



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Způsoby zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních a možnost jejich zneužití

Security Sources of Ionizing Radiation in Medical facilities and the Possibility of Abuse

Diplomová práce

Studijní program: Ochrana obyvatelstva
Studijní obor: Civilní nouzové plánování
Autor diplomové práce: Bc. Markéta Jenčová
Vedoucí diplomové práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

Kladno 2020



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jenčová** Jméno: **Markéta** Osobní číslo: **456509**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**
Studijní program: **Ochrana obyvatelstva**
Studijní obor: **Civilní nouzové plánování**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Způsoby zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních a možnost jejich zneužití

Název diplomové práce anglicky:

Security Sources of Ionizing Radiation in Medical facilities and the Possibility of Abuse

Pokyny pro vypracování:

Předmětem diplomové práce bude problematika způsobu zabezpečení a možnosti zneužití zdrojů ionizujícího záření v 5 vybraných zdravotnických zařízeních, a to ve Všeobecné fakultní nemocnici v Praze, Ústřední vojenské nemocnici v Praze, v Oblastní nemocnici v Kladně, a.s. a dalších dvou nemocnicích zřizovaných Krajským úřadem Středočeského kraje. V teoretické části bude řešena problematika zdrojů ionizujícího záření, příslušných právních předpisů spojených s jejich provozem a také možnosti zneužití k teroristickým účelům, včetně příkladů zneužití v historii. V praktické části bude řešeno vlastní zabezpečení zdrojů ve vybraných zdravotnických zařízeních, z hlediska jejich uskladnění a možného úniku či možnosti jejich odcizení. V další části práce bude provedena simulace použití špinavé bomby vytvořené ze zdrojů nacházejících se na vybraném pracovišti pomocí programu TEREX. Následně budou nasbíraná data vyhodnocena a budou navržena potřebná opatření k zabezpečení bezproblémového chodu zdravotnických zařízení a bude provedeno porovnání bezpečnostních opatření s jinými zařízeními podobného typu. Výsledkem výzkumu bude ucelený souhrn používaných zdrojů a jejich zabezpečení, bude vyhodnoceno případné zneužití zdrojů s možnými dopady na obyvatelstvo.

Seznam doporučené literatury:

- [1] NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, Medicínská biofyzika, ed. 2., zcela přepracované a doplněné, Praha: Grada Publishing, 2019, ISBN 978-80-271-0209-9
- [2] KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK, Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0168-9
- [3] KLENER, Vladislav (ed.), Principy a praxe radiační ochrany, Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000, ISBN 80-238-3703-6

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Petra Kadlec Linhartová

Datum zadání diplomové práce: **23.09.2019**

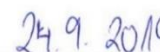
Platnost zadání diplomové práce: **18.09.2021**

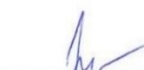

prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc., MBA, dr.h.c.
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. MUDr. Ivan Dylevský, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student(ka) bere na vědomí, že je povinnen(a) vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.


Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Způsoby zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních a možnost jejich zneužití vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

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

V Kladně dne 20.05.2020

.....
Bc. Markéta Jenčová

PODĚKOVÁNÍ

Velmi ráda bych touto cestou poděkovala paní Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D., za její trpělivost, cenné rady a konstruktivní připomínky při tvorbě mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat paní Ing. Petře Kadlec Linhartové za její vstřícnost a cenné rady. V neposlední řadě patří mé velké poděkování zdravotnickým zařízením, jejich vedení a pracovníkům za umožnění realizace praktické části práce.

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je problematika zdrojů ionizujícího záření se zaměřením na jejich využívání ve zdravotnictví, a naopak zneužívání v oblasti radiologického terorismu. Teoretická část práce se zabývá problematikou ionizujícího záření a jeho využití. Úvod je věnován účinkům záření na člověka. Dále jsou zmíněny principy radiační ochrany a legislativa, jejíž dodržování je v této oblasti klíčové. Podstatná část práce se věnuje zdrojům ionizujícího záření používaným ve zdravotnických zařízeních v oblastech nukleární medicíny, radioterapie a radiodiagnostiky. Poslední část teoretického úseku je zaměřena na zabezpečení těchto zdrojů a možnosti jejich zneužití ve formě radiologických zbraní a terorismu.

Praktická část práce je vytvořena z údajů získaných ve vybraných zdravotnických zařízeních. Jedná se o informace o zdrojích, které se nachází na odděleních nukleární medicíny, radioterapie a radiodiagnostiky. Je popsán přehled těchto zdrojů s doplňujícími informacemi o opatřeních, která jsou zavedena s ohledem na nepovolaný přístup ke zdrojům a možnosti jejich odcizení a zneužití. V druhé části je vytvořena simulace použití tzv. „špinavé bomby“ na měkký cíl v podobě vybraného zdravotnického zařízení. Výbuch nástražného výbušného zařízení se směsí radioaktivních látek je vytvořen v softwarovém programu TEREX, který dokáže ze vstupních dat od uživatele simulovat mimořádnou událost v podobě útoku radiologickou zbraní. Na základě nasbíraných dat je provedeno vyhodnocení zabezpečení zdrojů ionizujícího záření a možnosti jejich zneužití.

Klíčová slova

Zdroje ionizujícího záření; zdravotnická zařízení; zabezpečení; opatření; zneužití

ABSTRACT

The subject of the thesis is the issue of sources of ionizing radiation focused on their use in health care, and, on the other hand, their abuse in radiological terrorism. The theoretical part of the work is aimed to the topic of ionizing radiation and its use. The first part deals with the effect of radiation on human being. Next, the principles of radiation protection and legislation, whose compliance is crucial, are mentioned. A substantial part of the work deals with sources of ionizing radiation used in medical facilities in the fields of nuclear medicine, radiotherapy and radio-diagnostics. The last part of the theoretical section is aimed to the security of these resources and the possibility of their misuse in the form of radiological weapons and terrorism.

The practical part of the work is based on data obtained in the selected medical facilities. It concerns with the sources found in the departments of nuclear medicine, radiotherapy and radio-diagnostics. An overview of these resources and additional information on the measures that are introduced with regard to unauthorized access to resources and the possibility of their theft and misuse is described. In the second part the use of so-called "dirty bomb" on a soft target in the form of a selected medical device is simulated. The explosion of a booby-trapped explosive device with a mixture of radioactive substances is created in the TEREX software program. This program is able to create a major emergency in the form of an attack with a radiological weapon from user's input data. Based on the data collection, the evaluation of the security of ionizing radiation sources and the possibility of their misuse is performed.

Keywords

Sources of ionizing radiation; medical facilities; security; measures; abuse

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce a hypotézy	11
3	Přehled současného stavu.....	12
3.1	Biologické účinky ionizujícího záření.....	12
3.1.1	Projevy deterministických (tkáňových) účinků.....	14
3.1.2	Akutní nemoc z ozáření	15
3.1.3	Kombinované radiační poškození	16
3.1.4	Ostatní časně a pozdní projevy deterministických účinků	17
3.2	Způsoby ozáření a kontaminace	18
3.3	Cíle a principy radiační ochrany	19
3.4	Legislativa v oblasti radiační ochrany	20
3.5	Zdroje ionizujícího záření používané ve zdravotnictví	23
3.5.1	Kategorizace zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních	24
3.5.2	Kategorizace pracovišť ve zdravotnických zařízeních	24
3.5.3	Kategorizace pracovišť se zdroji ionizujícího záření do kategorie ohrožení.....	25
3.5.4	Vymezení kontrolovaného a sledovaného pásma na pracovišti se zdroji ionizujícího záření	25
3.5.5	Zdroje ionizujícího záření v nukleární medicíně.....	26
3.5.6	Zdroje ionizujícího záření v radiodiagnostice	28
3.5.7	Zdroje záření v radioterapii.....	29
3.6	Zajištění radiační ochrany ve zdravotnických zařízeních	31

3.7	Zabezpečovací systém u zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních	33
3.7.1	Kategorizace radionuklidových zdrojů pro účely zabezpečení ..	35
3.7.2	Zabezpečení radionuklidových zdrojů 1. až 3. kategorie	35
3.8	Radiologické zbraně a radiologický terorismus.....	38
3.8.1	Radiologické zbraně a jejich rozdělení.....	39
3.8.2	Historie použití radiologických zbraní a otázka jejich vlastnictví	41
3.8.3	Pravděpodobné zóny a účinky útoku radiologickými zbraněmi	42
3.8.4	Zdroje radioaktivního materiálu vhodné k zneužití se zaměřením na zdravotnická zařízení.....	45
3.8.5	Odhalování radiologického terorismu a boj proti jeho přípravě	46
3.8.6	Mimořádné události se zdroji ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních.....	47
4	Metodika.....	51
5	Výsledky.....	53
5.1	Fakultní nemocnice v Motole.....	54
5.1.1	Klinika nukleární medicíny a endokrinologie 2. LF UK a FN Motol	54
5.2	Oblastní nemocnice Kolín, a.s.....	57
5.2.1	Radiodiagnostické oddělení	57
5.2.2	Oddělení nukleární medicíny.....	59
5.3	Oblastní nemocnice Příbram, a.s.	61
5.3.1	Oddělení zobrazovacích metod	61
5.3.2	Oddělení nukleární medicíny.....	62

5.4	Všeobecná fakultní nemocnice v Praze	65
5.4.1	Radiodiagnostická klinika.....	65
5.4.2	Onkologická klinika.....	66
5.5	Nemocnice Jihlava, příspěvková organizace.....	67
5.5.1	Onkologické oddělení.....	67
5.6	Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace.....	68
5.6.1	Radiodiagnostické oddělení	68
5.6.2	Oddělení nukleární medicíny.....	69
5.6.3	Oddělení radiační onkologie	72
5.7	Simulace použití špinavé bomby	73
6	Diskuze	75
6.1	Zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve vybraných zdravotnických zařízeních	75
6.2	Možnost zneužití zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních k výrobě špinavé bomby.....	79
7	Závěr	90
8	Seznam použitých zkratk.....	91
9	Seznam použité literatury.....	93
10	Seznam použitých obrázků	100
11	Seznam použitých tabulek.....	101

1 ÚVOD

Zdroje ionizujícího záření hrají velkou roli v mnoha odvětvích a jsou nenahraditelné. Ve zdravotnictví to platí dvojnásob. Díky diagnostickým zařízením jsou lékaři schopni diagnostikovat nejrůznější zranění a onemocnění, v radioterapii zase záření likviduje nádorovou tkáň, kterou pomáhají v těle najít radiofarmaka používaná v nukleární medicíně. Každá mince má však dvě strany, stejně tak zdroje ionizujícího záření nemají jenom pozitivní účinky, ale i negativní, kdy se mohou stát neovladatelnými nebo mohou být zneužity k nelegálním účelům. K nejznámějším událostem z novodobé historie v souvislosti s radioaktivitou patří černobylská havárie nebo útoky na Hirošimu a Nagasaki. Nejen tyto události přispěly k tomu, že je nutné zabývat se otázkou ochrany a zabezpečení zdrojů ionizujícího záření a možnostmi jejich zneužití. Například radiologické zbraně v rukou teroristů by také mohly napáchat velké škody na majetku, životním prostředí a lidských životech. Samotné zdroje záření jsou používány v mnoha odvětvích a jejich velká část se vyskytuje právě ve zdravotnictví. Otázkou je, jak pravděpodobné jsou útoky zbraněmi, jako je „špinavá bomba“, a jaká úroveň ochrany zdrojů ve zdravotnických zařízeních je dostatečná k prevenci jejich odcizení za účelem zneužití k těmto útokům.

Teoretická část práce obsahuje přehled biologických účinků ionizujícího záření na lidský organismus, dále se zabývá radiační ochranou a příslušnou legislativou. Následně se věnuje zdrojům ionizujícího záření používaným ve zdravotnictví, včetně opatření a zabezpečení, které s jejich využíváním souvisí, a zabývá se i možnostmi jejich zneužití. Praktická část je věnována zdrojům záření ve zdravotnických zařízeních se zaměřením na jejich zabezpečení a také je věnován prostor problematice zneužití těchto zdrojů ve formě špinavé bomby.

2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

Hlavním cílem práce je zmapovat zdroje ionizujícího záření ve vybraných zdravotnických zařízeních se zaměřením na jejich zabezpečení. Především se jedná o popis opatření, která mají zabránit nepovolanému vstupu ke zdrojům, případně jejich odcizení a následnému zneužití. Sběr dat bude probíhat na vybraných oddělení radiodiagnostiky, oddělení radiační onkologie a oddělení nukleární medicíny. Následně proběhne vyhodnocení celkového zabezpečení zdrojů na vybraných odděleních včetně případného navržení přijetí dalších opatření. Bude posouzena a porovnána možnost zneužití zdrojů na jednotlivých odděleních.

Dalším cílem je vytvořit simulaci použití špinavé bomby v programu TEREX, kde by potenciálně mohly být použity radioaktivní látky nacházející se ve zdravotnických zařízeních.

Hypotézy:

- 1) Zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních je dostatečné.
- 2) Riziko zneužití zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních k výrobě špinavé bomby je minimální.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

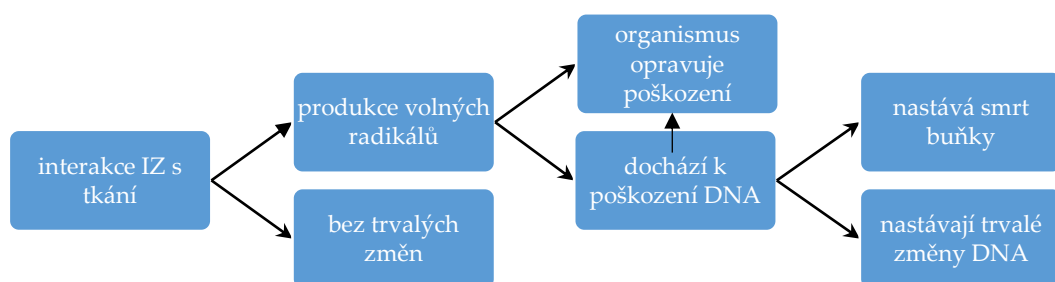
Nejdůležitějším ukazatelem správné činnosti systému ochrany obyvatelstva je zdraví obyvatel. Obecně na lidský organismus každý den působí různé vlivy, které pozitivně i negativně ovlivňují zdravotní stav jedince. Jedním z nich je i ionizující záření (IZ), se kterým se obyvatelstvo celého světa setkává v každodenním životě. Pokud IZ působí ve vyšších dávkách, má schopnost způsobit zlomy molekul DNA, tedy poškozovat buňky. Díky reparačním mechanismům je organismus schopný se bránit, ale pouze do určité míry. Je-li člověk vystaven působení IZ, vliv na jednotlivé tkáně a orgány závisí na mnoha faktorech [1].

3.1 Biologické účinky ionizujícího záření

Od té doby, co bylo IZ objeveno, a od začátku využívání jeho účinků v medicíně, průmyslu a dalších odvětvích, je již považováno za nepostradatelného pomocníka. Po určité době od jeho objevení bylo zjištěno, že IZ je za určitých okolností nebezpečné a způsobuje zdravotní komplikace až smrt. Na podkladě těchto zjištění bylo nutné zavést určitý soubor pravidel, který bude zaručovat kontrolu nad IZ a také omezí nežádoucí ozáření osob. A právě tehdy bylo vydáno první doporučení týkající se radiační ochrany (RO) Mezinárodním výborem pro ochranu před zářením X a radiem (International X-ray and Radium Committee – IXRPC), založeným v roce 1928. Díky vývoji technologií se celý systém ochrany před IZ modernizoval a zdokonaloval s cílem zajistit co nejvyšší stupeň ochrany obyvatelstva před negativními vlivy IZ. V dnešní době je jednou z nejdůležitějších organizací zabývajících se touto problematikou Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu (International Commission on Radiological Protection – ICRP), která vznikla z IXRPC v roce 1950. Její doporučení a pokyny jsou směřovány především na regulující orgány, organizace a jednotlivce odpovědné za RO. Na počátku studií zaměřených na

působení IZ na člověka nebyl brán ohled na rozdíl mezi akutními a chronickými biologickými účinky IZ. V 50. letech 20. století nastal velký rozvoj využívání IZ a bylo již nutné tyto účinky odlišit. Postupem času vznikla především snaha o zajištění co nejvyšší ochrany před IZ se současným dosažením co neefektivnějšího využití IZ v rámci všech jeho možných aplikací. Právě proto byl investován čas i finance do výzkumu, který se týkal biologických účinků na člověka, a to jak při ozáření vysokými, tak i nízkými dávkami. Díky těmto studiím byla dokázána značná odlišnost mezi těmito dvěma jevy a byly popsány rozdíly ve zdravotních účincích záření na člověka s ohledem na velikost absorbované dávky [1, 2].

Veškeré znalosti o IZ a jeho vlivu na obyvatelstvo jsou stále prozkoumávány a nejnovější poznatky jsou implementovány do aktuálních trendů v RO. V následujících odstavcích se budeme zabývat celkovým vlivem IZ na zdraví člověka, které jsou vyjádřeny deterministickými a stochastickými účinky. Na obrázku 1 je znázorněný proces, který probíhá při ozáření lidského organismu [1].



Obrázek 1 Schéma procesů v organismu od ozáření po konkrétní účinky [3].

Stochastické účinky jsou bezprahové účinky, jejichž pravděpodobnost stoupá s rostoucí dávkou. Jejich výskyt je podmíněn mutacemi buněk. Pravděpodobnost, že tyto účinky nastanou, je závislá na efektivní dávce absorbovaného IZ. U osob, které v minulosti čelily radiačnímu poškození, je možnost, že přetrvají ireverzibilní změny, které se v průběhu let projeví jako pozdní důsledky ozáření. Tyto změny jsou spojeny s hyperplazií a dystrofií tkání. Lze také nalézt genetické mutace u dětí, jejichž rodiče byli v minulosti ozáření. Mezi další projevy pozdní radiační patologie lze zahrnout nádorové postižení a zkrácení doby života. Existence prahové dávky, při jejímž překročení dojde k vyvolání konkrétních účinků na lidský organismus, je základem **deterministických (tkáňových) účinků**. Jsou podmíněny ztrátami v buněčných populacích, které hrají hlavní roli v životně důležitých procesech v těle. Míra účinků závisí na dávce, čím větší je, tím závažnější jsou účinky na zdraví člověka [3, 4].

3.1.1 Projevy deterministických (tkáňových) účinků

Pokud dojde k ozáření lidského organismu, nastává tzv. „nemoc z ozáření“. To, jak vážný průběh toto onemocnění bude mít, nejvíce záleží na absorbované dávce, dále také na druhu IZ, na časovém rozložení ozáření nebo na tom, zda záření působí na člověka uvnitř nebo vně organismu. Radiační poškození, které vzniká, dělíme na celotělové a lokální a z pohledu časového na akutní a chronické. K nejvýznamnějšímu poškození dochází při vysokých dávkách záření, kdy nastává rozvoj akutní nemoci z ozáření (ANO). Detailní rozbor onemocnění byl učiněn poté, co proběhl jaderný útok na japonská města (1945), který přinesl smrt lidí v důsledku ozáření. Poté se objevovaly jednotlivé případy ANO, kterou onemocněli lidé při nehodách v jaderných reaktorech, při ztrátě kontroly nad zdroji ionizujícího záření (ZIZ) nebo při černobylské havárii [1, 3].

3.1.2 Akutní nemoc z ozáření

Akutní nemoc z ozáření vzniká v důsledku ozáření celého organismu nebo jeho podstatné části rovnoměrným nebo relativně rovnoměrným rentgenovým, gama nebo neutronovým zářením. Proces ozáření je z časového hlediska krátký a jedná se o ozáření vnější. Samotná absorbovaná dávka musí být vyšší než 0,7 Gy. Z lékařského pohledu dochází k poškození červené kostní dřeně, epitelu tenkého střeva a centrální nervové soustavy. Podle toho, do jaké míry jsou tyto orgánové systémy postiženy, dělíme ANO do 4 základních klinických forem a jejich kombinací. V tabulce 1 jsou zobrazeny klinické formy a stupně závažnosti ANO [3].

Tabulka 1 Klinické formy a stupně závažnosti ANO.

Dávka (Gy)	Klinická forma	Stupeň závažnosti	Odhad vývoje onemocnění	Úmrtnost (%)	Doba úmrtí (dny)
0,7–2	Dřeňová	I (lehký)	Úplně příznivý	0	–
2–4		II (střední)	Relativně příznivý	5	40–60
4–6		III (těžký)	Poměrně příznivý	50	30–40
6–10			Nepříznivý	95	10–20
10–20	Střevní	IV (velmi těžký)	Úplně nepříznivý	100	8–16
20–50	Toxemická			100	4–7
nad 50	Cerebrální			100	1–3

Nejlehčí forma se nazývá **dřeňová** a setkáváme se s ní u celotělového ozáření dávkou vyšší než 0,7 Gy. Nastává-li tato forma ANO, její klinické příznaky a celkový postup nemoci je nejvíce zřetelný v porovnání s ostatními. Typickým projevem je poškození kostní dřeně, které s sebou přináší infekční komplikace, krvácení a anémii. Pokud postižený neobdrží příliš vysoké dávky, po 6–8 týdnech se jeho zdravotní stav lepší díky dostatečnému zachování kmenových buněk, kterými se postupně obnovuje krvetvorba. Další forma je **střevní**. Ta nastává, pokud je absorbovaná dávka vyšší než 10 Gy. Klinický obraz nemoci záleží na míře poškození sliznice tenkého střeva, tato forma ANO je již 100% letální. Tím, že je organismus vystaven vyšším dávkám záření, se první příznaky nemoci projevují dříve a jsou výraznější než u formy hematologické. Po ozáření dávkou mezi 20 a 50 Gy nastává **toxemická** (cévní, kardiovaskulární) forma ANO. Projevuje se hemodynamickými poruchami, které mají závažný průběh. U osob, které byly vystaveny tak vysoké dávce záření, probíhá pouze symptomatická léčba, která má za účel především snížení bolestivých projevů nemoci. Smrt nastává 4.–7. den po ozáření. U celotělového ozáření dávkou vyšší než 50 Gy se rozvíjí cerebrální radiační syndrom, který je typický pro **cerebrální** formu ANO. Stejně tak jako u předchozí formy ANO probíhá pouze symptomatická terapie a smrt nastává do 48 hodin po ozáření [3].

3.1.3 Kombinované radiační poškození

Tento stav nastává při kombinaci působení pronikavé radiace a nějakého neradiačního procesu, jako je například tlaková vlna nebo tepelné záření při výbuchu. U postižené osoby se tedy projevují příznaky typické pro příslušné fáze ANO nebo jiného radiačního poškození společně s důsledky, jako jsou zlomeniny, popáleniny a dalších přidružená zranění, která nejsou způsobena radiací. Z hlediska léčby je zásadní, která z „komponent“ převažuje, tedy která postiženého nejvíce ohrožuje na životě. Právě z důvodu kombinace zdravotního postižení je náročnější průběh léčby a následné rekonvalescence, pokud

postižený událost přežije. U kombinovaného radiačního poškození můžeme identifikovat 4 fáze průběhu, a to prodromální, fázi převahy neradiační složky, fázi převahy radiační složky a fázi rekonvalescence [3].

