



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

Možnosti zneužití radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření

Possibilities of Misuse of Radioactive Materials and Sources of Ionizing Radiation

Diplomová práce

Studijní program: Civilní nouzové plánování

Autor diplomové práce: Bc. Karolína Peterková

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Petra Kadlec Linhartová

Kladno 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Peterková** Jméno: **Karolína** Osobní číslo: **503776**
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**
Garantující katedra: **Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva**
Studijní program: **Civilní nouzové plánování**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Možnosti zneužití radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření

Název diplomové práce anglicky:

Possibilities of Misuse of Radioactive Materials and Sources of Ionizing Radiation

Pokyny pro vypracování:

Předmětem diplomové práce bude analýza možného zneužití radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření. V teoretické části budou shrnuty základní poznatky týkající se radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření, včetně příkladů jejich držení neoprávněnými osobami. Pozornost bude věnována radiologickému terorismu, radiologickým zbraním a radionuklidům vhodným pro jejich sestavení. V praktické části bude provedena analýza událostí spojených s neoprávněným nakládáním s radioaktivním materiálem nebo zdrojem ionizujícího záření, budou analyzovány poznatky získané strukturovanými rozhovory, které budou provedeny minimálně u pěti vybraných odborníků. Následně bude v programu TEREX nasimulováno použití špinavé bomby na vybraném území ČR. Výstupem práce budou doporučení, jak možnostem zneužití radioaktivních materiálů předcházet.

Seznam doporučené literatury:

- [1] FILIPEC, Ondřej, Úvod do problematiky zbraní hromadného ničení, Olomouc: Univerzita Palackého, 2014, 186 s., ISBN 978-80-244-3810-8
- [2] HÁLA, Jiří, Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie, Brno: Konvoj, 1998, ISBN 80-856-1556-8
- [3] MATOUŠEK, Jiří, ÖSTERREICHER, Jan, LINHART, Petr, CBRN, jaderné zbraně a radiologické materiály, Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2007, ISBN 978-80-7385-029-6
- [4] PROUZA, Zdeněk, ŠVEC, Jiří, Zásahy při radiační mimořádné události, Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008, 125 s., ISBN 978-80-7385-046-3

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: **04.10.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2023**

doc. Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA
děkan

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Možnosti zneužití radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření 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 30.11.2021

Bc. Karolína Peterková

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucí práce Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, připomínky, a především za její vstřícnost. Dále bych ráda poděkovala konzultantce práce Ing. Petře Kadlec Linhartové za její pomoc při realizaci výzkumné části. V neposlední řadě patří poděkování i odborníkům, kteří byli ochotní podílet se na realizaci výzkumné části tím, že zodpověděli výzkumné otázky.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zejména specifiky radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření. V teoretické části jsou objasněny základní poznatky týkající se radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření. Dále jejich využití v odvětví zdravotnictví

či průmyslových aplikacích. Zhodnoceny jsou kazuistiky případů neoprávněného držení a nakládání se zdroji, a jejich návaznost na možný radiologický terorismus. Práce dále vymezuje základní odlišnosti jednotlivých typů radiologických zbraní, a radionuklidů vhodných pro jejich sestavení.

V praktické části jsou zpracovány dvě varianty modelace použití špinavé bomby. Obě modelace jsou provedeny v softwarovém programu TerEx. Tento program vymezuje celkovou plochu zasaženého území, včetně bezpečnostních vzdáleností. Míra zdravotních, ekonomických a environmentálních dopadů je částečně odvozena z analýz a poznatků popsaných v teoretické části, a je diskutována v závěru práce. Součástí výzkumné části jsou dále i strukturované rozhovory s odborníky. Výsledky rozhovorů například ukazují, že integrovaný záchranný systém České republiky je na hrozbu radiologického terorismu adekvátně připraven. Získané poznatky jsou dle jednotlivých sekcí diskutovány v závěru práce.

Klíčová slova

radioaktivita; ionizující záření; radioaktivní materiály; zdroje ionizujícího záření; špinavá bomba, radiologický terorismus, radiologické zbraně

ABSTRACT

The thesis deals with specifics of radioactive materials and sources of ionizing radiation. In a theoretical part the basic knowledge concerning the radioactive materials and the sources are clarified. Further, an application of the materials in medicine or industry is described. Cases of an unauthorized possession and handling of the sources and their connection to a possible radiological terrorism are assessed. The thesis also defines distinctions of different types of radiological weapons and radionuclides suitable for their construction.

In a practical part, two options for modelling the use dirty bombs are elaborated. Both the simulations are performed in a TerEx software program. The program defines the total affected area including safety distances. Level of health, economic and environmental impacts is partly derived from the analysis and the knowledge described in the theoretical part. The level of the pollution is discussed in a conclusion of the thesis. The research part also includes structured interviews with experts. The results of the interviews for example show that the Integrated Rescue System of the Czech Republic is prepared to the threat of the radiological terrorism adequately. The results are discussed in the conclusion of the thesis.

Keywords

radioactivity; ionizing Radiation; radioactive materials; sources of ionizing radiation; dirty bomb, radiological terrorism, radiological weapons

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 9 |
| 2 | Cíle práce a hypotézy | 10 |
| 3 | Přehled současného stavu | 11 |
| 3.1 | Legislativní rámec..... | 11 |
| 3.2 | Základní poznatky týkající se RA materiálů a ZIZ..... | 15 |
| 3.2.1 | Kategorizace ZIZ z pohledu radiační ochrany..... | 16 |
| 3.2.2 | Pracoviště se ZIZ | 19 |
| 3.2.3 | Biologické účinky ionizujícího záření | 20 |
| 3.3 | Využití RA látek a ZIZ v jednotlivých odvětvích..... | 25 |
| 3.3.1 | Výskyt RA látek a ZIZ v odvětví lékařských aplikací..... | 25 |
| 3.3.2 | Využití RA látek a ZIZ v odvětví průmyslových aplikací | 28 |
| 3.3.3 | Transport RA materiálů a ZIZ..... | 31 |
| 3.3.4 | Analýza neoprávněného držení a nakládání s RA materiály a ZIZ | 35 |
| 3.4 | Radiologický terorismus | 40 |
| 3.4.1 | Radiologické zbraně | 40 |
| 3.4.2 | Radionuklidy vhodné pro sestavení radiologické zbraně..... | 43 |
| 3.4.3 | Příklady radiologického terorismu ve světě..... | 46 |
| 4 | Metodika | 50 |
| 5 | Výsledky | 53 |
| 5.1 | Simulace použití špinavé bomby na území ČR | 53 |
| 5.2 | Výsledky strukturovaných rozhovorů..... | 63 |
| 6 | Diskuze | 68 |
| 6.1 | Diskuze k simulaci špinavé bomby | 69 |
| 6.2 | Diskuze k rozhovorům..... | 80 |
| 6.3 | Vyhodnocení hypotéz..... | 86 |
| 7 | Závěr | 87 |

| | | |
|----|---------------------------|----|
| 8 | Seznam použitých zkratk | 88 |
| 9 | Seznam použité literatury | 90 |
| 10 | Seznam použitých obrázků | 98 |
| 11 | Seznam použitých tabulek | 99 |
| 12 | Seznam Příloh | 99 |

1 ÚVOD

Problematika zneužívání radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření představuje v dnešní moderní společnosti veliké riziko. Toto riziko je značně eliminováno prostřednictvím radiační ochrany, jež představuje ucelený soubor opatření předcházející a řešící otázku adekvátního zabezpečení zdrojů. V oblasti radiační ochrany se setkáváme zejména s opatřeními regulujícími nakládání s materiály a zdroji záření, dále opatřeními zaměřenými na zajištění bezpečnosti při transportu či likvidaci zdrojů. Vyskytují se i takové evropské státy, které nemají dostatečně vysokou úroveň zabezpečení zdrojů. V těchto zemích pak není možné naprosto eliminovat odcizení radioaktivních materiálů, které pak mohou být přeprodávány na černém trhu a zneužity kdekoli na světě.

Zdroje ionizujícího záření jsou dnes hojně využívány v odvětví medicíny, průmyslu, či výzkumu. Tato působiště se proto stávají primárními rizikovými místy, z nichž by mohl být radioaktivní materiál odcizen. Radiologická bezpečnost v těchto institucích proto musí být progresivní, a snažit se eliminovat rizika možného zneužití již v počátcích.

Tendence některých teroristických organizací, jako je například Al-Káida, vedoucí k získání radioaktivního materiálu vhodného k sestrojení radiologické zbraně vyvolávají již desítky let v mnohých lidech značné obavy. Nicméně i přesto, že špinavé bomby jsou spíše prostředkem k vyvolání strachu a paniky, nelze tuto hrozbu opomíjet.

2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY

Cílem diplomové práce je zpracování přehledu, kde se radioaktivní látky a zdroje ionizujícího záření mohou využívat, a zároveň provedení analýzy možného zneužití radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření. Pro uskutečnění tohoto cíle budou v teoretické části shrnuty základní poznatky týkající se radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření včetně příkladů jejich držení neoprávněnými osobami.

Dále je cílem zhodnocení rizika radiologického terorismu. Pozornost bude proto věnována radiologickým zbraním a radionuklidům vhodným k jejich sestavení. Dále bude provedena analýza případů souvisejících s radiologickým terorismem.

Cílem praktické části je zhodnocení modelové situace použití špinavé bomby na vybraném území České republiky, která je provedena prostřednictvím softwarového nástroje TerEx.

Dalším cílem je pak analýza poznatků týkajících se oblasti úrovně bezpečnosti radioaktivních materiálů a zdrojů, pracovišť se zdroji, a oblasti radiologického terorismu získaných strukturovanými rozhovory, které budou provedeny minimálně u pěti vybraných odborníků.

Závěrečným výstupem práce jsou doporučení, jak lze možnostem zneužití radioaktivních materiálů předcházet.

Hypotéza 1:

Radionuklid ^{60}Co je potencionálně rizikovější z hlediska biologických účinků než radionuklid ^{239}Pu .

Hypotéza 2:

Radiologický terorismus představuje na území České republiky reálnou, byť málo pravděpodobnou hrozbu.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Legislativní rámec

V průběhu let se na území České republiky (dále jen ČR) postupně etablovala právní legislativa ošetřující problematiku zdrojů ionizujícího záření (dále jen ZIZ) [1]. Tato národní legislativa vychází z takzvané nadnárodní legislativy, která v globálním rámci představuje především legislativní normy, metodické postupy a doporučení. [2] Nejen ČR, ale i další jednotlivé státy si poté z těchto norem dále implementují potřebná nařízení do svých zákonů. Díky tomu je možné v zákonech například reflektovat i již odehrané havárie, na jejichž základě lze následně relevantně reagovat na případné krizové situace. Vzhledem k vývojovým trendům v problematice zneužívání ZIZ se zákony následně poměrně často novelizují pomocí vyhlášek ministerstev. [1,3]

Níže je pozornost věnována pouze vybranému zákonu a vyhláškám, které definuje současná legislativa, platná na území ČR, v souladu s evropskou legislativou.

Zákon č. 263/2016 Sb. atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů (dále jen atomový zákon)

Tento zákon prošel v minulosti hned několika změnami. Jeho současná rekodifikovaná podoba vychází z příslušných předpisů EURATOMU (Evropské společenství pro atomovou energii) a EU (Evropské unie). [1,4]

Jeho nynější podoba je oproti původní verzi zákona z roku 1997 rozšířena o zásady mírového využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Tyto zásady definují především povinnosti spočívající v zajištění zabezpečení ochrany fyzické osoby a životního prostředí (dále jen ŽP), zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a technické bezpečnosti. Významnou povinností je zabezpečení monitorování radiační situace a s tím spojené administrativní agendy (sběr a třídění dat, analýza). Dále Atomový zákon nově upravuje v § 7 zakázané činnosti, jimiž se rozumí činnosti zahrnující nedovolenou výrobu jaderných zbraní či jiných jaderných výbušných zařízení. Dále také specifikuje neoprávněné testování výbuchu jaderných pum či neoprávněný dovoz radioaktivního odpadu, a to včetně vyhořelého jaderného paliva z jiných států. [4,5]

V rámci regulace využívání jaderné energie a ionizujícího záření (dále jen IZ) jsou v hlavě druhé vymezeny formální náležitosti týkající se činností souvisejících s využíváním jaderné energie (povolení, registrace, ohlášení činnosti). Specifika obsahových náležitostí vztahujících se k činnosti jsou uvedena převážně v dílu 1, hlavě II. Pro kvalitní úroveň jaderné, radiační a technické bezpečnosti je nezbytný systém řízení. V rámci jeho dlouhodobé udržitelnosti jsou v díle 2 uvedeny činnosti zvláště důležité pro jeho rozvoj (vzdělání pracovníků, zkoušky ověřující odbornou způsobilost). Díl 3 krátce vymezuje poplatky (předmět poplatků, splatnost, sazby). [4]

Část druhá se zabývá principy bezpečného využívání jaderné energie – především povinnostmi držitele povolení k takovým činnostem, jež mají přímou souvislost s využíváním jaderné energie, a to například výstavba, spuštění, provoz či vyřazování jaderného zařízení z provozu. Sekce radiační ochrany (počínaje § 60) zahrnuje jak ochranu radiačních a externích pracovníků, tak obyvatel. Zaměřuje se především na jejich ochranu před ozářením. [4]

Velmi významnou položkou v atomovém zákoně je koncept nakládání s radioaktivním odpadem. Hlava IV. stanovuje základní pravidla a podmínky nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem a povinností přepravce při transportu radioaktivní nebo štěpné látky. [4]

Další oblastí, kterou zákon upravuje, je monitorování radiační situace na území ČR a zabezpečení fyzické ochrany a radionuklidového zdroje. [4]

V neposlední řadě jsou v závěrečných paragrafech (§ 175 a dále) ošetřeny přestupky držitele, registranta, ohlašovatele, fyzických osob (dále jen FO), právnických osob (dále jen PO) či podnikajících fyzických osob (dále jen PFO). V rámci výkonu státní správy se do zákona promítají i kontroly dodržování jednak samotného atomového zákona, a jednak závazků vyvstávajících z mezinárodních smluv, jimiž je ČR vázána. V případě zjištění odchylky od zákona jsou zjednána ze strany kontrolujících úřadů (inspektorů) opatření vedoucí k nápravě. [4]

Vyhláška č. 374/2016 Sb. O evidenci a kontrole jaderných materiálů a oznamování údajů o nich, ve znění pozdějších předpisů

Tato vyhláška rezonuje s nařízením Komise č. 302/2015 o uplatňování dozoru nad bezpečností v rámci Euratomu. Vyhláška konkrétně upravuje minimální koncentraci izotopu prvku v materiálu, dále rozsah a způsob provádění kontroly jaderného materiálu. V § 6 jsou vymezeny povinnosti vedoucího evidence jaderných materiálů, v následujícím paragrafu jsou vytyčeny formální náležitosti pro systém evidence jaderných materiálů – evidenční a provozní záznamy. V rámci oblasti nešíření jaderných zbraní jsou ve čtvrté části uvedeny obsahové náležitosti ke dvěma dokumentacím. První dokument je o vydání povolení k nakládání s jadernými materiály. Druhý o vydání povolení k jeho dovozu či vývozu. [6]

Dále vyhláška obsahuje informace vztahující se k těžbě a zpracování uranové a thoriové rudy a informace o právních lhůtách dotýkajících se například jaderného palivového cyklu. K vyhlášce je v závěru též připojeno celkem 6 příloh, které obsahují vzory některých formulářů, eventuálně soupis fyzické inventury. [6]

Vyhláška č. 375/2016 Sb. O vybraných položkách v jaderné oblasti, ve znění pozdějších předpisů

Jak již samotný název napovídá, vyhláška postuluje vybrané položky v jaderné oblasti, kterými se rozumí například kompletní jaderné reaktory, reaktorové nádoby, regulační tyče a tlakové trubky jaderného reaktoru, neutronové detektory, deflektory, obalové soubory pro ozářené jaderné palivo. [7]

