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Graf č. 8 znázorňuje kolektivní ekvivalentní dávku H_T na prsty aplikujících pracovníků z jednoho zpracovaného GBq.

Graf 8



Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Tabulky č. 5, 6, 7 a 8 ukazují výsledky vlastního dozimetrického měření – jednak výsledky dozimetrie prstýnkových dozimetrů za období listopad 2023 a únor 2024, rozdělené na kolektivní ekvivalentní dávky H_T na prsty farmaceutických pracovníků a aplikujících pracovníků, dále tabulku zpracované aktivity a aplikované aktivity, která byla pracovníky zaznamenávána do připravených tabulek.

Tabulka 5

Výsledky měření kumulativní ekvivalentní dávky H_T na prsty prstýnkovým dozimetrem – listopad 2023

radionuklid	Prstýnkový dozimetr č.	H_T [mSv]	Ruka pravá/levá
^{68}Ga Apl	Test 1	0,1	P
^{68}Ga Apl	Test 1	0,2	L
^{18}F Apl	Test 2	0,7	P
^{18}F Apl	Test 2	1	L
^{68}Ga Farm	Test 3	0,2	P
^{68}Ga Farm	Test 3	0,2	L
^{18}F Farm	Test 4	1,2	L
^{18}F Farm	Test 4	0,6	P

Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Tabulka 6

Výsledky měření kumulativní ekvivalentní dávky H_T na prsty prstýnkovým dozimetrem – únor 2024

radionuklid	Prstýnkový dozimetr č.	H_T [mSv]	Ruka pravá/levá
^{68}Ga Apl	Test 1	1,1	L
^{68}Ga Apl	Test 1	0,7	P
^{18}F Apl	Test 2	0,9	P
^{18}F Apl	Test 2	0,9	L
^{68}Ga Farm	Test 3	0,2	P
^{68}Ga Farm	Test 3	0,4	L
^{18}F Farm	Test 4	0,3	L
^{18}F Farm	Test 4	0,2	P

Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Tabulka 7

Hodnoty **zpracovaných** aktivit v GBq pro PET RF v referenčních měsících listopad 2023 a únor 2024

	¹⁸ F	⁶⁸ Ga	celkem
Listopad 2023	104,5	4,42	108,92
Únor 2024	101	11,179	112,179

Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

Tabulka 8

Hodnoty **aplikovaných** aktivit v GBq pro PET RF v referenčních měsících listopad 2023 a únor 2024

	¹⁸ F	⁶⁸ Ga	celkem
Listopad 2023	35,225	2,648	37,873
Únor 2024	36,269	2,94	39,209

Zdroj: Vlastní zpracování, 2024

6 Diskuse

Obecně lze konstatovat, že pracoviště se zdrojem IZ, tj. i všechna oddělení nukleární medicíny, podléhají přísným pravidlům radiační ochrany. Legislativně jsou stanoveny limity ozáření, které je nepřipustné překročit. Za tímto účelem jsou stanovené monitorovací úrovně, aby došlo ke včasnému zjištění, šetření a přijetí opatření proti překročení limitů ozáření. Je však stále potřeba hledat další možnosti snížení stávající úrovně ozáření, resp. jeho optimalizaci s ohledem na dosažení co nejlepších klinických výsledků. Pro hodnocení úrovně optimalizace ozáření RP využíváme veličinu DOM, kterou si každé pracoviště stanovuje v Programu monitorování v závislosti na činnostech, četnosti a zdrojích, které používá, s cílem tyto DOM nepřekračovat, resp. zdůvodňovat a optimalizovat dále, pokud je DOM překročena.