3.1.4 Ostatní časné a pozdní projevy deterministických účinků

K lokálnímu radiačnímu poškození patří poškození kůže a sliznic, ke kterému dochází většinou v důsledku radiačních nehod a havárií. Vyskytuje se již po ozáření dávkami okolo 3 Gy (pro gama záření). Míra radiačního poškození kůže závisí na obdržené dávce, podle níž rozlišujeme 4 stupně závažnosti (I.–IV. stupeň). Jedná se o stupeň lehký při dávkách 8–12 Gy, střední (12–30 Gy), těžký (30–50 Gy) a velmi těžký (nad 50 Gy). Všechny stupně lze dále rozdělit na jednotlivé fáze poškození, a to na prvotní erytém, latentní a manifestní fázi, fázi odeznívání poškození a fázi přetrvávajících důsledků. Jednotlivé fáze se liší především časovou periodou projevů. Fáze rozvoje nemoci se u I. st. projevuje sekundárním erytémem, u II. st. se k němu přidává otok kůže a puchýře, III. st. s sebou nese navíc bolestivost, vředy a hnisavé komplikace a u IV. st. nastává lokální krvácení až nekróza [1, 3].

Kvůli vysoké citlivosti zárodku a plodu je rizikové ozáření těhotné ženy. K nevratným změnám může dojít již od dávek 0,1 Gy. Velkou roli zde hraje to, v jakém stádiu těhotenství se žena nachází. První až druhý týden těhotenství se řídí podle hesla „všechno nebo nic“, kdy buď zůstane zárodek v nepozměněném stavu, nebo zanikne. Třetí až osmý týden znamená riziko vzniku malformací při překročení absorbované dávky 0,1 Gy. V druhém až osmém měsíci je možnost vzniku vývojových chorob či mentálního postižení (od 0,2 Gy). Celkově lze konstatovat, že ozářením plodu v děloze také stoupá pravděpodobnost vzniku stochastických účinků, jako jsou maligní nádory nebo leukémie. V průběhu let po ozáření se mohou objevit nenádorová pozdní poškození, která vznikají po dlouhodobější expozici záření na lidský

organismus, a je zde také dávkový práh. Řadí se sem chronický zánět kůže, který se dříve vyskytoval především u lékařů, jejichž náplní práce bylo provádění RTG vyšetření. Projevem tohoto onemocnění byla velmi suchá, popraskaná kůže s lámavostí a rýhováním nehtů. Dalším příkladem pozdních projevů je zákal oční čočky [1, 3].

3.2 Způsoby ozáření a kontaminace

Při styku s IZ může dojít k zevnímu i/nebo vnitřnímu ozáření, i k zevní či vnitřní kontaminaci. **Zevní ozáření** je buď celotělové, nebo může dojít ozáření větší části těla či ozáření jednotlivých částí. Může nastat v rámci lékařské aplikace záření nebo při mimořádných událostech (MU). Ochrana proti němu spočívá v co nejkratší době působení záření, v použití vhodných stínících materiálů a v co největší vzdálenosti od zdroje záření. Kontaminace radionuklidy znamená, že na povrchu nebo uvnitř organismu jsou přítomny radionuklidy. K této kontaminaci může dojít při MU s přítomností IZ, nebo např. při jaderném výbuchu. To, jaké dopady bude mít ozáření nebo přítomnost radionuklidů vně, ale především uvnitř organismu, záleží nejen na fyzikálních vlastnostech záření nebo radionuklidu (RN), ale také na chemických nebo metabolických charakteristikách RN. **Zevní** neboli povrchová **kontaminace** je znečištění vnějších částí tělesného povrchu, kůže a sliznic určitými ZIZ. Tyto kontaminanty můžeme rozdělit na přírodní (např. ^{40}K , ^{14}C , ^{226}Ra) a na uvolněné při MU (např. ^{131}I , ^{137}Cs , ^{239}Pu). Při MU spojených s jadernou energetikou je směs štěpných produktů složena hlavně ze zářičů beta a gama. Záření beta proniká pouze do hloubky několika milimetrů, vyvolává především povrchová poškození kůže, očních spojivek nebo sliznic dutin ústních a nosních. To, jak velké poškození nastane, je ovlivněno odlišnou radiosenzitivitou kůže a dalšími vlastnostmi kůže, jako je aktuální stav kůže (povrchová zranění) a dále přítomnými RN. **Vnitřní kontaminace způsobuje vnitřní ozáření** a představuje inhalační kontaminaci

(vdechování plynů a aerosolů RN se vzduchem), dále kontaminaci zažívacími cestami (ingesce kontaminovaných tekutin, potravin, vykašlaných radioaktivních látek z horních dýchacích cest do úst) nebo vstupem poraněnou kůží či sliznicemi. Mohlo by k ní dojít např. při použití radiologických zbraní. Záření alfa má sice krátký dolet, ale při vnitřní kontaminaci se na minimálním objemu celá energie absorbuje, a tak způsobuje biologická poškození tkání a orgánů. Ochrana před vnitřní kontaminací spočívá především v používání osobních ochranných pomůcek, jako jsou gumové rukavice, ochranný oděv nebo brýle, bohužel při mimořádných událostech těmito prostředky přímo zasažené obyvatelstvo nedisponuje. Ochranná opatření, která jsou zaváděna, mají za cíl snížit působení RN na lidský organismus na co nejkratší dobu [1, 3, 4, 5, 6].

3.3 Cíle a principy radiační ochrany

K prvořadým cílům RO patří zabránit vzniku deterministických účinků a omezit pravděpodobnost vzniku stochastických účinků na takovou úroveň, která bude přijatelná pro jedince i společnost. Pro očekávané expoziční situace jsou stanoveny tzv. principy RO. Mezi ně patří princip zdůvodnění, optimalizace ochrany, aplikace dávkových limitů a zajištění. **Princip zdůvodnění** se týká využívání IZ pouze pro takové účely, které budou společensky přijatelné a budou přinášet benefity, jež budou převažovat nad negativními účinky záření. Při hodnocení tohoto kritéria v rámci zavádění nových zdrojů nebo provádění činností spojených s využitím ZIZ je důležitá analýza a hodnocení přínosů, nákladů a případných negativních vlivů. V tomto procesu má zásadní roli ochrana před zářením. Jednou z hlavních otázek je, zda existuje jiná alternativa se stejným nebo podobným ziskem. Mají-li být lidé vystaveni působení záření, to, jaký bude jejich počet, jaké obdrží dávky nebo jak často budou tomuto záření vystaveni, má být vždy regulované. V tom spočívá **princip optimalizace ochrany**. Zároveň má být těchto expozic co nejméně, s ohledem

na společenské a ekonomické požadavky. Lze tedy říct, že zde má být snaha o udržení co nejvyššího stupně RO v rámci aktuálně řešené problematiky a vždy má výrazně převažovat užitek nad potenciální škodou. V souvislosti s optimalizací ochrany se zavedl princip ALARA („as low as reasonably achievable“). V praxi lze dodržování tohoto systému zaznamenat na každém pracovišti s ZIZ, kde jsou zaváděna personální, organizační nebo např. technická opatření. Ta přispívají k takovému chodu pracoviště, které bude v souladu s platnými pravidly ukotvenými v legislativě, ale i s obecně platnými principy RO. Dalším principem je **aplikace dávkových limitů**, kdy ICRP vydává doporučené limity, které se vždy vztahují k určité skupině lidí (obyvatelstvo, pracovníci). Veškerá činnost v rámci plánovaných expozičních situací se ZIZ by měla být provedena tak, aby tyto limity nebyly za žádných okolností překročeny. Tyto limity zavádí příslušný orgán, který se při jejich stanovení řídí mezinárodními doporučeními. Jako poslední je **princip zajištění**. Jedná se o princip, který byl vzat v úvahu vzhledem k bezpečnostním hrozbám posledních desetiletí. Potřeba zavedení tohoto principu je způsobena možností zneužití ZIZ k teroristickým nebo jiným nelegálním účelům. Požadavkem tedy je, aby nedocházelo ke ztrátě kontroly nad zdroji, která by mohla být způsobena zneužitím nebo odcizením ZIZ ze strany neoprávněných osob. Zajištění bezpečnosti zdrojů se tedy vzhledem k bezpečnostní situaci ve světě stává důležitým faktorem, na který se musí brát ohled [1, 4].

3.4 Legislativa v oblasti radiální ochrany

Radiační ochrana v České republice vychází z koncepce platící v Evropě i ve světě. Tato koncepce je sestavena z doporučení, která vydává ICRP a také z norem, které vytváří Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) ve spolupráci s Evropskou unií (EU) v rámci Evropského společenství pro atomovou energii (Euroatom). **Mezinárodní agentura pro atomovou energii**

je organizační celek, který vznikl z mezivládní spolupráce v rámci Organizace spojených národů (OSN) pro vědu a technologii v oblasti mírového využívání jaderné energie. Tato organizace působí v souladu se Smlouvou o nešíření jaderných zbraní a jejím hlavním cílem při založení bylo prospěšné využití atomové energie k mírovým, zdravotním a dalším účelům, které mají vždy stejný cíl, a to podpořit pozitivní vývoj světa s využitím této energie. Česká republika se stala jejím členem v roce 1993. Nejvýznamnější činností v rámci organizace je tzv. záruková činnost v souladu se Smlouvou o nešíření jaderných zbraní, která je zaměřena na podporu využívání atomové energie k mírovým účelům a kontrolu, zda nedochází ke zneužívání energie. Mezi ČR a MAAE jsou uzavřeny mezinárodní smlouvy, které jsou významné při využívání jaderné energie. V den, kdy se ČR stala členem EU, se také zavázala k dodržování Smlouvy Euroatom a aktů, které přijaly orgány **Evropského společenství pro atomovou energii** na jejím základě. Toto společenství mělo za cíl vytvořit takové prostředí, kde se bude moci vytvářet a vyvíjet jaderný průmysl, ale také bude možnost jeho kontroly proti zneužití. Prostředky k dosažení těchto cílů jsou především podpora jaderného výzkumu, zajištění ochrany zdraví obyvatel a pracovníků se ZIZ (stanovení bezpečnostních standardů RO, mechanismy kontroly) a především vytvoření systému kontroly, aby nebyl jaderný materiál zneužíván k jiným účelům, než je stanoveno. Gestorem pro oblast RO a kontroly a evidence nakládání s jadernými materiály je v České republice **Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB)**, který v rámci vydávání legislativních předpisů implementuje všechny požadavky ze strany Euroatomu. Jeho hlavním úkolem je výkon státní správy a dozorní činnosti na pracovištích se ZIZ, dále i monitorování ozáření osob, vedení přehledu ZIZ na celém území ČR a v neposlední řadě i kontrola nad dodržováním práv a povinností vyplývajících z předpisů týkajících se RO. Právě ty nejdůležitější z nich z hlediska potřeb naší práce si v následujících odstavcích představíme [7, 8, 9].

Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon (dále jen Atomový zákon) se věnuje mírovému používání jaderné energie, stanovení podmínek pro činnosti při expozičních situacích, radioaktivnímu odpadu a vyhořelému palivu, zvládnutí radiacní mimořádné události (RMU), zabezpečení jaderného zařízení, jaderného materiálu a ZIZ, požadavkům k zajištění nešíření jaderných zbraní a výkonu státní správy v oblasti mírového využívání jaderné energie a IZ [9, 10].

Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje je klíčová pro potřeby diplomové práce, protože se zabývá problematikou ZIZ. Jeden ze zásadních dílů pojednává o kategorizaci ZIZ, pracovišť a ZIZ. Pro přehled o ZIZ slouží evidence ZIZ, kterou provádí držitel povolení a registrant. K zabezpečení ZIZ je nutný soustavný dohled nad radiační ochranou. Vyhláška stanovuje dohlížející osobu a také osobu s přímým dohledem nad RO a jejich povinnosti. Ke stanovení míst, kde se RO sleduje, je určené **kontrolované pásmo (KO)** a **sledované pásmo (SP)**, které vyhláška definuje. Nezbytnou součástí vyhlášky je část zabývající se bezpečným provozem pracoviště s generátorem záření nebo pracoviště s otevřeným a uzavřeným RN zdrojem. Jedna z posledních částí vyhlášky se věnuje nehodovým expozičním situacím. Vyjadřuje referenční úrovně, které se za takových situací využívají, dále uvádí ochranná patření, která se používají při nehodách se ZIZ, a také se zabývá otázkou odstranění následků nehod. Na samém konci hlavní části vyhlášky se nachází část, která věnuje pozornost zabezpečení ZIZ. Zaměřuje se na postupy zabezpečení, prvky systému zabezpečení a celý plán zabezpečení a na závěr i na ochranu informací o těchto režimových opatřeních [10].

Ve **vyhlášce č. 359/2016, Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události** najdeme pravidla, podle kterých se pracoviště se ZIZ dělí do kategorií dle možného ohrožení. Kromě toho, že jsou zde definovány postupy, podle kterých se hodnotí RMU (analýza vzniku RMU, připravenost k odezvě,

ověřování připravenosti), jsou zde také popsány postupy a opatření k organizaci zdravotnického zajištění celé události. Z dalších vyhlášek jsou z pohledu problematiky zabezpečení ZIZ důležité tyto [9]:

- **vyhláška č. 409/2016 Sb.**, o činnostech zvláště důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, zvláštní odborné způsobilosti a přípravě osoby zajišťující radiační ochranu registranta;
- **vyhláška č. 377/2016 Sb.**, o požadavcích na bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem a o vyřazování z provozu jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie;
- **vyhláška č. 361/2016 Sb.**, o zabezpečení jaderného zařízení a jaderného materiálu;
- **vyhláška č. 360/2016 Sb.**, o monitorování radiační situace;
- **vyhláška č. 162/2017 Sb.**, o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle Atomového zákona.

3.5 Zdroje ionizujícího záření používané ve zdravotnictví

Zdroje ionizujícího záření používané ve zdravotnictví můžeme rozdělit do dvou kategorií, a to na elektronické ZIZ a radioaktivní zářiče. První jmenované ZIZ jsou zářiče, kde IZ vzniká v důsledku elektromagnetického urychlování částic s kladným znaménkem. Jedná se o rentgenové trubice používané v radiodiagnostice a urychlovače částic používané v radioterapii (RT). Při radioaktivních přeměnách jader vznikají radioaktivní zářiče, které byly především v minulosti používané v radioterapii (cesiové a kobaltové ozařovače), dnes jsou již téměř úplně nahrazeny lineárními urychlovači. Dále se také používají v brachyterapii a především v nukleární medicíně (NM), kde jsou hlavním zdrojem záření pro diagnostické i terapeutické účely. Z hlediska emitované energie můžeme rozdělit ZIZ na nízko a vysokoenergetické zdroje. Do první skupiny řadíme ty, které produkují částice či fotony o energiích jednotek,

desítek či stovek keV. Patří sem rentgenky používané v radiodiagnostice a většinu radionuklidů. Vysokoenergetické zdroje s kvanty záření o energiích jednotek, desítek či stovek MeV, GeV či až TeV jsou vysokoenergetické urychlovače používané v RT, či zde najdeme i zástupce radionuklidů např. v podobě ^{60}Co [2, 4, 11].

3.5.1 Kategorizace zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních

Zdroje ionizujícího záření dělíme na nevýznamné, drobné, jednoduché, významné a velmi významné. V medicíně se nejvíce využívají jednoduché a významné zdroje. K jednoduchým ZIZ řadíme zubní rentgen, kabinové RTG zařízení, kostní denzitometr nebo otevřené radionuklidové zářiče a radionuklidové generátory $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. K významným ZIZ řadíme generátory záření určené k radioterapii nebo pro radiodiagnostiku, urychlovače částic pro lékařské ozáření, zařízení obsahující uzavřené RN zářiče určené k radioterapii (teleterapie, brachyterapie), ZIZ určený k radioterapii protony, neutrony a jinými těžkými částicemi nebo otevřený radionuklidový zářič ^{131}I pro léčbu onemocnění štítné žlázy [12].

3.5.2 Kategorizace pracovišť ve zdravotnických zařízeních

Pracoviště, která pracují se ZIZ, dělíme do 4 kategorií. Pracoviště I. kategorie je pracoviště s kostním denzitometrem, zubním nebo kabinovým RTG zářičem nebo pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči. Pracoviště II. kategorie jsou vybavena rentgenovým zařízením určeným k radiodiagnostice nebo k radioterapii, dále sem řadíme pracoviště s mobilním ozařovačem obsahující uzavřený radioaktivní zdroj a pracoviště s otevřeným radionuklidových zářičem (generátor $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$). Pracoviště III. kategorie disponují urychlovačem částic pro ozařování pacientů, patří sem i pracoviště se zařízením obsahujícím

uzavřený RN zdroj, které je určeno k radioterapii (brachyterapie). Do IV. kategorie neřadíme žádné pracoviště ve zdravotnických zařízeních [12].

3.5.3 Kategorizace pracovišť se zdroji ionizujícího záření do kategorie ohrožení

Podle prováděcí vyhlášky č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události se jaderná zařízení, pracoviště se zdroji ionizujícího záření nebo činnosti v rámci expozičních situací dělí do kategorií ohrožení (A–D). Zdravotnická zařízení jsou řazena dle §2, odst. (1), písm. c) a d) do kategorie C a D. *„Do kategorie ohrožení C se zařazuje jaderné zařízení nebo pracoviště se zdroji ionizujícího záření, na němž nemůže vzniknout radiační havárie, do kategorie ohrožení D se zařazuje činnost v rámci expozičních situací, včetně nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje nebo přepravy radioaktivní nebo štěpné látky, která může být příčinou vzniku radiační nehody nebo radiační havárie na nepředvídatelném místě, a tím i havarijního ozáření.“*

3.5.4 Vymezení kontrolovaného a sledovaného pásma na pracovišti se zdroji ionizujícího záření

Kontrolované pásmo se vymezuje na pracovišti se ZIZ, kde lze předpokládat, že by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně nebo že by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než 3/10 limitu pro radiačního pracovníka pro kůži anebo končetiny nebo 15 mSv pro oční čočku. Sledované pásmo se nachází na pracovišti se ZIZ, kde lze předpokládat, že by efektivní dávka mohla být vyšší než 1 mSv ročně nebo by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než 1/10 limitu ozáření pro radiačního pracovníka pro oční čočku, kůži a končetiny. Ve vyhlášce č. 422/2016 Sb. je dále stanoven rozsah KP s SP, rozsah omezení a podmínek práce v KP a způsob zajištění RO na tomto místě, včetně příslušné dokumentace. Také je zde určeno, jakým způsobem mají být tato pásma vymezena. Jedná se o umístění znaku radiačního nebezpečí, upozornění: *"Kontrolované pásmo*

se zdroji ionizujícího záření, nepovolaným vstup zakázán“ a umístění údajů o charakteru zdroje ionizujícího záření včetně souvisejících rizik na viditelná místa na pracovišti. U sledovaného pásma je odlišné pouze upozornění, které zní: "Sledované pásmo se zdroji ionizujícího záření", ostatní požadavky jsou stejné [10, 12].

3.5.5 Zdroje ionizujícího záření v nukleární medicíně

V nukleární medicíně se především používají otevřené radionuklidové zdroje. Jsou to zdroje, které nesplňují podmínky stanovené pro uzavřený zářič. Definice uzavřeného zářiče najdeme v Atomovém zákoně § 60, odst. (1): „Pro účely tohoto zákona se rozumí a) Uzavřeným radionuklidovým zdrojem radionuklidový zdroj, jehož úprava zapouzdřením nebo ochranným překryvem zajišťuje zkouškami ověřenou těsnost a vylučuje za předvídatelných podmínek použití a opotřebování únik radionuklidu“. V poměru s ostatními obory ve zdravotnictví, které využívají ZIZ, je v NM jednotlivých zdrojů největší množství. Radionuklidy používané na odděleních NM jsou vyráběny v jaderných reaktorech nebo v urychlovačích. Přímo na oddělení jsou poté dováženy specializovanými firmami buď radionuklidy připravené k přímému použití, nebo radionuklidové generátory, z kterých si radionuklidy získávají sami pracovníci oddělení. Nejčastěji používaným RN generátorem je $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, z něhož je získáváno $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$, který poskytuje radioaktivní $^{81\text{m}}\text{Kr}$. V tabulce 2 jsou uvedeny nejčastěji používané otevřené RN s uvedením některých charakteristických znaků. Zdrojem IZ je i odpad, který na pracovišti NM vzniká. Jedná se o pevné radioaktivní odpady ve formě lahvíček, stříkaček a jehel, které přišly do kontaktu s radioaktivní látkou. Ty jsou přechodně uloženy v tzv. vymíracích místnostech na pracovištích, odkud jsou poté přesunuty k dalšímu zpracování. Kapalné radioaktivní odpady vznikají např. po radioterapeutickém podání ^{131}I . Specializovaná pracoviště mají zřízen oddělený kanalizační systém, kdy veškeré kontaminované tekutiny i pevné látky odcházejí do vymíracích nádrží,

kde se po určitou dobu skladují a následně vypouští do městské kanalizace [5, 13, 14].

Tabulka 2 ZIZ nejčastěji používané v nukleární medicíně [13, 15].

Radionuklid	Energie fotonů (keV)	Poločas přeměny	Typická aplikace
¹³¹ I	365 (82 %) 637 (7,2 %)	8,04 dne	Zobrazení/terapie
⁸⁹ Sr	–	50,7 dne	Terapie
⁹⁰ Y	–	2,67 dne	Terapie
^{99m} Tc	140,5 (89 %)	6,02 hod	Zobrazení
^{81m} Kr	190	13,6 s	Zobrazení
⁶⁷ Ga	93 (39 %) 185 (21 %) 300 (17 %)	3,26 dne	Zobrazení
¹²³ I	159 (83,3 %)	13,2 hod	Zobrazení
¹¹¹ In	171 (90 %) 245 (94 %)	2,8 dne	Zobrazení
²⁰¹ Tl	68–80 KeV (záření X)	3,04 dne	Zobrazení
¹⁸ F	511 (200 %)	110 min	Zobrazení
¹²⁵ I	27–30 KeV (záření X)	60 dní	Zobrazení
⁸² Rb	776 (13,4 %)	1,25 min	Zobrazení

Ostatní ZIZ na pracovištích nukleární medicíny jsou zastoupeny hybridními přístroji, které kombinují SPECT (Single-Photon Emission Computed

Tomography) nebo PET (Positron Emission Tomography) s CT (Computed Tomography) (SPECT/CT, PET/CT). Tyto přístroje umožňují sledovat anatomickou i funkční strukturu tkáně, a lze tak získat kvalitnější diagnostický obraz. Dalšími ZIZ jsou etalony, které slouží ke kalibracím a ověřování měřící a zobrazovací techniky [8, 13].

3.5.6 Zdroje ionizujícího záření v radiodiagnostice

Radiodiagnostiku můžeme rozdělit na skiografii, skiaskopii, angiografii, mamografii a výpočetní tomografii. Všechny tyto metody využívají rentgenové záření. Zdrojem X-záření je vakuová elektronka – rentgenka. Zjednodušený princip vzniku záření je takový, že katoda emituje elektrony, které jsou urychleny a dopadají na anodu za vzniku záření. Toto záření prochází skrz vyšetřovanou tkáň člověka, část záření se absorbuje a část projde skrz tkáň a zobrazí se na detektoru. Vznikne tedy rentgenový obraz vybrané tkáně. Většina radiodiagnostické přístrojové techniky se nachází na oddělení radiodiagnostiky (někdy také nazývané zkratkou RDG, RTG, radiologie nebo oddělení zobrazovacích metod) ve zdravotnických zařízeních. K tradičním a nepostradatelným přístrojům ve skiografii patří tzv. diagnostický rentgen, který se stal jedním z nejpoužívanějších přístrojů v radiodiagnostice. Zobrazení struktur, které je zde vytvořeno, je planární a poskytuje 2D projekce denzity tkáně do určité roviny. Ke specializovaným metodám RTG zobrazení patří mamografie, která slouží k zobrazení prsní tkáně a uplatňuje se při podezření na karcinom prsu či v rámci screeningu. Využívána je měkká technika snímání, kdy se používá napětí do 45 keV. Ve větších zdravotnických zařízeních jsou i pojízdné radiodiagnostické přístroje (pojízdná skiografie), které slouží k získání 2D obrazu konkrétních orgánů nebo orgánových soustav přímo u lůžek pacientů. K ZIZ používaným ve zdravotnických zařízeních patří i zubní rentgen, který se stává běžnou součástí stomatologických klinik a zubních oddělení. Komplexní zobrazení struktur nabízí CT, které poskytuje možnost

prostorového tomografického zobrazení s vysokým kontrastem a možností počítačových rekonstrukcí, díky kterým lze provést detailní diagnostický rozbor zkoumaného orgánu nebo orgánové soustavy. Skiaskopie představuje přímé vizuální pozorování obrazu prošlého RTG záření. Využívá se např. při intervenčních výkonech (zavádění sond, implantaci kardiostimulátorů nebo angiografii). Skiaskopický přístroj může být buď stacionární, nebo pojízdný (tzv. C-rameno), který se používá na operačních sálech při vizuální kontrole a navigaci při některých zákrocích. Velkou výhodou skiaskopie je, že umožňuje vyšetřujícímu vytvořit si reálnou představu, jak je chorobné ložisko nebo jiný objekt prostorově umístěný [2, 4, 16].