Hned v úvodním paragrafu se vyhláška zaměřuje na obsahové náležitosti prohlášení o konečném použití položky. Dále na rozsah, způsob či dobu uchování evidovaných údajů o položkách. V neposlední řadě hovoří i o zákonných lhůtách, během nichž musí držitel povolení k vývozu nebo dovozu obeznámit Úřad s evidovanými údaji. Stěžejní částí vyhlášky je zejména přiložený seznam vybraných položek, který konkrétně uvádí vybrané materiály, zařízení a technologie spadající do jaderné oblasti. [7]

Vyhláška č. 376/2016 Sb. O položkách dvojího použití v jaderné oblasti, ve znění pozdějších předpisů

Položky dvojího použití v jaderné oblasti představují v první řadě průmyslová zařízení. Do této sekce spadají radiačně stínící okna o vysoké měrné hmotnosti, roboty, obráběcí stroje. V druhé řadě se jedná o materiály jako například hliník, beryllium,

vizmut, vápník a bór. Všechny materiály vyjmenované ve vyhlášce, mají své specifikující charakteristiky. Dále mohou být položkou komponenty pro jaderná výbušná zařízení, tj. rozbušky a pulzní výbojové kondenzátory. Tato vyhláška, podobně jako vyhláška předchozí, specifikuje v § 1 formální náležitosti prohlášení o konečném použití položky dvojího použití. V § 3 definuje rozsah a způsob uchování evidovaných údajů o položkách. Stěžejní část vyhlášky opět představuje příloha, zahrnující seznam položek dvojího použití. [8]

Vyhláška č. 422/2016 Sb. O radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, ve znění pozdějších předpisů

V první části jsou upřesněny nezbytné pojmy související s předmětem vyhlášky. Jedná se o pojmy jako absorbovaná dávka, ekvivalentní dávka, efektivní dávka a úvazky těchto dávek či D-hodnota. V části druhé je vyhláška orientována především na radiační ochranu, jež stanovuje limity z ozáření – a to jak pro obyvatele, tak pro radiační pracovníky a studenty. Udává limity osobního dávkového ekvivalentu za kalendářní rok v rámci takzvaných odvozených limitů. V návaznosti na atomový zákon upravuje optimalizaci radiační ochrany zaměřující se na vyhovující varianty zajištění bezpečnosti. [9]

Významnou část představuje oddíl 3 spočívající především v charakteristice a kategorizaci ZIZ z pohledu jejich přeshraničního pohybu, z hlediska pracovišť disponujících se zdroji, které jsou řazeny do čtyř kategorií. Další možnou skupinou je členění radiačních pracovníků. [9]

S radiační ochranou přímo souvisí i veličiny definující ZIZ, jejichž výčet je uveden v díle 4. Se ZIZ souvisí i tzv. zkoušky přejímací, zkoušky dlouhodobé stability či provozní stálosti. Výstupem zkoušky dlouhodobé stability je zhodnocení její úspěšnosti. V případě zjištění závady jsou stanoveny zákonné lhůty pro zjednání její nápravy viz § 30. Z hlediska radiační ochrany je zásadní kvalitní evidence souvisejících povolení, samotná evidence ZIZ – ať už uzavřených, otevřených nebo vysokoaktivních. [9]

Vyhláška se rozsáhle vyjadřuje i k expozičním situacím – a to jak k plánovaným v rámci pracovního provozu, tak k existujícím expozičním situacím z přírodního pozadí, například v důsledku uvolňujícího se radonu. [9]

V závěrečné části jsou k vyhlášce připojeny podrobné přílohy obsahující výčet D-hodnot pro vybrané radionuklidy, radiační váhové faktory – tkáňové a jakostní, konverzní faktory anebo údaje o zdrojích a postupech při manipulaci s nimi. [9]

3.2 Základní poznatky týkající se RA materiálů a ZIZ

V této kapitole je pozornost věnována radioaktivním (dále jen RA) materiálům a ZIZ. Aby bylo možné s těmito termíny dále pracovat, je nutné je nejprve definovat. RA materiálem se rozumí látka pevného či kapalného skupenství nebo předmět obsahující radionuklidy v rozsahu nezanedbatelného z hlediska radiační ochrany. Za RA materiál lze považovat i substanci nebo objekt, jež je radionuklidy v neopomenutelné míře kontaminován [10]. Vedle RA materiálů figurují i materiály jaderné, jež jsou tvořeny výchozím materiálem, který může mít dle atomového zákona povahu chemické sloučeniny, slitiny, kovu nebo koncentrátu přírodního uranu, ochuzeného uranu či thoria. Dále je tvořen zvláštním štěpným materiálem, jímž je obohacený uran ^{235}U a ^{233}U a izotopy ^{239}Pu a ^{233}U . Ty jsou významné zejména z hlediska proliferace jaderných zbraní. [5]

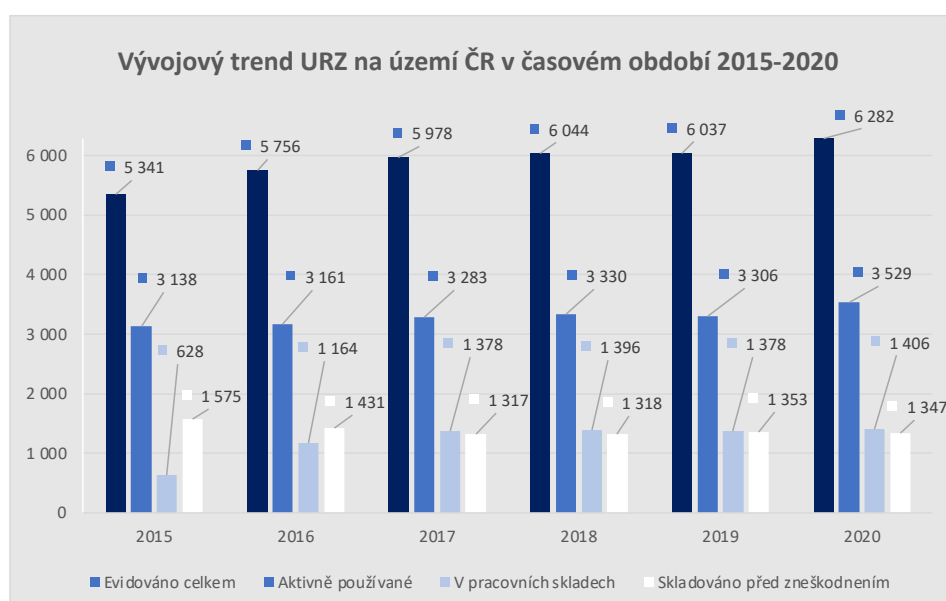
ZIZ může být dle § 2, odst. 2, písm. d) atomového zákona „*radioaktivní látka, předmět nebo zařízení ji obsahující nebo uvolňující, anebo generátor záření, kterým je zařízení způsobilé generovat ionizující záření*“ [5]. ZIZ mohou mít svůj původ buďto v pozemském, nebo kosmickém prostoru – v takovém případě hovoříme o ZIZ přírodních. Pro veškeré přírodní zdroje je používána mezinárodně uznávaná zkratka NORM – Naturally Occurred Radioactive Material a řadí se k nim například ^3H , ^{14}C , ^7Be [10,11]. Naproti nim stojí ZIZ umělé, jež mají svůj původ synteticky vytvořen například v jaderných reaktorech či urychlovačích částic (radiofarmaka aj.). [12]

Dle způsobu vzniku záření vně zářiče se rozlišují dva typy. Prvním typem, jež emituje záření nepřetržitě v důsledku radioaktivních přeměn je zdroj radionuklidový. Tento zdroj není možné jednoduše vypnout pomocí tlačítka, jako je tomu u aparturních zdrojů. V aparturních zdrojích je možné produkovat záření pouze při provozu zařízení – typickým představitelem takového zařízení je například Röntgenova lampa. [13]

Radionuklidové zářiče jsou dvojího typu, lze je dělit z hlediska jejich překryvu na uzavřené a neuzavřené. Uzavřené zářiče (dále jen URZ) jsou specifické konstrukční

úpravou zapouzdření či aplikací ochranného překryvu tak, aby byl eliminován únik radionuklidů ze zářiče. Ochranné prvky zářiče jsou testovány prostřednictvím zkoušek ověřujících těsnost. Tyto zkoušky při testování berou ohled na předvídatelné podmínky použití a zohledňují rovněž i nevyhnutelný aspekt opotřebení. Jestliže radionuklidový zářič splní požadavky na těsnost, je mu uděleno osvědčení. Otevřené zářiče (dále jen ORZ) nejsou upraveny pomocí zapouzdření či ochranného překryvu. Toto kritérium ani nemohou vzhledem ke svým vlastnostem splňovat. ORZ jsou definovány zejména jako radioaktivní aerosoly, plyny, roztoky aj. Jejich uplatnění je především v nukleární medicíně, kde jsou hojně využívány ve formě radiofarmak. [12,14]

Na obrázku 1 je uveden přehled počtu URZ na území ČR za časové období 2015–2020.



Obrázek 1 – Přehled počtu URZ na území ČR za dané období [15]

3.2.1 Kategorizace ZIZ z pohledu radiační ochrany

Dle § 61 atomového zákona jsou ZIZ odstupňovány do 5 kategorií, jež jsou řazeny dle jejich významnosti z hlediska možných nepříznivých účinků na zdraví a rovněž i na ŽP. [5]

Velmi významné ZIZ

Kategorie velmi významných zdrojů záření v sobě zahrnuje pouze a jedině jaderný reaktor. [9] Jaderné reaktory umožňují řízené uvolňování jaderné energie, která je následně přeměňována na energii tepelnou a ta je dále využívána. [16] Převážná většina jaderných reaktorů slouží k energetickým účelům. Do sekce neenergetických reaktorů spadají reaktory využívané pro výzkumné účely institucemi, jež jsou orientovány například na vývoj a inovaci v oblasti jaderné energetiky, či pro výuku studentů se zaměřením na reaktorovou fyziku. Rozdíly v účelu použití jsou sice významné, nicméně všechny jaderné reaktory – energetické i neenergetické – mají vždy společného jmenovatele, jímž je jaderný odpad, který představuje výstupní článek celého jaderného procesu. [13,16]

V USA, Číně, Francii a dalších 29 státech je dle statistických údajů WNA (World Nuclear Association) v provozu celkem 439 energetických jaderných reaktorů různých druhů, například tlakovodní, grafitové aj. [17] V tabulce 1 je uveden přehled jaderných reaktorů aktuálně se nacházejících na území ČR.

Tabulka – Přehled jaderných reaktorů na území ČR [18,19]

| Účel použití | Počet | Umístění | Typ reaktoru | Palivo |
|---|-------|---------------|----------------|--------|
| Energetické účely | 4 | JE Dukovany | VVER 440/213 | 235U |
| | 2 | JE Temelín | VVER 1000/320 | 235U |
| Výzkumné účely <small>(spuštění v r. 2023)</small> | 2 | CV Řež s.r.o. | LVR-15 LR-0 | 235U |
| | 1 | FJFI ČVUT | VR-1 | 235U |

Zneužití jaderného reaktoru je poměrně obtížné vzhledem ke špičkovým bezpečnostním opatřením, jež zabraňují nekompetentním osobám být jen ve vstupu k reaktoru, natož nakládání s ním [20]. Ovšem i přes vysokou bezpečnostní úroveň v úvahu připadá varianta zneužití jaderného reaktoru v rámci radiologického terorismu. [21]

V případě možnosti zneužití jaderného odpadu lze říci, že zde je riziko podstatně vyšší. Jedním ze zásadních faktorů odrážejících se na zvýšeném riziku je i skutečnost, že vyhořelé jaderné palivo a další komponenty pocházející z jaderného procesu bývají mnohdy po určité době od jejich vyjmutí z jaderného reaktoru transportovány do meziskladů jaderného paliva – a to formou železniční či silniční přepravy. Přestože

přeprava RA a jaderných materiálů podléhá přísným bezpečnostním opatřením, nikdy nelze dopředu s určitostí předpovědět, jaké komplikace během cesty nastanou – přepadení či vykolejení vlaku. [20,22]

Významné ZIZ

Významné ZIZ lze rozdělit do dvou sekcí z hlediska významnosti a úrovně nebezpečí při nakládání s nimi. První sekce vymezuje generátory záření, jež jsou určeny k obecné diagnostice za pomoci lékařského RTG ozařování. Druhá sekce je poněkud rozsáhlejší a zahrnuje urychlovače částic, ZIZ na bázi neutronů, protonů či jiných těžkých částic a taktéž i uzavřený radionuklidový zdroj určený k radioterapii a ozařování předmětů či surovin. Dále do této sekce náleží mobilní defektoskop s URZ. V neposlední řadě obsahuje i vysokoaktivní zdroj, jehož úroveň aktivity je různorodá v závislosti na radionuklidu. Například pro radionuklidy ^{241}Am a ^{238}Pu je vyhláškou č. 422/2016 Sb. úroveň aktivity stanovena na $6 \cdot 10^{-2}$ TBq, kdežto u hojně se používajícího radionuklidu ^{60}Co je úroveň aktivity podstatně nižší – odpovídá hodnotě $1 \cdot 10^{-1}$ TBq. [9]

Významné ZIZ podléhají nutné kontrole, nicméně určitá pravděpodobnost vzniku potenciaální hrozby odcizení a zneužití zdroje je zde oproti velmi významným ZIZ (jadernému reaktoru) řádově vyšší. [9]

Jednoduché ZIZ

Do sekce jednoduchých zdrojů lze řadit například zařízení nebo přístroj, který je konstruován tak, že jeho součásti při vysílání IZ pracují při rozdílu potenciálu vyšším než 5 kV – taková zařízení slouží například ve stomatologii (zubní RTG), denzitometrii (RTG kostní denzitometr) či veterinářství (veterinární RTG). [9]

Drobné ZIZ

Drobné ZIZ jsou mimo jiné definovány vztahem příkonu dávkového ekvivalentu ke vzdálenosti. Povrch generátoru záření a zařízení obsahující URZ jsou konstruovány tak, že v prostoru vykazují do vzdálenosti 0,1 m příkon dávkového ekvivalentu menší než $1 \mu\text{Sv/h}$. Toto ovšem neplatí v místech, kde je se zařízením manipulováno rukama v rámci pracovní činnosti. V takových místech zařízení vykazuje hodnoty směrového dávkového ekvivalentu nanejvýš hodnot $250 \mu\text{Sv/h}$. [9]

Dále je u drobných ZIZ zohledněn součet podílů aktivit radionuklidů – včetně hmotnostních, a taktéž i příslušných zprošťovacích úrovní aktivity – včetně hmotnostních. U dlouhodobých radionuklidových zdrojů emitujících α záření a neutrony musí být součet výše uvedených podílů a úrovní menší než 100. V případě ORZ je tato hodnota součtu podílů a úrovní menší než 10. [9]

Nevýznamné ZIZ

Nevýznamné ZIZ mají z celé výše uvedené kategorizace z pohledu radiační ochrany nejmenší potenciál pro vznik možných nepříznivých účinků na zdraví a životní prostředí. Z tohoto důvodu nepodléhají nutným kontrolám. [9]

V kategorii nevýznamných zdrojů lze nalézt především generátor záření, jehož energie nepřevyšuje 5 keV. Dále patří mezi nevýznamné zdroje i katodová trubice či jiné elektrické zařízení, které je designováno tak, že v prostoru povrchu zařízení (do vzdálenosti 0,1 m) je z kteréhokoliv přístupného místa jeho prostorový dávkový ekvivalent menší než 1 $\mu\text{Sv/h}$. Zároveň je toto elektrické zařízení navrženo tak, že pracuje při rozdílu potenciálů do 30 kV. V neposlední řadě se nevýznamným zdrojem rozumí i RA látka, jejíž součet podílů aktivit radionuklidů – včetně hmotnostních a součet příslušných zprošťovacích úrovní – včetně hmotnostních nedosahuje hodnot větších než 1. [9]