ONM ČB má ve svém Programu monitorování nastaveny následující vyšetřovací úroveň pro ekvivalentní dávku na prsty:

- Pro radiofarmaceuty- 10 mSv/měsíc, 150 mSv/rok
- Pro aplikující personál- 5 mSv/měsíc, 150 mSv/rok

Dávková optimalizační mez pro ekvivalentní dávku na prsty je v Programu monitorování stanovena jako nejvyšší obdržená dávka při optimalizovaných postupech a dodržení všech dostupných způsobů ochrany a to:

- Pro radiofarmaceuty- 10 mSv/měsíc, 100 mSv/rok
- Pro aplikující- 3 mSv/měsíc, 36mSv/rok

Uvedené DOM platí pro součet na obou rukou.

Práce s novými typy radiofarmak přináší nové výzvy ohledně radiační ochrany. V **tabulkách č. 3 a 4** je podáván přehled o využívaných radionuklidech a jejich zpracované aktivitě, v **grafech č. 1 a 2** jsou tato data vizualizovaná. **Graf č. 3** ukazuje poměr celkově zpracované aktivity (tj. pro účely SPECT, PET i lůžkovou část) a aktivitu pro účely PET. V průběhu referenčních měsíců listopad a únor v letech 2019-2024 se ukazuje, že celková zpracovaná aktivita radionuklidů na ONM ČB klesá, aktivita pro účely PET však má dlouhodobě stabilní hodnotu a tvoří přibližně 1/3 z celkově zpracovávané aktivity.

Graf č. 4 ukazuje personální strukturu farmaceutických a aplikujících pracovníků. Množství těchto zaměstnanců je na oddělení dlouhodobě stabilní – u farmaceutických pracovníků se počet zaměstnanců pohybuje mezi 3-5 a u aplikujících pracovníků mezi 8-12.

Vyšší kolektivní ekvivalentní dávku na ruce obdrželi dle dostupných dat v referenčních měsících farmaceutiční pracovníci, kdy medián kolektivních dávek H_T na prsty byl v měsíci listopad (2019-2023) 8,4 mSv a v měsíci únor (2019-2024) hodnotu 7,25 mSv. U aplikujících pracovníků byl medián kolektivní ekvivalentní dávky na prsty v listopadu (2019-2023) 4,2 mSv a v únoru (2019-2024) 4,35 mSv.

Poměr radiační zátěže farmaceutických pracovníků a aplikujících pracovníků je obdobný i u přepočtených kolektivních dávek, kdy listopadový medián u farmaceutických pracovníků činil po zaokrouhlení na tři desetinná místa **0,025 mSv/GBq**, únorový **0,023 mSv/GBq** a u aplikujících pracovníků činil listopadový medián **0,012 mSv/GBq** a únorový **0,012 mSv/GBq**.

V tomto směru je potřeba si uvědomit, že přepočet na GBq probíhá v hodnotách zpracované aktivity. Zatímco u farmaceutických pracovníků jde o relevantní hodnoty, u aplikujících pracovníků může být reálná hodnota aplikované aktivity, resp. hodnota aktivity, se kterou zacházejí při aplikaci pacientovi, nižší, než je hodnota aktivity zpracované.

Zcela názorně je uvedený pokles zřejmý z **tabulek č. 7 a 8**, které ukazují množství zpracované aktivity pro PET RF a množství aplikované aktivity PET RF. Množství aplikované aktivity PET RF bylo pracovníky průběžně zaznamenáváno do připravených tabulek. Jednak je zřejmé, že část aktivity zůstává v aplikačních hadičkách, stříkačkách apod. tj. do těla pacienta se sice nedostane, ale ovlivňuje radiační zátěž aplikujícího personálu a je s ní tedy počítáno.

Z uvedených tabulek je dále patrné, že množství aplikované aktivity PET RF a množství zpracované aktivity PET RF je zhruba třetinová. Tento poměr souvisí především s krátkým poločasem rozpadu PET RF (viz. též **tabulka č. 1**), kdy aktivita mezi přípravou a aplikací je již na nižší úrovni, část připraveného RF není využito. Tzn. přesto, že pro farmaceutické pracovníky znamená jejich příprava radiační zátěž, aplikující již s touto aktivitou do styku nepřijdou, resp. jen částečnou. Porovnáváme-li proto v **tabulce č. 5 a**

6 hodnoty kumulativních ekvivalentních dávek na ruce při přípravě a aplikaci PET RF, nabízí se z výše uvedeného faktu domněnka, že vyšší hodnoty dávek pravděpodobně obdrželi v obou referenčních měsících farmaceutičtí pracovníci.