3.5.7 Zdroje záření v radioterapii

Účinků IZ na specifické tkáně a orgány využívá radioterapie v oblasti léčby nádorových i nenádorových onemocnění. Zdroje ionizujícího záření využívané k těmto účelům můžeme rozdělit na zdroje pro zevní radioterapii a pro brachyterapii. V zevní radioterapii dnes patří mezi nejvíce používané přístroje lineární urychlovač (LINAC). Záření vzniká v procesu, kdy jsou urychleny (působením elektrického a magnetického pole) nabitě částice (zpravidla elektrony). Ty dopadají na wolframový terčik za vzniku vysokoenergetického fotonového záření. Unikátní je robotický ozařovač „Cyberknife“, který je výjimečný díky své malé hmotnosti a umístění na robotickém rameni, které umožňuje precizní ozáření tkáně z téměř každé pozice. K ojediněle se vyskytující modalitě patří i tomoterapie, kde je v ozařovací jednotce integrován CT skener a LINAC, který využívá technologii léčby zářením s modulovanou intenzitou. Před tím, než se začaly používat moderní ozařovací přístroje typu LINAC, byly číslem jedna v ozařování radioizotopové ozařovací přístroje. Jedním z nich je kobaltový ozařovač, jehož zdrojem je ^{60}Co o průměru 15–20 mm, který má celkovou aktivitu cca 185–370 TBq. Záření, které emituje, má energie 1,17 a 1,33 MeV a jeho poločas rozpadu je 5,3 roku. Samotný zdroj se nachází

v hlavici, která je vyrobena z olova nebo ochuzeného uranu, a zaručuje tak stínění zdroje. Aktivace zdroje probíhá tak, že se jeho poloha změní z klidové do pracovní (výstupní otvor pro záření). Těchto ozařovačů již v klinické praxi nenajdeme mnoho, ale několik se jich ještě k léčbě v České republice používá. Záření z ^{60}Co užívá i Leksellův gama nůž. U starších modelů je 201 zdrojů ^{60}Co fixně uloženo v hlavici přístroje. U moderních přístrojů je umístěno 192 zdrojů ^{60}Co uspořádaných v 8 nezávisle pohyblivých segmentech (Gamma knife Perfexion). Využívá se nejvíce v radiochirurgii v oblasti hlavy. Dalším zdrojem jsou terapeutické rentgenové ozařovače, které vytváří záření s energií od 5–10 keV do 400 keV. Tyto přístroje pracují na stejném principu jako rentgenka u diagnostického RTG přístroje. Nejvíce se dnes vyrábějí přístroje s energií záření v rozmezí 10–300 keV, které nacházejí využití v léčbě karcinomů kůže a v některých indikacích paliativní léčby a u nenádorových afekcí. Jejich výhodou a zároveň i nevýhodou je maximální dávka na povrchu těla, kůže. Speciální část zaujímá protonová terapie, která je založena na ozařování tkáně svazkem urychlených protonů o energii 200 MeV a vyšší. Zdrojem částic je urychlovač nabitých částic (synchrotron), který je poměrně prostorově náročný (velká hala + další místnosti s příslušenstvím). Hlavními indikacemi k léčbě touto technikou jsou nádory prostaty, anu, pankreatu, ORL oblasti a další [17, 18].

V brachyterapii se užívá uzavřených zářičů. Ty jsou umístěny přímo do místa nádoru či jeho lůžka, a tím je v blízkosti zdroje dosaženo vysoké dávky záření. Velikost zdrojů je velmi malá (zdroj ^{192}Ir má průměr asi 1 mm a délku 5 mm) a dle klinických potřeb jsou formovány do tvaru zrn, pelet nebo kuliček. Emitují záření beta a gama. Mezi dva hlavní představitele této kategorie patří přístroje LDR (Low Dose Rate) s dávkovým příkonem 0,4–2 Gy/hod a HDR (High Dose Rate) s dávkovým příkonem více než 12 Gy/hod. U obou typů těchto přístrojů se zdroje nachází uvnitř stíněného trezoru. V průběhu ozařování jsou tyto zdroje transportovány do aplikátorů, které jsou umístěny na předem definovaných

místech v blízkosti nádorového ložiska. Zdrojem záření u LDR je např. ^{137}Cs , který bývá ve formě kuliček. Jako zdroj pro HDR terapii se používá např. ^{192}Ir (aktivita 370 GBq). U permanentních aplikací se využívá radionuklidů s velmi nízkým dávkovým příkonem (0,01–0,3 Gy/hod) ULDR (Ultra Low Dose Rate), např. zrna ^{198}Au , ^{125}I a ^{103}Pd . Mají krátký poločas rozpadu a nízkou energii záření, což je důležitý faktor ochrany okolní tkáně [17, 18]. V tabulce 3 se nachází nejčastěji využívané ZIZ v brachyterapii.

Tabulka 3 ZIZ používané v brachyterapii [17, 18].

Radionuklid	Poločas rozpadu	Energie (MeV)
^{198}Au	2,7 dní	0,412
^{103}Pd	17 dní	0,020
^{137}Cs	30 let	0,662
^{192}Ir	73,8 dní	0,397
^{60}Co	5,6 let	1,25
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	28,9 dní	2,24 max
^{32}P	14,3 dní	1,71 max

3.6 Zajištění radiační ochrany ve zdravotnických zařízeních

V souvislosti s používáním ZIZ je nutné zajistit přiměřenou ochranu osob před IZ a také zabezpečení samotných zdrojů. Došlo tedy k zavedení opatření, která se musí aplikovat před každou činností související s využíváním IZ k zaručení bezpečného a hladkého průběhu činnosti. K nim patří především systém registrace a schvalování činností v souvislosti s využíváním atomové energie. Při veškerých těchto aktivitách je nutné provádění RO, které se může dělit do tří úrovní: samokontrola pracovníků, kontrola uvnitř organizace,

kteřá činnost provádí a „superkontrola“ realizovaná orgány činnými v oblasti radiační ochrany. V prostředí, kde se nachází ZIZ, jsou stanoveny požadavky na RO a bezpečnost zdrojů, které můžeme rozdělit do jednotlivých oddílů [1].

První z nich zahrnuje tzv. „**bezpečnostní kulturu**“, pod kterou spadá především bezpečnost radiačních pracovníků a obyvatel a která má nejvyšší prioritu. Dále se pod tímto pojmem skrývá nutnost kontroly nad zajištěním činností v rámci RO, a to i takových situacích, které se běžně nestávají (radiační mimořádné události). Ověřována je zde funkčnost zavedených činností v rámci RO. Dále sem řadíme vymezení kompetencí a odpovědnosti za RO na pracovišti včetně podrobného školení všech pracovníků, kteří se v prostředí zdrojů nachází. „**Zajištění jakosti**“ znamená, že je zaručena existence programu, který slouží k ověření stavu RO a bezpečnosti zdrojů. Ten zahrnuje ověřování účinnosti ochranných a bezpečnostních opatření používaných na pracovišti. Konkrétně k tomu slouží testy programu jakosti (např. přijímací zkouška, test dlouhodobé stability, test provozní stálosti). Mezi jeden z nejdůležitějších bodů patří „**péče o lidský faktor**“, kdy je snaha zabezpečit co nejmenší počet omylů, nehod nebo dalších událostí, které svou činností zaviní člověk. K zajištění kvalitního personálu slouží jeho řádný výcvik a dosažení žádoucí kvalifikace u všech osob, které musí při své činnosti dodržovat zásady RO a bezpečnosti. Tato pracovní síla je zajištěna správnou informační činností ze strany vedení, dále náležitou organizací v rámci celého pracoviště, moderním a funkčním vybavením nebo prováděním cvičení v rámci nehodových nebo mimořádných událostí. Před tím, než začne být provozována činnost v rámci expozičních situací, je žádoucí provést „**bezpečnostní analýzu zdroje**“. Mezi hlavní aspekty, které se přitom sledují, patří umístění stavby, samotný provoz, údržba nebo ukončení činností. Všechna tato hlediska se poté řádně prozkoumají a dává se dohromady soubor činností a požadavků, které musí být splněny, aby byl provoz zařízení bezpečný a aby byla možnost vzniku nežádoucích situací co nejmenší. I když

všechny činnosti směřují k bezproblémovému chodu pracoviště, musí být zajištěn i systém, který zvládne reagovat na neobvyklou situaci, a zajistí tak ochranu a bezpečnost na té nejvyšší možné úrovni. Jedná se např. o možnost úniku radioaktivních látek nebo odcizení či ztrátu ZIZ [1].

3.7 Zabezpečovací systém u zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních

Zabezpečení ZIZ, které probíhá na pracovištích, je ustanoveno v Atomovém zákoně a prováděcích vyhláškách, kdy se tyto zásady řídí především podle doporučení, která vydává MAAE. Tyto požadavky jsou cíleně aktualizovány s cílem zvýšit bezpečnost v oblasti činnosti se ZIZ, kdy zneužití ZIZ nelze úplně vyloučit. Pokud je ale vytvořen takový systém, který je funkční a kvalitní a snadno aplikovatelný v praxi, lze riziko zneužití ZIZ snížit na takovou úroveň, která je pro společnost akceptovatelná. Hlavní důvody, proč je důležité vytvářet systém zabezpečení RN zdrojů, jsou identifikace reálných rizik, zjištění jejich pravděpodobnosti, zajištění jejich předcházení, popřípadě realizování potřebných opatření. U nejrizikovějších RN zdrojů je nutné počítat i s případnou realizací vhodného zásahu proti zneužití ZIZ. I když je tento systém vytvořen na míru požadavkům konkrétního zařízení, je nutné ověřit jeho správnost a funkčnost, hodnotit ho a v případě potřeby ho aktualizovat. Pro vyhodnocení stupně zabezpečení se používá tzv. **odstupňovaný princip**. V Atomovém zákoně je ustanoveno, že každý, kdo využívá jadernou energii nebo vykonává činnosti v rámci expozičních situací, je povinen při zajišťování jaderné bezpečnosti, RO, technické bezpečnosti, monitorování radiační situace, zvládnutí RMU a zabezpečení využívat přístup odstupňovaný podle velikosti možného ozáření osob a okolí a jeho možných důsledků. V praxi je tedy nutné, aby u radionuklidových zdrojů 1. kategorie bylo zabezpečení na nejvyšší úrovni, především s ohledem na jejich ochranu a řízení přístupu do míst jejich uložení. Čím více stoupá riziko jejich zneužití, tím je požadována větší akceschopnost

v rámci bezpečnostních a ochranných systémů. Naopak u nejnižších kategorií z hlediska zabezpečení nebude muset být tento systém tak striktní a podmínky zabezpečení budou mnohem jednodušeji splnitelné [9, 19].

Fyzická bezpečnost zdrojů představuje systém založený na zabránění odcizení a přístupu nepovolaných osob ke zdroji. Je založena na systematickém sledování ZIZ a včasném ohlášení ztráty ZIZ příslušným orgánům. Systém zabezpečení by měl sloužit k tomu, aby zajistil bezproblémový chod pracoviště s ohledem na přítomnost ZIZ. Měl by především plnit funkci tzv. odrazení, detekce, zdržení, funkci zásahu a řízení zabezpečení. **Odrazením** je myšleno to, aby se potenciální pachatel rozhodl neprovést pokus o nepovolený přístup či přemístění RN zdroje. Cílem prostředků používaných za tímto účelem je, aby si útočník myslel, že splnění cíle útoku je příliš těžké, a tak je cíl ve formě zisku ZIZ nebo přístupu k němu vzdálený. Mezi prostředky odrazení patří např. vizuálně výrazná přítomnost prvků systému zabezpečení (mříže, bezpečnostní dveře, kamerový systém, fyzická ostraha) či přítomnost slovního popisu, co hrozí v přítomnosti zdroje (např. „Nebezpečí vnitřní kontaminace a vnitřního ozáření.“). **Detekcí** je myšleno zaznamenání nepovoleného vstupu k ZIZ. Toto zjištění je uskutečněno díky pracovníkům zařízení nebo díky členům fyzické ostrahy/recepčních či prostřednictvím varovného akustického signálu (narušení prostoru). Vhodnými prvky jsou např. pohybová čidla, detektory třítštění skla, dveřní či okenní magnetické kontakty. Součástí detekce je i vyhodnocení obdržené informace (kamerovým systémem, fyzická kontrola místa) a případné zavolání pomoci. **Zdržením** se myslí to, že potenciální útočník se nedostane k/od ZIZ za krátký časový interval, ale některými prostředky je tento čas prodloužen. To může být realizováno pomocí mechanických zábranných prostředků (mříže, bezpečnostní zámky, kotevní šrouby, větší množství dveří). **Zásahem** rozumíme činnost předem zvolených osob, jejichž úkolem je pokusit se zabránit pokusu o zneužití zdroje nebo jeho

ukradení, a to včetně sabotáže, která by mohla být provedena samotným pracovníkem vybraného pracoviště. Zásah probíhá tak, že je snaha o přerušení útoku (odpovídající síly fyzické/pohotovostní ostrahy) a zabránění ztrátě kontroly nad zdrojem [19].

3.7.1 Kategorizace radionuklidových zdrojů pro účely zabezpečení

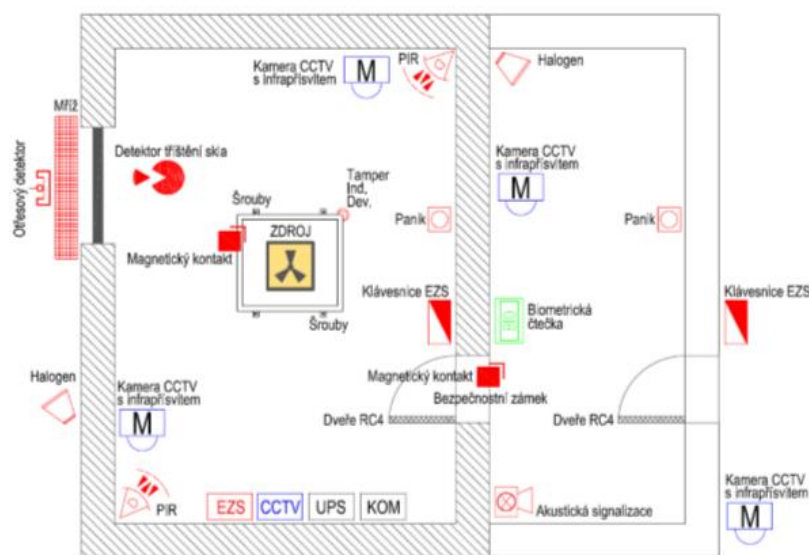
Dle Atomového zákona se ZIZ dělí do 5 kategorií (1. kategorie nejrizikovější – 5. kategorie s nejnižším rizikem). Pro rozdělení do jednotlivých kategorií podle stupně zabezpečení slouží výčet, který nalezneme v § 17 vyhlášky č. 422/2016 Sb. Kategorie zabezpečení pro otevřené a uzavřené RN zdroje se stanovuje poměrem aktivity RN a tabelované D-hodnoty, kterou nalezneme v příloze 1 vyhlášky č. 422/2016 Sb. V praxi tedy existuje povinnost pro každého, kdo požaduje povolení k nakládání s RN zdrojem nebo ohlašovatele, který chce provádět činnost s drobným typově schváleným zdrojem IZ, ustanovit kategorii zabezpečení. Podle toho je následně rozhodnuto, zda je nutné vytvořit plán zabezpečení [19, 12].

3.7.2 Zabezpečení radionuklidových zdrojů 1. až 3. kategorie

Zdroje používané v radiodiagnostice a v nukleární medicíně nespádají do kategorie zabezpečení 1. až 3. kategorie, a držitelé povolení tak nemusí na svých pracovištích zavádět speciální opatření. Naopak některé zdroje používané v radioterapii do těchto kategorií patří. A právě u těchto ZIZ provádí držitel povolení dle vyhlášky č. 422/2016 Sb. zabezpečení radionuklidového zdroje 1. až 3. kategorie zabezpečení. V případě, kdy by došlo k neoprávněnému vniknutí k ZIZ, je nutné znemožnit neoprávněné přemístění (1. kategorie) nebo alespoň snížit pravděpodobnost neoprávněného přemístění na co nejnižší úroveň (2. a 3. kategorie). U všech třech zmíněných kategorií musí mít pracoviště zřízen systém rozpoznání nepovolaného přístupu k RN zdroji. Dále potom

u 3. kategorie zabezpečení musí zajistit zjištění neoprávněného přemístění RN zdroje. Odhalení každé snahy o nepovolaný přístup k RN zdroji musí být u 1. a 2. kategorie zabezpečení. Veškeré zprávy o zjištění nepovolaného přístupu musí být předány tak, aby mohlo dojít k včasné analýze informací a případnému zákroku. V celém bezpečnostním systému musí být vytvořen také systém zábran, které slouží ke zdržení osoby, která má v plánu přemístění RN zdroje. Okamžitá realizace zásahu k zabránění neoprávněného přemístění RN zdroje včetně zajištění dostatečných sil a prostředků pro tento zásah se uskutečňuje pro zdroj 1. kategorie zabezpečení. Prvky systému zabezpečení se skládají z technických prostředků a organizačních opatření, které mají za úkol znesnadnit a omezit dostupnost RN zdroje pro osoby, jež chtějí tento zdroj zneužít, a dále zabezpečují rozeznání nepovolaného přístupu k RN zdroji v nejkratším možném čase. V neposlední řadě je zapotřebí stanovit strukturu celého systému zabezpečení RN zdroje, který zahrnuje činnost fyzických osob, tok informací nebo konkrétní technické prostředky. K zajištění veškerých požadavků slouží **Plán zabezpečení zdrojů 1.–3. kategorie zabezpečení**. Plán zabezpečení (PZ) se skládá z popisu RN zdroje, včetně příslušné kategorizace a způsobu použití, dále je zde uvedena identifikace místa aplikace a uložení RN zdroje, včetně okolí ZIZ a jeho lokalizace v objektech a areálech i s polohou těchto objektů a areálů vzhledem k okolí, které je veřejně přístupné. Jsou zde vymezeny cíle PZ pro objekty a areály, které jsou zaměřeny na specifické podmínky a nebezpečí, včetně způsobů zamezení nežádoucím následkům neoprávněného činu. Plán též obsahuje výčet samotných opatření k zabezpečení radionuklidového zdroje, ke kterým patří např. kontroly přístupu ke zdroji, odhalení, zdržení, popřípadě zásah při nepovolaném přístupu. K další části PZ řadíme popis administrativních opatření k zabezpečení RN zdroje, který zahrnuje např. práva a povinnosti jednotlivých pracovníků, běžné a mimořádné operace s RN zdrojem nebo údržby a opravy technických prostředků. Další opatření se týká způsobu zajištění ochrany informací důležitých z hlediska zabezpečení RN zdroje, způsobů kontroly přístupu k RN

zdroji nebo zajištění výcviku personálu. Kvůli rizikům spojeným s provozováním pracoviště s takovým ZIZ je nutná **ochrana informací důležitých z hlediska zabezpečení radionuklidového zdroje**. Mezi tato data z pohledu zabezpečení RN zdroje patří např. fakta o RN zdrojích a jejich lokalizace, realizovaná přeprava a její trasy, veškeré informace nacházející se v plánu zabezpečení, včetně záznamů o systému zabezpečení nebo ostraze. Ve vyhlášce č. 422/2016 Sb. jsou také uvedena práva a pravomoci držitele povolení, které se týkají poskytování informací uvedených výše těm osobám, které je musí znát pro výkon činnosti, a to jen v takové míře, která je nutná vzhledem k výkonu jejich činnosti. Držitel povolení je povinen zvolit fyzickou osobu, která má za úkol zajištění zabezpečení RN zdroje a optimální spolupráce v rámci zabezpečení RN zdroje [19]. Na obrázku 2 je znázorněn modelový plán zabezpečení prostoru s radionuklidovým zdrojem 1. kategorie zabezpečení.



Obrázek 2 Modelový plán zabezpečení prostoru s radionuklidovým zdrojem 1. kategorie zabezpečení [19]

3.8 Radiologické zbraně a radiologický terorismus

Na rozdíl od jaderných zbraní, které mohou být ukradeny nebo násilně získány z arzenálu jaderně ozbrojeného státu, radiologické zbraně takto získat nelze. Uvažuje-li jednotlivec nebo skupina o použití tohoto typu zbraně, musí si ji svépomocí vyrobit. Nejčastěji skloňovanou radiologickou zbraní je tzv. „špinavá bomba“ (ŠB), která může mít několik podob. Mezi další radiologické útoky můžeme zahrnout i napadení jaderné elektrárny či jiného zařízení s významnými ZIZ za účelem zisku nebo rozšíření radioaktivního materiálu. Jednou z variant aktivace radiologické zbraně je i tzv. „sebevražedný terorismus“, kdy by ke smrti pachatelů mohlo dojít nejen při samotné realizaci, ale i vlivem přípravy činu, tedy pobytem v blízkosti radioaktivních látek. Terorismus jako takový je hrozbou pro mezinárodní stabilitu a bezpečnost. Pravidelně se konají významné mezinárodní nebo celostátní veřejné akce, které se vyznačují přítomností široké veřejnosti a intenzivního mediálního zpravodajství. Všeobecně je známo, že se právě tyto události, jako jsou politické nebo hospodářské summity nebo velké sportovní soutěže, mohou stát terčem teroristického útoku. Ohroženy jsou také tzv. měkké cíle, tedy místa s vysokou koncentrací lidí, kde není zajištěna potřebná ochrana osob před nebezpečím v podobě např. bombových útoků. Jsou to např. centra měst, zastávky nebo prostředky městské hromadné dopravy, velká nákupní střediska nebo nemocnice. Hrozba radiologického terorismu je na programu mezinárodní i vnitrostátní bezpečnosti. Aby se však toto riziko snížilo, mezinárodní společenství dosáhlo velkého pokroku při zajišťování jaderného a jiného radioaktivního materiálu, který by se jinak mohl použít při teroristickém činu. Tento pokrok je podmíněn snahou všech států přijmout silné systémy a opatření v oblasti jaderné a radiační bezpečnosti [15, 20, 21].