3.2.2 Pracoviště se ZIZ

V závislosti na tom, s jakým typem ZIZ je na pracovišti disponováno, se rozlišují celkem čtyři základní kategorie pracovišť. [9]

Do první kategorie se řadí například pracoviště s drobným ZIZ, dále pracoviště s kostním denzitometrem, pracoviště s veterinárním, zubním anebo kabinovým RTG. [9]

Druhá kategorie zahrnuje pracoviště s RTG zařízením, jehož uplatnění je především v radiodiagnostice či radioterapii, dále defektoskopické pracoviště pracující s URZ (zejména mobilním). [9]

Pracoviště třetí kategorie nakládají zejména s urychlovači částic, s URZ určenými pro sterilizaci a ozařování potravin anebo s URZ vhodnými pro radioterapii. [9]

Čtvrtá a také poslední kategorie se váže zejména k velmi významným ZIZ, tedy jaderným reaktorům. Tato kategorie zahrnuje nejen samotné pracoviště s jaderným zařízením, ale i pracoviště s úložištěm radioaktivního odpadu. [9]

Specifickou kategorií jsou tzv. přechodná pracoviště se ZIZ neboli defektoskopická pracoviště. Tato pracoviště jsou členěna na tři typy z hlediska prostředí a místní situace. Vzhledem k tomu, že na přechodných pracovištích hrozí poměrně vysoké riziko vstupu nepovolaných osob, je vždy nezbytné vymezit hranice kontrolovaného pásma pomocí výstražné pásky se znakem upozorňujícím na radiační nebezpečí. Dále je nutno umístit na viditelné místo upozornění ve znění „*Kontrolované pásmo se ZIZ, nepovolaným vstup zakázán*“, společně se znakem radiačního nebezpečí. [23]

První typ – pracoviště A – je z hlediska neoprávněného vstupu FO za hranici kontrolovaného pásma nejvíce náchylné, jelikož je zpravidla situováno v místech, kde se ve vysoké míře nacházejí FO (městské části, průmyslové areály aj.), zatímco v okolí pracoviště typu B se FO nacházejí spíše ojediněle (otevřený venkovní prostor, pole, lesy). Nejlépe jsou na tom z hlediska zabezpečení pracoviště typu C, jež jsou chráněna nejčastěji prostřednictvím betonových zdí, mnohdy s příměsí stínících materiálů (barytová omítka). Pracoviště typu C se často zřizují přímo ve výrobních provozech či halách. [23]

3.2.3 Biologické účinky ionizujícího záření

IZ se v duchu atomového zákona, dle § 2, odst. 2, písm. a), rozumí „*přenos energie v podobě částic nebo elektromagnetických vln vlnové délky nižší nebo rovnající se 100 nm s frekvencí vyšší nebo rovnající se 3×10^{15} Hz, který je schopen vytvářet ionty.*“ [5]. Dle tohoto rozeznáváme, kromě rentgenového a neutronového záření, tři základní typy záření. [12]

Prvním typem je záření alfa, které je charakterizováno jako „*proud částic α , emitovaných rozpadajícími se jádry při jaderných přeměnách, přičemž částice alfa je jádro hélia, které je složeno ze dvou protonů a dvou neutronů, tj. čtyř nukleonů, má dva kladné elementární náboje*“. [24]

Druhým typem je záření beta, které představuje „částice (elektrony a pozitrony), které jsou vysílány radioaktivními jádry prvků při přeměně β . Nesou kladný nebo záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být ovlivňován elektrickým polem. Pronikavost je větší, než u alfa částic (dosah ve vzduchu okolo 1 metru)“. [25]

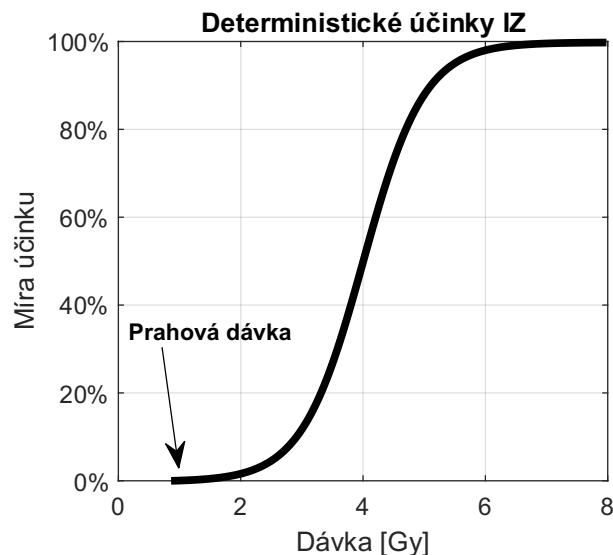
Posledním základním typem je záření gama, jež je definováno jako „elektromagnetické záření krátkých vlnových délek $\lambda \leq 10^{-10}$ m. Je tvořeno fotony, emitovanými jádrem při jaderných přeměnách α , β , kdy jádro může být v excitovaném stavu“. [24]

Interakce IZ s organismem

Aby mohlo nastat případné poškození biologického systému, musí nejprve dojít k samotné interakci ionizujícím zářením. S mírou poškození, a následnou odezvou organismu na ozáření souvisí několik faktorů. Významná je nejen absorbovaná dávka a dávkový příkon, ale i typ samotného IZ, z něhož vyplývá jakým způsobem byla energie v organismu na úrovni buněk deponována. V případě elektromagnetického záření je okolní prostředí ionizováno pouze nepřímo a průchod látkou je brzděn jen minimálně. Z tohoto důvodu má relativně dlouhý dolet částic. Záření alfa má oproti gama záření vysokou hustotu ionizace v prostředí. Rozdílné fyzikální vlastnosti IZ se tak značně odrážejí například v povaze poškození DNA. Důležitý význam má například také časová a prostorová distribuce ozáření. [26]

Odezva organismu na ozáření – účinky deterministické

Jestliže dojde k ozáření celého těla, nebo určitých tkání, takovou ekvivalentní dávkou záření, že opravné mechanismy již nejsou schopny adekvátně nahrazovat některé poškozené buňky, nastane u těchto buněk tzv. buněčná smrt. [13,26] Takovéto, zpravidla jednorázové, ozáření posléze vyvolá specifický klinicky pozorovatelný obraz, který se odvíjí právě od výše absorbované prahové dávky. Z čehož je tedy patrné, že pokud je ekvivalentní dávka nižší než prahová, k poškození s následnou smrtí buněk nedochází, a v takovém případě se o deterministické účinky nejedná (viz obrázek 2, na němž je zobrazena křivka s počátkem v prahové dávce). [13,26]



Obrázek 2 – Deterministické účinky IZ [27]

U deterministických účinků mohou být po ozáření klinické změny pozorovatelné buďto na celotělové anebo lokální úrovni – v závislosti na rozsahu zasažené části organismu. Zřejmě nejznámějším termínem, jež bývá s těmito účinky spojován je akutní nemoc z ozáření, nebo též akutní radiační syndrom. Ten se dle míry závažnosti ozáření projevuje v několika formách. Prahová dávka, jež většinou při celotělovém ozáření způsobí u jedinců tento syndrom, je okolo 1 Gy, nicméně rozvoj závisí i na dalších faktorech. [13,26]

Akutní nemoc z ozáření může mít čtyři následující formy [26]:

- dřeňová forma;
- střevní forma;
- toxemická forma;
- cerebrální forma.

První výše zmíněná forma zpravidla nastává v důsledku ozáření dávkou 0,7–10 Gy. Při této formě je, dle teoretických poznatků, nejvíce patrná patogeneze, zejména z důvodu delšího intervalu přežívání či letálního konce pacientů. Prognóza při I. (lehkém) stupni dřeňové formy bývá zcela příznivá. Relativně příznivou prognózu má II. stupeň, při němž je mortalita odhadována na 5 %. Těžký neboli III. stupeň má při poměrně příznivé prognóze mortalitu 50 %. Symptomy mohou mít různé podoby, od nevolností, zvracení, únavy, apatie, po závratě, bolesti hlavy a svědění či pálení kůže [26]. Střevní forma nastává při dávce 10–20 Gy, a mívá nepříznivou prognózu

s mortalitou 100 %. Klinické projevy v prodromální fázi jsou ve formě zvracení, nauzei či anorexie. Během manifestní fáze dochází k zhoršení stavu pacienta. Často trpí průjmy a zvýšenými teplotami. Následující, toxemická forma často vede k zvýšené propustnosti cév, anebo poruch krevního oběhu v mozku. Projevuje se po obdržení celotělové dávky 20–50 Gy a mortalita je opět 100 %. Poslední cerebrální forma se projevuje v případech ozáření dávkou nad 50 Gy. Jak název napovídá, tato forma je charakteristická rozvojem mozkového radiačního syndromu. Mezi klinické projevy patří úporné zvracení, průjem a únava. Může docházet i ke ztrátě vědomí, tonickým křečím či kómatu. Úmrtí pacientů je v tomto případě otázkou několika dnů. [26]

V důsledku nehod, či nevhodné manipulace se zdroji záření, se u zasažených jedinců mohou projevovat klinické projevy ve formě tzv. lokálního akutního poškození (radiační dermatitidy). Ta může mít následující dvě podoby [13,26]:

- radiační poškození kůže;
- radiační poškození sliznic.

Radiační poškození kůže je nejčastěji se vyskytujícím poškozením v souvislosti s IZ. Poškození se v časně formě projevuje tzv. erytémem, který následně v závislosti na stupni závažnosti přechází do suché a vlhké dermatitidy. Posléze se objevuje jizvení, případně nekróza. Celý tento proces může trvat od několika hodin, až po několik dní – podle toho, zda se jedná o lehký, střední, těžký anebo velmi těžký stupeň závažnosti [26].

Pro účely výzkumné části této práce je významné tzv. kombinované radiační poškození. K tomuto typu dochází v důsledku jaderných výbuchů a radiačních havárií. S největší pravděpodobností by taková poškození nastala, vzhledem k jejich povaze, i při teroristickém útoku s použitím RA látky. Kombinované poškození v sobě zahrnuje jednak působení radiace, a jednak účinky tlakové vlny či tepelného záření. V této kombinaci dochází u jedinců například k těžšímu průběhu popáleninových a traumatických šoků. Včetně zhoršení celkové prognózy, například v důsledku zpomalené reparace postižených tkání. [26]

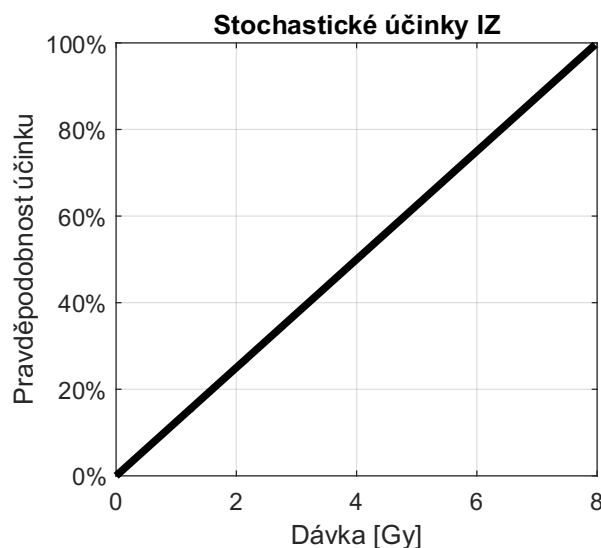
U jedinců, kteří byli vystaveni IZ dlouhodobě, se může projevit chronická nemoc z ozáření, a to zejména pokud pravidelně absorbovali dostatečně velké množství dávky – např. 0,7–1 Gy/rok. [26]

Negativním aspektem, který se může projevit u pacientů, jež byli postiženi radiačním poškozením jsou ireverzibilní změny. Tyto změny jsou pozdním důsledkem neúplné reparace poškození. Pozdní důsledky mohou mít povahu nenádorového onemocnění, které se může projevovat ve formě poruchy nervového systému anebo radiačního šedého zákalu. A rovněž mohou mít i povahu nádorového poškození. [26]

Odezva organismu na ozáření – účinky stochastické

Stochastické účinky jsou oproti deterministickým charakteristické tím, že jsou implikací poškození být jen jediné buňky. K poškození malé kvantity buněk může dojít v důsledku jednorázového ozáření tzv. podprahovou dávkou. Dalším faktorem, na jehož základě se účinky mohou projevit, je ozařování lokální tkáně, popřípadě celého těla po malých dávkách, ale v delším časovém intervalu. [13,26] Pokud jedinec obdrží podprahovou dávku ozáření, nebudou u něj v krátkém časovém úseku pozorovatelné klinické příznaky poškození. Nicméně není vyloučeno, že se u něj klinické změny objeví s určitým, zejména dlouhodobým časovým odstupem. Projevy těchto účinků jsou v zásadě dvojího typu. Buďto dochází u jedince k samotnému nádorovému bujení anebo se účinky odráží v genetice jeho potomstva. [13, 26] Nejčastější negativní projevy stochastických účinků u dalších generací, jsou vrozené vývojové vady. V případě těchto účinků nelze nikdy dopředu s určitostí specifikovat, jak a které geny budou u potomstva v důsledku záření poškozeny. Zásadní odlišnost od deterministických účinků je tedy v tom, že rizika plynoucí ze stochastických účinků lze na základě absorbované dávky pouze s určitou pravděpodobností predikovat. [13, 26]

Jak je patrné z obrázku 3 níže, pravděpodobnost výskytu účinků roste od nuly čili jedná se o bezprahové účinky.



Obrázek 3 – Stochastické účinky IZ [27]

3.3 Využití RA látek a ZIZ v jednotlivých odvětvích

ZIZ nacházejí uplatnění v širokém spektru oborů lidské činnosti, ve velké míře se s nimi však setkáme ve zdravotnictví a průmyslu. V odvětví zdravotnictví se nejčastěji vyskytují ZIZ jednoduché a významné. V ČR mají ZIZ největší zastoupení v zubním lékařství. [12,13]

3.3.1 Výskyt RA látek a ZIZ v odvětví lékařských aplikací

Odvětví zdravotnictví je dle statistických údajů považováno za významného uživatele ZIZ a RA látek. [15] Okruh zdravotnictví, jež určitým způsobem disponuje s RA látkami a ZIZ, v této kapitole bude rozdělen do třech sekcí – radiodiagnostika, radioterapie a nukleární medicína. [12]

Radiodiagnostika

Tento lékařský obor používá převážně URZ. V dnešní době radiodiagnostika využívá výhradně metody zobrazovací, které umožňují nahlédnutí do lidského organismu bez porušení tělesné celistvosti. Zobrazovacích metod využívaných v rámci radiodiagnostiky je několik. Za nejstarší metody využívané v radiodiagnostice (dříve rentgenologii) lze pokládat skiografii a skiaskopii. [12] Obě tyto metody fungují na principu prozařování pacienta RTG paprsky, přičemž ve skiografii je výstupem statický latentní obraz prozářené tkáně. Ve skiaskopii je výstupem tzv dynamické zobrazení obrazu. Vlivem dramatických technologických pokroků byla RTG diagnostika

později – přibližně v 2. polovině min. stol. – obohacena o výpočetní tomografii (CT). Dalšími zobrazovací metodami, je mamografie (vyšetření prsou) nebo angiografie (zahrnující vyšetření žil a tepen). [12] V odvětví zubního lékařství je nejčastěji používanou zobrazovací metodou dentální radiodiagnostika. RTG přístroje využívané v rámci dentální radiodiagnostiky mají v ČR nejpočetnější zastoupení. V roce 2021 byl celkový počet RTG zařízení 10 019. [15] Dentální radiodiagnostika umožňuje díky své univerzální konstrukci přístroje zobrazení nejen tvrdých zubních tkání (dentin, enamelum, cementum), ale i zubních tkání měkkých (pulpa dentis). [12]