Podíváme-li se však na tyto tabulky podrobněji, zjistíme, že zatímco v měsíci listopadu byly výsledky dozimetrického měření prstýnkovým dozimetrem - výsledky ekvivalentních kumulativních dávek na ruce v obdobné úrovni jak u farmaceutických pracovníků (**průměr 0,50 mSv ± 0,42**), tak u aplikujících pracovníků (**průměr 0,55mSv± 0,47**), pak v měsíci únoru byly hodnoty dávek u aplikujících pracovníků dokonce vyšší (**průměr 0,9 mSv±0,16**) než u farmaceutických pracovníků (**průměr 0,28mSv±0,1**). Je tak patrné, že hodnota aktivity RF, se kterou pracovník zachází, není jediným indikátorem budoucí radiační zátěže. Zejména u automatizovaných a poloautomatizovaných systémů je zajištěna vysoká úroveň radiační ochrany, přesto se i zde nevyhneme situacím, kdy dojde k prasknutí hadiček s RF, dojde k netěsnosti, zaseknutí apod. a v těchto situacích je nutné, aby příslušný pracovník zasáhl i přesto, že to pro něj znamená zvýšenou radiační zátěž, která je nejvýznamnější právě na ruce. V tomto směru je důležitá zkušenost pracovníka, opakovaná edukace pro práci s RF, důsledné dodržování správných postupů atd.

Z výše uvedených výsledků je patrné, že hodnoty ekvivalentních dávek na ruce při práci s PET RF jsou na ONM ČB hluboko pod dávkovými limity na ruce (roční limit 500mSv/ přepočteno na měsíc limit 42mSv) a dozimetricky zjištěné kumulativní dávky nedosahují ani monitorovací vyšetřovací úrovně stanovené ONM ČB. Chceme-li porovnávat naměřené hodnoty s DOM, je potřeba konstatovat, že ONM ČB nemá kolektivní DOM. Naměřené hodnoty je proto potřeba vnímat jako maximálně možné za situace, že by celou přípravu RF zajišťoval pouze jeden farmaceut resp. veškerou aplikaci RF realizoval jeden aplikující odborník, což je předpoklad zcela nepravděpodobný. I přesto je patrné, že kumulativní ekvivalentní dávky na ruce nedosahují DOM, které jsou stanoveny pro individuální dávky.

Další otázkou, která byla zjišťována, byl poměr ekvivalentních dávek na ruce plynoucí z práce s PET RF k ekvivalentním dávkám plynoucím z celkových hodnot zpracované aktivity na ONM ČB. Kumulativní ekvivalentní dávky na ruce (posuzovány hodnoty naměřené na levé ruce) při zpracování PET RF činila u farmaceutických pracovníků v listopadu 2023 1,4 mSv a u aplikujících **1,2 mSv**, v únoru 2024 u farmaceutických

pracovníků **0,7 mSv** a u aplikujících **2 mSv celková** kumulativní H_T na ruce u farmaceutických pracovníků činila v listopadu 2023 **8,4 mSv** a u aplikujících **4,2 mSv**, v únoru 2024 činila u farmaceutických pracovníků **7,9 mSv** a u aplikujících **5 mSv**.

Je tak patrné, že poměr Kumulativní ekvivalentní dávky na ruce při zpracování PET RF a kumulativních ekvivalentních dávek z celého pracoviště ONM ČB činí nižší poměr, než je poměr zpracovávaných aktivit PET RF k celkovému množství zpracovávané aktivity RF.