3.8.1 Radiologické zbraně a jejich rozdělení

Radiologické zbraně se někdy řadí mezi tzv. „zbraně hromadného ničení“. Někteří se spíše přiklánějí k tomu, že patří do skupiny „zbraní hromadného narušení“. Většinou se radiologické zbraně uvádějí ve spojení s jadernými zbraněmi. Největší rozdíl v nich je v ničivé síle těchto zbraní, v účelu použití a v samotném zbraňovém systému. Na základě studií by většina sestavených a použitých ŠB nedisponovala velkým množstvím radioaktivního materiálu, a tak by nepředstavovala významné zdravotní riziko ozáření s následnými vážnými zdravotními následky. Odborníci se tedy shodují na tom, že použití radiologických zbraní je sice považováno za jeden z nejpravděpodobnějších teroristických činů, ale z hlediska zdravotních dopadů by útoky vedly k malému počtu okamžitých úmrtí [20, 22, 23].

Radiologické disperzní zařízení – „Radiological Dispersal Device“ (RDD) je zařízení, které rozptyluje radioaktivní materiál do životního prostředí, což vede k radioaktivní kontaminaci. Rozšíření radioaktivní látky by mohlo proběhnout pasivní disperzí, kdy by radioaktivní látka byla vystavena prostředí a mohla by tiše se v průběhu času rozptýlit. Aktivní disperze by byla založena na cíleném rozptýlení radioaktivních látek různými způsoby. Radiologické zbraně tohoto typu mohou mít různé formy, od velmi surových výbušných zařízení po sofistikované disperzní mechanismy. Bohužel zpravodajská média pracují převážně s již zmíněným pojmem „špinavá bomba“ a tím popisují všechny typy radiologických zbraní, což vyjadřuje omezený smysl pro rozmanitost těchto zbraní. Jeden z nejčastěji používaných popisů ŠB je, že se jedná o spojení konvenčních výbušnin, jako je dynamit nebo trinitrotoluen (TNT) s radioaktivním materiálem. Poté, co jsou výbušniny aktivovány, výsledný výbuch rozptyluje radioaktivní materiál do okolí. Nejvíce se v její souvislosti hovoří o gama záření, jehož zdrojem jsou ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir nebo alfa částice vysílající ^{241}Am a ^{238}Pu . Při použití radiologického disperzního zařízení by mohl

být rozpuštěn radioaktivní materiál v kapalném roztoku. V této chemické formě by rozprašovače uvolňovaly do prostředí roztok radioaktivních látek. Prostřednictvím podobných mechanismů by mohly být rozptýlovány radioaktivní materiály v práškové formě. Například by řízené střely nebo bezpilotní letadla mohla tyto kapaliny nebo prášky rozptýlit letem nízko nad městskými oblastmi nebo jinými cíli. Při zkoumání jiných způsobů šíření by teroristé mohli zvážit použití **radiologických zápalných zařízení** „Radiological Incendiary Device“ (RID) k rozptylu radioaktivních materiálů. RID, někdy nazývané jako „The smoky Bomb“, by mělo za úkol rozšířit radioaktivní látky pomocí požáru. Tato metoda by zkomplikovala úsilí hasičů v boji proti požáru a při záchraně lidí z hořícího objektu, kdy by musely být nasazeny speciální síly a prostředky. Kvůli kouři by se radioaktivní látky mohly rozšířit do okolí, a způsobit tak rozsáhlejší kontaminaci lidí i životního prostředí. Důvod k použití právě RID teroristickými skupinami by mohl být ten, že požár působí negativním způsobem na lidskou psychiku. Ve spojení s radioaktivitou by navíc mohl vyvolat chaos a paniku, a způsobit tak několikanásobně větší újmy na zdraví a majetku. Dalším typem radiologické zbraně je **radiologické emisní zařízení**, „Radiation Emission Device“ (RED), které emituje IZ ze stacionárního nebo mobilního radioaktivního zdroje. Při jeho použití by byli nejvíce zasaženi lidé nacházející se v blízkosti zdroje. Zdroj by mohl být umístěn na veřejném místě, které je charakteristické přítomností velkého množství osob na malém prostoru (zastávky MHD, náměstí velkých měst, koncertní sály, sportovní arény). Další možností je, že by mohl být skrytý v místě, odkud může vysílat záření po delší dobu, aniž by byl odhalen a zajištěn [20, 22, 23, 24, 25, 26].

V literatuře někdy najdeme definované tyto radiologické zbraně pod tzv. „I³“ **útoky** (inhalation, ingestion, and immersion“). „Inhalační“ útok by měl za úkol přimět oběti, aby vdechly a udržely si většinu radioaktivního materiálu v plicích, „ingesční“ útok by vyžadoval polykání radioaktivního materiálu a cílem

„ponorného“ útoku by bylo, aby oběti „nasákly“ materiál v nějakém typu roztoku nebo koloidní suspenzi. Největší obavy z těchto typů útoků jsou proto, že by znásobily vliv nebezpečných účinků záření na zdraví kvůli způsobení vnitřní kontaminace. Materiály emitující záření alfa (např. ^{210}Po) by byly k těmto účelům vhodné, protože i malé množství látky požitá nebo vdechnutá může způsobit vážné zdravotní problémy až smrt. Nejúčinnější útoky „I³“ by sice vyžadovaly značné technické dovednosti, relativně jednodušší verze těchto útoků jsou ale pravděpodobně proveditelné v rámci dovedností teroristů, např. kontaminace jídla, pitné vody, vzduchotechniky [22].

3.8.2 Historie použití radiologických zbraní a otázka jejich vlastnictví

V určité formě byly radiologické zbraně použity např. ve studené válce. Jejich náplní byly zředěné roztoky radioaktivních látek s velkým obsahem neaktivních solí nebo umělé radioaktivní izotopy získané v reaktoru ozáření určitých prvků. V roce 1995 upozornili čečenští povstalci mezinárodní média na kanystr radioaktivního materiálu strategicky umístěný v Ismailovském parku v Moskvě, kde hrozili explozí. K samotnému výbuchu nedošlo. Bylo zjištěno, že nádoba obsahovala radioaktivní ^{137}Cs , jeho aktivita byla naštěstí nízká a neohrozila zdraví osob, které se pohybovaly v blízkém okolí. Další incident, který měla na svědomí tatáž skupina, se odehrál v roce 1998. Týkal se kontejneru radioaktivních materiálů, který byl připevněn k mině v blízkosti železniční trati poblíž Argunu v Čečensku. Ani v tomto případě nebylo zařízení aktivováno a bylo bezpečně zlikvidováno. Na pravděpodobné vlastnictví ŠB čečenskými teroristy upozorňují především ruské úřady. Čečenci jsou považováni za pravděpodobné pachatele ztrát a krádeží radioaktivních materiálů a panuje obava z jejich použití ve formě radiologických zbraní proti ruským cílům a také z možného ilegálního obchodu s těmito radioaktivními látkami především s islamistickou sítí. Právě u nejnebezpečnější islamistické sítě Al-Kajda existuje největší riziko použití těchto zbraní. Důkazem je např. událost z května 2002,

kdy byl ve Spojených státech amerických zadržen americký občan, který byl podezřelý z vazby na Al-Kajdu a z plánu použití radiologické zbraně na americkém území. Při vyšetřování se zjistilo, že neměl v plánu útok na určitý cíl, ale prošel „pouze“ výcvikem v Pákistánu, který měl účastníky naučit, jak zacházet s výbušninami. Také bylo zjištěno, že se pravděpodobně pokoušel o získání radioaktivního materiálu na území bývalého Sovětského svazu. Další záznamy o potenciálním použití těchto zbraní byly zajištěny při zásazích proti bin Ládinově síti. V červnu 2003 v Thajsku byl zadržen muž, který chtěl propašovat z Laosu 30 kg ^{137}Cs . V té době byli v Bangkoku zatčeni členové organizace „Džamaa Islámíja“, která plánovala útoky proti velvyslanectvím a místům navštěvovaným turisty. Státem, který deklaroval vlastnictví radiologických zbraní a u něhož je vysoké riziko jejich použití při případném napadení, je Korejská lidově demokratická republika [21, 27, 28].

3.8.3 Pravděpodobné zóny a účinky útoku radiologickými zbraněmi

Důležité z hlediska rozsahu útoku je efektivní použití samotné zbraně. Z hlediska psychologického, tedy davového šílenství, paniky, není prvořadá potřeba rozptýlení velkého množství radioaktivity, ale výbuch jako takový. Pokud ale dojde k rozšíření informace o přítomnosti radioaktivity, i když by byla v minimálním množství, nárůst paniky a chaosu by byl nepochybně obrovský. Jen samotný výbuch způsobuje akutní stresovou reakci přítomných osob, kterou doprovází pocity paniky, strachu a vyděšení. Pokud je však cílem pachatelů rozšíření radioaktivní látky, musí být při samotné konstrukci ŠB použity složitější mechanismy sestavení zbraně jako celku, a především musí být použity vhodné radionuklidy. Aby ŠB naplno splnila účel radioaktivní kontaminace osob a prostředí, bylo by třeba vytvořit takovou substanci (aerosol), která by zapříčinila vznik radioaktivní mraku, který by produkoval záření do velkého prostoru. Jak se radioaktivní materiál šíří do okolí, stává se méně koncentrovaným a méně škodlivým. Rychlé zjištění typu použitého

radioaktivního materiálu pomůže místním orgánům při poskytování poradenství komunitě o ochranných opatřeních, jako je úkryt na místě nebo rychlé opuštění bezprostředního okolí. Záření lze snadno detekovat pomocí detektorů, které jsou součástí vybavení zásahových složek. Následná dekontaminace postižené oblasti může vyžadovat značný čas a náklady [20, 22, 23, 22, 25, 29].

Účinky ŠB by byly určeny [22, 30]:

- množstvím rozptýlených radioaktivních látek;
- chemickou a fyzikální povahou radioaktivních látek;
- použitým prostředkem k rozptýlení materiálu (detonační zařízení);
- délkou expozice;
- hustotou obyvatelstva v zasaženém území;
- povětrnostními podmínkami v průběhu i po skončení působení ŠB (déšť, směr a síla větru, vlhkost vzduchu);
- infrastrukturou v místě incidentu (některé radioaktivní substance se chemicky spojují s materiály jako beton, sklo či asfalt – rozdíl rozptylu uvnitř budovy / na otevřeném prostranství/husté zástavbě).

Radiologická zbraň v podobě výbušného zařízení spojeného s radioaktivní látkou by v případě aktivace způsobila výbuch se současnou kontaminací okolí radioaktivními látkami. Oblast účinků takto sestrojené zbraně by se mohla rozdělit na tyto dvě zóny [31]:

- **„Okamžitá“ zóna:**
 - oblast bezprostředních účinků detonované výbušniny;
 - intenzivnější ozáření přítomných osob v důsledku zranění šrapnelů s radioaktivním materiálem;
 - ztráty na životech v důsledku zranění způsobených účinky exploze.

- **Zóna „oblaku“:**

- oblast zahrnující „okamžitou“ zónu + zónu „radioaktivního oblaku“;
- vlivem povětrnostních podmínek dojde k rozptýlení radioaktivního materiálu do okolí;
- možnost poškození zdraví v důsledku vnějšího nebo vnitřního ozáření;
- musí být zahrnuta do oblasti dekontaminace.

Pravděpodobná motivace k použití radiologické zbraně teroristy

I když se obecně má za to, že počet okamžitých úmrtí na následky působení radiologické zbraně bude pravděpodobně malý, dobře provedený radiologický útok na nechráněnou populaci by vyžadoval řadu opatření, která by měla zásadní vliv na obyvatelstvo, ekonomiku a životní prostředí. Pravděpodobná motivace a cíl pachatelů k použití radiologické zbraně by mohlo být **zranění a ztráty na lidských životech**. Samotný útok pomocí ŠB může mít negativní účinky na zdraví a život člověka. Okolnosti působení ŠB závisí na množství rozšířené radioaktivní látky a na samotném způsobu vedení útoku. Pokud by bylo použito detonační zařízení, zranění nebo smrt lidí by byla pravděpodobně zapříčiněna pouze samotným výbuchem. Zdravotní problémy by mohla způsobit přítomná směs radioaktivních látek, kde by nejvíce záleželo na absorbované dávce záření, typu záření, také na tom, zda by se jednalo o vnitřní či vnější kontaminaci. Další vliv na zdraví obyvatel by měla vyvolaná panika a chaos, který by mohl způsobit např. srdeční selhání nebo zranění a smrt v důsledku ušlapání. Dále také **vyvolání paniky**. Značný počet obyvatel nemá podstatné znalosti o problematice IZ, což by mohlo vést k negativnímu ovlivnění nastalé situace. Přítomnost IZ by mohla mít především vliv na chaos a vznik paniky nejen přímo v místě události, ale také v jejím okolí. I když by dopad působení IZ na fyzické zdraví lidí nebyl velký, psychický stav osob by mohl být narušen radiofobií. V případě, že by nastala hromadná panika, mohly by být

zahlceny telefonní sítě kvůli tísňovému volání, dále přeplněny nemocnice kvůli strachu ze zdravotních potíží, a celá událost by tak měla významné sociální dopady. V nejhorších případech by byl narušen i celkový život obyvatelstva v oblasti postižené touto událostí, kde by musela být provedena dekontaminace, případně i demolice domů či by dokonce vznikla nutnost dlouhodobé evakuace obyvatelstva. V neposlední řadě by teroristický cíl mohl být **destabilizace státu a způsobení hospodářských a ekonomických ztrát**. Úmyslem teroristů by tak mohlo být narušení normálního fungování strategicky důležitých institucí nebo míst. Samotný zásah k likvidaci způsobených škod by vyžadoval velké množství použitých sil a prostředků, které jsou speciálně uzpůsobeny k práci s přítomností IZ. V důsledku kontaminace životního prostředí a narušení infrastruktury by mohla být nezbytná rozsáhlá a zdlouhavá dekontaminace zasažených prostor, která by mohla obnášet i destrukci staveb nebo odběry půdy. To vše by bylo finančně nákladné a musela by být zavedena řada opatření, která by významně narušovala integritu státu [22, 23, 32, 33].

3.8.4 Zdroje radioaktivního materiálu vhodné k zneužití se zaměřením na zdravotnická zařízení

Existuje celá řada radionuklidů, které jsou potencionálně zajímavé při řešení vyhlídky na radiologický útok. Ačkoli radioaktivní látkou použitou v radiologické zbrani může být i vyhořelé palivo z reaktoru nebo jiný radioaktivní odpad, je pravděpodobnější, že radioaktivním zdrojem by byly radionuklidy používané komerčně. Jedná se o ZIZ používané v nemocnicích, výzkumných zařízeních, při průmyslových činnostech, ke sterilizaci potravin a lékařských nástrojů, při kontrole svárů nebo při vrtání ropy. Většina komerčně vyráběných a aplikovaných izotopů emituje vysoce energetické gama paprsky, několik z nich emituje beta nebo alfa částice [22]. Radionuklidy, které se nacházejí ve zdravotnických zařízeních a jsou využitelné k tvorbě radiologických zbraní, jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Některé potencionálně zneužitelné komerčně dostupné RN [22, 17].

Radionuklid	Poločas rozpadu	Energie (MeV)
²⁴¹ Am	433 let	2,2
¹³⁷ Cs	30 let	0,662
⁶⁰ Co	5,3 let	1,25
¹³¹ I	8 dní	0,364
¹⁹² Ir	74 dní	0,397

U činností, kde se používají tyto radioaktivní látky, platí, že držitelé licence musí neprodleně nahlásit ztracený nebo odcizený radioaktivní materiál, který představuje významné riziko ve vztahu k možnému zneužití. Jedná se tedy o radioaktivní zdroje, které mohou představovat nezanedbatelné riziko pro veřejnost a životní prostředí, pokud nejsou řádně používány, chráněny a zajištěny [34].

3.8.5 Odhalování radiologického terorismu a boj proti jeho přípravě

Brzy po založení Federation of Atomic Scientists (FAS) v roce 1945 existovaly obavy, že nestátní aktér může získat jaderné nebo jiné radioaktivní materiály k použití při trestném nebo teroristickém činu. Ochrana před těmito hrozbami a jejich odhalení jsou mnohdy složité. Jednou z možností zaznamenání pohybu nelegálně získaných ZIZ je rozmístění zařízení pro detekci záření v přístavech a na hraničních přechodech, jakož i kolem vysoce ohrožených cílů, jako jsou například velká města a určité budovy. Bohužel, stínění radioaktivního materiálu užitečného pro výrobu radiologických zbraní je relativně snadné. Kvůli tisícům kilometrů hranic a milionům lidí a kontejnerů ročně se dostávajícím přes hranice např. Spojených států amerických, se nelze tedy spoléhat pouze na metodu detekce, která by měla odhalit pašovaný materiál. Další skutečností, která

nahrává potencionálním pachatelům je, že dnešní doba nabízí velké množství radioaktivních látek používaných pro komerční účely, a tedy relativně významný počet příležitostí, jak se k látkám dostat. Odborníci na radiologickou bezpečnost ve FAS a dalších organizacích se shodují, že účinná obranná strategie závisí na „obraně do hloubky“ nebo na více úrovních ochrany a reakce. Každá vrstva ochrany je nedokonalá, ale tím, že je jich více, se stává celkový obranný systém efektivnějším a obranschopným. Záslouhou vícestupňového systému dochází ke snižování rizika, díky kterému sklesá jak pravděpodobnost útoku, tak velikost následků samotných činů. Metody snižování pravděpodobnosti výskytu mimořádných událostí zahrnují zabezpečení radiologických materiálů, které jsou významné z hlediska bezpečnosti. V některých případech existuje možnost nasazení alternativních technologií místo použití radioaktivních materiálů, a tím lze odstranit riziko jejich zneužití. Důležitou činností v rámci zabezpečení ZIZ je vyhledávání a zaznamenání všech dostupných informací o trestné činnosti související s radioaktivními materiály a následné vymáhání práva dříve, než by mohla být zločinci zbraň typu ŠB použita. Důležitou součástí prevence zneužití radioaktivních materiálů je i systém zabezpečení uvnitř i vně jaderných elektráren a dalších potenciálně zranitelných zařízení. Ten sice je na vysoké úrovni, vždy ale existuje prostor pro jeho zdokonalení. Jednou z účinných metod by mohlo být snížení motivace teroristů k provádění činů s použitím radiologických zbraní. Tuto metodu je bohužel nejtěžší provést, což lze usoudit například z výroku Dr. Jerrolda Posta, odborníka na terorismus: „Víme více o vnitřku atomu než o vnitřku mysli teroristy“ [22, 23].

3.8.6 Mimořádné události se zdroji ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních

Každý rok se stovky lékařských radioaktivních zdrojů na celém světě ztrácejí, zůstávají opuštěné na různých místech nebo dochází ke krádežím. Je to dané pravděpodobně tím, že v mnoha zemích neexistuje funkční systém

kontroly zajištění těchto zdrojů. V následujících řádcích si uvedeme příklady **radiologických mimořádných událostí se ztracenými nebo zapomenutými zdroji** ze zdravotnických zařízení. V publikaci „Johnston's general record of radiation events“ bylo zatím zaznamenáno 25 událostí s opuštěnými zdroji ze zdravotnických zařízení. Tyto události se staly např. v USA, rozvinutých zemích Evropy, Japonsku a Rusku. K dalším událostem došlo v rozvojových zemích nebo v Číně. Někdy byly zdroje ztraceny, nebo skončily s ostatními zařízeními v kovovém šrotu, nebo byly ponechány v nezměněném a nezabezpečeném stavu na určitém místě. V roce 1983 bylo v Juarezu v Mexiku rozebráno radioterapeutické zařízení s 6 000 farmaceutiky obsahujícími ^{60}Co (celkem 15,6 TBq). Asi 800–1 000 jich spadlo a bylo rozházeno po podlaze kamionu. Vůz byl prodán jako kovový šrot, který byl následně transportován do sléváren. V důsledku toho bylo mnoho kovových výrobků tohoto výrobního zařízení kontaminováno radioaktivním ^{60}Co . Kontaminace byla objevena až za šest týdnů náhodou, když železné výztužné tyče používané pro stavební účely způsobily poplach ve vojenském centru v Los Alamos (USA). Podle odhadů dostaly asi 4 000 lidí poměrně vysoké radiační dávky, 800 z nich dostalo více než 50 mSv. Navíc osm lidí obdrželo dávky v rozmezí 1 až 7 Gy, naštěstí frakcionovaně v průběhu asi dvou měsíců. Kromě toho muselo být 17 000 budov monitorováno radiační kontrolou a 800 z nich bylo zbořeno, protože je nebylo možné dekontaminovat. Další radiační událost se odehrála v Dakaru (Senegal) v srpnu 2006, odkud byl odeslán rentgenový přístroj do destinace Abidjan, hlavního města Pobřeží slonoviny. Po ukončení procesu ozařování se zdroj v podobě ^{192}Ir nevrátil do chráněné polohy v ozařovači bez povšimnutí personálu. Toto zařízení bylo ponecháno na schodišti po dobu několika týdnů a poté bylo transportováno do Abidjanu. Teprve když bylo zařízení připraveno k provozu, bylo zjištěno, že zdroj byl v nestíněné poloze. Čtyři lidé utrpěli vážná zranění v důsledku ozáření a poměrně malé dávky dostal velký počet dalších pracovníků. V prosinci 2013 přepravoval kamion v Mexiku terapeutické zařízení

se zdrojem ^{60}Co s aktivitou 110 TBq z Tijuany do skladu v Mexiko City. Kamion nebyl vybaven indikačními a bezpečnostními zařízeními pro případ mimořádné události. Když kamion zastavil na benzinové stanici, přepadl jej lupič a kamion ukradl. Vůz byl objeven pár dní poté 40 km od místa loupeže. Lékařské zařízení bylo nalezeno mimo vozidlo v terénu a bylo odneseno místním obyvatelem, který si jej vzal domů a doufal, že ho prodá jako kovový šrot. Bohužel se u něj projevil zdravotní komplikace spojené s ozářením, a proto šel na kontrolu k lékaři, který následně kontaktoval příslušné úřady. Zdroj byl zajištěn a převezen do skladu, v důsledku události měli tři lidé menší radiační poškození. Zajímavostí je, že přeprava byla provedena pomocí speciálního robota. Na jednu z posledních zaznamenaných událostí upozornila MAAE na svých webových stránkách, které informují o jaderných a radiologických událostech. „The National Commission on Nuclear Safety and Safeguards“ v Mexiku informovala MAAE o ztrátě zdroje používaného v lékařském zařízení k brachyterapii. Jednalo se o ^{137}Cs s aktivitou 1,067 GBq. Kde se ZIZ nachází, doposud není známé. Existují i případy použití ZIZ jako prostředku ke spáchání **sebevraždy**. Jeden z případů se odehrál 8. června 1969, kdy 19letý zaměstnanec radiologické laboratoře v Moskvě ukradl zdroj ^{137}Cs a ponechal si ho v těsné blízkosti těla po dobu 20 hodin. Celková dávka jeho expozice se odhadovala na 15–20 Gy, na některých místech jeho trupu byla dávka až 30 Gy. Akutní nemoc z ozáření byla muži diagnostikována za pár hodin, 15 dní po hospitalizaci muž zemřel. Další sebevražda se stala v roce 1972, kdy si v Bulharsku muž aplikoval ampulku s ^{137}Cs . Jeho absorbovaná dávka byla odhadnuta na 200 Gy. Další záznam hovoří o bývalém inženýrovi ve zdravotnickém zařízení v Tulse v Oklahomě, který 29. července 1981 ukradl zdroj ^{92}Ir a použil ho ke spáchání sebevraždy. Mezi různými faktory, které způsobují radiační mimořádné události, je i **zneužívání ZIZ k trestným činům**. Jedna z událostí se stala v Texasu v roce 1972. Od dubna do října otec (pracovník zdravotnického zařízení) tajně schovával tobolky ^{137}Cs s aktivitou 37–74 GBq do různých míst a věcí svého 11letého syna (sluchátka, polštář, kalhoty). Chlapec

musel podstoupit 16 operací s četnými transplantacemi kůže. Nejvíce medializovaný případ vnitřního ozáření se smrtelnými následky je otrava ^{210}Po v Londýně. Obětí byl Alexandr Litviněnko, bývalý důstojník ruské zpravodajské služby. Dominantní alfa aktivita spolu s relativně krátkým poločasem rozpadu činí z ^{210}Po látku, která je vhodná pro otravu. Podání látky zřejmě proběhlo 1. listopadu 2006 a smrt Litviněnka nastala 23. listopadu. Přítomnost ^{210}Po v těle oběti byla určena močovým testem za života, a také později při pitvě provedené lékařským vyšetřovatelem. Ten poté vydal prohlášení o tom, že kvůli hrozbě ozáření se tento postup považoval za „nejnebezpečnější pitvu, k jaké kdy došlo v západních zemích“. Všichni patologové měli na sobě dvouvrstvé ochranné oděvy, hermeticky uzavřené rukavice a masky, kterými byl dodáván kyslík. Izolovaná a chráněná byla také místnost, kde byla pitva provedena [29, 35, 36].