V radiodiagnostice jsou v závislosti na účelu použití používány generátory záření X o různých pracovních napětích. Například RTG zařízení používaná ve skiografii využívají k produkci rentgenových fotonů napětí v rozsahu 40–150 kV. Zařízení určené pro výpočetní tomografii (CT) pracuje při napětí 70–140 kV. RTG zařízení využívané při angiografii pracuje v rozsahu napětí 60–125 kV. V případě mamografických RTG zařízení je napětí výrazně nižší – pohybuje se v rozsahu pouhých 20–40 kV. [28]

V rámci některých výše uvedených metod vyšetření je v ČR zjevný vzrůstající trend počtu generátorů záření X oproti roku 2011. V tomto roce bylo evidováno celkem 180 CT zařízení, přičemž tento počet během následujících 10 let vzrostl v důsledku technologického vývoje na hodnotu 247. Obrovský nárůst je dále viditelný v oblasti zubních rentgenových zařízení. Počet zubních intraorálních zařízení se v roce 2011 pohyboval na hodnotách 5 701, zatímco v roce 2021 už hodnoty dosahovaly 7 805. Rapidní vzestup je taktéž u počtu zubních panoramatických zařízení. Ty se z hodnot 890 vyšplhaly na hodnoty 2 214. V roce 2001 bylo v oblasti skiografie a skiaskopie 2 062 zařízení, kdežto do roku 2011 hodnoty mírně poklesly na 1 954. Nicméně v roce 2021 je opět zjevný nárůst, hodnoty dosahují 2 076. Vývoj počtu mamografických zařízení oproti roku 2011, kdy bylo evidováno 131 zařízení, poklesl v roce 2021 na hodnoty 123. [15]

Radioterapie

Radioterapie neboli radiační onkologie je klinický obor zacílený zejména na léčbu zhoubných nádorových onemocnění, ale v některých případech též i na léčbu nenádorových onemocnění. V rámci radioterapie se pracuje zejména s lineárními –elektrostatickými či vysokofrekvenčními urychlovači. V menší míře jsou však stále ještě

využívány ZIZ s radioaktivními prvky ^{137}Cs a ^{60}Co emitujícími vysoce energetické gama záření. [12]

Podle umístění zdroje záření jsou rozlišovány dvě podoblasti radioterapie. Pokud je zdroj záření umístěn v těsné blízkosti ložiska nádoru, případně je zaveden přímo do orgánu, tkáně či lůžka s nádorem, jedná se o tzv. brachyterapii. Její základní princip spočívá v ozařování na krátkou vzdálenost, z čehož vyplývá, že intenzita dávky záření je v místě aplikace nejvyšší a v jejím okolí exponenciálně klesá. V případě, že je radionuklidový zdroj do těla aplikován formou permanentní, při níž dochází k vyzáření celé aktivity zdroje do tkáně, jsou nejčastěji využívány prvky s krátkým poločasem rozpadu (^{198}Au nebo ^{125}I). [12] Při dočasné aplikaci se využívají URZ, které se zavádějí pomocí aplikátoru na požadované místo. Dle cílového umístění aplikátoru obsahujícího zdroj záření je rozlišována radioterapie intersticiální – vkládá se přímo do nádoru, intrakavitární – vkládá se do tělesných dutin, intraluminární – zavádí se do trubicových orgánů, či muláž – umisťuje se na povrchu nádoru. [12]

Významnou součástí radioterapie je i tzv. teleterapie – v literatuře též označována jako zevní či externí radioterapie, při níž je zdroj záření zpravidla umístěn ve vzdálenosti 80–100 cm od těla pacienta. [12]

V teleterapii se nacházejí například generátory záření X pro kontaktní radioterapii určené k ozáření kožních nádorů do hloubky 1–2 mm. Dále RTG zařízení pro povrchovou radioterapii určené k ošetření povrchové léze. V rámci nenádorové terapie, např. k ošetření povrchové leze, je používán URZ (^{137}Cs). V případě nádorových onemocnění byl dříve využíván, zejména pro hloubkovou terapii, URZ (^{60}Co), který byl však v průběhu let nahrazen nízkoenergetickým lineárním urychlovačem. Generátorem záření s duální možností záření X, jež umožňuje jak povrchovou, tak hloubkovou terapii, je vysokoenergetický lineární urychlovač. Lineární urychlovače částic využívané v teleterapii produkují tzv. vysokoenergetické brzdné záření X – zpravidla v rozsahu od 2 do 25 MV. Zatímco klasické rentgeny produkují RTG záření v rozsahu začínajícím na hodnotě napětí 10 kV (např. kontaktní rentgen s Grenzovým zářením) a končící na hodnotě 400 kV (např. RTG pro ortovoltážní terapii). [12, 29]

Nukleární medicína

Nukleární medicína představuje interdisciplinární lékařský obor, ve kterém jsou za účelem diagnostiky a rovněž i za účelem terapie hojně využívány ORZ ve formě radiofarmak. V případě diagnostiky se jedná převážně o zářiče β^+ ; γ , kdežto v případě terapie jsou to spíše zářiče α ; β^- . [30]

Radiofarmaka jsou definována jako přípravky obsahující jeden či více radionuklidů, které při určování diagnostiky vycházejí ze stopovacího principu, jehož základní myšlenka spočívá v nahrazení atomu v molekule látky za radioaktivní izotop. Takto nahrazený atom při průniku do organismu zapříčiní – v závislosti na složení a způsobu aplikace – lokální ozáření cílové tkáně, které je sledováno pomocí detekce IZ. Před samotnou aplikací do organismu však radiofarmaka musí splňovat základní kritérium, jímž je radionuklidová a radiochemická čistota. Radiofarmaka definují dva základní činitele. Prvním činitelem je biologicky aktivní složka a druhým složka radioaktivní. Radiofarmakem tak mohou být látky rozličného charakteru – Na^{131}I , cukry, aminokyseliny, leukocyty, erytrocyty, plyny, suspenze, koloidy aj. V závislosti na odlišných charakteristických vlastnostech použitých radionuklidů se může rozpadová konstanta u radiofarmak lišit v řádu hodin, dnů, ale i let. U nejvíce využívaného radiofarmaka $^{99\text{m}}\text{Tc}$ je udáván poločas rozpadu 6 hodin, ale u radiofarmaka ^{131}I je poločas rozpadu odhadován na 8 dní. [30]

I přes poměrně nízký poločas rozpadu radionuklidů dochází ve spalovnách komunálního odpadu každoročně k nálezům zdravotnického materiálu pocházejícího z oblasti nukleární medicíny, který stále vykazuje vyšší úroveň kontaminace. Radiofarmaka mají své opodstatnění v nukleární kardiologii, pneumologii, onkologii, neurologii, hematologii a endokrinologii. [30] Výčet nejčastěji se vyskytujících radiofarmak dle účelu jejich použití je uveden v příloze A.

3.3.2 Využití RA látek a ZIZ v odvětví průmyslových aplikací

Nejpočetnějším odvětvím, v němž jsou široce využívány ZIZ, je průmysl, kde lze – z pohledu významnosti – nalézt celé spektrum zdrojů. V této kapitole je pozornost věnována pouze vybraným průmyslovým aplikacím – defektoskopii, bezpečnostním rentgenům a radiační sterilizaci. [12]

Průmyslová radiografie a defektoskopie

Průmyslová radiografie představuje nedestruktivní defektoskopickou metodu (non-destructive testing), jejímž účelem je lokalizovat, kvalifikovat a kontrolovat vlastnosti či degradační vady materiálů nebo výrobků. [12] Průmyslová radiografie funguje na principu prozařování materiálů či výrobků za pomoci zejména rentgenových (ojediněle i gama) paprsků, přičemž obraz těchto paprsků lze po jejich zachycení následně vyhodnotit pomocí dvou základních metod. První a poněkud starší metodou, je zachytávání paprsků na speciální radiografický film. Druhou a zároveň novější metodou je převedení obrazu do elektronické podoby a jeho následné zobrazení na monitoru počítače, kde je možné s promítnutým snímkem libovolně manipulovat (2D rentgen, 3D Computer Aided Tomography). [12, 29] RTG přístroje jsou užívané v rámci defektoskopie pracují standardně s napětím v rozmezí od 60 do 320 kV (někdy až 450 kV). Aktivita gama zářičů využívaných v defektoskopii se pohybuje – v závislosti na zapouzdřeném radionuklidu – v rozmezí 1–100 TBq. V této oblasti se využívají zejména radionuklidy ^{170}Tm , ^{160}Yb , ^{192}Ir , ^{75}Se , ^{60}Co a ^{137}Cs . Defektoskopické přístroje mohou být buď pevně instalovány na stálých defektoskopických pracovištích, nebo mohou být tzv. mobilní. Mobilní defektoskopická zařízení jsou často využívána zejména na přechodných pracovištích. [29] Defektoskopie nachází své uplatnění například v oblasti strojírenství, kde je takto zjišťována případná necelistvost a nejednotnost materiálů či přítomnost vnitřních prasklin a dalších okem neodhalitelných defektů odlitků, svarů či obrobků. [12]

V oblasti elektrotechniky se pomocí RTG analyzuje kvalita pájení součástek určených po povrchovou montáž. [12] Makroskopické defekty pájeného spoje mohou mít různé podoby – od zkratů, prasklin, dutin, otevřených spojů až po deformaci vývodů. Veškeré tyto defekty je RTG zařízení schopno odhalit s vysokou přesností. Na snímku se tyto defekty projevují ve formě světlejších skvrn v důsledku jejich exponování vyšší intenzitou RTG záření. [31]

Bezpečnostní rentgeny

Na letištích, hraničních přechodech, v bankách či v jaderných elektrárnách jsou z důvodu zajištění ochrany před nebezpečnými předměty často instalovány tzv. bezpečnostní rentgeny. [12] Může se jednat o drobný, jednoduchý, ale i významný ZIZ. Tato zařízení jsou ve velké míře používány za účelem kontroly zavazadel, osob a dopravních prostředků, včetně nákladu. Bezpečnostní rentgeny jsou konstruovány

na podobné bázi jako přístroje defektoskopické. Zachycený obraz pronikajících RTG paprsků je zde převáděn do elektronické podoby a zobrazován ve vysokém rozlišení na monitoru počítače. Přístroj může mít v zásadě dvě podoby, a to RTG lampy o energie do 200 keV anebo lineárního urychlovače pracujícího s energií v rozsahu od 3 do 9 MeV. [12,13]

Ozařování potravin

Odvětví zemědělství a potravinářského průmyslu je se ZIZ široce spjato především z důvodu jejich příznivého využití v rámci ošetřování potravin a surovin. Je vědecky dokázáno, že IZ dokáže účinně zničit DNA choroboplodných zárodků, virů a bakterií, které jsou oproti běžným molekulám (z nichž jsou tvořeny potraviny) podstatně náchylnější na poškození. [12] Vyhláška č. 133/2004 Sb. *o podmínkách ozařování potravin a surovin, o nejvyšší přípustné dávce záření a o způsobu označení ozářené na obalu*, ve znění pozdějších předpisů, diferencuje celkem tři druhy IZ, které lze k ošetření potravin a surovin použít. Jedná se o záření gama pocházející z radionuklidu ^{60}Co (případně ^{137}Cs), dále RTG záření, jehož energie záření není vyšší než 5 MeV. Třetím druhem jsou urychlené elektrony, jejichž energie je nanejvýš 10 MeV. Důležitým aspektem při ošetřování potravin a surovin pomocí IZ je, že nesmí být se stejným účelem kombinováno s chemickým ošetřením. [32] Mezi základní podmínky použití IZ k ošetření potravin a surovin patří například redukce ztrát z důvodu rašení, klíčení či předčasného zrání. Dále zničení patogenních a škodlivých organismů, jež by mohly přenášet nebezpečné nákazy. Zásadní podmínkou je také neohrožení zdraví spotřebitele vlivem ozáření. V závislosti na tom, zda je použita nízká, střední či vysoká dávka, je dosaženo odlišných výsledků. U brambor, obilovin, čerstvého ovoce a zeleniny se nejčastěji používají nízké dávky záření (do 1 kGy), díky kterým je možné docílit inhibice klíčení, dezinfekce či zpoždění dozrávání. Střední dávky o rozsahu od 1 do 10 kGy jsou aplikovány na jahody, ryby, či mořské plody z důvodu prodloužení jejich trvanlivosti či pasterizace. K průmyslové sterilizaci a dekontaminaci jsou používány vysoké dávky (od 10 do 50 kGy) – a to zejména u masa, drůbeže a koření. V praxi jsou však ke sterilizaci či dekontaminaci používány dávky do 10 kGy. [12, 29]

3.3.3 Transport RA materiálů a ZIZ

Specifickou a poměrně komplexní sférou orientující se na možná radiační a jaderná rizika, jež jsou spojována s dopravou materiálů, je oblast zabezpečení RA materiálů a ZIZ při transportu. [13] Transport materiálů může probíhat na lokální a mezikontinentální úrovni. V rámci přeshraničního převozu a dovozu je převozní činnost vázána mezinárodními evropskými dohodami o přepravě nebezpečných věcí. V oblasti silniční přepravy se jedná konkrétně o dohodu ADR (Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road). [33] Četnost publikace aktualizované verze této dohody bývá ve sbírce zákonů ČR zpravidla v intervalu jednoho roku. Cílem dohody ADR v rámci přepravy RA materiálů je zajištění optimální bezpečnosti a ochrany lidí, majetku a životního prostředí před škodlivými účinky IZ. V rámci zefektivnění dosažení tohoto cíle jsou ustanoveny požadavky vedoucí k zabránění vzniku kritického stavu a škodám v důsledku tepla vznikajícího vlivem samotného IZ. Hlavním kritériem, jímž se na těchto zamezeních podílí, je především samotné uzavření radioaktivního obsahu a následné pravidelné kontroly vnějších příkonů dávkového ekvivalentu. Zásadním faktorem odrážejícím se v úrovni bezpečnosti při přepravě je též náležité vyškolení pracovníků v oblasti radiační ochrany. Díky dostatečnému povědomí o zásadách radiační ochrany lze u pracovníků v co největší míře předejít nežádoucímu pracovnímu ozáření z důvodu pochybení. Dohoda stanovuje povinnosti hlavních účastníků, které zahrnují standardní kroky, jimiž je ověřeno, že nebezpečné přepravované věci mají povolení a lze je přepravovat na základě dohody ADR. Dále, že byly použity vhodné a především schválené obaly a že bylo použito dostatečné značení vymežující nebezpečnost látky. [33,34]

Železniční přeprava je v ČR vázána Řádem pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečného zboží (RID). Tento řád je rozsáhle upraven ve sdělení Ministerstva zahraničních věcí č. 29/1998 Sb., ve znění pozdějších změn a doplnění. RID zahrnuje širokou škálu podmínek týkajících se přepravy nebezpečných látek (dále jen NL) v rámci jejich rozdělení do tříd, jichž je celkem 9, přičemž konkrétně radioaktivní látky jsou řazeny do třídy 7. Ve sdělení jsou například podrobně specifikovány podmínky pro přípravu a kontrolu RA látek při přepravě a při tranzitním skladování a rovněž i podmínky týkající se typů obalových souborů a kusů. [35] Přestože typy obalových souborů mají stejné značení jako při silniční dopravě, viz tabulka 2, jejich konstrukční

provedení je odlišné a přizpůsobené k umístění do železničních, kotlových vozů. Kategorie kusů a přepravních obalových souborů je rovněž stejná jako v případě ADR (viz tabulka 3). [33,34]

Tabulka 1 – Typy transportních obalových souborů (TOS) [33,34].

| Druh přepravy | Typ transportního obalového souboru (TOS) | | | | | | | |
|---------------|---|-------------|------|------|------|---|------|------|
| | ADR | Vyjmutý kus | IP-1 | IP-2 | IP-3 | A | B(U) | B(M) |
| RID | Vyjmutý kus | IP-1 | IP-2 | IP-3 | A | B | B(M) | – |

Tabulka 2 – Kategorie kusů a přepravních obalových souborů [33,34].