7 Závěr

Pracovníci na ONM ČB jsou při své práci vystavováni zvýšenému riziku ozáření podle typu činnosti, kterou vykonávají. Při práci s radiofarmaky, jak při přípravě, tak při aplikaci, jsou nejvíce exponované prsty pracovníka. Proto se v rámci těchto činností dbá na dodržování zásad radiační ochrany, jako je práce v gumových rukavicích, použití stínění včetně stínění lahvíček s RF, využívají se poloautomatické aplikátory, také příprava je z větší části automatizovaná.

Tato práce v teoretické části naplnila cíl: Shrnout poznatky týkající se celého procesu výroby a přípravy radiofarmak pro účely PET. V praktické části se zaměřila na problematiku ozáření rukou radiačních pracovníků při přípravě a aplikaci radiofarmak pro účely PET. Bylo postupováno dle navržené metodiky, výsledky byly zpracovány v grafech a tabulkách, byly diskutovány a bylo odpovězeno na výzkumné podotázky:

Překračují hodnoty Ekvivalentních dávek na ruce personálu ONM ČB při přípravě a aplikaci PET radiofarmak dávkové limity dle platné legislativy?

Ekvivalentní dávky na ruce personálu ONM ČB při přípravě a aplikaci PET radiofarmak nepřekračují dávkové limity dle platné legislativy.

Překračují hodnoty Ekvivalentních dávek na ruce personálu ONM ČB při přípravě a aplikaci PET radiofarmak stanovené dávkové optimalizační meze?

Ekvivalentní dávky na ruce personálu ONM ČB při přípravě a aplikaci PET radiofarmak nepřekračují stanovené dávkové optimalizační meze.

Jaký je poměr hodnot Ekvivalentních dávek na ruce personálu ONM ČB obdržených při přípravě a aplikaci PET radiofarmak a z činnosti z celého oddělení v porovnání s poměrem zpracovávaných aktivit při těchto činnostech?

Podíl Ekvivalentních dávek na ruce personálu ONM ČB při přípravě a aplikaci PET radiofarmak v porovnání s Ekvivalentní dávkou na ruce personálu ONM ČB z celkově zpracované aktivity RF na ONM ČB odpovídá podílu zpracované aktivity pro účely PET k celkově zpracované aktivitě na ONM ČB, resp. je nižší.

Na základě těchto dílčích podotázek byla odpovězena výzkumná otázka:

Jaká je úroveň radiační ochrany při přípravě a aplikaci PET radiofarmak na ONM České Budějovice?

Radiační ochrana rukou personálu při přípravě a aplikaci PET radiofarmak na ONM ČB je optimalizovaná a nevyžaduje nápravná opatření, která by vedla s dalším snižováním dávky na prsty.

Rozsah a lhůta pro zpracování bakalářské práce neumožňoval rozsáhlejší sběr dat, byly vybrány dva referenční měsíce. Získaná data byla proto zpracována bez rozsáhlejšího statistického hodnocení. Dosažené výsledky přinášejí možné podněty pro další případný výzkum – jako například podrobnější zjištění příčin rozdílu mezi zpracovanou a aplikovanou aktivitou PET RF, detailnější analýza důvodů vyššího podílu zátěže na ruce aplikujícího personálu oproti farmaceutickým pracovníkům v porovnáním s celkovými kumulativními hodnotami ekvivalentních dávek u stejných pracovníků apod.

Kromě inspirace pro některou další absolventskou práci, popř. využití výsledků na ONM ČB, může minimálně teoretická část této práce sloužit jako podpůrný studijní materiál pro studenty oboru Radiologická asistence.