4 METODIKA

V teoretické části byla provedena literární rešerše problematiky se zaměřením na zdroje ionizujícího záření. Byly popsány účinky ionizujícího záření na člověka, cíle a principy radiační ochrany a příslušná legislativa. Dále se práce zaměřila na zdroje ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních a na zabezpečení těchto zdrojů. V posledním díle této části se práce věnovala radiologickým zbraním a zneužívání zdrojů ionizujícího záření.

Praktická část byla zaměřena na zdroje ionizujícího záření ve vybraných zdravotnických zařízeních, jejich zabezpečením proti přístupu nepovolané osoby a případné možnosti zneužití. V první části byl vytvořen přehled zdrojů ionizujícího záření ve vybraných zdravotnických zařízeních. Ten obsahuje výčet zdrojů ionizujícího záření na zvolených pracovištích a jsou zjištěna opatření proti nepovolanému vstupu, popřípadě možnosti odcizení těchto zdrojů. Část byla věnována také zabezpečení dodávek ZIZ.

V rámci výzkumné části práce byly osloveny vybrané nemocnice v Praze a Středočeském kraji. Kvůli probíhající epidemii koronaviru a vyhlášeným opatřením se povedlo získat informace pouze z Všeobecné fakultní nemocnice v Praze, z Oblastní nemocnice Příbram, a.s. a z Oblastní nemocnice Kolín, a.s. Aby bylo možné provést porovnání jednotlivých pracovišť, byla oslovena další pracoviště v původním regionu i mimo něj, a to Nemocnice Jihlava, příspěvková organizace, Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace a Fakultní nemocnice v Motole.

Sběr dat byl realizován třemi způsoby. K nejvýznamnějšímu z nich patřily osobní návštěvy ve zdravotnických zařízeních a na jednotlivých odděleních. Tam se vždy uskutečnila prohlídka pracoviště se zaměřením na prostory se ZIZ. Prohlídku vedl jeden z odborných pracovníků oddělení, který zároveň

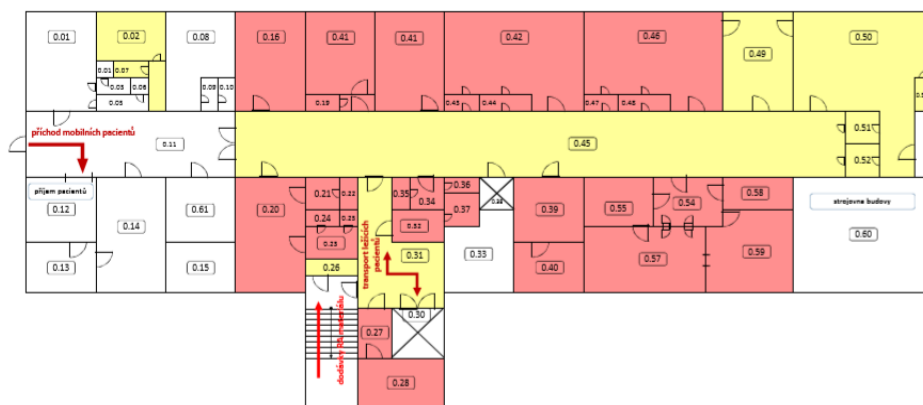
poskytoval informace o pracovišti a ZIZ. Díky osobním schůzkám ve zdravotnických zařízeních byla získána data ústním sdělením pracovníků oddělení i papírová či elektronická dokumentace s informacemi o ZIZ. Velká část dat byla shromážděna pomocí elektronické pošty, kdy vedoucí pracovníci jednotlivých úseků zvoleného pracoviště poskytli potřebné informace a dokumenty e-mailem. Poslední formou získávání potřebných údajů byly telefonické hovory se zaměstnanci.

V druhé části byla vytvořena simulace použití špinavé bomby vyrobené za pomoci konvenční výbušniny a radioaktivních látek. Demonstrace výbuchu s rozšířením radioaktivních částic bude provedena v programu TEREX (TERoristický Expert). Tento program se používá za účelem rychlého vyhodnocení dopadů úniku nebezpečných látek nebo výskytu nástražného výbušného systému. Program obsahuje databázi nebezpečných látek včetně důležitých charakteristik, zásad první pomoci nebo dekontaminace. Je zde k dispozici databáze chemických látek, s kterými lze modelovat a simulovat krizové situace. Díky tomuto programu lze provést včasné rozhodnutí v naléhavých případech a je velmi přínosný při plánování, výuce a cvičení. Je vytvořen pro podniky, školy a další instituce, státní orgány a složky IZS. K dispozici mají uživatelé různé modely pro konkrétní požadavky. V práci bude použit havarijní model SPREAD EXPLOSIVE. Tento model slouží k ověření šíření prachových částic, resp. aerosolů, jako nosičů toxických, radioaktivních či biologických informací [37].

5 VÝSLEDKY

První část kapitoly shrnuje výsledky výzkumu provedeného na vybraných pracovištích nukleární medicíny, radiační onkologie a radiodiagnostiky. Jsou zde popsána jednotlivá pracoviště a oddělení se zaměřením na zdroje ionizujícího záření a jejich zabezpečení. Druhá část kapitoly popisuje simulaci použití špinavé bomby.

Ve všech zdravotnických zařízeních bylo vymezeno sledované a/nebo kontrolované pásmo se ZIZ. Pro příklad je na obrázku 3 zobrazen plán pracoviště s vyznačením kontrolovaného a sledovaného pásma (Oblastní nemocnice Příbram, a.s., oddělení nukleární medicíny) a na obrázku 4 je označení dveří do vyšetřovny na oddělení nukleární medicíny (Oblastní nemocnice Kolín, a.s., oddělení nukleární medicíny).



Obrázek 3 Plán vymezení kontrolovaného a sledovaného pásma.



Obrázek 4 Označení vstupu do kontrolovaného pásma na oddělení NM.

5.1 Fakultní nemocnice v Motole

Ve Fakultní nemocnici v Motole (dále jen FN Motol) proběhl sběr dat na Klinice nukleární medicíny a endokrinologie, kde je na lůžkovém oddělení ročně hospitalizováno kolem 950 pacientů, v endokrinologické ambulanci kliniky je vyšetřeno kolem 13 000 a v ambulanci nukleární medicíny kolem 6 000 pacientů ročně [38].

5.1.1 Klinika nukleární medicíny a endokrinologie 2. LF UK a FN Motol

Klinika nukleární medicíny a endokrinologie 2. LF UK a FN Motol patří k největším klinikám ve svém oboru v České republice. Specifikace pracoviště je uvedena v tabulce 5.

Tabulka 5 Specifikace pracoviště NM [39].

Specifikace pracoviště	
Kategorie pracoviště	II.
Kategorie otevřených a uzavřených zdrojů	Maximálně jednoduché
Kategorie SPECT/CT	Významný zdroj
Kategorie zabezpečení	4.

Jedná se o jedno z mála pracovišť v České republice, na němž se kromě klasické diagnostické části nachází i lůžkové oddělení, kde probíhá léčba otevřenými zářiči (^{131}I – radiojód a ^{131}I – MIBG). Pacienti, kteří podstupují tuto terapii, musí být hospitalizováni a odděleni od ostatních pacientů. Po aplikaci radiojódu se tělo pacienta a veškeré jeho exkrementy (moč, stolice, pot, sliny, slzy) stávají radioaktivní. Je tedy nutné, aby toto pracoviště bylo uzavřené

a místnosti byly odstíněny z důvodu radiační ochrany pacientů i personálu. Na celém pracovišti tak probíhá specifický režim zdravotní péče. Veškerý odpad ze sociálních zařízení pacientů je sveden do nádrží, díky kterým je oddělen od odpadu běžného, neradioaktivního. Pro lůžkové oddělení jsou navíc vyhrazeny dva sklady, jeden na použité prádlo a druhý na odpad z košů pacientů, který je také radioaktivní. Veškerý zmíněný odpad je uchován po dobu cca tří měsíců, poté je již bezpečné odeslat odpad do spalovny a vypustit nádrže do čističky odpadních vod [39, 40].

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Proti nepovolanému vstupu do místností se ZIZ je pracoviště zajištěno dveřmi s „koulí“. Klíče od jednotlivých místností mají pouze pověřeni pracovníci oddělení. Klinika je rozdělena do tří částí: ambulance nukleární medicíny, dvě lůžkové stanice pro terapeutické účely a ambulance endokrinologie. Pracoviště si pro účely diagnostických vyšetření objednáva dva generátory $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. Na začátku týdne v pondělí přichází generátor, jehož aktivita je cca 26 GBq ^{99}Mo . V půlce týdne je doručen generátor o aktivitě ^{99}Mo 15 GBq. Z těchto generátorů je získáván $^{99\text{m}}\text{Tc}$, který se používá k diagnostickým vyšetřením. Ostatní radionuklidy jsou dováženy dle aktuálního provozu, tedy podle objednaných pacientů a naplánovaných vyšetření, primárně se jedná o $^{81\text{m}}\text{Kr}$ a ^{123}I . K terapeutickým účelům se objednáva zdroj záření v podobě $^{131}\text{I-NaI}$. Ten je dodáván 2–3x týdně v podobě lékových kapslí (terapeutické dávky cca 5x 3,7 GBq, diagnostické aktivity cca 15x 111 MBq). Příležitostně jsou na oddělení aplikována i terapeutika o aktivitách 2x3,7 GBq a občas také $^{131}\text{I-MIBG}$ v tekutém stavu o aktivitě 3,7–7,4 GBq. Na konci týdne jsou primárně terapie $^{131}\text{I-NaI}$ cca 10x 3,7 GBq. Z terapeutických radionuklidů se dále pracuje s ^{90}Y , ^{186}Re a příležitostně i s ^{153}Sm . Dalšími ZIZ na pracovišti jsou etalony, které se používají ke kalibracím a ověřování zobrazovací techniky [39, 40]. Seznam používaných ZIZ na pracovišti je uveden v tabulce 6.

Tabulka 6 Specifikace ZIZ na oddělení NM [39].

Typ zdroje záření	Specifikace zdroje
Generátor záření	2x SPECT/CT
Generátory radionuklidů	$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$
Používané radionuklidy	^{131}I , ^{123}I , ^{90}Y , ^{153}Sm , ^{186}Re , ^{111}In , ^{223}Ra
Etalony ke kalibracím a ověřování měřící a zobrazovací techniky	^{137}Cs + ^{68}Ga + ^{68}Ge + ^{57}Co + ^{133}Ba

Specifika dodávky radionuklidů

Generátory radionuklidů a radionuklidy samotné jsou dopravovány na pracoviště specializovanými firmami. Dodávka se uskutečňuje v noci nebo brzy ráno tak, že ji doručí dodavatelé přímo do zvoleného skladu, kde je vymezeno kontrolované pásmo. Dveře do tohoto skladu jsou otevírány pomocí elektronické karty. Tento sklad je monitorován kamerovým systémem. Všechny vstupy, přes které dopravce musí projít, aby dodal radiofarmaka nebo generátory až do skladu, jsou zajištěny elektronickou kartou a zároveň jsou zde „koule“ na dveřích. Při dodávce se řidiči přepravní společnosti nezapisují do návštěvní knihy se záznamem o vstupu do sledovaného a kontrolovaného pásma, ale ke kontrole vstupu slouží kamerový záznam nebo data o pohybu získaná prostřednictvím čipové karty [39].

V tabulce 7 je uvedena celková spotřeba aktivity za rok 2018. Nejvyšší hodnoty spotřebované aktivity terapeutického radiofarmaka jsou u ^{131}I z důvodu specializace pracoviště na terapii radiojódem a dále u generátoru $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, z něhož je získáváno technecium, které je nejpoužívanějším radionuklidem v diagnostických vyšetřeních.

Tabulka 7 Bilance spotřebované aktivity za rok 2018 [41].

Radiofarmakum	Celková pořízená aktivita k referenčnímu datu [MBq]	Celková spotřebovaná aktivita [MBq]
¹²³ I – Datscan	11 174	16 298
¹²³ I – MIBG	4 958	9 920
¹²³ I – NaI	37	80
¹³¹ I – NaI roztok	5 883	89
¹¹¹ In	122	252
¹⁸⁶ Re	740	1 210
¹⁵³ Sm	11 200	11 715
⁹⁰ Y	4 144	6 317
²²³ Ra	125,4	93,18
Generátor ⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	518 500	2 810 386
Generátor ⁸¹ Rb/ ^{81m} Kr	444	Neudává se
¹³¹ I – NaI kapsle	2 813 261	2 811 505
¹³¹ I – MIBG	123 950	122 478

5.2 Oblastní nemocnice Kolín, a.s.

V oblastní nemocnici Kolín, a.s. proběhl sběr dat na radiodiagnostickém oddělení a na oddělení nukleární medicíny.

5.2.1 Radiodiagnostické oddělení

Podle kategorizace pracovišť patří radiodiagnostické oddělení do pracoviště II. kategorie s významnými zdroji záření. Specifikace ZIZ je uvedena v tabulce 8.

Tabulka 8 Specifikace ZIZ na RTG oddělení [42].

Specifikace generátoru záření	Počet	Kategorie zdroje
RTG přístroj – skiografie + skiaskopie	3x	Významný
CT	1x	Významný
C-rameno	3x	Významný
Pojízdná skiografie	2x	Významný

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Kamerový systém v nemocnici je rozmístěn tak, že vchod ke všem RTG snímkovně i CT vyšetřovně je zaznamenáván. Systém vstupu na jednotlivá RDG pracoviště je dvojitý, kdy jsou na některých místech používány prosté zámky s klíči, na jiných místech je i přístupový systém na bázi elektronických čipů, kterými se pracovníci oddělení autorizují. Vstup do samotné RTG vyšetřovny je zajištěn před vniknutím nepovolané osoby dveřmi s „koulí“. Oddělení zobrazovacích metod disponuje třemi pojízdnými RTG přístroji, které se používají na operačních sálech. Jedná se o C-ramena, která jsou uložena v uzamykatelné místnosti v prostorech operačních sálů. Přístup k nim mají pouze radiologičtí asistenti z RTG oddělení. Dva pojízdné přístroje sloužící k pojízdné skiografii se nachází na dětském oddělení a na multioborové jednotce intenzivní péče. Jejich zabezpečení je zajištěno tak, že pokud chce radiologický asistent přístroj použít, vždy musí nejdříve telefonicky uvědomit personál na oddělení, kde oznámí, že ho bude využívat. Do roku 2007 byl u pracoviště CT a magnetické rezonance přístup pouze přes zabezpečovací systém, kde bylo vždy nutné provést autorizaci pomocí kódu, aby byl umožněn vstup k modalitě.

Po nesprávné autorizaci byl spuštěn poplachový systém. V roce 2007 byl tento systém zrušen [42].

5.2.2 Oddělení nukleární medicíny

Na pracovišti se uskutečňují především radiodiagnostická vyšetření. Specifikace pracoviště je uvedena v tabulce 9.

Tabulka 9 Specifikace pracoviště NM [43].

Specifikace pracoviště	
Kategorie pracoviště	II.
Kategorie otevřených a uzavřených zdrojů	Maximálně jednoduché
Kategorie SPECT/CT	Významný zdroj
Kategorie zabezpečení	4.

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Na pracovišti není zaveden kamerový systém. Zabezpečení nepovolaného vstupu do prostoru se ZIZ je zajištěno dveřmi s „koulí“. Jako vstupní bod slouží recepce, kde je v pracovní době vždy přítomen jeden ze zaměstnanců a kontroluje vstup osob do vnitřních prostor pracoviště se sledovaným a kontrolovaným pásmem. Nejvíce využívaným ZIZ je radionuklidový generátor $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. Na oddělení se vždy nachází dva generátory, ze kterých se získává $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Dodávka generátoru probíhá každý týden. Dalším zdrojem na pracovišti je $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ generátor, který je dodáván 2x až 3x týdně podle objednaných pacientů a počtu vyšetření. Několikrát za rok (cca 4x) se využijí ke speciálním diagnostickým vyšetřením nebo k terapii otevřenými zářiči i jiné radionuklidy, kdy dochází k jejich jednorázovému objednání a následné spotřebě. Dalšími ZIZ

jsou etalony ke kalibraci měřičů aktivity, teleskopická ukazovátka a SPECT/CT [43]. Specifikace ZIZ na oddělení NM je uvedena v tabulce 10.

Tabulka 10 Specifikace ZIZ na oddělení NM [43].

Typ zdroje záření	Specifikace zdroje
Generátor záření	SPECT/CT
Generátory radionuklidů	$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$
Radionuklidy	^{201}Tl , ^{90}Y , ^{153}Sm , ^{186}Re , ^{67}Ga
Etalony ke kalibracím a ověřování měřící a zobrazovací techniky	^{137}Cs + ^{57}Co + ^{153}Gd

Specifika dodávek radionuklidů

Distributor, který na oddělení dodává generátory záření a ostatní radionuklidy, má přístup do prostoru, kam dodávku ukládá. Na toto místo ve smluvený čas vloží radioaktivní látky a/nebo generátory radionuklidů. Zaměstnanci oddělení nukleární medicíny si zde materiál vyzvednou a dále s ním pracují. Tyto zásilky probíhají v brzkých ranních hodinách, nebo naopak v pozdních večerních hodinách. Pokud probíhá dodávka v pracovní době, distributor předává dodávku přímo pracovníkům oddělení. V areálu nemocnice je přítomna i bezpečnostní služba, jejíž zaměstnanci kontrolují mimo jiné i vchody do jednotlivých budov a oddělení. Pokud by tento pracovník vizuálně zjistil, že došlo k násilnému otevření dveří, tato skutečnost by byla dále řešena bezpečnostními složkami [43].

5.3 Oblastní nemocnice Příbram, a.s.

V oblastní nemocnici Příbram, a.s. byla získána data z oddělení zobrazovacích metod a oddělení nukleární medicíny.

5.3.1 Oddělení zobrazovacích metod

Podle kategorizace pracovišť patří radiodiagnostické oddělení do pracoviště II. kategorie s významnými zdroji záření. Specifikace pracoviště je uvedena v tabulce 11.

Tabulka 11 Specifikace ZIZ oddělení zobrazovacích metod [44].

Specifikace generátoru záření	Počet	Kategorie zdroje
RTG přístroj – skiografie + skioskopie	4x	Významný
CT	1x	Významný
C-rameno	5x	Významný
Pojízdná skiografie	1x	Významný
Mamografie	1x	Významný

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

V některých částech radiodiagnostického pracoviště jsou umístěny kamery. Systém vstupu na jednotlivá RDG pracoviště je trojí. Vstup do některých vyšetřoven je přes dveře s „koulí“, kdy klíče mají pouze pracovníci oddělení. Na některá pracoviště je vstup přes posuvné dveře, které se dají zevnitř místnosti elektronicky uzamknout a vstup je tedy možný pouze tehdy, když je zde přítomný obslužný personál. Nakonec je na pracovišti pro přístup na některá

místa zřízen elektronický systém, kdy je nutné k autorizaci použít elektronickou kartu. Oddělení disponuje pěti pojízdnými C-rameny, která jsou rozmístěna na různých pracovištích v areálu nemocnice (3x operační sály, 1x interní jednotka intenzivní péče, 1x gastroenterologické oddělení). Pojízdný RTG přístroj je umístěn v uzavřené technické místnosti na oddělení [44].

5.3.2 Oddělení nukleární medicíny

Na pracovišti se uskutečňují především radiodiagnostická vyšetření. Specifikace pracoviště je uvedena v tabulce 12.

Tabulka 12 Specifikace pracoviště NM [45].

Specifikace pracoviště	
Kategorie pracoviště	II.
Kategorie otevřených + uzavřených zdrojů	Maximálně jednoduché
Kategorie zdroje SPECT/CT	Významný
Kategorie zabezpečení	4.

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Na oddělení není zřízen kamerový systém. Vstup do kontrolovaného a sledovaného pásma pro pacienty a návštěvy je chráněn elektrickým vrátným umožňujícím vchod pouze s vědomím zaměstnanců příjmového úseku oddělení. Zaměstnanci oddělení mají přístup do/z neaktivní části v 1. nadzemním podlaží osobním výtahem. Pro zamezení přístupu nepovolaným osobám má výtah ochranu bezpečnostním zámekem. Dveře z chodby do místností se ZIZ jsou opatřeny „koulí“ zabraňující i nepředvídatelnému vstupu neoprávněné osoby do vyšetřovny. Dveře jsou vybaveny zámky a je zde i elektronické zabezpečení

s výstupem na dispečink nemocnice. Pokud by tedy došlo k násilnému nebo neoprávněnému otevření dveří, tuto informaci by obdržel a zaznamenal pracoviště dispečinku, kde by došlo k jejímu vyhodnocení. V současné době jsou radionuklidy a generátory radionuklidů na oddělení dodávány až 4x týdně včetně víkendů. Generátor $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ je dodáván 1x týdně, ostatní dny jsou dováženy ostatní radionuklidy (^{111}In , ^{201}Tl , ^{67}Ga , ^{123}I , ^{90}Y). Dalšími ZIZ jsou etalony ke kalibraci měřičů aktivity, teleskopická ukazovátka a SPECT/CT [45, 46]. V tabulce 13 je zobrazena bilance spotřebované aktivity na oddělení NM v roce 2019. K nejpoužívanějším radionuklidům patří ^{111}In a $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Tabulka 13 Bilance spotřebované aktivity na oddělení NM z roku 2019 [47].

Radionuklid	Aktivita jednotky k referenčnímu datu a hodině	Spotřeba jednotek v r. 2019
^{111}In – Indium oxinate	37 MBq	52
^{111}In – OctreoScan	122 MBq	12
^{201}Tl – Chloride injection	213 MBq	41
^{67}Ga – Citrate Injection	123 MBq	1
^{90}Y – Colloid suspencion for local injection	185 MBq	3
^{123}I – Datscan	185 MBq	46
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ –Technekow FM	4,3 GBq	1
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ – Technekow FM	8,6 GBq	50

Specifika dodávek radionuklidů

Dopravu radionuklidů a generátorů radionuklidů realizují dodavatelé převážně v noci. Personál radiofarmaceutického úseku si ji vyzvedává k dalšímu použití po příchodu na směnu kolem 6:00 ráno. Distributor ukládá dodávku RN do transportního skladu radionuklidů. Tento prostor je uzamčen a hlídán bezpečnostním čidlem napojeným na pult centrální ostrahy nemocnice. Kód pro vstup znají pouze řidiči a personál oddělení. Dodavatelé se do areálu nemocnice dostanou pouze přes ostrahu, která jim také otevírá budovu, v níž se nachází oddělení NM. Po uložení dodávky distributorem je sklad opět uzamčen a oddělení je zakódováno. Pokud je realizována dodávka během dne, řidič předává dodávku osobně pracovníkům oddělení [45, 46]. V tabulce 14 se nachází specifikace všech ZIZ na oddělení nukleární medicíny.