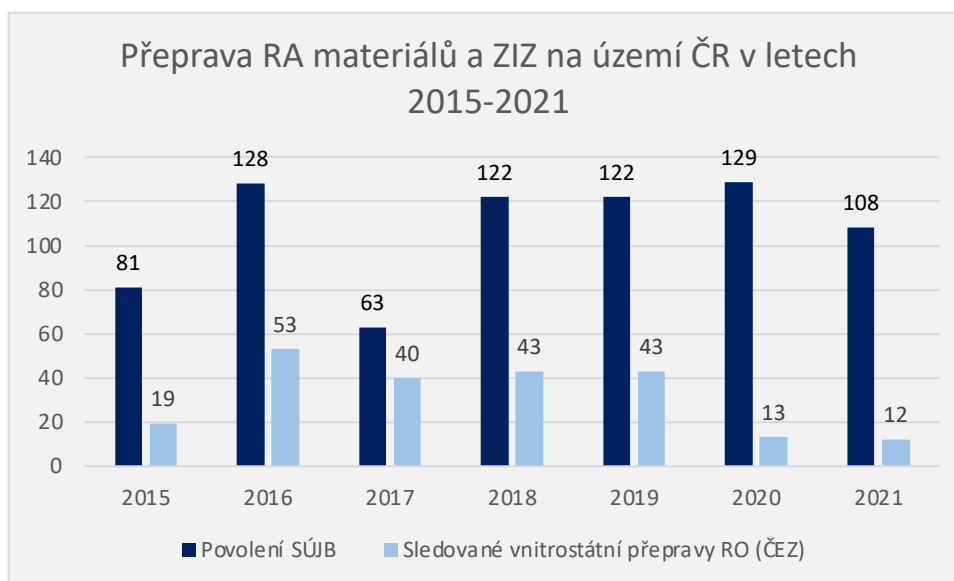
| Kategorie | Nejvyšší příkon dávkového ekvivalentu | Přepravní index |
|---|--|-------------------------------|
| I - BÍLÁ | nejvýše 0,005 mSv/h | 0 |
| II - ŽLUTÁ | více než 0,005 mSv/h (nejvýše 0,5 mSv/h) | více než 0 (avšak nejvýše 1) |
| III - ŽLUTÁ | více než 0,005 mSv/h (nejvýše 2 mSv/h) | více než 1 (avšak nejvýše 10) |
| III - ŽLUTÁ [za podmínek výlučného použití] | více než 2 mSv/h (nejvýše 10 mSv/h) | více než 10 |

Nevyhnutelný cyklus přepravy radionuklidového zariadení do příslušného cílového pracoviště (I.–IV. kategorie) a následný převoz zariadení po ukončení jeho provozu na místo určené k profesionální likvidaci se v rámci jeho existence odehraje přinejmenším jedenkrát. [9, 13] Nicméně v praxi jsou zariadení mnohdy opakovaně převáženy i několikrát do roka – nejčastěji z důvodu ekonomických či technologických benefitů z toho plynoucích. Přeprava RA materiálů a ZIZ má své výhody, ale zároveň i jisté nevýhody. Jejich přeprava je založena především na preskriptivním přístupu a redundanci. Na základě preskriptivního přístupu je k této problematice přístupováno nejen na úrovni národní, kdy se vychází z platné legislativy ČR dotýkající se této oblasti, ale i na úrovni nadnárodní, kdy jsou implementovány mezinárodní doporučení – například doporučení ICRP 60, které bylo publikováno Komisí pro radiologickou ochranu a bezpečnost v lékařství a jež se výrazně zasloužilo o současnou podobu systému radiační ochrany. [13, 36] Redundancí je zde myšlen dvoustupňový systém zabezpečení. První stupeň zabezpečení představuje uložení radionuklidových zariadení do výlučných transportních obalových souborů na základě dílčího rozdělení zariadení do jednotlivých skupin dle úrovně rizika, které vykazují. Při určování vhodného transportního obalového souboru hraje významnou roli samotný radionuklid, jeho aktivita a souhrnné vlastnosti.

Patříčně zvolený obal dokáže účinně odstínit a minimalizovat nežádoucí projevy IZ. Druhou úrovní zabezpečení jsou striktní požadavky zejména administrativního charakteru. Velký důraz je kladen na kvalitu a rozsah přepravní dokumentace, zpracování havarijního řádu pro případ nehody, školení a přezkušování personálu či přezkoumávání splnění technických požadavků transportních vozidel. [13]

Pro účely přeshraničního pohybu a zabezpečení rozlišuje atomový zákon (v § 61) celkem 5 kategorií. Parametry ZIZ, na jejichž základě jsou jednotlivé kategorie odlišovány, jsou dány zejména jejich účelem použití a dále poměrem aktuální aktivity a D-hodnoty – u URZ i ORZ, a také jejich dávkovým příkonem. V první kategorii zabezpečení se jedná například o URZ a ORZ, jejichž poměr aktuální aktivity a D-hodnoty má počátek na hodnotě 1 000. Druhá kategorie zahrnuje například URZ určené pro defektoskopii či brachyterapii s vysokým nebo středním dávkovým příkonem. ZIZ třetí kategorie jsou zejména průmyslové ozařovače, jimiž jsou například URZ v indikačním nebo měřicím zařízení, anebo URZ určené pro karotáže. Čtvrtá kategorie zahrnuje například URZ určené k brachyterapii s nízkým dávkovým příkonem nebo URZ nacházející se v eliminátoru statické elektřiny. Poslední pátá kategorie obsahuje například ZIZ pro radionuklidovou rentgenofluorescenční analýzu, a dále i oční aplikátory a permanentní implantáty určené pro radioterapii. [5]

Na území ČR jsou každoročně přepravovány RA materiály a ZIZ zejména formou silniční a železniční přepravy a v menší míře též leteckou přepravou. Veškeré přepravované materiály jsou důkladně zařazovány do příslušné kategorie z hlediska zabezpečení pro účely přeshraničního pohybu. Na obrázku 4 je uveden přehled počtu přeprav, jež proběhly na základě povolení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB), a taktéž počet sledovaných vnitrostátních přeprav radioaktivních odpadů vztahujících se ke společnosti ČEZ a jaderné elektrárny (dále jen JE) Temelín a JE Dukovany. [15]



Obrázek 4 – Přeprava RA materiálů a ZIZ uskutečněná v ČR za dané období [15].

Z obrázku 4 je zřejmé, že uskutečněný počet přeprav má spíše kolísavé tendence. Přesto lze říci, že v letech 2020–2021 došlo k výraznému snížení počtu sledovaných vnitrostátních přeprav radioaktivního odpadu oproti předešlým roků. Na vině může být několik faktorů včetně pandemické situace Covid-19, jež obecně negativně ovlivnila chod jaderné energetiky zejména v oblasti distribuce dodávek energie. [37]

V souvislosti s transportem RA materiálů a ZIZ jsou SÚJB řešeny spíše ojedinělé mimořádné události. V roce 2021 byly řešeny celkem 3 případy vzniklé při transportu, jež se odehrály na Letišti Václava Havla. V prvním případě se jednalo o zajištění vozidla přepravujícího RA látky, které nebylo řádně označeno dle stanovených předpisů ADR. Průvodní dokumentace však stanoveným předpisům odpovídala. Druhým případem bylo zachycení zásilky vykazující zvýšený dávkový příkon. Celní správa pomocí spektrometrické metody odhalila, že se uvnitř zásilky nacházejí hodinky obsahující radionuklid ^{226}Ra . Poslední případ se týkal ohlášeného převozu defektoskopického krytu, jenž obsahoval URZ ^{192}Ir o aktivitě přibližně 3 TBq. Při nakládce tohoto defektoskopického krytu s URZ došlo k jeho pádu, v důsledku, něhož se v oblasti kufru automobilu ochranný přepravní kryt otevřel. K této události byl Hasičským záchranným sborem (dále jen HZS) Letiště Praha povolán HZS hl. m. Prahy a zároveň byl o případu informován SÚJB, který na místo události povolal mobilní skupinu Státního ústavu radiační ochrany (dále jen SÚRO), aby ověřila stav přepravovaného zařízení. Mobilní skupina v okolí zdroje nezaznamenala zvýšený dávkový příkon a o této skutečnosti

informovala odesílatele zásilky, který následně ověřil nepoškození zařízení. Po ověření byl ochranný kryt zařízení opět zaplombován a zásilka pokračovala v přepravě. [15]

3.3.4 Analýza neoprávněného držení a nakládání s RA materiály a ZIZ

V této kapitole je pozornost věnována nálezům nebezpečných látek na území ČR a dále je zde provedena analýza záchytů RA materiálů a ZIZ ze strany SÚJB v letech 2011–2021. V neposlední řadě je popsán i případ nebezpečného nakládání s kobaltovým ZIZ na území Indie. [38]

Nález nebezpečných látek na území České republiky v roce 2010

V souvislosti s problematikou neoprávněného držení jaderného a zvláštního štěpného materiálu se i na půdě ČR řešila v roce 2010 relativně neobvyklá situace. V této věci sehrálo velkou roli riziko patologického shromažďování předmětů, kdy muž ve středním věku zjevně trpěl určitou formou psychického onemocnění a ve svém domě nacházejícím se na katastrálním území v Bělé nad Svitavou skladoval opravdu velké množství věcí různorodého druhu. V nemovitosti se nacházely jednak materiály řazené mezi běžný komunální odpad (papír, plasty, potraviny), jednak materiály spadající do sekce chemických látek (vysoce toxické, toxické, žíravé či oxidující) a v neposlední řadě materiály spadající do kategorie radioaktivní a explozivní. [38]

Nejen obytná, ale i hospodářská část domu byla naprosto přehlcena věcmi. Kvůli hromadám dezorganizovaných všudypřítomných věcí byl pohyb po domě značně omezen, byl možný pouze prostřednictvím úzkých uliček – ty ovšem umožňovaly přístup jen do některých částí domu. Leckteré místnosti v domě byly prakticky nepřístupné. Tento nepořádek majiteli výrazně znemožňoval běžné užívání prostor domu a provádění základních aktivit. [38]

S nadměrným hromaděním věcí je obecně spojováno zvýšené riziko požáru. V tomto případě bylo ovšem riziko mnohem závažnější a řádově vyšší, uvážíme-li, že muž v domě přechovával chemikálie, výbušniny a radioaktivní látky. Tyto aspekty se staly podnětem pro šetření ze strany příslušných institucí. Aktivitu tohoto muže byly po určitou dobu sledovány i Útvarem pro odhalování organizovaného zločinu, který se dne 7. října 2010 rozhodl v této věci jednat. Ve spolupráci s pyrotechniky HZS

Jihomoravského kraje (chemická laboratoř Tišnov) po prvotním průzkumu místa příslušníci potvrdili předpoklad nezákonného jednání a přechovávání nebezpečných látek. [38] Se zjištěnou situací posléze obeznámili hejtmana Pardubického kraje a další odborníky z útvarů, již se na místo události dostavili. Kromě Policie ČR a HZS ČR byla na místo povolána i externí společnost Dekonta a. s., jejíž specializace je orientována především na environmentální bezpečnost. A jednou z mnoha oblastí zájmů této firmy je i činnost spojená s nakládáním s nebezpečným odpadem a jeho likvidací. Firma provedla na místě události během několika dnů identifikaci a inventarizaci nebezpečných látek a následně látky zabezpečila a zajistila jejich likvidace. Po ukončení veškerých činností – počínaje vyklizením a provedením asanačních prací, po celkovou likvidaci NL – byla firmou vytvořena závěrečná zpráva, jež uceleně a přehledně popisuje vzniklou událost. Závěrečná zpráva obsahuje komplexní výčet celkového množství a druhů nebezpečných materiálů, jež se nacházely na místě události. [38] V tabulce 4 a 5 jsou však uvedeny materiály, jež mohou mít přímou souvislost s radiologickým terorismem či výrobou tzv. špinavé bomby.

Tabulka 3 – Přehled nalezených RA látek [38].

| Radioaktivní látka | Molekulový vzorec | Množství (g) |
|--------------------|---|--------------|
| Uranyl Chlorid | UO ₂ (NO ₃) ₂ | 200 |
| Uranyl Nitrat | UO ₂ Cl ₂ | 100 |

Tabulka 4 – Přehled nalezených prekurzorů k výrobě trhavin [38].

| Prekurzory k výrobě trhavin | Molekulový vzorec | Množství (kg) |
|-----------------------------|--|---------------|
| Pentaerythritol | C ₅ H ₁₂ O ₄ | 77 |
| Pentrit | C ₅ H ₈ N ₄ O ₁₂ | 23 |
| Prášková celulóza | C ₆ H ₁₀ O ₅ | neuvedeno |
| Nitrocelulóza | C ₆ H ₇ O ₂ | 70 |

Závěrem lze konstatovat, že zde mohl být potenciál využít nakumulované výbušniny a radioaktivní materiály v rámci radiologického terorismu. Pachatel svou sbírku s největší pravděpodobností shromažďoval v řádu několika desítek let. Ovšem zda bylo jeho záměrem sestrojení improvizovaného výbušného zařízení se do dnes nepodařilo zcela jednoznačně prokázat. Rovněž se nepodařilo prokázat původ některých nebezpečných látek [38].



Obrázek 5 – Nalezené jaderné materiály – Uranyl nitrát a Uranyl chlorid [38].



Obrázek 6 – Nalezený Pentrit a další neznámé výbušniny [38].

Analýza záchyťů RA materiálů a ZIZ na území ČR v letech 2011–2021

Na území České republiky je každoročně SÚJB evidováno několik desítek událostí spojených s neoprávněným nakládáním s RA materiály či ZIZ. Jedná se především o události spojené s nálezem a následným zachytem RA látek, ZIZ či předmětů, které byly kontaminovány. Mezi nejčastější místa výskytu patří spalovny komunálních odpadů a zařízení určená ke zpracování či shromažďování kovového šrotu. Dále nejsou ojedinělé ani nálezy v soukromých objektech FO či na aktivních nebo bývalých pracovištích se ZIZ. [38] V tabulce 6 je uveden chronologicky řazený výčet událostí dle období jejich řešení v letech 2011–2021. Je zde nutné podotknout, že tento výčet zdaleka neobsahuje všechny události, které se za dané časové období udály či byly odhaleny. Ne všechny nálezy jsou totiž SÚJB řádně nahlášený, a proto může vznikat určitá latence – čili skrytost, či utajenost některých událostí, což se následně odráží v exaktnosti statistických údajů. [15]

Tabulka 5 – Přehled záchytů RA materiálů a ZIZ SÚJB na území ČR v letech 2011–2021 [15].

| Rok | Spalovny odpadu | Kovový šrot | Soukr. objekty | Pracoviště se ZIZ | Letiště VH | Ostatní | Celkem |
|------|-----------------|-------------|----------------|-------------------|------------|---------|--------|
| 2011 | 16 | 32 | 0 | 3 | 3 | 1 | 55 |
| 2012 | 24 | 32 | 0 | 3 | 2 | 5 | 66 |
| 2013 | 24 | 41 | 1 | 1 | 2 | 3 | 72 |
| 2014 | 16 | 34 | 0 | 1 | 1 | 0 | 52 |
| 2015 | 10 | 20 | 0 | 1 | 0 | 5 | 36 |
| 2016 | 11 | 8 | 0 | 0 | 0 | 3 | 22 |
| 2017 | 17 | 19 | 0 | 0 | 0 | 6 | 42 |
| 2018 | 18 | 9 | 0 | 0 | 0 | 4 | 31 |
| 2019 | 16 | 8 | 4 | 0 | 0 | 4 | 32 |
| 2020 | 21 | 11 | 3 | 3 | 1 | 6 | 45 |
| 2021 | 15 | 7 | 6 | 2 | 3 | 3 | 36 |

Z tabulky 6 je patrný vzrůstající vývoj řešených případů v letech 2011 až 2015. Ve spalovnách komunálního odpadu mají největší četnost výskytu předměty kontaminované radionuklidy ^{226}Ra , ^{131}I a $^{99\text{m}}\text{Tc}$. V případě radionuklidu ^{226}Ra se často jedná o hodinky či předměty kontaminované rádiovou barvou. Radionuklidy ^{131}I a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ se ve spalovnách ocitají ve formě kontaminovaného zdravotnického materiálu používajícího se v oblasti nukleární medicíny. Ojedinělé nejsou ani případy nálezů kontaminovaných předmětů radionuklidy ^{137}Cs , ^{60}Co a ^{232}Th . V ojedinělých případech se ve spalovnách vyskytnou i předměty kontaminované radionuklidy ^{241}Am , ^{238}U , ^{68}Ge , či ^{54}Mn . [38]

V zařízeních pro shromažďování či zpracování kovového šrotu mají největší četnost předměty kontaminované či obsahující radionuklidy ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co . Často však byly nalezeny i předměty kontaminované radionuklidy ^{238}U , ^{108}Ag , ^{152}Eu , ^{55}Fe . [38]

Nebezpečné nakládání se ZIZ na území Indie v roce 2010

Událost významného pochybení se v roce 2010 odehrávala i v indickém městě Dillí. Na tamní chemické univerzitě byl k výzkumným účelům používán ZIZ obsahující ^{60}Co . Tento zdroj emitující gama záření byl po určitém časovém období univerzitou určen k vyřazení z provozu čili bylo nutné zajistit jeho převoz na místo určené k likvidaci. Avšak při likvidaci zdroje došlo ze strany univerzity k výraznému pochybení a porušení právně závazných národních předpisů. Namísto bezpečného předání zdroje oprávněné firmě specializující se na likvidaci ZIZ byl zdroj prodán nic netušícímu obchodníkovi s kovovým šrotem. Po koupi bylo se zdrojem manipulováno neodborným způsobem.