Seznam literatury

1. ADAM, J., ANDRES, P., BOLČÁK, K., ČERMÁKOVÁ, M., DEMLOVÁ, R., DRAŽILOVÁ DUBSKÁ, L., SEDLÁČKOVÁ, Š., VALÍK, D., *Nová radiofarmaka a aplikace pozitronové emisní tomografie na Masarykově onkologickém ústavu v Brně*. Klinická onkologie. 2009, 22(3), 94-97. Dostupné z: <https://www.linkos.cz/casopis-klinicka-onkologie/2009-06-15-3/nova-radiofarmaka-a-aplikace-pozitronove-emisni-tomografie-na-masarykove-onkolog/>
2. *Bezpečnost přepravy radioaktivních materiálů*, 2024. [online]. SÚJB, [citováno 10.1.2024]. Dostupné z: <https://sujb.gov.cz/jaderna-bezpecnost/prepravy-radioaktivnich-materialu/bezpecnost-prepravy-radioaktivnich-materialu>
3. BUDINSKÝ, M., VYŠINSKÝ, P., SYNEK, S., ŽILKOVÁ, K., 2020. *Automatická příprava radiofarmak jako nástroj optimalizace radiační ochrany personálu*. Československá farmakologie, 69, 218-221, ISSN 1803-6597.
4. DAŇOVÁ, K., 2015. *Radiační ochrana pacientů a personálu na oddělení nukleární medicíny*. Bc. Práce, ZSF JCU
5. DONADILLE, L., CARINOU, E., GINJAUME, M., JANKOWSKI, J., RIMPLER, A., SANS MERCE, M., VANHAVERE, F., 2008. *An overview of the use of extremity dosimeters in some European countries for medical applications*, Radiation Protection Dosimetry, Svazek 131, vydání 1, strany 62–66, Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn229>
6. *Doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany 2007*, [online]. SÚJB [citováno 20.12.2023]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/ICRP103_dokument.pdf
7. *Farmokinetika FDG*. 2003. [online]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20170926235758/https://www.drugs.com/mmx/fludeoxyglucose-f-18.html>
8. GILLINGS N., 2013. *Radiotracers for positron emission tomography imaging*. Magma (New York, N.Y.) [online]. 26(1), 149-58 [cit. 2017-06-16]. DOI: 10.1007/s10334-012-0356-1. ISSN 13528661. Dostupné z: <http://1url.cz/QtSoS>

9. HÄRINGOVÁ, K., 2022. *Příprava pozitronových radiofarmak na klinice NM FNO*. Čes. Slov. Farmacie, 71, 161-171, ISSN 1803-6597.
10. HORÁKOVÁ, A., 2014. *PET Centrum v ÚJV Řež: nejmodernější zařízení na výrobu radiofarmak*, [online]. Technický týdeník, [citováno 20.12.2023]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/pet-centrum-v-ujv-rez-nejmodernejsi-zarizeni-na-vyrobu-radiofarmak_26800.html
11. HUDZIETZOVÁ, J. a kol., 2014. *Radiační zátěž rukou pracovníků během přípravy a aplikace radiofarmak značených radionuklidem ¹⁸F*. Česká Radiologie, 68(4): 318–322, ISSN 1210-7883 Dostupné z: http://www.cesradiol.cz/dwnld/CesRad_1404_318_322.pdf
12. HUDZIETZOVÁ, J., PRCHALOVÁ D., SABOL, J., VLČEK, P., 2013, *Radiační zátěž pracovníků na klinice nukleární medicíny a endokrinologie 2. LF UK a FN Motol v letech 2006–2011*, Česká radiologie, 67(1): 87–94, ISSN 1210-7883
13. KLENER, V., 2000. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 619 s. ISBN 80-238-3703-6.
14. KOLLAARD, R., ZORZ, A., DABIN, J., COVENS, P., COOKE, J., CRABBÉ, M., CUNHA, L., DOWLING, A., GINJAUME, M., MCNAMARA, L., 2021. *Review of extremity dosimetry in nuclear medicine*. Journal of Radiol. Protection. 41(4). DOI: 10.1088/1361-6498/ac31a2
15. KOMÁREK, P., RABIŠKOVÁ M., 2006. *Technologie léků*. 3. vyd. Praha: Galén, ISBN 80-7262-423-7
16. KORANDA, P., 2014. *Nukleární medicína*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-244-4031-6.
17. KOVÁČIK, A., VRANÍKOVÁ, B., ŽILKOVÁ, K., 2021, *Technologie a příprava radiofarmak na oddělení nukleární medicíny*. Praktické lékárenství, 17(3): 171–174, ISSN - 1801-2434.
18. KRAFT, O., PEKÁREK, J., *Radiofarmaka*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Lékařská fakulta, 2012.s.13. ISBN 978-80-7464-183-1.
19. KUBINYI, J., SABOL, J., VONDRÁK, A., 2018, *Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami*. Praha: Grada Publishing, ISBN 978-80-271-0168-9.
20. KVĚTINA, J., 1981. *Radiofarmaka*. Praha: SPN, bez ISBN