Tabulka 14 Specifikace ZIZ na oddělení NM [45].

Typ zdroje záření	Specifikace zdroje
Generátory radionuklidů	$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$
Radionuklidy	^{123}J , ^{201}Tl , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{51}Cr , ^{90}Y , ^{89}Sr , ^{153}Sm , ^{186}Re , ^{18}F
Etalony ke kalibracím a ověřování měřicí a zobrazovací techniky	^{137}Cs + ^{57}Co

5.4 Všeobecná fakultní nemocnice v Praze

Ve Všeobecné fakultní nemocnici v Praze (VFN) byla data poskytnuta z Radiodiagnostické kliniky a Onkologické kliniky.

5.4.1 Radiodiagnostická klinika

Kliniku tvoří 17 pracovišť a oddělení, která vyšetří ročně přibližně 100 tisíc pacientů a provedou cca 125 tisíc vyšetření [48]. V tabulce 15 je zobrazena specifikace všech ZIZ na klinice.

Tabulka 15 Specifikace ZIZ na oddělení RTG [49].

Specifikace generátoru záření	Počet	Kategorie zdroje
Stacionární skiografie	10x	Významný
Stacionární skiaskopie	2x	Významný
Skiograficko – skiaskopická stěna	2x	Významný
CT	3x	Významný
C-rameno	10x	Významný
Pojízdná skiografie	20x	Významný
Angiografie	4x	Významný
Mamografie	2x	Významný
Peroperační mamograf	1x	Nevýznamný

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Podle kategorizace pracovišť patří radiodiagnostické oddělení do pracoviště II. kategorie s významnými zdroji záření. Kamerový systém na oddělení zřízen není. Přístup do vyšetřoven s generátory záření je zajištěn „koulí“ na dveřích, klíče mají pouze pracovníci oddělení. Pojízdné RTG přístroje se nachází na uzavřených odděleních. C-rameno je umístěno na různých odděleních včetně operačních sálů. Tato oddělení jsou uzavřená a ZIZ se nacházejí v uzamykatelných místnostech. Přístup ke zdrojům mají pouze radiologičtí asistenti [49].

5.4.2 Onkologická klinika

Na onkologické klinice se k radioterapii používá helikální tomoterapie, která patří k jedné z mála v České republice. Za první 3 roky fungování bylo přístroj ozářil více než 1 000 pacientů. Na klinice je také používán afterloadingový systém k brachyterapii [49]. Specifika pracoviště jsou uvedena v tabulce 16.

Tabulka 16 Specifikace pracoviště radiační onkologie [49].

Specifikace pracoviště	
Kategorie pracoviště	II. + III.
Kategorie zdrojů	Významné
Kategorie zabezpečení (Brachyterapie)	2.

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Na pracovišti se nachází kamerový systém, který monitoruje prostor ozařoven. Dále je vstup k ozařovačům zajištěn elektronickým zabezpečením dveří, kdy mají povolený vstup pouze zaměstnanci vlastníci elektronickou kartu.

Tento elektronický systém je propojen na pult centrální ostrahy v areálu nemocnice. Vstup k ostatním ZIZ na pracovišti (CT, C-rameno, terapeutický rentgen) je zajištěn uzamčenými dveřmi. Další informace o zabezpečení zdrojů nelze uvádět z důvodu ochrany informací důležitých z hlediska zabezpečení radioaktivního zdroje (kategorie zabezpečení 2) [49]. V tabulce 17 je zobrazena specifikace ZIZ na Onkologické klinice.

Tabulka 17 Specifikace ZIZ na Onkologické klinice [49].

Typ zdroje záření	Specifikace zdroje (počet)
LINAC	Helikální tomoterapie
Brachyterapie	^{192}Ir , ^{106}Ru
CT	1x
C-rameno	1x
Terapeutický rentgen	2x

5.5 Nemocnice Jihlava, příspěvková organizace

V Nemocnici v Jihlavě byla zpracována data z Onkologického oddělení. To patří do Kooperující onkologické skupiny Kraje Vysočina, které má za cíl spolupráci při zajišťování nejlepší možné péče pro občany Kraje Vysočina.

5.5.1 Onkologické oddělení

Na Onkologickém oddělení probíhá zevní radioterapie pomocí lineárních ozařovačů a brachyterapie pomocí uzavřeného radionuklidového zdroje. Specifika pracoviště jsou uvedena v tabulce 18.

Tabulka 18 Specifikace Onkologického oddělení [50].

Specifikace pracoviště	
Kategorie pracoviště	II. + III.
Kategorie zdrojů	Významné
Kategorie zabezpečení (¹⁹² Ir)	2.

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Na pracovišti se nachází tři generátory záření a jeden uzavřený radionuklidový zdroj. Jedná se o dva lineární urychlovače, jeden terapeutický simulátor a přístroj pro automatický afterloading se zdrojem ¹⁹²Ir (nominální aktivita 10 Ci). Pracoviště s generátory záření jsou zajištěna proti vstupu nepovolaných osob „koulí“ na dveřích. Vstupy na pracoviště brachyterapie jsou možné pomocí čipových karet (elektronické zámky) pro vybrané pracovníky. Dveře přímo do ozařovny brachyterapie splňují požadavky bezpečnostní třídy RC4. V době nepřítomnosti pracovníků jsou prostory hlídány dvěma zabezpečovacími systémy s čidly pohybu. V prostorách ozařoven jsou sice kamerové systémy, ale ty slouží pouze k „hlídání“ polohy a stavu pacientů v době vlastního ozařování [50].

5.6 Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace

V Nemocnici Havlíčkův Brod byla data získána z Oddělení nukleární medicíny, z Oddělení radiodiagnostiky a z Oddělení radiační onkologie.

5.6.1 Radiodiagnostické oddělení

Podle kategorizace pracovišť patří radiodiagnostické oddělení do pracoviště II. kategorie s významnými zdroji záření. Specifikace ZIZ je popsána v tabulce 19.

Tabulka 19 Specifikace ZIZ na oddělení RTG [51].

Specifikace generátoru záření	Počet	Kategorie zdroje
Stacionární skiaskopie	1x	Významný
Stacionární skiografie	2x	Významný
CT	1x	Významný
C-rameno	2x	Významný
Pojízdná skiografie	2x	Významný
Angiografie	1x	Významný

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Kamerový systém na oddělení zřízen není, ale do budoucna se o něm uvažuje. Přístup do vyšetřoven s generátory záření je zajištěn „koulí“ na dveřích, klíče mají pouze pracovníci oddělení. Vstup do vyšetřovny s CT je zajištěn posuvnými dveřmi s elektronickým zámekem. Pojízdné RTG přístroje se nachází na uzavřených odděleních. Přístup k nim mají pouze radiologičtí asistenti, kteří se pro přístup ke zdroji musí ústně prokázat. C-ramena se nachází na oddělení urologie a na operačních sálech, kde jsou umístěny v uzamykatelných místnostech. Přístup ke zdrojům mají pouze radiologičtí asistenti [51].

5.6.2 Oddělení nukleární medicíny

Na Oddělení nukleární medicíny v Nemocnici Havlíčkův Brod se uskutečňují především diagnostická vyšetření, ale také zde částečně probíhá i radioterapie otevřenými zářiči. Specifikace pracoviště je uvedena v tabulce 20.

Tabulka 20 Specifikace pracoviště RTG [52].

Specifikace pracoviště	
Kategorie pracoviště	II.
Kategorie otevřených + uzavřených zdrojů	Maximálně jednoduché
Kategorie zdroje SPECT/CT	Významný
Kategorie zabezpečení	4.

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Kamerový systém na oddělení zaveden není, jedna kamera je pouze u zadního vstupu na oddělení (pro personál). Přístup do kontrolovaného pásma je zajištěn tak, že jsou na všech dveřích „koule“ a klíče vlastní pouze personál oddělení. Z otevřených radionuklidových zářičů se nejvíce na pracovišti využívá ^{99m}Tc , ^{81m}Kr . Dále potom ^{123}I (cca 2 pacienti za 14 dní). Radionuklidový generátor $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ je dodáván 1x týdně a generátor $^{81}\text{Rb}/^{81m}\text{Kr}$ je dodáván většinou 2x týdně. Pokud je objednané vyšetření s jiným radionuklidem, proběhne jednorázová dodávka tohoto radionuklidu. Dalšími ZIZ jsou etalony ke kalibraci měřičů aktivity, teleskopická ukazovátka a SPECT/CT [52]. V tabulce 21 je zobrazena specifikace ZIZ na oddělení NM.

Tabulka 21 Specifikace ZIZ na oddělení NM [52].

Typ zdroje záření	Specifikace zdroje
Generátory radionuklidů	$^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$, $^{81}\text{Rb}/^{81m}\text{Kr}$
Radionuklidy	^{123}J , ^{90}Y , ^{186}Re , ^{131}I
Etalony ke kalibracím a ověřování měřící a zobrazovací techniky	^{137}Cs + ^{57}Co + ^{133}Ba + ^{153}Gd

Specifika dodávek radionuklidů

Distributor objednanou dodávku RN uloží za přítomnosti pracovníka recepce do uzamykatelného prostoru v areálu centrální budovy nemocnice. Převzetí dodávky potvrdí pracovník recepce razítkem a podpisem. Z tohoto místa si radionuklidy přebírá pracovník oddělení NM k dalšímu využití na začátku pracovní směny. Pokud se jedná o dodávku uskutečněnou v pracovní době oddělení NM, firma předává zboží přímo pracovníkovi na oddělení [53]. V tabulce 22 je zobrazena bilance spotřebované aktivity na oddělení za rok 2019.

Tabulka 22 Bilance spotřebované aktivity za rok 2019 [54].

Specifikace zdroje	Aktivita/Aktivity	Množství [ks]
Generátor $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$	4 GBq	2
	4,3 GBq	2
	6 GBq	2
	6,45 GBq	3
	7,5 GBq	4
	8,6 GBq	24
	10,75 GBq	1
	12,9 GBq	11
^{123}I – Datscan	185 MBq	43
^{123}I – MIBG	148 MBq	3
^{123}I – Sodium Iodide	37 MBq	9
^{186}Re	185 MBq	1
Kryptoscan $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$	74 MBq	48
$^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ – LKR74	74 MBq	43
^{90}Y	1110 MBq	1
	1480 MBq	3
^{131}I (Theracap)	148 MBq	1
	222 MBq	1
	259 MBq	1
	296 MBq	1
	370 MBq	1
	400 MBq	2
	550 MBq	4
^{131}I – Natriumiodid	11 MBq	2

5.6.3 Oddělení radiační onkologie

Na oddělení radiační onkologie se nachází kobaltový ozařovač TERAGAM 01 s uzavřeným radionuklidovým zdrojem ^{60}Co . Specifika pracoviště jsou uvedena v tabulce 23.

Tabulka 23 Specifikace pracoviště radiační onkologie [55].

Specifikace pracoviště	
Kategorie pracoviště	II. + III.
Kategorie zdrojů	Významné
Kategorie zabezpečení (^{60}Co)	1.

Specifikace zabezpečení pracoviště a používaných zdrojů

Na pracovišti se nachází uzavřený radionuklidový zdroj ^{60}Co , který je vysokoaktivním zdrojem s aktivitou 337 TBq k 1. 1. 2015. Dále je na oddělení umístěn rentgenový ozařovač s napětím $U = 20\text{--}200\text{ kV}$, klinicky využívající tři energie: 60 kV, 120 kV, 180 kV. Dle zařazení ZIZ do 1. kategorie zabezpečení disponuje pracoviště Plánem zabezpečení zdroje 1. kategorie zabezpečení, které podléhá ochraně informací důležitých z hlediska zabezpečení zdroje. Na pracovišti jsou přítomny zabezpečovací prvky, které jsou v souladu s platnou legislativou. Do budoucna se uvažuje o pořízení zabezpečovacího systému ze Spojených států amerických, který by zaručil např. monitorovací kamerový systém s výstupem na dispečink nemocnice [55].

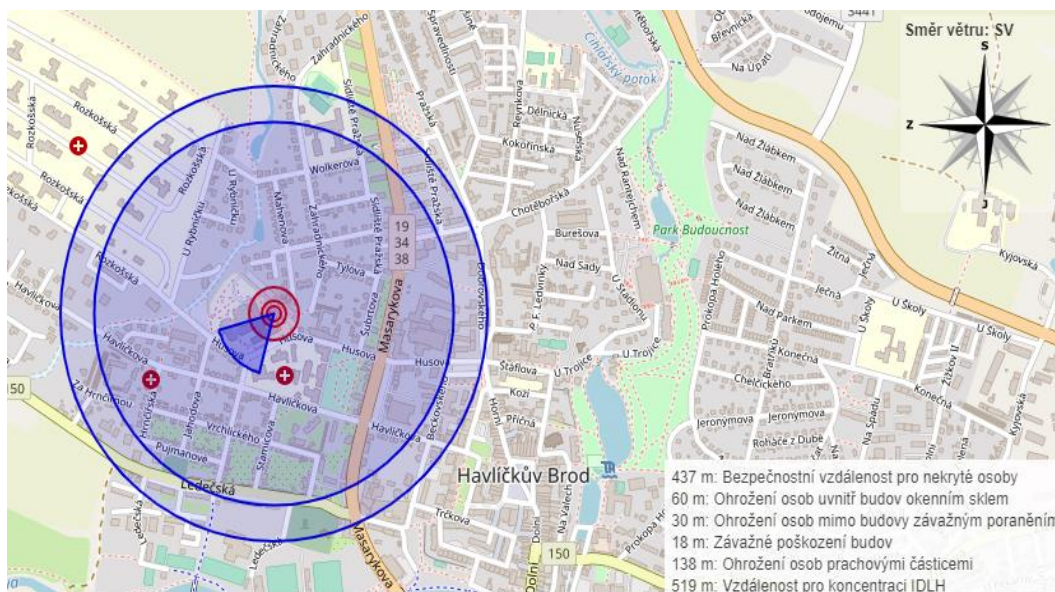
5.7 Simulace použití špinavé bomby

Pro simulaci použití špinavé bomby byla zvolena varianta radiologického disperzního zařízení, které je vyrobeno pomocí nástražného výbušného zařízení a směsi radioaktivních látek. Na obrázku 5 jsou zaznamenány vstupní parametry, které byly vloženy do SW programu TEREX.

Vstupní parametry	
Látka	anorganický prach (oxidy kovů)
Hmotnost prachové náplně	5 kg
Rychlost větru	3 m/s
Zataženo	0 %
Doba vzniku	Noc, ráno nebo večer
Typ atmosférické stálosti	Inverze - velmi stabilní
Typ povrchu ve směru šíření látky	Obytná krajina
Hmotnost nálože	5 kg
Typ výbušniny v náloži	TNT

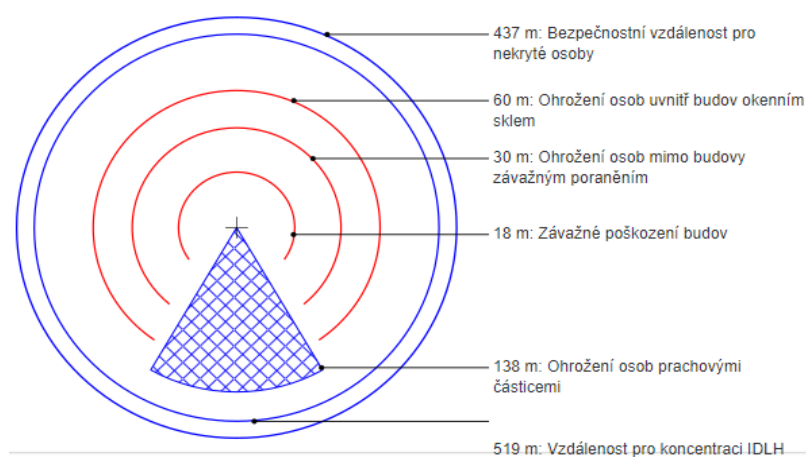
Obrázek 5 Vstupní parametry v SW programu TEREX.

V programu byla zvolena látka tzv. „anorganický prach (oxidy kovů)“, která v tomto programu nejméně napodobuje účinky komerčně dostupných radioaktivních látek. Pro účely simulace byla vybrána náplň v podobě radioaktivních látek o hmotnosti 5 kg, kterou by potenciální pachatelé mohli nelegálně získat např. ze zdravotnických zařízení (především na oddělení nukleární medicíny nebo brachyterapie). Jako nálož byla použita trhavina TNT o stejné hmotnosti jako náplň ŠB, tedy 5 kg. Místem vzniku MU byla Nemocnice v Havlíčkově Brodě. Tento objekt byl zvolen jako příklad zasažení měkkého cíle, kde se nachází velký počet nechráněných lidí. Z vytvořené simulace vyšlo, že nejvíce ohrožené místo je do 18 m od epicentra, kde by došlo k největšímu poškození budov a kde by bylo nejvíce zraněných nebo mrtvých osob. Na obrázku 6 je znázorněno přibližné ohraničení místa výbuchu s možným šířením do okolí.



Obrázek 6 Zanesení simulovaného výbuchu do mapového podkladu.

Na obrázku 7 je schematické znázornění zón účinků exploze. Do 30 m od místa výbuchu by byly závažně ohroženy osoby mimo budovy. Do okolí zhruba 60 m by byly ohroženy osoby uvnitř budov, kde by jim hrozilo poranění způsobené okenním sklem. Do vzdálenosti 138 m by byly ohroženy osoby prachovými částicemi, kde by nejvíce záleželo na použité radioaktivní látce a také výbušnině. Celková evakuace by měla proběhnout do vzdálenosti 519 m od místa exploze.



Obrázek 7 Schematické znázornění zón účinků exploze.

6 DISKUZE

Tato diplomová práce se zabývala způsobem zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve vybraných zdravotnických zařízeních a možnostmi jejich zneužití. Hlavním stanoveným cílem bylo zjistit, jaké zabezpečení zdrojů ionizujícího záření je na zvolených pracovištích. Stanovené hypotézy ověřovaly zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních dostatečné a jestli je riziko zneužití zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních k výrobě špinavé bomby minimální. V následujících odstavcích bude provedeno vyhodnocení a porovnání zabezpečení na jednotlivých odděleních vybraných zdravotnických zařízeních a bude posouzeno riziko odcizení a zneužití zdrojů ionizujícího záření přítomných na pracovištích. Druhá část kapitoly je věnována možnostem zneužití zdrojů ionizujícího záření a připravenosti na tento typ událostí.

6.1 Zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve vybraných zdravotnických zařízeních

Zabezpečení pracovišť se ZIZ proti nepovolanému vstupu a proti odcizení je ve zdravotnických zařízeních stanovené především legislativními požadavky a kontrolou jejich plnění. Na základě získaných informací ze zvolených zdravotnických zařízení a vybraných oddělení, je v následujících odstavcích provedeno vyhodnocení zabezpečení ZIZ a možnost odcizení ZIZ. Jsou zde porovnávána jednotlivá pracoviště mezi sebou a v případě potřeby jsou zde navržena některá opatření, která by mohla přispět k ještě větší bezpečnosti pracoviště.

Pracoviště nukleární medicíny

Na základě zařazení pracovišť nukleární medicíny do kategorie ohrožení D, kdy nelze vyloučit ztrátu/zneužití/odcizení ZIZ, je zásadní identifikace případů,

kdy tato situace může nastat. Jedna z možností je **uložení dodávky distributorem na jiném než smluveném místě pracoviště / nesprávné zajištění dodávky**. V tomto případě by hlavní roli hrál lidský faktor, kdy by mohlo dojít k nesprávnému pochopení instrukcí, tím pádem uložení radionuklidů na nechráněné místo, odkud by se dodávka mohla ztratit nebo by mohla být odcizena. Stejný případ by mohl nastat, pokud by pracovníci firmy nebo personál zdravotnického zařízení nezajistili prostor, do kterého dodávku ukládají (neuzamčení prostoru). Dalším potencionálním případem **nezajištění vchodů/vstupů na oddělení obvyklým způsobem nebo násilné vniknutí nepovolané osoby na pracoviště s případným odcizením zdroje**. Na některých pracovištích není zřízen kamerový systém nebo bezpečnostní služba v podobě fyzické ostrahy objektu. Mohlo by dojít k situaci, kdy personál, který jako poslední opouští pracoviště, nezajistí uzamčení oddělení nebo dojde k násilnému vniknutí do prostor se ZIZ. V případě nepřítomnosti bezpečnostních prvků by mohla vzniknout prodleva mezi odcizením zdrojů a samotným zjištěním události, která by mohla být klíčová pro odhalení pachatele a nálezu ZIZ. Právě z důvodu možného odcizení RN probíhá **zabezpečení prostoru dodávky RN**. Prostor, kam distributor ukládá dodávku radionuklidů, se v jednotlivých pracovištích liší. Lze konstatovat, že je zde určitým způsobem uplatňován odstupňovaný princip. Pracoviště se liší především objemem prováděných vyšetření, a tedy množstvím spotřebované aktivity radionuklidů (viz tabulky 7, 13, 22 s bilancí spotřebovaných radionuklidů za rok). U menších pracovišť je použito méně zabezpečovacích prvků než u pracovišť, která kvůli velkému množství vyšetření musí zajistit větší množství ZIZ o vyšších aktivitách. Na menších pracovištích se RN ukládají do vyčleněného prostoru, který je uzamčen pomocí zámku a klíče (např. Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace, Oblastní nemocnice Kolín, a.s.). Na některých pracovištích je zavedena dvojí ochrana, kdy je místnost kromě zámku na dveřích zajištěna ještě bezpečnostním čidlem, které může být napojeno na pult centrální ochrany

v nemocnici. Pracovník, který dodávku ukládá, tedy musí vlastnit klíč a znát bezpečnostní kód (Oblastní nemocnice Příbram, a.s.). Specializovanější zabezpečení je na pracovištích, kde probíhá více vyšetření, tedy je zde přítomno více radionuklidů, a také na těch pracovištích, kde probíhají specializovaná vyšetření ve formě terapie otevřenými zářiči. Zde se kromě zámku na dveřích a vstupu na čipovou kartu přidává ještě kamerový systém, který monitoruje prostor, kde jsou radionuklidy uloženy distributorem (FN Motol). Největší opatření na odděleních NM je v prostorách, kde jsou ukládány a skladovány RN. Ke zvýšení bezpečnosti u menších pracovišť by mohl přispět kamerový systém, který by monitoroval místo, kam jsou dodávky ukládány. Zabezpečení proti nepovolanému vstupu do vyšetřoven a místností se ZIZ je zajištěno převážně „koulí“ na dveřích. Podle zjištěných informací lze konstatovat, že zavedená zabezpečení a opatření na odděleních nukleární medicíny jsou dostatečná. Pracoviště NM se na riziko ztráty nebo odcizení RN připravují prostřednictvím vnitřního havarijního plánu, kde je popsána připravenost k odezvě ve formě technických a organizačních opatření. V tomto dokumentu jsou stanoveny kroky, které se mají učinit, pokud dojde ke zjištění ztráty/odcizení nebo zneužití ZIZ. S tím úzce souvisí i nutnost vymezení způsobů ověřování vnitřního havarijního plánu, zásahových instrukcí a ověřování funkčnosti technických prostředků havarijní připravenosti. Funkčnost systému těchto opatření a jejich ověřování přispívá ke snižování pravděpodobnosti vzniku RMU a k případnému zmírnění následků již vzniklých událostí.