Obchodník a jeho čtyři zaměstnanci se společně pokoušeli odstranit olověný ochranný obal, jenž zabraňoval průniku ionizujícího záření skrz. Po vytrvalé manipulaci se jim ochranný obal podařilo poškodit a následně odstranit. V důsledku odstranění ochranného obalu byl obchodník společně se svými zaměstnanci vystaven vysoké dávce záření. [39]

Na tomto incidentu lze pozorovat neblahý vliv IZ na lidský organismus, jelikož přibližně po týdnu začali někteří pracovníci pozorovat nápadné hyperpigmentové změny na kůži, projevy alopecie a téměř všichni vykazovali nevolnost a únavu. Postupně začali se svými obtížemi navštěvovat zdravotnická zařízení, přičemž na základě sledu událostí a prezentovaných symptomů lékaři dospěli u všech pěti hospitalizovaných pacientů ke stanovení diagnózy akutního radiačního syndromu. Odlišnost symptomů, pro které byli jednotliví pacienti hospitalizováni, byla dána rozdílností přijaté dávky záření, vzdáleností od zdroje a době trvání expozice. V tabulce 7 jsou uvedeny odhadované dávky záření, které každý z pěti pacientů obdržel. [39]

Tabulka 6 – Odhadovaná dávka záření u hospitalizovaných osob [39].

| Pacient | Odhadovaná dávka záření |
|----------------|--------------------------------|
| 1. pacient | 3,1 Gy |
| 2. pacient | 2,3 Gy |
| 3. pacient | 2,8 Gy |
| 4. pacient | 0,9 Gy |
| 5. pacient | 0,6 Gy |

Konkrétně u prvního pacienta, který otevřel ochranný olověný obal a obdržel nejvyšší dávku záření (3,1 Gy), se po 2 dnech projevila nemoc z ozáření ve formě ztmavnutí prstů na ruku a nohu, hyperpigmentovaných skvrn na pravém předloktí a levém rameni, určité hemoptýzy, únavy a nevolnosti. Léčba zvolená pro prvního pacienta spočívala v podávání krevních destiček a antibiotik. Navzdory prvotnímu dosažení stabilizovaného stavu došlo v 10. den od hospitalizace ke zhoršení celkového stavu pacienta. Pacient měl vysoké horečky a trpěl dušností v důsledku aspergilózy plic. Následně se u něj začala projevovat renální a respirační insuficience vedoucí k úmrtí 16. dne. [39]

Zbývající pacienti byli též podrobena terapii, na níž reagovali příznivě a po přibližně 4 týdnech hospitalizace byli propuštěni z nemocnice. U těchto osob lze v budoucnu předpokládat pravděpodobný rozvoj stochastických účinků. [39]

Po tomto incidentu došlo hned k několika reparacím. Univerzita vyplatila poškozeným a pozůstalým náležitě odškodné. Dále byly učiněny i právní kroky proti šesti profesorům z chemické univerzity, kteří byli obviněni z trestného činu z nedbalosti. Ze strany úřadů bylo nařízeno a provedeno mnoho intenzivních kontrolních a dekontaminačních prací právě v oblasti trhu s kovovým šrotem, kde často končí nejen vyřazené ZIZ. Dalším krokem, jenž učinilo ministerstvo práce a sociálních věcí, bylo vydání protokolu pro radiační nehody, který poskytuje jasné pokyny pro případ nehody spojené s ozářením. Samotný zdroj byl posléze na základě rozhodnutí Rady pro regulaci atomové energie v Indii (AERB) převezen do národního zařízení určeného k nakládání s jaderným odpadem. [39]

3.4 Radiologický terorismus

Terorismus lze obecně vnímat jako určitou násilnou cestu k prosazování zájmů ze strany stoupců (z řad teroristických organizací) prosazujících zejména radikální ideologii. Pohnutky pachatelů teroristických činů bývají nejčastěji politického, náboženského, separatistického či ekologického rázu. [40]

Přestože se klasický terorismus (bez použití RA látek) týká zejména ostatních evropských zemí (Francie, Španělsko aj.), nelze do budoucna vyloučit jeho provedení i na území ČR. To stejné platí i pro radiologický terorismus, ačkoliv nebyl doposud žádný radiologický terorismus (až na výjimečné případy týkající se ovšem pouze jedinců) proveden, neznamená to, že toto riziko neexistuje. S touto skutečností kooperuje i EU, jež se v boji proti radiologickému terorismu v poměrně velké míře angažuje. Její iniciace v této problematice rezonuje například i s aktivitami Organizace spojených národů (dále jen OSN) anebo Mezinárodní organizace pro atomovou energii (dále jen IAEA) či Mezinárodní komise pro radiační ochranu (dále jen ICRP), jež se touto otázkou taktéž silně zabývají. [41,42]

3.4.1 Radiologické zbraně

Radiologické zbraně spadají a řadí se do sekce CBRN (Chemical, biological, radiological, nuclear) látek. Záměrné použití radiologických zbraní by v cílové zemi vyvolalo především občanský či finanční rozvrat, v globální míře pak zejména strach a paniku. Teroristé mohou RA materiál a ZIZ získávat různými nelegálními cestami.

Mohou se pokusit o jejich získání například formou odcizení z pracovišť se ZIZ (univerzity, nemocnice, výzkumné instituce aj.) především v zemích s nižší úrovní zabezpečení, dále ukradením během jejich transportu či jejich zakoupením na černém trhu (RA látky se poměrně běžně vyskytují i na internetu – dark web), popřípadě zaútočením na jaderné zařízení (elektrárnu) a uvolnění RA látek do okolí. [43]

Významným aspektem je pro teroristy vysoká úroveň aktivity zářiče. Kromě aktivity zářiče jsou pro teroristy významná ještě další kritéria vedoucí k výběru vhodného ZIZ pro teroristický útok. Jedná se o dostupnost vhodného radionuklidu, snadné použití, dostatečně dlouhý poločas rozpadu, dostupnost RA materiálu v dostatečně velkém množství, případně jeho detekovatelnost. [21, 43, 44]

Všeobecně lze radiologický terorismus, z hlediska jeho provedení, chápat ve čtyřech rovinách – viz níže.

Radiologická zbraň typu RDD

Jednou z nejvíce diskutovaných možností provedení tzv. aktivního radiologického terorismu je prostřednictvím radiologického disperzního zařízení (Radiological dispersal device – RDD). Radiologické disperzní zařízení je charakteristické tím, že k rozptýlení RA materiálu se využívá látku, která je způsobilá k chemické výbušné přeměně. Tato látka, definovaná obecně jako výbušnina, může mít podobu trhaviny, třaskaviny, střeliva, případně pyrotechnické složení [43, 45].

Aby bylo možné RA látky výbušninou rozptýlit, je nezbytné použít mechanický podnět (rozněcovadlo), pomocí něhož se vyvolá tzv. detonace. Roznět může být proveden průmyslovou rozbuškou, zápalnicí, bleskovicí, případně elektrickým rozněcovadlem (mžikovým nebo časovým). V případě použití elektrického roznětu je nezbytné zajistit jeho ochranu před účinky cizí energie (bludné proudy, elektrostatická energie, atmosférická elektrická energie, vysokofrekvenční energie aj.). Použité radioaktivní látky mohou mít skupenství pevné, ale i kapalně, popřípadě se může jednat o RA látky v podobě aerosolu. Při rozptýlení RA látky pomocí výbušného zařízení by měly nejvíce negativní dopady účinky samotného výbuchu a vzniklé rázové vlny, jež by pravděpodobně na místě usmrtily několik osob, zatímco rozptýlené RA látky by měly za následek spíše ojedinělá úmrtí či vážné zdravotní účinky plynoucí z ozáření.

Ovšem z dlouhodobého hlediska lze předpokládat pravděpodobný vznik stochastických účinků. [43, 46, 47, 48]

Radiologická zbraň typu RED

Druhou pasivní možností radiologického terorismu je použití radiologického expozičního zařízení (Radiological Exposure Devices – RED). Základním principem není rozptýlení, ale pouhé umístění RA materiálu nebo ZIZ do míst, v jejichž blízkosti (nejlépe do 1 m) mohou být osoby vystaveny záření. Důležitým aspektem je zde použití zdroje o vysoké aktivitě a jeho umístění do takových lokalit, v nichž se lidé zdržují po delší dobu. Míra účinků na jedince je dána zejména dobou, po kterou se osoba nachází v blízkosti zdroje. Čím delší expozici je osoba vystavena, tím větší hrozí riziko rozvoje deterministických účinků. Ideálními místy pro uskutečnění takového činu jsou veřejné objekty (nádraží, městská hromadná doprava, stadiony aj.). Tato forma teroristického útoku je nebezpečná z hlediska vnějšího ozáření. Pravděpodobnost vnitřního ozáření je zde téměř mizivá. [46, 49]

Radiologická zbraň typu RID

Aby teroristé značně zkomplikovali složkám IZS zajištění včasné pomoci zasaženým osobám či rychlou likvidaci následků jejich činu, mohou se pokoušet o vyvolání požáru. Požár s přítomností RA látek by značně ztížil zásah a zároveň by do vzduchu vynesl mikroskopické částičky, které by pro osoby nacházející se v blízkosti představovaly velké riziko v důsledku jejich inhalace. Z toho tedy vyplývá, že tato forma útoku by byla nejvíce nebezpečná z hlediska vnitřního ozáření – a to z důvodu možného ozáření orgánů při vstupu RA částic do organismu. [43, 46]

Jaderné zařízení jako radiologická zbraň

Poslední formou radiologického terorismu je sabotáž jaderného zařízení, respektive použití jaderného zařízení jako radiologické zbraně. Jako nejatraktivnější objekt, v němž by se teroristé mohli pokoušet o havárii se jeví zařízení pracující přímo s jaderným reaktorem – tedy jaderná zařízení anebo výzkumné instituce. [46,21]

3.4.2 Radionuklidy vhodné pro sestavení radiologické zbraně

Radionuklid je forma nestabilního chemického prvku, který emituje záření. Některé se vyskytují přirozeně v přírodním prostředí, jiné jsou vyrobeny člověkem záměrně, nebo jsou vedlejším produktem jaderných reakcí. Rychlost rozpadu radionuklidů definuje tzv. poločas rozpadu, jež je specifická „doba, za kterou se pravděpodobně rozpadne právě polovina atomů“. Tato doba může být v řádu desetin sekund až milionů let. [50]

Níže je popsáno celkem šest potenciálně nebezpečných radionuklidů z hlediska jejich možných zdravotních a environmentálních dopadů.

Americium (^{241}Am)

Americium je syntetický prvek, který vzniká nejčastěji v jaderných reaktorech v důsledku pohlcování produkovaných neutronů v plutoniu při štěpení jader. Ojedinelý není ani vznik americia při testech jaderných zbraní (kde taktéž probíhá štěpná reakce). Skupenství tohoto radioaktivního prvku je za normálních podmínek (teploty a tlaku) pevné. Radioaktivní kov emituje dva typy záření, jež vznikají při radioaktivním rozpadu jader. Jedná se primárně o záření alfa a v menší míře též záření gama. Americium je charakteristické poločasem rozpadu 432,2 let. [51]

Z hlediska zdravotních důsledků představuje ^{241}Am významné riziko při ingestci (požití) či aspiraci (vdechnutí). Při průniku do organismu může docházet k jeho zvýšené koncentraci v kostech, játrech anebo svalech, přičemž doba, po kterou může být určitá koncentrace ^{241}Am v těle přítomna, je odhadována i na několik desítek let. I malá přítomnost ^{241}Am může v dlouhodobém horizontu přispět ke zvýšení pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků. Z hlediska environmentálních důsledků představuje ^{241}Am významné riziko zejména při uvolnění do vzduchu, jelikož malé částice americia se mohou vzduchem šířit do relativně velkých vzdáleností. Z tohoto důvodu může dojít ke značné kontaminaci půdy, vegetace či vody, v níž mají částice tendenci se ukládat. [51]

Cesium (^{137}Cs)

Cesium je měkký a relativně pružný chemický prvek, který při pokojové teplotě (přibližně 28 °C) přechází do kapalného skupenství. Jednou z vlastností tohoto stříbrně bílého kovu je, že je velmi reaktivní a dobře se váže s chloridy. ^{137}Cs vzniká při jaderném

štěpení v jaderných reaktorech, případně při testování jaderných zbraní. Mimo to lze cesium vyrobit například pomocí tavné elektrolýzy chloridu (nebo hydroxidu cesného), alkalickým tavením rudy či loužením polucitu v kyselině sírové. Tento alkalický kov emituje záření beta a záření gama, a jeho poločas rozpadu je 30,17 let. [52]

Zdravotní následky v důsledku expozice ^{137}Cs mohou mít deterministickou i stochastickou povahu (v závislosti na přijaté expoziční dávce). Při vnitřní expozici ingescí anebo aspirací dochází k přenosu ^{137}Cs především do měkkých tkání (zejména svalů). Přítomnost vysokoenergetického gama záření v organismu může významně zvyšovat pravděpodobnost rozvoje nádorových onemocnění. Při úniku do ŽP hrozí značné riziko kontaminace nejen půdy a vegetace, ale i vody, ve které je prvek dobře rozpustný. I přesto, že se cesium silně váže na půdu i beton, neprochází příliš hluboko pod povrch. [52]

Kobalt (^{60}Co)

Tento šedomodrý pevný kov je vedlejším produktem provozu jaderných reaktorů vznikající v důsledku vystavení kovových konstrukcí neutronovému záření. Poločas rozpadu je relativně nízký (5,27 let). Stejně jako ^{137}Cs i kobalt emituje záření beta a gama. Při manipulaci se ZIZ obsahující ^{60}Co hrozí vnější expozice a vznik například akutní nemoci z ozáření (deterministické účinky). V případě vysoké dávky ozáření může nastat u jedince i smrt. Při vnější expozici ingescí či aspirací je převážná většina ^{60}Co vyloučena z organismu stolicí, nicméně určité stopové množství je absorbováno játry, ledvinami a kostmi. [53]

Plutonium (^{239}Pu)

Plutonium je uměle vytvořený prvek, jenž má stříbřitě šedivou barvu. ^{239}Pu je vedlejší produkt provozu jaderných reaktorů a výbuchů jaderných bomb. Tento kov může v interakci s kyslíkem měnit svou barvu (koroze). Jemně rozptýlený kov je pyroforický a může se na vzduchu vznítit. Plutonium ^{239}Pu emituje částice alfa a jeho poločas rozpadu je 24 110 let. [54]