21. LEK-17 (Příprava sterilních přípravků v lékárně a zdravotnických zařízeních). 2016, [online]. Státní ústav pro kontrolu léčiv, [citováno 18.11.2023]. Dostupné z: <https://www.sukl.cz/lekarny/lek-17>
22. PETROVÁ, K., 2014. *Osobní monitorování a zdravotní dohled nad radiačními pracovníky* [online]. SÚJB, [citováno 10.1.2024]. Dostupné z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/seminare/1_sledovani_a_hodnoceni_davek_RP_petrova_2014.pdf
23. *Radiační ochrana pro vybrané pracovníky*, 2019, [online]. ČEZ, [citováno 10.12.2023]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/skoleni/skoldohprac/zoz_ro.pdf
24. REICHL, J., VŠETIČKA, M., 2016. *Cyklotron*. In: Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/859-cyklotron#>
25. SALESSES, F., PEREZ, P., MAILLARD, A., 2016. Effect of dosimeter's position on occupational radiation extremity dose measurement for nuclear medicine workers during ¹⁸F-FDG preparation for PET/CT. *EJNMMI, Phys* 3, 16 (2016). Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s40658-016-0152-5>
26. *Seznam subjektů k dovozu, distribuci, vývozu a výrobě zdrojů ionizujícího záření*, 2024, [online]. SÚJB, [citováno 1.2.2024]. Dostupné z: https://sujb.gov.cz/aplikace/radon/?table=tab_g
27. *Shrnutí závěrečné zprávy – ORAMED (Optimalizace radiační ochrany zdravotnického personálu)*, 2013, [online]. Cordis, [citováno 12.2.2024]. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/id/211361/reporting>
28. SÚKUPOVÁ, L., 2012. *Stochastické a deterministické účinky záření*, [online]. [citováno 16.10.2023]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/deterministicke-a-stochasticke-ucinky-ozareni/>
29. ŠABATA, L., 2019. *Nukleární medicína – technické základy: přístrojová a výpočetní technika v nukleární medicíně, základy radiofarmak a specifika radiační ochrany v nukleární medicíně*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, 2019, s.102. ISBN 978-80-7394-734-7.
30. ŠTĚPÁN, J., 2016. *Balení a přeprava radiofarmak*, [online]. Čes. slov. Farmacie, [citováno 7.10.2023]. Dostupné z:

<https://www.prolekare.cz/casopisy/ceska-slovenska-farmacie/2016-3-10/xxxviii-pracovni-dny-radiofarmaceuticke-sekce-ceske-spolecnosti-nuklearni-mediciny-cls-jep-59517>

31. ŠTĚPÁN, J., 2016. *Balení a přeprava radiofarmak*, [online]. LF MU, [citováno 6.10.2023]. Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/~jirs/technology/Transport_of_radiopharmaceuticals.pdf
32. VANHAVERE, F., CARINOU, E., DONADILLE, L., GINJAUME, M., JANKOWSKI J., RIMPLER, A., SANS MERCE, M., *An overview on extremity dosimetry in medical applications*, Radiation Protection Dosimetry, Svazek 129, Vydání 1-3, březen–duben 2008, strany 350–355, ISSN: 1742-3406, Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn149>
33. WRZESIEN, M., OLSZEWSKI, J., JANKOWSKI, J., 2008. *Vystavení rukou pracovníkům nukleární medicíny ionizujícímu záření*, Radiation Protection Dosimetry, Svazek 130, Vydání 3, strany 325–330, Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn057>