Pracoviště radiodiagnostiky

Na všech pracovištích radiodiagnostiky, kde proběhl sběr dat, je vstup ke generátorům záření zajištěn převážně dveřmi s „koulí“. Na některých pracovištích je monitorován vstup do vyšetřoven (Oblastní nemocnice Kolín, a.s., Oblastní nemocnice Příbram, a.s.) a některá oddělení mají zaveden i elektronický systém přístupu ke generátorům záření (Oblastní nemocnice Kolín, Oblastní

nemocnice Příbram). Na těchto odděleních jsou možnosti odcizení ZIZ velmi malé. Generátory záření jsou samy o sobě pevně umístěny ve vyšetřovnách, a jejich demontáž tak není možná. Jediné možné riziko představují pojízdne přístroje (C-rameno, pojízdny RTG přístroj). Ty se nacházejí vždy v uzavřeném a uzamčeném prostoru (místnost, oddělení). Váha těchto přístrojů může být např. 190 kg, a manipulace s nimi tak není snadná (zvláště u starších typů). Pokud by tedy došlo k vniknutí do prostoru s pojízdným zdrojem, přesun by byl možný pouze výtahem a vzhledem k velikosti přístroje by tento proces jistě vzbudil pozornost. Na všech pracovištích, kde probíhal sběr informací, je zabezpečení pojízdných skiagrafických přístrojů stejné. K těmto generátorům se dostávají pouze radiologičtí asistenti, kteří jsou předem upozorněni, že se mají na dané oddělení dostavit. Podle zjištěných informací lze konstatovat, že zavedená zabezpečení a opatření na odděleních radiodiagnostiky jsou dostatečná.

Pracoviště radioterapie

Odcizení přístrojů typu LINAC je v pracovní době i mimo ni téměř nemožné. Muselo by dojít k jejich demontáži, která by byla časově a technicky velmi náročná a složitá. Zabezpečení proti nepovolanému vstupu do prostoru k vyšetřovně s LINAC je zajištěno buď dveřmi s „koulí“ (Nemocnice Jihlava, příspěvková organizace), nebo elektronickými zámky s výstupem na pult centrální ostrahy (VFN). Vstupy do některých částí pracoviště (brachyterapie, vyšetřovny s LINAC) jsou zajištěny kromě elektronického zámku i dveřmi bezpečnostní třídy RC4. Ve vyšetřovnách a v některých případech i mimo ně je nainstalován kamerový systém, který slouží především ke kontrole pacienta. Pracoviště, kde probíhá i brachyterapie, nebo pracoviště s radionuklidovým ozařovačem ve formě ^{60}Co , patří do kategorie zabezpečení 1.–3. kategorie. V prostorách těchto ZIZ jsou zavedena speciální opatření, která jsou ustanovena v PZ. Tento dokument a informace v něm obsažené jsou dostupné pouze pracovníkům, kteří tyto informace potřebují k výkonu povolání. Většina

pracovišť má zaveden kamerový systém, který monitoruje prostor ozařovny a slouží ke kontrole pacienta. Při zkoumání možnosti odcizení ZIZ v radioterapii by tedy přicházely v úvahu pouze ZIZ používané při brachyterapii, jako je např. ^{192}Ir . Pachatel by musel překonat systémy zabezpečení dveří a vědět, kde se ZIZ nachází. Tato pravděpodobnost je velmi malá. Určitou možnost odcizení představuje i kobaltový ozařovač, v němž se nachází uzavřený zdroj ^{60}Co . Konstrukce celého ozařovacího přístroje, který obsahuje mimo jiné stínící materiály, má značnou hmotnost. Muselo by tedy dojít k demontáži celého zařízení, aby se pachatel dostal ke zdroji, což by bylo velmi časově i technicky náročné. Podle zjištěných informací lze konstatovat, že zavedená zabezpečení a opatření na odděleních radioterapie jsou dostatečná.

6.2 Možnost zneužití zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních k výrobě špinavé bomby

Jedním z hlavních důvodů, proč nejsou zdravotnická ani jiná zařízení využívající ZIZ cílem pachatelů krádeží je skutečnost, že zabezpečení těchto zdrojů je na vysoké úrovni. Další důvod, proč doposud nebyly ZIZ využity k výrobě a použití radiologické zbraně je zřejmě ten, že pro optimalizaci produkce radioaktivního materiálu spojeného s výbušninou nebo jiným disperzním zařízením by pachatelé museli mít odpovídající znalosti. Aby splnila radioaktivní zbraň účel zamoření oblasti radiací a ozáření obyvatel, ten, kdo by zbraňový systém vytvářel by musel disponovat znalostmi o fyzikálních, chemických a dalších vlastnostech použitého radioaktivního materiálu. Podle těchto kritérií by zvolil vhodný radionuklid a jeho množství a spojil by ho s vhodným zařízením pro rozptyl. Lze tedy říct, že použití účinné ŠB by obnášelo spolupráci odborníků na jednotlivé části ŠB a vlastnictví náležitých prostředků. Z tohoto pohledu vyplývá, že k dosažení vlastnictví opravdu účinné ŠB a následnému účinnému použití zbraně vede poměrně dlouhá a náročná cesta [22, 23, 26].

Druh radioaktivního zdroje použitého v radiologické zbraní je klíčovým faktorem, který určuje povahu poškození zdraví člověka. Při vdechování radioaktivního materiálu představují největší zdravotní rizika alfa zářiče. Na druhou stranu před alfa částicemi se lze snadno chránit (odstínění pomocí listu papíru), a tak představují nebezpečí pouze v případě, že jsou přímo vdechovány nebo požitý. Vdechované radioaktivní materiály mohou zůstat v plicích neomezeně dlouho a pokračovat tak v ozařování vnitřních tkání a orgánů. Většina radioaktivního materiálu, který by mohl být použit, by vyzařovalo vysokoenergetické záření beta nebo gama, které se hůře stíní (záření gama – olovo, beton, záření beta – plast, plexisklo). Na rozdíl od alfa zářičů je vnitřní ozáření zářičem gama mnohem méně nebezpečné. U záření beta účinky závisí na energii a prostředí, kterým záření prochází. Radionuklidy tedy vysílají různé typy ionizujícího záření a liší se např. v energii, elektromagnetickém náboji nebo pronikavosti záření. Důležitým faktorem je také poločas rozpadu radionuklidu. Radioizotopy s krátkými poločasy (sekundy, minuty, hodiny), by se rozpadly poměrně rychle a obvykle by nepředstavovaly bezpečnostní hrozbu, protože jejich úroveň radiace by se snížily pod prahovou hodnotu nebezpečí dříve, než by mohly být použity ve formě radiologické zbraně. Na druhou stranu by radioizotopy s velmi dlouhými poločasy rozpadu (tisíce let), obvykle nepředstavovaly bezpečnostní hrozbu, protože tyto materiály emitují záření výrazně pomaleji v porovnání s radionuklidy s kratšími poločasy rozpadu. Velká část komerčně dostupných radionuklidů tedy nepředstavuje významné bezpečnostní hrozby, ale jsou tu i radionuklidy, které mají poločasy střední délky (dny až zhruba tisíc let), které by mohly být použity. Dalším faktorem, který by mohl ovlivňovat rozhodování o použití daného radionuklidu je detekovatelnost ZIZ. Protože má záření alfa krátký dosah, byl by problém ho detekovat. U záření beta a gama je detekovatelnost snazší a je proveditelná přímo v terénu. Důležitým ukazatelem pro možné odcizení a zneužití ZIZ ze zdravotnických zařízení je také velikost a hmotnost radionuklidů s ohledem

na případný transport. Např. radionuklidový ozařovač se zdrojem ^{60}Co je díky své konstrukci nesnadným cílem pro potenciální zloděje, ale např. brachyterapeutické zdroje váží jen stovky gramů a jejich velikost je pouze několik milimetrů. Velmi důležitými jsou také fyzikálně chemické a chemické vlastnosti zdrojů, která mohou zvýšit nebo snížit bezpečnostní rizika. Zejména chemická forma silně ovlivňuje snadnost nebo obtížnost, s kterou může být látka dispergována do okolí. Např. chlorid cesný je na prvním místě v seznamu vysoce rizikových, snadno dispergovatelných radioaktivních zdrojů, protože se jedná o látku podobnou prášku, kterou lze šířit pouhým vyfukováním. Naopak ^{60}Co nebo ^{192}Ir je nejčastěji ve formě kovových pelet nebo tyčí, takže jeho rozptýlení by bylo obtížnější. Další důležitou otázkou působení radionuklidů na lidský organismus je metabolismus radionuklidů v lidském těle. Biologicky patří k nejvýznamnějším např. radioizotopy jódu a cesia. Jód ^{131}I (smíšený alfa a beta zářič s poločasem rozpadu 8 dní), který by mohl být zneužit, je velmi dobře rozpustný ve vodě a téměř ve 100 % se vstřebává do krevního řečiště, odkud je poté jako neradioaktivní jód vycytán ve štítné žláze, kterou může poškodit. Dalším zástupcem je cesium ^{137}Cs , smíšený beta a gama zářič, který má poločas rozpadu 30 let. Je vysoce rozpustný ve vodě a vstřebává se jak do živých organismů, tak i do rostlin nebo dřevin. Jeho účinky ve špinavé bombě by tedy mohly způsobit nejen přímé negativní účinky na zdraví, ale pokud by se dostal do potravního řetězce, mohl by dále způsobovat poškození zdraví. Dle zmíněných kritérií se ve zdravotnických zařízeních se nacházejí některé radionuklidy, které by mohly být zneužitelné [3, 22, 56]. Je to např. ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{131}I , ^{192}Ir nebo ^{90}Y .

I když pravděpodobnost odcizení a zneužití radioaktivních materiálů ze zdravotnických zařízení je malá, je důležité s touto možností počítat a zavádět určitá opatření. Nejdůležitější v této oblasti je vytvářet analýzu rizik, která odhalí případné nedostatky a pomůže při přípravě a plánování potřebných opatření. Zajištění následující bodů v oblasti problematiky ZIZ lze považovat za důležité

z hlediska jejich zneužitelnosti. První z nich je **zajištění bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření**. Na otázku nejdůležitějších faktorů zabezpečení ČR před teroristickým útokem za použití radioaktivních látek nebo zdroje ionizujícího záření byla odpověď vrchního komisaře na oddělení ochrany obyvatelstva (MV-GŘ HZS ČR) v diplomové práci na téma „Radiologický terorismus“ od autorky Mgr. Kristýny Dražanové [57] tato: *„Fungující systém evidence zdrojů ionizujícího záření, dostatečná fyzická ochrana jaderných zařízení, kontrola a ochrana při přepravě jaderných materiálů a zdrojů. Fungující složky státu, které mají za úkol rozpoznávat aktivity různých skupin a organizací, které by mohly zamýšlet provedení teroristického útoku“*. Ze získaných informací ze zdravotnických zařízení lze tvrdit, že zajištění bezpečnosti ZIZ ve zdravotnických zařízeních je na vysoké úrovni. Veškeré nezbytné náležitosti, které jsou spojené s činností se ZIZ v oblasti bezpečnosti jsou stanoveny zákony a vyhláškami, jejichž dodržování pravidelně kontroluje příslušný úřad (SÚJB). O zabezpečení pracovišť se ZIZ hovořila v rozhovoru pro Krajské listy předsedkyně SÚJB, Ing. Dana Drábová, Ph.D. [58] [58]: *„Nejúčinnější obranou je zavedení takového systému kontrol při používání zdrojů ionizujícího záření a jaderného materiálu, aby se nemohl dostat do rukou teroristů či zločinců. Nedá se ovšem říci, že ve všech zemích je takový systém důsledně a efektivně zaveden. V České republice je používání zdrojů ionizujícího záření velmi důsledně kontrolováno, zdroje jsou rozděleny do kategorií právě podle své potenciální nebezpečnosti, a to i se zohledněním jejich možného zneužití. Podle toho, v jaké kategorii je zdroj zařazen, jsou nastaveny požadavky na jeho zabezpečení. Legislativou je požadováno, aby zdroje byly skladovány tak, aby bylo zajištěno, že s nimi nebudou nakládat neoprávněné osoby, a aby bylo bráněno ztrátě či odcizení zdroje nebo jeho poškození“*. Vzhledem k tomu, že se zatím žádná krádež ZIZ ze zdravotnických a řízení nestala, nelze tvrdit, že je systém opatření a zabezpečení proti zneužití zcela nedobytný a dokonalý. Důležité ale je, že jsou opatření zavedena a fungují při běžném, obvyklém provozu. Možnou zkouškou, jak zjistit kvalitu zavedených bezpečnostních systémů, by bylo uspořádání cvičení, při němž by

byla bezpečnost pracoviště ověřena. Dalším bodem je otázka **informovanosti obyvatelstva**. Při použití ŠB by pravděpodobně nešlo o tisíce mrtvých lidí, jako spíše o tisíce panikařících lidí. Jak říká referent oddělení ochrany obyvatelstva (MV-GŘ HZS ČR): „*Považuji za potřebné výrazně snížit úroveň radiofobie v naší populaci (vyvolané, tipuji, asi absencí základních odborných poznatků a z něho vyplývající emoce strachu z neznámého, a též neexistencí srozumitelného podání (v duchu tzv. entertainmentu – přitažlivého, zábavného, pochopitelného, a tudíž snadno zapamatovatelného)). A to nejen v řadách veřejnosti, ale i v případě osob, které o této problematice rozhodují na vyšší úrovni. Také je, jsem přesvědčen, nutné zlepšovat krizovou komunikaci státních institucí směrem k veřejnosti. Soustředil bych se rovněž více na obecné schopnosti reakce na výskyt či nález radioaktivních materiálů – nemusí jít přímo o terorismus (nálezy ZIZ apod.). Pro osvojení poznatků a schopností adekvátně a správně reagovat je důležité i praktické procvičování (tj. nikoliv jednorázové, nýbrž systematické, pravidelné, zaměřené na dílčí části problematiky a cyklicky zakončované souhrnným, komplexním procvičením)“ [57]. S tímto názorem lze jen souhlasit. Bylo by vhodné informovat obyvatelstvo o radioaktivních látkách a jejich účincích na zdraví právě např. při útoku ŠB. Bohužel lidé kvůli válečným konfliktům s použitím jaderných zbraní nebo nehodě v Černobyli mají z radioaktivity velký strach. Právě ten by při použití ŠB mohl způsobit mnohem větší problémy než zařízení samotné.*

Pro zmírnění těchto potencionálních následků by bylo možné např. vytvořit informační materiál, který by shrnoval hlavní informace o ŠB a co v případě jejího použití dělat. Osvěta by mohla probíhat také na školách. Jedním z dalších důležitých bodů je **připravenost na odezvu**. I když je pravděpodobnost odcizení a zneužití ZIZ malá, je nutné se na tuto situaci připravit. Akceschopnost by měla být jak na straně pracoviště, které se ZIZ pracuje přímo, tak ze strany osob a institucí, které by situaci s odcizením a případným zneužitím ZIZ řešily. Většina pracovišť, kde toto odcizení hrozí, má ve vnitřních havarijních plánech

popsán postup, který by byl v případě potřeby uplatněn. Při znalosti posloupnosti jednotlivých kroků by mohla být odezva na nastalou situaci rychlá a efektivní. Reakce pracovníků oddělení na tuto situaci by mohla být prověřována interním cvičením, kdy by se zjistilo, zda všichni zaměstnanci vědí, jak by měli reagovat a jaké kroky by měli učinit v případě zjištění nepřítomnosti ZIZ na určeném místě. Pokud by k odcizení došlo a nebyl vypátrán viník, mohlo by dojít ke zneužití tohoto materiálu právě k **vytvoření radiologické zbraně**. Ke zmírnění dopadu událostí radiologické povahy je nutné, aby u nich zasahovaly týmy specialistů, kteří jsou k této činnosti řádně vycvičeni a mají k němu potřebné vybavení. Samotné účinky takových RMU na obyvatelstvo a okolí závisí na jejich efektivitě práce, jednání s přítomnými lidmi, a především na rychlosti zásahu. V České republice je pro případ použití ŠB vytvořena typová činnost, kterou vydává MV-generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR odbor IZS (integrovaný záchranný systém) k výkonu služby. Typová činnost slouží jako opora k postupu složek IZS a dalších začleněných skupin (např. Armáda ČR, Celní správa ČR) při záchranných a likvidačních pracích s ohledem na druh a charakter mimořádné události. Typová činnost, která se týká radiologických zbraní, je **STČ 01/IZS „Špinavá bomba“**. Ta zahrnuje jednotlivé listy zasahujících složek a ostatních organizací, které se na zásahu podílejí, kde jsou uvedeny postupy, kterými se mají v místě zásahu řídit. V období, kdy není aktuální žádný útok, by měl probíhat vývoj a výcvik pro následné nasazení nejúčinnějších metod, např. k čištění radioaktivních materiálů a dekontaminace budov, a dále vytváření lepších strategií pro řešení mimořádných událostí pro všechny úrovně správy. Agentura pro jadernou energetiku NEA (The Nuclear Energy Agency) je specializovaná agentura při Organizaci pro hospodářskou spolupráci a rozvoj OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), která má dlouholetou tradici v oblasti jaderné havarijní politiky, plánování, připravenosti a řízení. Agentura prostřednictvím svých činností nabízí svým členským státům pomoc v oblasti

jaderné a radiologické připravenosti s cílem usnadnit a vylepšit strategie jaderné havarijní připravenosti a reakce na mezinárodní úrovni. Výbor NEA pro radiační ochranu a veřejné zdraví CRPPH (Committee on Radiological Protection and Public Health) se prostřednictvím různých podskupin zaměřuje na zlepšení účinnosti mezinárodní jaderné havarijní připravenosti a řízení. Jedním z nástrojů je příprava a vedení série mezinárodních cvičení pro nouzové jaderné cvičení INEX (International Nuclear Emergency Exercises). INEX 4 z roku 2010 bylo zaměřené na použití improvizovaného jaderného zařízení nebo radiologického disperzního zařízení. V tomto cvičení mělo dojít k prověření krizového řízení mimořádných událostí a reakcí na rozsáhlou radiologickou kontaminaci městského prostředí. Výsledkem těchto cvičení by mělo být získání znalostí možných scénářů použití radiologického disperzního zařízení, zlepšení a vývoj pohotovostních plánů, nácvik rozhodování s ohledem na rozdílné názory vedoucích pracovníků, vytváření optimalizačních strategií a plánování přechodu na procesy obnovy. Právě výbuch špinavé bomby byl simulován v rámci strategického cvičení INEX 4 na několika místech v ČR. Např. v Praze se cvičení uskutečnilo v roce 2015, kdy se především prověřovala připravenost na zvládnutí následků události, fungování systému péče o zraněné osoby (součástí i opatření v cílových zdravotnických zařízeních), dále se řešila komunikace s veřejností a médii a také dekontaminace zasaženého prostoru. Formou řízené diskuse proběhlo 20. 2. 2015 v učebně stanice Hasičského záchranného sboru Ústeckého kraje – Litoměřice cvičení na strategické úrovni. Jednalo se o výbuch ŠB v prostoru Mírového náměstí v Litoměřicích. Cvičení, které se konalo ve spolupráci s Krajským úřadem Ústeckého kraje a SÚJB, se zúčastnily základní složky IZS Ústeckého kraje. Jedním z dalších bodů je **technologická a IT podpora**. V současnosti je svět informačních technologií velmi mocný a mohl by se využít i ve formě osvěty a případné pomoci informování obyvatelstva o aktuální situaci. V případě krizové situace spojené s odcizením a zneužitím ZIZ by bylo vhodné využít všechny dostupné prostředky k podání objektivních

informací o mimořádné události. Touto cestou by také mohly být získány užitečné informace k objasnění příčin a důsledků události. Důležitá sdělení by byla předána pomocí rozhlasového nebo televizního vysílání, díky kterému by mohly být zmírněny probíhající obavy. Další výhodou dnešní doby jsou nejmodernější počítačové technologie, které je vhodné a žádoucí využívat právě i v případě použití radiologické zbraně. Softwarový program, jako je TEREX v případě nastalé události pomůže s řešením otázky šíření radioaktivních látek, a poskytne tak přibližnou oblast, která byla útokem zasažena. Ve spojení s mapovým podkladem je možné vytvořit přehledný plán zasažené oblasti, který se použije při evakuaci a usnadní tak práce zasahujícím institucím [59, 60, 61, 62].

Na jednu stranu je velké štěstí, že zatím nebyl spáchán žádný teroristický čin za použití radiologických zbraní ve velkém měřítku. To však znamená, že naše chápání takových událostí je omezeno pouze na hypotetické scénáře. Z velkého množství publikovaných prací je zřejmé, že mnozí považují za nejpravděpodobnější teroristické napadení scénář, kdy by bylo použito **detonační zařízení k rozšíření radioaktivního materiálu**. Události jako 11. září 2001, kdy došlo k sérii koordinovaných teroristických útoků, poukazují na to, že organizace, jako je al-Kajda, jsou ochotny přijímat odborníky, školit jednotlivce a investovat čas a peníze do dosažení svých cílů. Proto je nezbytné, aby vlády spolupracujících zemí a výzkumná komunita při přípravě na radiologický incident s těmito scénáři počítaly. Na provedené simulaci použití ŠB ve formě výbušného zařízení spojeného s radioaktivní látkou je patrné, že efekt této zbraně by byl ovlivněn několika faktory. K nejdůležitějším z nich by patřilo množství použité výbušniny, které by nejvíce ovlivnilo počet mrtvých přímo na místě incidentu a počet zraněných v blízkém okolí. Další proměnnou jsou použité radioaktivní látky a jejich množství. Podle toho, jaké a v jakém množství by byly použity radionuklidy, by probíhala dekontaminace a evakuace

místa. Velmi důležitou roli by hrálo místo incidentu, které by ovlivnilo, jak počet postižených osob, tak i celý zásah a následnou dekontaminaci. V neposlední řadě by svou roli hrály i meteorologické podmínky, denní doba či další faktory, které by mohly jak negativně, tak pozitivně ovlivnit celou událost. Ve vědeckém časopisu „Scientific American“ (listopad 2002) je uveden příklad, kde se uvažovalo o následcích explozivního použití ^{137}Cs s aktivitou $1,3 \times 10^{14}$ Bq. Prostor výbuchu ŠB byl v jihovýchodní části Manhattanu, kde by bylo území o rozloze 800 km² zamořeno více, než připouštějí tamní normy. V rozsahu cca 20 ulic by obyvatelé byli po 30 let vystaveni výrazně zvýšenému riziku rakoviny (v případě neprovedení dekontaminace). Okolí v místě události (asi 15 km²) by muselo být podle doporučení ICRP trvale evakuováno. Škody, které by výbuch způsobil, by řádově dosahovaly několika miliard amerických dolarů a dekontaminace tak velkého území by byla velmi nákladná a složitá. Probíhala by zřejmě tak, že by specializované jednotky musely odstranit částičky radioaktivního prachu z vnějších ploch, štěrbin a trhlin. Také by na nějakých místech musel být odstraněn povrch silnic a chodníků, stejně jako horní vrstva půdy v parcích a zahradách. Kromě těchto dopadů by událost měla negativní psychologický efekt na zdejší obyvatelstvo. Vznikl by velký chaos, panika, mohl by nastat rozsáhlý útěk obyvatel z města provázený dopravními problémy a hysterií [20, 22, 23].