Alfa záření je nejvíce nebezpečné při aspiraci. Při vdechnutí částic ^{239}Pu dochází k jejich usazování v plicní tkáni, kde následně zabíjejí plicní buňky. To vede k zjizvení

plic a následnému rozvoji dalších onemocnění (včetně rizika nádorových onemocnění). Částice mohou z plic vstoupit i do krevního řečiště a putovat až do ledvin. Jakmile však plutonium cirkuluje tělem, koncentruje se v kostech, játrech a slezině. Při ingestaci (kontaminované vody, potravy) plutonium nepředstavuje pro člověka příliš vážnou hrozbu, protože žaludek plutonium neabsorbuje a snadno se z těla ven dostává stolicí.[54]

Stroncium (⁹⁰Sr)

Stroncium je stříbrný kov, který ve své přirozeně se vyskytující formě není radioaktivní. Uměle vytvořený prvek ⁹⁰Sr je vysoce radioaktivní – emituje záření beta a jeho poločas rozpadu je 29 let. Vyrábí se zpravidla komerčně pomocí jaderného štěpení – pro použití v lékařství a průmyslu. [55] V medicíně je využíváno například při léčbě osteoporózy v rámci klinických studií (např. Prevention of early postmenopausal bone loss by Stroncium ranelate – PREVOS, Stroncium Administration for treatment of Osteoporosis – STRATOS). [56]

K negativním zdravotním důsledkům ⁹⁰Sr dochází zejména při ingestaci. Pokud se ⁹⁰Sr dostane do organismu, chová se podobně jako vápník a snadno se absorbuje do kostí a zubů, což může vést k riziku vzniku rakoviny kostí, kostní dřeně či měkkých tkání nacházejících se v okolí zasažené kosti. [55]

V případě úniku do ŽP mohou rostliny či plodiny rostoucí v kontaminované půdě (či její blízkosti) přijímat malá množství ⁹⁰Sr. Ohrožena jsou následně i zvířata konzumující kontaminovanou vegetaci. Určité stopové množství prvku ⁹⁰Sr se stále vyskytuje v životním prostředí – například z jaderných zkoušek, prováděných zejména v 50. a 60. letech 20. století, a dále z významných havárií jaderných elektráren Černobyl a Fukušima Daiichi, díky kterým bylo do životního prostředí vyneseno velké množství ⁹⁰Sr. [55]

Uran

Uran je radioaktivní kov, který má po provedení rafinace stříbrně bílou barvu. Přirozeně se vyskytující uran (v horninách, vodě aj.) se výrazně odráží v úrovních přirozeného radiačního pozadí v ŽP. Uran má tři primární (mateřské) přirozeně se vyskytující izotopy: ²³⁴U, ²³⁵U a ²³⁸U. Po procesu obohacování má uran využití především v jaderných reaktorech. [57] Všechny jeho izotopy emitují vysoké množství

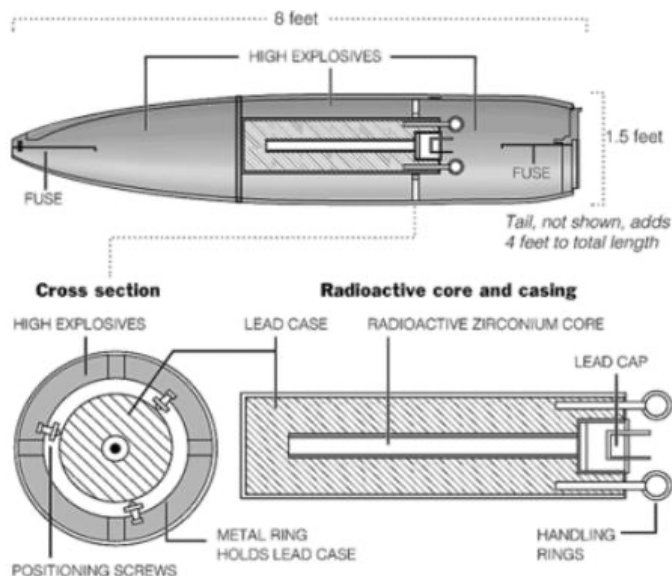
alfa částic, kladně nabitých iontů, v nízké míře pak beta a gama záření. [58] Poločas rozpadu se liší v závislosti na druhu izotopu. U ^{234}U je poločas přeměny nejkratší – tedy 244 000 let. Poněkud vyšší poločas přeměny (700 milionů let) má ^{235}U . A nejdelší poločas přeměny v řádu 4,47 miliardy let má ^{238}U . Těžební průmysl získává uran pomocí těžby hornin anebo za pomoci použití silných chemikálií určených k rozpuštění uranu z podzemních hornin do podzemních vod, odkud je voda následně čerpána na povrch.[57]

Uran se rozpadá především alfa rozpadem, generované záření je při dopadu na kůži člověka absorbováno v horních vrstvách epidermis, z tohoto důvodu uran nepředstavuje tak velké riziko v případě vnější expozice. [59] Nicméně při kontaminaci organismu může uran zapříčinit stochastické zdravotní následky spojené s rakovinou plic, jater, nebo kostí, v nichž se alfa částice zpravidla absorbují. [57]

3.4.3 Příklady radiologického terorismu ve světě

Jak je známo, radiologický terorismus nebyl nikdy teroristickými organizacemi uskutečněn, nicméně existují případy, z nichž lze jistým způsobem odvodit možné následky teroristického útoku prostřednictvím RA materiálů. Přestože radiologický terorismus za pomoci radiologické zbraně typu RDD nebyl jako trestný čin nikdy dokonán, existuje hned několik zmínek o jeho pokusech. [21, 44]

V roce 1987 byla v Iráku vyrobena a otestována radiologická bomba. Tuto skutečnost dokazuje tajná irácká zpráva, popisující konstrukci, testování a dopady na člověka. Případný výbuch takové bomby měl způsobit zvracení, rakovinu, vrozené vady a pomalou smrt – trvající řádově 2 až 6 týdnů. Cíle možného použití, dle nalezené zprávy, měly být důležité vojenské objekty, průmyslové oblasti, letiště aj. Podle ředitele agentury pro kontrolu jaderných zbraní Garyho Milhollina se jednalo o bombu způsobující pomalou a krutou smrt, a dle jeho názoru tím Saddam Hussein, tehdejší vůdce Iráku, překročil hranici morálního barbarství. [60] Tato zbraň měla vážit přibližně 1 t, její náčrt je na obrázku 7.



Obrázek 7 – Radiologická zbraň sestavená za vlády Saddama Husseina [61]

Následně bude popsán jeden z prvních pokusů o radiologický terorismus jež se stal v Moskvě v roce 1995. Tamní televizní stanice byla anonymně upozorněna, že se v Izmailovském parku nachází špinavá bomba. Po telefonátu bylo místo prohledáno a skutečně byl na místě nalezen balíček obsahující ^{137}Cs (viz obrázek 7). Přestože se původ zdroje, ani viníky se nepodařilo nikdy odhalit, je čin přisuzován čečenským separatistům, kteří se schopností sestavit radioaktivní bombu silně prezentovali. [44,62]



Obrázek 8 – Nalezený balík v Izmailovském parku obsahující ^{137}Cs [62]

O několik let později, v roce 2001 byl v hlavním městě Afghánistánu nalezen sklad zbraní patřící jedné z nejznámějších teroristických organizací – Al-Káidě, která vedle zájmu o jaderné zbraně projevuje i silnou pozornost v oblasti radiologického terorismu. Na tomto místě byla nalezena znepokojivá dokumentace obsahující technický

návod k výrobě špinavé bomby a rovněž i materiál vhodný pro sestavení bomby. Varovným textem je rovněž příručka „Encyklopedie jaderné přípravy“, jež byla v roce 2005 zveřejněna na džihádistických webových stránkách. Dokument čítající zhruba 287 stránek je jakýmsi manuálem pro výrobu nejen jaderných, ale i radiologických zbraní. Dokument dále uvádí i jednotlivé kroky pro extrakci radia a sestavení zbraně typu RDD. [44, 62, 63]

Druhý popsáný pokus se uskutečnil v roce 2002 v Chicagu. Kvůli podezření z nelegální výroby a možného odpálení špinavé bomby byl zadržen americký občan José Padilla. Tento civilista podporoval terorismus a měl pravděpodobně vazby na teroristickou organizaci Al-Kaída. Padilla údajně v rámci školení studoval konstrukční mechaniku špinavých bomb včetně poznatků o drátování výbušných zařízení a optimalizování bomby pro radiologický rozptyl. Jeho zatčení proběhlo na letišti O'Hare, kde byl zajištěn s kufrem plným 10 000 dolarů v hotovosti. Jeho cesta do USA byla považována za průzkumnou misi, během níž si měl detailněji plánovat možnosti radiologického útoku. [62] V roce 2007 byl Padilla, ve svých 43 letech, shledán vinným a odsouzen na 17 let. [64]

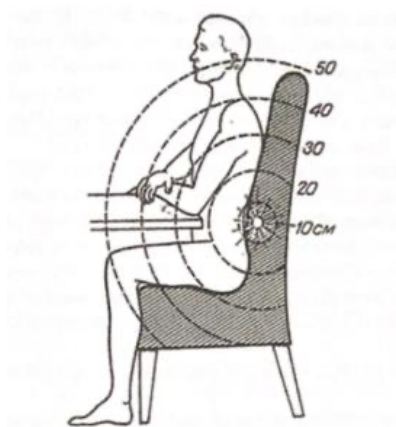
Další tendence Al-Káidy byly odhaleny o rok později, tedy v roce 2003, v Hératu (Afgánistán), kde byly nalezeny důkazy, z nichž britští zpravodajští agenti a výzkumníci zbraní usoudili, že se Al-Káidě podařilo zkonstruovat malou špinavou bombu. Existuje silné podezření, že k sestavení zařízení Al-Káidě pomohl afghánský režim Tálibánu tím, že organizaci poskytl ZIZ, používaný v lékařství. K tvrzení, že zařízení existuje, se přiklonil i zajatý poručík Al-Káidy Abu Zubaydah. Toto zařízení nicméně nebylo nikdy nalezeno. [62]

Dále se zaměříme na možné účinky radiologické zbraně typu RED. Ty lze doložit na příkladech ojedinělých událostí, které nastaly v souvislosti s krádeží ZIZ, nebo úmyslného použití k trestnému činu vraždy. Jeden z případů, týkající se krádeže zdroje, se odehrál v roce 1969 v Moskvě. Zaměstnanec radiologické laboratoře, tehdy 19letý mladík, ukradl z pracoviště menší ZIZ obsahující ^{137}Cs . [65] Po odcizení zdroj nejprve schovával po dobu pěti hodin ve své kapse, poté zdroj z kapsy vytáhl, a se zdrojem po určitou dobu manipuloval v přímé blízkosti břicha, a následně byl po dobu přibližně 15 hod zdroj vystaven především v oblasti zad. Příznaky nemoci z ozáření se u chlapce začaly projevovat po několika málo hodinách. Celková dávka

expozice, jíž byl vystaven, byla odhadnuta na hodnotu 15–20 Gy, přičemž v oblasti trupu dávka dosahovala i hodnot 30 Gy. V důsledku vystavení vysoké dávce záření muž po patnácti dnech zemřel. [65]

Znepokojivá událost podobného charakteru se odehrála v roce 1972 v Texasu. Otec záměrně umístil svému synovi do pokoje celkem asi 8 kapslí obsahujících ^{137}Cs o aktivitě 37–74 GBq, a to například do kalhot, sluchátek nebo do polštáře. Nic netušící, jedenáctiletý chlapec byl vystavován záření po dobu přibližně 5 měsíců. Po přijetí do nemocnice chlapec podstoupil celkem 16 operací, které zahrnovaly četné transplantace kůže. Otcovo jednání bylo přisuzováno jeho narušenému duševnímu zdraví v důsledku rozvodu a soudem nařízeného omezeného kontaktu se synem. Přesný motiv tohoto pokusu o vraždu není znám. [65]

Na stejném principu byl uskutečněn případ vraždy Vladimíra Kapluna, ředitele společnosti Karonara, jež se odehrál v roce 1993 v Moskvě. Do opěradla jeho křesla byl umístěn radioaktivní zdroj obsahujícího pravděpodobně ^{137}Cs anebo ^{60}Co . Během pár týdnů se u oběti projevil příznaky akutní nemoci z ozáření. Ačkoliv byla zahájena hospitalizace v nemocnici, po měsíci osoba zemřela. Po smrti byl u Kapluna proveden výzkum zubní skloviny metodou elektronové paramagnetické resonance – EPR, který odhalil dávku 190 Gy v dutině ústní. [65]



Obrázek 9 – Znárodnění umístění radioaktivního zdroje v křesle Vladimíra Kapluna [65]

4 METODIKA

Realizaci této diplomové práce předcházelo důkladné prostudování dostupných českých i zahraničních odborných literárních a zákonných pramenů a dále informací přístupných na webových stránkách. První polovina teoretické části je zpracována především na základě obecně závazných právních předpisů a podzákonných právních předpisů platných na území ČR. Z těchto předpisů mají nejvýznamnější podíl na celkovém zhodnocení problematiky řešené v této diplomové práci *zákon č. 263/2016 Sb. atomový zákon*, ve znění pozdějších předpisů, a *vyhláška č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje*, ve znění pozdějších předpisů. Oblast zabezpečení RA materiálů a ZIZ při transportu je v této práci koncipována především na základě mezinárodních pramenů, jimiž jsou mezinárodní dohody ADRa RID. Druhá polovina teoretické části je zaměřena na analýzu neoprávněného nakládání s RA materiály a ZIZ. Analýza vychází především ze shromážděných informací, jež jsou veřejně dostupné v odborných publikacích a na webových portálech. Analýza událostí na území ČR je dále obohacena o poznatky týkající se záchytů RA materiálů a ZIZ (za časové období 2011 až 2021), jež jsou pravidelně vydávány ze strany SÚJB. Tyto incidenty jsou mimo jiné shrnuty i ve výročních zprávách tohoto úřadu. Nicméně převážná většina incidentů, o nichž pojednává částečně kapitola 3.3.4 a zcela kapitola 3.4.3 jsou internacionálního charakteru čili odehrály se na jiném území než v ČR.

Praktická část je částečně zhotovena pomocí softwarového programu TerEx. V rozhraní programu jsou prostřednictvím havarijního modelu SPERAD EXPLOSIVE nasimulovány dvě modelace použití špinavé bomby na území České republiky (Staroměstské náměstí). V případě první modelace je použito 5 kg výbušniny typu DAP a 5 kg radionuklidu ^{60}Co . U druhé modelace je zvoleno taktéž 5 kg výbušniny DAP, ovšem použitý radionuklid je tentokrát ^{239}Pu . Postup v programu byl následovný: Nejprve byly zadány vstupní údaje týkající se rychlosti a směru větru, oblačnosti, typu atmosférické stálosti, doby vzniku (den – léto), povrchu, lokality, hmotnosti nálože a prachové náplně. Na základě zadaných vstupních parametrů program následně vypočítal a vyhodnotil celkové zasažené území, včetně doporučených bezpečnostních vzdáleností.

Dále je pro realizaci výzkumné části zvolena kvalitativní metoda výzkumu formou strukturovaných rozhovorů. Strukturované rozhovory se s vybranými odborníky uskutečnily na základě předem stanoveného schématu. Nejprve bylo stanoveno celkem 11 otevřených výzkumných otázek, přičemž první otázka se respondentů dotazovala na odbornou specializaci – a to především z důvodu následného přehlednějšího vyhodnocování získaných poznatků. Dále byly otázky následně rozděleny do celkem 3 sekcí, jejichž celkové znění je uvedeno v příloze B této práce. První sekce je zaměřena na úroveň bezpečnosti RA materiálů a ZIZ a čítá celkem 4 otázky. Druhá sekce je vztažena na zabezpečení pracovišť zacházejících se ZIZ a čítá celkem 3 otázky. Poslední třetí sekce se zabývá problematikou radiologického terorismu jakožto reálné hrozby na území ČR a čítá taktéž 3 výzkumné otázky. Následně byli prostřednictvím e-mailového spojení osloveni a požádáni o zodpovězení otázek vybraní odborníci.