Seznam použitých zkratk:

μSv – Mikrosievert

ALARA – As Low As Reasonably Achievable

CSOD – Celostátní služba osobní dozimetrie SÚJB

ČB – České Budějovice

DOM – Dávkové optimalizační meze

DRÚ – Diagnostická referenční úroveň mSv milisievert

FDG – Fluorodeoxyglukóza

$H_{p(10)}$ - Osobní dávkový ekvivalent v hloubce tkáně 10 mm

H_T – Ekvivalentní dávka

IAEA – International Atomic Energy Agency

ICRP – International Commission on Radiological Protection

IRPA – International Radiation Protection Association

IZ – Ionizující záření

kBq, MBq, GBq – kilobecquerel, megabecquerel, gigabecquerel

KP – Kontrolované pásmo-

ONM – Oddělení nukleární medicíny Nemocnice České Budějovice a.s

PET – Pozitron emisní tomografie

RA – Radiologický asistent

RF – Radiofarmaka

RMÚ – Radiační mimořádná událost

RP – Radiační pracovník

Sb. - Sběrka zákonů

SP – Sledované pásmo

SPECT – Single photon emission computed tomography

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

TLD – Termoluminiscenční dozimetr

Seznam obrázků

Obrázek 1 Označení vozidla na převoz RF

Obrázek 2 Syntetizační modul KitLab pro přípravu RF značených Ga^{68} v laminárním boxu

Obrázek 3 Materiálová propust RF mezi přípravnou a aplikační místností

Obrázek 4 Stínění lahvičky pro RF

Obrázek 5 Poloautomatický aplikátor RF

Seznam tabulek

Tabulka 1 Běžně používané PET radionuklidy

Tabulka 2 Přehled obecných limitů, limitů pro radiační pracovníky, učně a studenty

Tabulka 3 Zpracovaná aktivita v GBq na celém ONM ČB v měsíci listopad v jednotlivých letech

Tabulka 4 Zpracovaná aktivita v GBq na celém ONM ČB v měsíci únor v jednotlivých letech

Tabulka 5 Výsledky měření kumulativní ekvivalentní dávky H_T na prsty prstýnkovým dozimetrem – listopad 2023

Tabulka 6 Výsledky měření kumulativní ekvivalentní dávky H_T na prsty prstýnkovým dozimetrem – únor 2024

Tabulka 7 Hodnoty zpracovaných aktivit v GBq pro PET RF v referenčních měsících listopad 2023 a únor 2024

Tabulka 8 Hodnoty aplikovaných aktivit v GBq pro PET RF v referenčních měsících listopad 2023 a únor 2024

Seznam grafů

Graf 1 Zpracovaná aktivita v GBq na celém ONM ČB

Graf 2 Zpracovaná aktivita v GBq pro PET na ONM ČB

Graf 3 Celková zpracovaná aktivita všech radionuklidů a zpracovaná aktivita pro PET na ONM ČB v GBq

Graf 4 Počet pracovníků při přípravě a aplikaci RF v referenčních měsících

Graf 5 Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty v mSv farmaceutických pracovníků (aktivita pro účely celého ONM ČB)

Graf 6 Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty v mSv aplikujících pracovníků (aktivita pro účely celého ONM ČB)

Graf 7 Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty farmaceutických pracovníků vztažená na jeden zpracovaný GBq (mSv/GBq)

Graf 8 Kolektivní ekvivalentní dávka H_T na prsty aplikujících pracovníků vztažená na jeden zpracovaný GBq (mSv/GBq)