V již zmiňované diplomové práci [57] se autorka ptala odborníků na názory ohledně špinavé bomby a reality jejího použití. Příslušník AČR, pracovník laboratoře toxických látek (Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany) na otázky, zda si myslí, že je riziko radiologického terorismu na území České republiky reálné, odpověděl: „*Ne, nemyslím si to. Existují totiž efektivnější způsoby. Všeobecně u radiologických zbraní velice záleží na daném radionuklidu. Pokud si člověk představí, že většina průmyslově využívaných radionuklidů je ve formě kovových pelet, tak je to problém, tento kov převést na takovou formu, kdy by to skutečně mohlo vyvolat*

nějaký efekt. Jediné, o čem se vždy mluvilo je, chlorid cesný, což je prášek, který by se vcelku efektivně dal výbuchem rozptýlit. To byl třeba případ Brazílie“. A právě díky incidentu v brazilské Goianii ze září 1987 je možné si vytvořit představu o tom, co by mohla kvalitně sestavená ŠB způsobit. Při této nehodě dva pracovníci šrotiště uvolnili ^{137}Cs z opuštěného radioterapeutického přístroje, který kdysi byl na radioterapeutické klinice. Dělníci nevěděli, jaké nebezpečí představuje, účelem této krádeže měl být zisk kovošrotu ke zpeněžení. Radioterapeutická hlava se skládala z 93 gramů vysoce rozpustné chloridové soli ^{137}Cs . Tato látka byla utěsněna uvnitř dvou tobolek z nerezové oceli, opět utěsněných mezinárodní standardní tobolkou, která měla standardizované rozměry. Pracovníci odstranili jednu z ochranných bariér a zbytek si vzali domů k demontáži. Roztržení těchto kapslí a následné rozptýlení radioaktivního materiálu vyvolalo jednu z největších radiologických nehod, kterou lze řadit k Černobylu nebo Fukušimě. Práškový chlorid cesný se jevil jako atraktivní světle modrý prášek, který muži považovali za fluorescenční látku. Dospělí i děti věřili, že je prášek neškodný, a jelikož pro ně byl velmi přitažlivý, hromadně si ho mezi sebou ukazovali. Někteří si ho dokonce vetřeli do pokožky. Existují i záznamy o tom, že prášek požilo minimálně jedno dítě. V příštích několika dnech začali někteří tito lidé vykazovat příznaky ANO. Rozsah tohoto incidentu byl ohromující, proto byl určen i stadion, kde bylo možné vyšetřit osoby, u nichž bylo podezření na kontaminaci. U 20 lidí byly diagnostikovány projevy deterministických účinků záření. Celkem bylo pozorováno 112 000 lidí a bylo zjištěno, že z nich bylo kontaminováno 249. Celkem 129 lidí bylo vystaveno vnitřní i vnější kontaminaci, 49 z těchto pacientů bylo přijato do nemocnice, 20 z nich vyžadovalo intenzivní lékařskou péči. Během jednoho měsíce zemřeli v důsledku incidentu 4 lidé a jeden pacient měl amputovanou paži. Přeživší lidé byli po léčbě propuštěni a dále byli pod lékařským dohledem. Rovněž byl proveden environmentální průzkum Goianie a okolí. Bylo zbořeno 42 domů a kontaminovaný prach a půda byly z oblasti odstraněny. Vyčištění trvalo

6 měsíců a odpad z incidentu měl objem okolo 3 500 m³. Celá tato rozsáhlá událost měla významné psychologické dopady, o kterých svědčí fakt, že 74 % místních obyvatel se podrobilo monitorování celého těla, i když mnoho z nich vůbec v okolí incidentu nebylo. Právě díky panice, která mezi lidmi byla, měli velmi ztíženou práci zdravotničtí pracovníci při identifikaci reálně kontaminovaných osob. Došlo také k významným ekonomickým dopadům, kdy byl jedním z následků 25% pokles prodeje produktů Goianie a tragédií bylo ekonomicky zasaženo 10 % obyvatel města. Tým odborníků přezkoumávající fakta tohoto případu vydal několik klíčových doporučení. První a nepochybně jeden z nejdůležitějších se týkal zajištění přísných předpisů týkajících se plnění odpovědnosti za radioaktivní zdroje. Při regulaci používání těchto materiálů by navíc měly být náležitě zohledněny fyzikální a chemické vlastnosti zdroje, nejen aktivita radioaktivního materiálu. Tým také viděl potřebu lepší komunikace mezi příslušnými agenturami a institucemi, které při takové události vzájemně spolupracují. Z lékařského hlediska incident upozornil na nezbytnou přítomnost specialistů z řad zdravotníků u tohoto typu událostí. Složitost v jednání s osobami vystavenými záření vyžaduje zkušený personál nejen v oblasti hematologie, imunosuprese a chemoterapie, ale tyto osoby musí umět poskytnout i první psychickou pomoc. Environmentální problémy související s radiologickým incidentem jsou dnes stejně důležité jako v roce 1987. S dekontaminací zasaženého místa jsou spojeny značné náklady [29, 36, 63].

I když bylo v práci řešeno mnoho negativních událostí, které by mohly nastat, závěrečné shrnutí všech zjištěných informací v práci přináší převážně pozitivní výsledky. Systém zabezpečení ZIZ, který je v ČR zaveden, plní svoji funkci. Na případné zneužití zdrojů jsou příslušné úřady a instituce připraveny a tato připravenost byla, je a bude aktivně prověřována.

7 ZÁVĚR

Cíl práce v podobě zjištění způsobů zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních byl splněn. Druhý cíl, kterým bylo vytvoření simulace použití špinavé bomby byl také splněn. V práci bylo zjištěno, že zabezpečení zdrojů ionizujícího záření ve zdravotnických zařízeních je vzhledem k malé pravděpodobnosti odcizení těchto zdrojů dostatečné. Obě stanovené hypotézy tedy byly potvrzeny.

Situace z pohledu této problematiky v celosvětovém měřítku je taková, že zatím nedošlo k odcizení ZIZ ze zdravotnických zařízení k účelu zneužití těchto zdrojů ve formě radiologické zbraně, a toto riziko je tedy minimální. V případě, že by k takové situaci došlo, existuje systém opatření a postupů, které by byly efektivně uplatněny. Funkčnost těchto opatření by měla být prověřována formou cvičení a simulací, díky kterým se lze lépe připravit na případnou reálnou mimořádnou událost. Vzhledem k existenci podpůrných IT technologií se lze spolehnout i na pomoc v rámci počítačové technologie, která by byla schopna přibližně ohraničit prostor události, a pomoci tak při záchranných a likvidačních pracích. I když nikdy nelze zcela eliminovat hrozbu krádeže zdrojů ionizujícího záření nebo jejich zneužití, lze se na řešení těchto situací řádně připravit a v případě potřeby zasáhnout tak, aby došlo k co nejmenším ztrátám na životech, ekonomickým dopadům či dopadům na životní prostředí. Díky funkčnímu legislativnímu systému, bezpečnostnímu systému nebo zdravotnickému systému neexistuje v této době reálný důvod k obavám.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ALARA – As low as reasonably achievable

ANO – Akutní nemoc z ozáření

CRPPH – Committee on Radiological Protection and Public Health

CT – Coputed Tomography

EUROATOM – Avropské společenství pro atomovou energii

FAS – Federation of Atomic Scientists

HDR – High Dose Rate

ICRP – International Commission on Radiological Protection

INEX – International Nuclear Emergency Exercises

IXRPC – International X-ray and Radium Committee

IZ – Ionizující záření

IZS – Integrovaný záchranný systém

KP – Kontrolované pásmo

LDR – Low Dose Rate

LINAC – Lineární urychlovač

MAAE – Mezinárodní agentura pro atomovou energii

MIBG – Metaiodobenzylguanidinová scintigrafie

MU – Mimořádná událost

NEA – The Nuclear Energy Agency

NM – Nukleární medicína

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development

PET – Pozitronová emisní tomografie

PZ – Plán zabezpečení

RDD – Radiological Dispersal Device

RED – Radiation Emission Device

RID – Radiological Incendiary Device

RMU – Radiologická mimořádná událost

RN – Radionuklid

RO – Radiační ochrana

RT – Radioterapie

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SP – Sledované pásmo

SPECT – Single photon emission computed tomography

ŠB – Špinavá bomba

TEREX – Teroristický expert

ULDR – Ultra Low Dose Rate

VFN – Všeobecná fakultní nemocnice

ZIZ – Zdroje ionizujícího záření

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KLENER, Vladislav, ed. *Principy a praxe radiální ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
- [2] SEIDL, Zdeněk, Andrea BURGETOVÁ, Eva HOFFMANNOVÁ, Martin MAŠEK, Manuela VANĚČKOVÁ a Tomáš VITÁK. *Radiologie pro studium i praxi*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4108-6.
- [3] HAVRÁNKOVÁ, Renata, ed. *Klinická radiobiologie*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2020. ISBN 978-80-247-4098-0.
- [4] NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA. *Medicínská biofyzika*. 2., zcela přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-271-0209-9.
- [5] KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína*. 6. vydání (2. vydání v Nakladatelství P3K). V Praze: P3K, 2015. ISBN 978-80-87343-54-8.
- [6] PELCLOVÁ, Daniela. *Nemoci z povolání a intoxikace*. 3., doplněné vydání. Praha: Karolinum. ISBN 978-80-246-2597-3.
- [7] *Mezinárodní agentura pro atomovou energii* [online]. In: [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: https://www.mzv.cz/mission.vienna/cz/organizace_v_pusobnosti_mise/ostatni_mezinarodni_organizace/mezinarodni_agentura_pro_atomovou/index.html
- [8] *Evropské společenství pro atomovou energii - Euratom* [online]. In: [cit. 2020-02-18]. DOI: <https://www.sujb.cz/evropska-unie/evropske-spolecenstvi-pro-atomovou-energii-euratom/>.
- [9] *Státní úřad pro jadernou bezpečnost: Atomové právo* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/legislativa/atomove-pravo/>

- [10] Zákon č. 263/2016 Sb.: Atomový zákon. In: *Sbírka zákonů ČR*. 2016, částka 102. Dostupné z: https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=263/2016&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy
- [11] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika* [online]. 1. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, Fakulta zdravotnických studií, 2009 [cit. 2020-05-14]. ISBN 978-80-7368-669-7. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>
- [12] Vyhláška č.422/2016 o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. In: *Sbírka zákonů ČR*. 2016, částka 172, číslo 422. Dostupné také z: https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=422/2016&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy
- [13] KORANDA, Pavel. *Nukleární medicína*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4031-6.
- [14] KUBINYI, Jozef, Jozef SABOL a Andrej VONDRÁK. *Principy radiační ochrany v nukleární medicíně a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0168-9.
- [15] LOMBARDI, Max. *Radiation safety in nuclear medicine*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2007. ISBN 9780849381683.
- [16] STATKIEWICZ-SHERER, Mary, Paula VISCONTI a E. RITENOUR. *Radiation protection in medical radiography*. 6th ed. Maryland Heights, MO: Mosby Elsevier, 2011. ISBN 0323066119.
- [17] HYNKOVÁ, Ludmila a Pavel ŠLAMPA. *Základy radiační onkologie*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2012. ISBN 978-80-210-6061-6.
- [18] ŠLAMPA, Pavel a Jiří PETERA. *Radiační onkologie*. 1. vyd. Praha: Galén, 2007. ISBN 978-80-7262-469-0.
- [19] *DOPORUČENÍ SÚJB bezpečné využívání jaderné energie a ionizujícího záření - Zabezpečení radionuklidových zdrojů a jejich kategorizace*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2017.

- [20] „Špinavá bomba“ – perspektivní zbraň teroristů. *Revue Politika*. 2003, (). DOI: <https://www.cdk.cz/spinava-bomba-perspektivni-zbran-teroristu>.
- [21] *Nuclear Security Systems and Measures for Major Public Events* [online]. In: . s. 56 [cit. 2020-02-19]. DOI: <https://www.iaea.org/publications/8858/nuclear-security-systems-and-measures-for-major-public-events>.
- [22] ACKERMAN, Gary a Jeremy TAMSETT. *Jihadists and weapons of mass destruction*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 9781420069648.
- [23] *An introduction to radiological terrorism* [online]. In: 2005 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <http://classic.austlii.edu.au/au/journals/AUJlEmMgmt/2005/16.pdf>
- [24] FITZGERALD, Amy. *Terrorism and national security*. New York: Nova Science Publishers, 2007. ISBN 1600212549.
- [25] MEDALIA, Jonathan. “*Dirty Bombs*”: *Technical Background, Attack Prevention and Response, Issues for Congress* [online]. In: s. 83 [cit. 2020-02-15]. DOI: https://www.researchgate.net/publication/290980722_Dirty_bombs_Technical_background_attack_prevention_and_response_issues_for_congress/citation/download.
- [26] LAFREE, Gary, Laura DUGAN a Erin MILLER. *Putting terrorism in context: lessons from the global terrorism database*. 1. Abingdon, Oxon: Out of House Publishing, 2015. ISBN 978131-5881-720.
- [27] *Security of radioactive sources: The evolving new international dimensions* [online]. [cit. 2020-02-19]. DOI: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull43-4/43403083948.pdf>. ISSN 0020-6067.
- [28] *Risk of radioactive "dirty bomb": growing* [online]. [cit. 2020-02-19]. DOI: <https://www.newscientist.com/article/dn5061-risk-of-radioactive-dirty-bomb-growing/>.
- [29] MAHAFFEY, James. *Atomic adventures: secret islands, forgotten N-rays, and isotopic murder - a journey into the wild world of nuclear science*. First Pegasus Books edition. New York, NY: Pegasus Books Ltd., 2017. ISBN 1681774216.

- [30] *Backgrounder on Dirty Bombs* [online]. [cit. 2020-04-08]. DOI: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fs-dirty-bombs.html>.
- [31] DAVIS, Lynn, Karyn MODEL, C. RYDELL a James CHIESA. *Individual Preparedness and Response to Chemical, Radiological, Nuclear, and Biological Terrorist Attacks*. Rand Corporation, 2003. ISBN 9780833036070.
- [32] SANDLER, Todd. *Terrorism: What Everyone Needs to Know*. 2. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 2018, 186 s. ISBN 0190845856.
- [33] BÍLKOVÁ, Veronika. *Czech Journal of International Relations: Jaderný a radiologický terorismus a mezinárodněprávní úprava ochrany proti němu* [online]. [cit. 2020-05-05]. DOI: <https://mv.iir.cz/article/view/179/186>. ISSN 2570-9429.
- [34] *Backgrounder on Dirty Bombs* [online]. [cit. 2020-02-19]. DOI: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fs-dirty-bombs.html>.
- [35] *Lost of radioactive sealed source* [online]. [cit. 2020-02-19]. DOI: <https://www-news.iaea.org/ErfView.aspx?mId=f8dd7f70-b488-4645-b080-0d2d10e69664>.
- [36] OBODOVSKIY, Ilya. *Radiation: Fundamentals, Applications, Risks, and Safety*. 1st Edition. Oxford, United Kingdom: ELSEVIER SCIENCE & TECHNOLOGY, 2019. ISBN 978-0-444-63979-0.
- [37] TERoristický EXpert. *T-soft* [online]. Praha, 2007 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.tsoft.cz/teroristicky-expert/>
- [38] *Historie: Klinika nukleární medicíny a endokrinologie 2. LF UK a FN Motol* [online]. In: . [cit. 2020-05-06]. DOI: <https://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-pro-dospELE/klinika-nuklearni-mediciny-a-endokrinologie-uk-2-1/historie/>.
- [39] KRÁČMEROVÁ, Tereza. *Osobní sdělení 31.3.2020 vedoucí Oddělení radiologické fyziky*. Klinika nukleární medicíny a endokrinologie 2. LF UK a FN Motol, V Úvalu 84 150 06 Praha 5.

- [40] *Specifikace zdrojů ionizujícího záření pro pracoviště Fakultní nemocnice v Motole využívajících metod nukleární medicíny: Interní dokument.* In: . *Klinika nukleární medicíny a endokrinologie 2.* LF UK a FN Motol: MUDr. Kateřina Táborská, Ing. Tereza Kráčmerová, b.r., ročník 2019.
- [41] *Bilance spotřebované aktivity.* In: . *Fakultní nemocnice v Motole, V Úvalu 84, 150 06 Praha 5: Klinika nukleární medicíny a endokrinologie 2.* LF UK a FN Motol, 2018.
- [42] NEUMANN, Petr. *Osobní sdělení: Vedoucí radiologický asistent, Radiodiagnostické oddělení.* Březen 2020. Oblastní nemocnice Kolín, a. s., nemocnice Středočeského kraje, Žižkova 146280 02 Kolín 3,
- [43] KUPROVÁ, Marie. *Osobní sdělení, Odborný VŠ pracovník Oddělení nukleární medicíny.* Oblastní nemocnice Kolín, a. s., nemocnice Středočeského kraje Žižkova 146280 02 Kolín 3.
- [44] VACKOVÁ, Lenka. *Osobní sdělení Vedoucí radiologická asistentka.* Duben 2020. Oddělení zobrazovacích metod, Oblastní nemocnice Příbram, a.s. Gen. R. Tesaříka 80, 261 01 Příbram I.
- [45] PLECHATÝ, Miloslav. *Osobní sdělení: Radiologický fyzik, Oddělení nukleární medicíny.* Březen 2020. Oblastní nemocnice Příbram, a.s. Gen. R. Tesaříka 80, 261 01 Příbram I.
- [46] STAŠOVÁ, Jarmila. *Osobní sdělení.* Březen 2020. Oddělení nukleární medicíny, Oblastní nemocnice Příbram, a.s. Gen. R. Tesaříka 80, 261 01 Příbram I,
- [47] *Radionuklidy 2019: Interní dokument Oddělení nukleární medicíny, Oblastní nemocnice Příbram.* In: . Oblastní nemocnice Příbram, a.s. Podbrdská 269, 261 95 Příbram V: Stašová Jarmila, DiS, 2020.
- [48] *RADIODIAGNOSTICKÁ KLINIKA: Charakteristika pracoviště* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.vfn.cz/pacienti/kliniky-ustavy/radiodiagnosticka-klinika/>
- [49] DANÍČKOVÁ, Kateřina. *Osobní sdělení: Vedoucí radiologický fyzik Oddělení radiační ochrany.* Květen 2020. Všeobecná fakultní nemocnice v Praze ,U Nemocnice 499/2, 128 08 Praha 2.

- [50] FIALA, Pavel. *Osobní sdělení: Radiologický fyzik, Onkologické oddělení*. Květen 2020. Nemocnice Jihlava, příspěvková organizace Vrchlického 59, 586 33 Jihlava.
- [51] KOŤAROVÁ, Hana. *Osobní sdělení*. Duben 2020. Vrchní radiologický asistent, Oddělení radiodiagnostiky, Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace, Husova 2624, 580 22 Havlíčkův Brod.
- [52] LINHARTOVÁ, Hana. *Osobní sdělení*. Duben 2020. Oddělení nukleární medicíny Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace, Husova 2624, 580 22 Havlíčkův Brod: Radiologický fyzik, Oddělení nukleární medicíny.
- [53] DRAHOZALOVÁ, Lenka. *Osobní sdělení*. Duben 2020. Oddělení nukleární medicíny Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace, Husova 2624, 580 22 Havlíčkův Brod.
- [54] LINHARTOVÁ, Hana. *Protokol o inventuře radionuklidových zdrojů v roce 2020*. Oddělení nukleární medicíny Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace, Husova 2624, 580 22 Havlíčkův Brod,
- [55] FRANC, Roman. *Osobní sdělení*. Duben 2020. Radiologický fyzik, Oddělení radiační onkologie, Nemocnice Havlíčkův Brod, příspěvková organizace, Husova 2624, 580 22 Havlíčkův Brod.
- [56] PROUZA, Zdeněk a Jiří ŠVEC. *Zásahy při radiační mimořádné události*. 1.vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. ISBN 978-80-7385-046-3.
- [57] DRAŽANOVÁ, Kristýna. *Radiologický terorismus*. České Budějovice, 2018.. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta. Vedoucí práce Mgr. Renata Havránková, Ph.D.
- [58] FIALA, Václav. *Špinavá bomba! Šéfka pro jadernou bezpečnost Drábová věčně a zasvěceně o tom, čeho se máme obávat od Islámského státu a co s tím budeme dělat* [online]. [cit. 2020-05-05]. DOI: <https://www.krajskelisty.cz/praha/10241-spinava-bomba-sefka-pro-jadernou-bezpecnost-drabova-vecne-a-zasvecene-o-tom-ceho-se-mame-obavat-od-islamskeho-statu-a-co-s-tim-budeme-delat.htm>.
- [59] *Dokumentace IZS* [online]. In: . [cit. 2020-04-09]. DOI: <https://www.hzscr.cz/clanek/dokumentace-izs-587832.aspx>.

- [60] International Nuclear Emergency Exercises (INEX). *The Nuclear Energy Agency (NEA)* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/rp/inex/>
- [61] *Cvičení INEX - výbuch špinavé bomby - proběhlo na stanici v Litoměřicích* [online]. [cit. 2020-05-05]. DOI: <https://www.hzscr.cz/clanek/hzs-usteckeho-kraje-menu-informacni-servis-zpravodajstvi-2015-unor-cviceni-inex-vybuch-spinave-bomby-probehlo-na-stanici-v-litomerichich.aspx>.
- [62] *Cvičení Krizového štábu hlavního města Prahy a Státního úřadu pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2020-05-06]. DOI: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/clanek/cviceni-krizoveho-stabu-hlavniho-mesta-prahy-a-statniho-uradu-pro-jadernou-bezpecnost/>.
- [63] *The Radiological accident in Goiânia*. [Lanham, MD: UNIPUB, distributor], 1988. ISBN 9201290888.

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma procesů v organismu od ozáření po konkrétní účinky [3]. ...	13
Obrázek 2 Modelový plán zabezpečení prostoru s radionuklidovým zdrojem 1. kategorie zabezpečení [19].....	37
Obrázek 3 Plán vymezení kontrolovaného a sledovaného pásma.	53
Obrázek 4 Označení vstupu do kontrolovaného pásma na oddělení NM.	53
Obrázek 5 Vstupní parametry v SW programu TEREX.	73
Obrázek 6 Zanesení simulovaného výbuchu do mapového podkladu.	74
Obrázek 7 Schematické znázornění zón účinků exploze.	74

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Klinické formy a stupně závažnosti ANO.....	15
Tabulka 2 ZIZ nejčastěji používané v nukleární medicíně [13, 15]	27
Tabulka 3 ZIZ používané v brachyterapii [17, 18].....	31
Tabulka 4 Některé potencionálně zneužitelné komerčně dostupné RN [22, 17].	46
Tabulka 5 Specifikace pracoviště NM [39].....	54
Tabulka 6 Specifikace ZIZ na oddělení NM [39].	56
Tabulka 7 Bilance spotřebované aktivity za rok 2018 [41].....	57
Tabulka 8 Specifikace ZIZ na RTG oddělení [42].	58
Tabulka 9 Specifikace pracoviště NM [43].....	59
Tabulka 10 Specifikace ZIZ na oddělení NM [43].....	60
Tabulka 11 Specifikace ZIZ oddělení zobrazovacích metod [44].	61
Tabulka 12 Specifikace pracoviště NM [45].	62
Tabulka 13 Bilance spotřebované aktivity na oddělení NM z roku 2019 [47].	63
Tabulka 14 Specifikace ZIZ na oddělení NM [45].....	64
Tabulka 15 Specifikace ZIZ na oddělení RTG [49].....	65
Tabulka 16 Specifikace pracoviště radiační onkologie [49].	66
Tabulka 17 Specifikace ZIZ na Onkologické klinice [49].....	67
Tabulka 18 Specifikace Onkologického oddělení [50].	68
Tabulka 19 Specifikace ZIZ na oddělení RTG [51].	69
Tabulka 20 Specifikace pracoviště RTG [52].	70
Tabulka 21 Specifikace ZIZ na oddělení NM [52].....	70
Tabulka 22 Bilance spotřebované aktivity za rok 2019 [54].	71
Tabulka 23 Specifikace pracoviště radiační onkologie [55].....	72