První dvě sekce, tedy oblast vztahující se k bezpečnosti RA materiálů a ZIZ a oblast zaměřující se na pracoviště se ZIZ, zodpověděli dva specialisté pracující v nemocnici na radiologii a jeden znalec z oboru defektoskopie.

První, druhou a zároveň i třetí sekci zodpovědělo celkem 5 odborníků od HZS, přičemž 4 z nich jsou od HZS Středočeského kraje a 1 od HZS Jihočeského kraje. Pracovní zařazení dotazovaných odborníků od HZS je velice variabilní. Na otázky odpovídal 1 specialista na ochranu obyvatelstva a krizového řízení, 1 odborník na ochranu utajovaných informací a bezpečnostní ochranu areálů, dále 1 vedoucí chemické služby HZS, taktéž i 1 velitel směny jednotek požární ochrany (dále jen JPO) HZS a v neposlední řadě i odbornice na havarijní a krizové plánování a přípravu a realizaci opatření ochrany obyvatelstva.

Dále k první, druhé a třetí sekci vyjádřili svůj názor i odborníci z JE Temelín, SÚRO, či asistent vysoké školy zabývající se CBRN. Konkrétně se jedná o celkem 2 experty z JE Temelín, z nichž jeden se v rámci pracovního zaměření zabývá evidencí a kontrolou jaderných materiálů a druhý je vedoucím reaktorového bloku. V rámci výzkumné části této práce byly zpracovávány také odpovědi jednoho zaměstnance SÚRO, jehož vědomosti a znalosti jsou zejména z oblasti havarijní připravenosti. Odpověděl rovněž i jeden odborný asistent VŠ se specializací a zaměřením na krizové řízení a CBRN.

Z výše uvedeného je tedy zřejmé, že strukturované rozhovory se zaměřují na problematiku zneužití RA materiálů a ZIZ na území ČR z vícero hledisek a poznatky jsou interpretovány z pohledu odborníků rozmanitého odborného zaměření. Toto relativně široké zacílení, co se odborné specializace týče, je z důvodu umožnění hlubšího porozumění problematice řešené v této práci a rovněž zvýšení validity výzkumu. Výsledky rozhovorů slouží dále k lepšímu zmapování celkové situace na území ČR.

Na základě výše zmíněné metodiky je též provedena souhrnná analýza vedoucí k vyvrácení či potvrzení výzkumných hypotéz stanovených pro tuto práci.

5 VÝSLEDKY

Praktická část je metodicky rozdělena do dvou částí. První část se zabývá praktickou realizací použití špinavé bomby na území ČR. Nastíněny jsou zde dvě situace, jež by mohly v reálných podmínkách na území ČR s vysokou pravděpodobností nastat. Pozornost je zde věnována výpočtu vzdáleností pro ohrožení osob, možným zdravotním či ekonomickým dopadům a v neposlední řadě i okrajovému popisu postupu složek IZS při zásahu u radiační mimořádné události (dále jen RMU). Následná druhá část obsahuje soupis důležitých poznatků získaných ze strukturovaných rozhovorů zacílených na problematiku zneužití RA materiálů a ZIZ v rámci ČR.

5.1 Simulace použití špinavé bomby na území ČR

K dosažení potřebných hodnot vypovídajících o následcích šíření radioaktivních látek rozptýlených za pomoci nástražného výbušného systému je použit softwarový program TerEx. Verze aplikace 3.0.0.0. nabízí celkem 12 variant havarijních scénářů a obsahuje vlastní databázi chemických látek a směsí, ze kterých lze volit v závislosti na zvoleném modelu. Každá modelace má jiný počet NL a směsí, se kterými lze disponovat. Scénáře pracující s rozptylem prachových částic jsou oproti jiným modelům značně omezené ve výběru látek – viz tabulka 8, jež krátce specifikuje významy jednotlivých modelů.

Tabulka 7 – Přehled havarijních modelů [TerEx]

| Havarijní model | Typ havarijního modelu | NL a směsi |
|------------------|---|------------|
| PUFF | Jednorázový únik vroucí kapaliny s rychlým odparem do oblaku | 81 |
| JET FIRE | Déletrvající masivní únik plynu se zahořením | 20 |
| PLUME | Déletrvající únik plynu do oblaku | 436 |
| PLUME | Déletrvající únik vroucí kapaliny s rychlým odparem do oblaku | 75 |
| PLUME | Pomalý odpar kapaliny z louže do oblaku | 377 |
| POOL FIRE | Hoření louže kapaliny nebo vroucí kapaliny | 384 |
| BLEVE | Ohrožení nádrže plošným požárem | 140 |
| PUFF | Jednorázový únik plynu do oblaku | 438 |
| EXPLOSIVE | Nástražný výbušný systém | 8 |
| SPREAD | Šíření prachových částic | 7 |
| SPREAD EXPLOSIVE | Šíření prachových částic explozí | 8 |
| DEGAS | Šíření těžkých plynů | 832 |

Jediným scénářem, který dokáže v simulovaném modelu pracovat s rozptylem částic do prostoru a zároveň zahrnout i scénář výbuchu trhaviny, se ukázal být modul SPREAD EXPLOZIVE. Tento scénář nejlépe vystihuje použití špinavé bomby.

Provedeny a vyhodnoceny jsou celkem dva scénáře použití špinavé bomby. Zadané meteorologické podmínky a lokace jsou pro oba typy scénářů totožné. Jediná odlišnost spočívá v použitém radionuklidu. V prvním scénáři je použit radionuklid ^{60}Co (kobalt) a výbušnina typu DAP (dusičnan amonný a palivo). Tento scénář představuje radiologickou zbraň sestavenou za pomoci konvenční výbušniny (využívané zpravidla pro trhací práce a poměrně často užívané teroristickými skupinami k útokům) a radioaktivního materiálu (^{60}Co), jenž pochází z odcizeného kobaltového ZIZ emitujícího gama záření. Druhý scénář kooperuje se stejným typem výbušniny, s ale odlišným radionuklidem (^{239}Pu).

Meteorologická data použitá pro výpočty jsou výtěžena z veřejně dostupné databáze počasí MeteoBlue. Kooperováno je s průměrnými hodnotami získanými z klimatických diagramů za dané roční období (léto). Klimatické diagramy jsou vytvořeny na základě historických údajů o počasí pro území Praha a je nutné podotknout, že tato data jsou pouze odvozena z globálně využívaného modelu počasí národního systému energetického modelování (dále jen NEMS), z čehož vyplývá, že data nejsou schopna reprodukovat podrobné místní povětrnostní podmínky, jimiž je například proudění studeného vzduchu či tepelné ostrovy. Nicméně pro výpočet simulací jsou tato orientační data dostačující vzhledem k značně omezenějšímu množství zadávaných vstupních meteorologických parametrů. [66]

Použitá data pro výpočet mají následující charakteristiky:

- hmotnost prachové náplně: 5 kg;
- rychlost větru: 3 m/s;
- směr větru: V;
- zataženo: 10 %;
- doba vzniku: den – léto;
- typ atmosférické stálosti: konvekce (velmi nestabilní);
- povrch: obytná krajina;
- typ výbušniny v náloži: výbušnina typu DAP (dusičnan amonný a palivo);

- hmotnost nálože: 5 kg;
- lokalita: 50.0869922 N; 14.4207228 E.

Lokalita na území ČR, kde je potencionální možnost výbuchu a rozptylu radioaktivních látek, je vybrána s ohledem na měkké cíle. Staroměstské náměstí v Praze (50.0869922 N; 14.4207228 E) představuje místo s regulérně vyšší koncentrací lidí. Veřejně známý orloj se spouští vždy v intervalu 1 hodiny. Téměř každou hodinu se tak proto pod orlojem Staroměstské radnice sejde najednou několik desítek, mnohdy i několik set lidí. Nejen orloj, ale i významné akce města (trhy, průvody aj.) přilákají davy lidí a seskupí je v určitém časovém období na tomto místě. Staroměstské náměstí je dominantní i velkým počtem kulturních památek (Mariánský sloup, Týnský chrám aj.), jejichž zničení by taktéž mohlo vzbuzovat zájem u teroristických organizací. [67]



Obrázek 10 – Orloj na Staroměstské radnici [68]

Na základě výše vyjmenovaných vstupních parametrů byla programem určena prostřednictvím matematických výpočtů predikce šíření látek v otevřeném prostředí. Pro vyhodnocení modelace v konkrétní lokaci (Staroměstské náměstí) bylo využito geografických informačních systémů, díky nimž bylo možné namodelovanou situaci zanást na mapový podklad. Výstupem simulací jsou doporučené vzdálenosti pro průzkum koncentrace prachových částic, bezpečnostní vzdálenost pro nekryté osoby, vzdálenost pro koncentraci IDLH (Immediately Dangerous to Life or health), vtyčení zóny ohrožení osob uvnitř a vně budov [69]. Dalším výstupem je komparace scénářů z hlediska zasaženého území, ohrožení osob a doby zamoření.

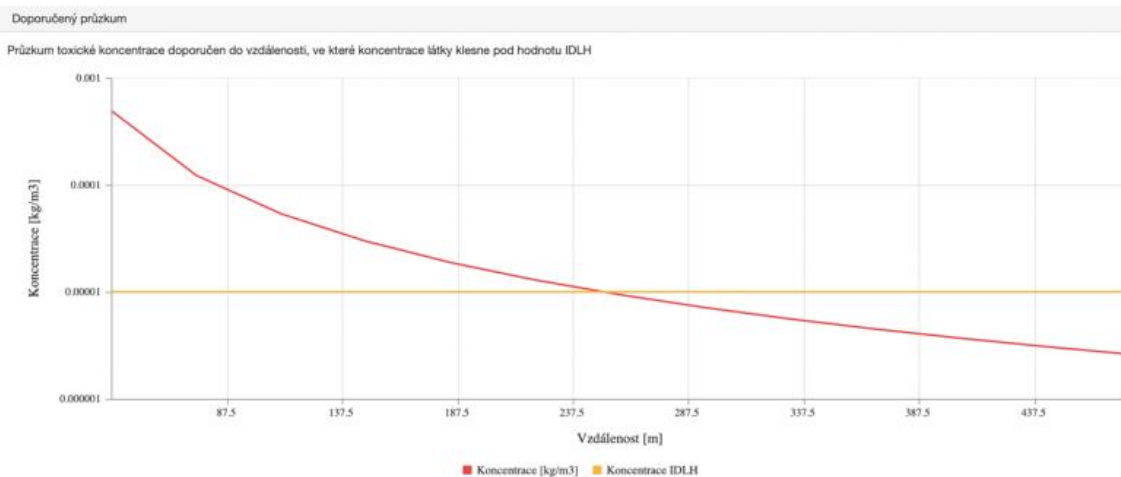
Modelace 1 (Kobalt)

Jak již bylo zmíněno výše, nejvhodnějším modulem pro simulaci špinavé bomby je SPREAD EXPLOZIVE, který dokáže pracovat s rozptylem částic do prostoru a zároveň zahrnout i scénář výbuchu trhaviny. Na základě zadaných vstupních parametrů byla programem vyhodnocena doporučená vzdálenost pro evakuaci 351 m. Dále byla jednoznačně stanovena vzdálenost pro koncentraci IDLH, jejíž založení spočívá na pravděpodobnosti způsobení smrti nebo okamžitých či opožděných trvalých nepříznivých účinků na zdraví v době trvání expozice kontaminanty obsaženými ve vzduchu po dobu 30 min. Účinnost IDLH je zpravidla vyjadřovaná dvěma parametry – buď v jednotkách hustoty [mg/m^3], nebo se lze setkat s vyjádřením maximální koncentrace v objemových jednotkách [ppm] (Parts per milion). [70] Dalším výstupním parametrem je bezpečnostní vzdálenost pro nekryté osoby, jež je programem ohraničena na hodnotu vzdálenosti 408 m. V souvislosti s explozí nástražného výbušného systému velmi často dochází k poškození okenního skla. Úsek, v němž je vážné riziko ohrožení osob uvnitř budov okenním sklem, je programem definován hodnotou 56 m (od epicentra výbuchu). Vzdálenost pro ohrožení osob mimo budovy závažným poraněním dosahuje o polovinu menší hodnoty než v případě ohrožení osob okenním sklem uvnitř budov. V okruhu vzdálenosti do 17 m od epicentra hrozí nebezpečí závažného poškození budov – viz obrázek 11.

| Výsledek výpočtu | |
|--|---|
| Ohrožení osob prachovými částicemi | 251 m [Koncentrace: 9,98 mg/m ³] |
| Vzdálenost pro koncentraci IDLH | 351 m [Koncentrace: 4,98 mg/m ³] |
| Bezpečnostní vzdálenost pro nekryté osoby | 408 m |
| Ohrožení osob uvnitř budov okenním sklem | 56 m |
| Ohrožení osob mimo budovy závažným poraněním | 28 m |
| Závažné poškození budov | 17 m |

Obrázek 11 – Výsledek výpočtu programu [TerEx]

Program umožňuje i zanesení určitých výstupních informací na grafický podklad. Nejčastěji se jedná o grafické vyhodnocení vzdáleností pro doporučený průzkum. Vizualizace dat vztahujících se konkrétně ke koncentraci IDLH je přehledně vyobrazena na obrázku 12.



Obrázek 12 – Vyděření závislosti koncentrace na vzdálenosti [TerEx]

Na obrázku 12 je viditelný vývojový vztah počáteční maximální koncentrace [kg/m³] ku přijatelné hranici koncentrace IDLH v souvislosti se vzrůstající vzdáleností [m] od epicentra. Koncentrace toxických látek má viditelně sestupnou tendenci. Tato postupně klesající úroveň koncentrace viditelná na červené křivce má kontinuální charakter. Nicméně je nutné podotknout, že program zde nepočítá s časem nebo možností proniknutí koncentrace do budov, kde by v reálných podmínkách docházelo ke kumulaci koncentrace vlivem nedostatečného odvětrávání prostor. Ve venkovních prostorách ve vzdálenosti zhruba 250 m (a dále) od epicentra již koncentrace nedosahuje úrovně ohrožení prachovými částicemi. Důležitým poznatkem pro toto tvrzení je, že tato vzdálenost není míněna v celém okruhu, nýbrž jen v zúženém okruhu po směru větru.

Po dalších 100 m se úroveň nebezpečné hladiny koncentrace dostává na přijatelnou hodnotu 4,98 mg/m³, od níž dále by se neměly projevovat zraňující projevy spojené s toxickými vlastnostmi látky. Ovšem i zde je nutné počítat i s časovým hlediskem a jistou nevypočitatelností možného usazování koncentrací v budovách a okolí budov. Významnou roli zde hrají proměnlivé povětrnostní podmínky. Vítr funguje na základě fyzikálních zákonů, jež způsobují pohyb vzduchu v atmosféře. Přírozený pohyb vzduchu je dán rozdílem hustot vzduchu. Působením vztlakových sil dochází k jevu zvanému obtékání budov větrem. Při tomto jevu dochází vlivem působení vztlakových neboli gravitačních sil k přetlaku vzduchu v horní části budov a k podtlaku v dolní části budov. Kvůli tomuto jevu se mohou toxické látky držet v okolí budov mnohem déle, než je tomu v otevřených prostranstvích bez překážek. [71]

Dalším grafickým výstupem programu je parametr dosahu tlakové vlny při explozi. Přetlak tlakové vlny je zde vyjádřen v jednotkách kPa (kilopascal), které jsou odvozeny od jednotky tlaku Pa (pascal) a představují hodnotu 1×10^3 Pa. [72]. Nejprve je však důležité zmínit, že přetlak tlakové vlny má odlišné účinky v závislosti na tom, jaké síly dosahuje. Přehled možných účinků přetlaku, počínající hodnotami menšími než 5 kPa a končícími hodnotami od 100 kPa a dále, je definován v tabulkách 9 a 10. [73]

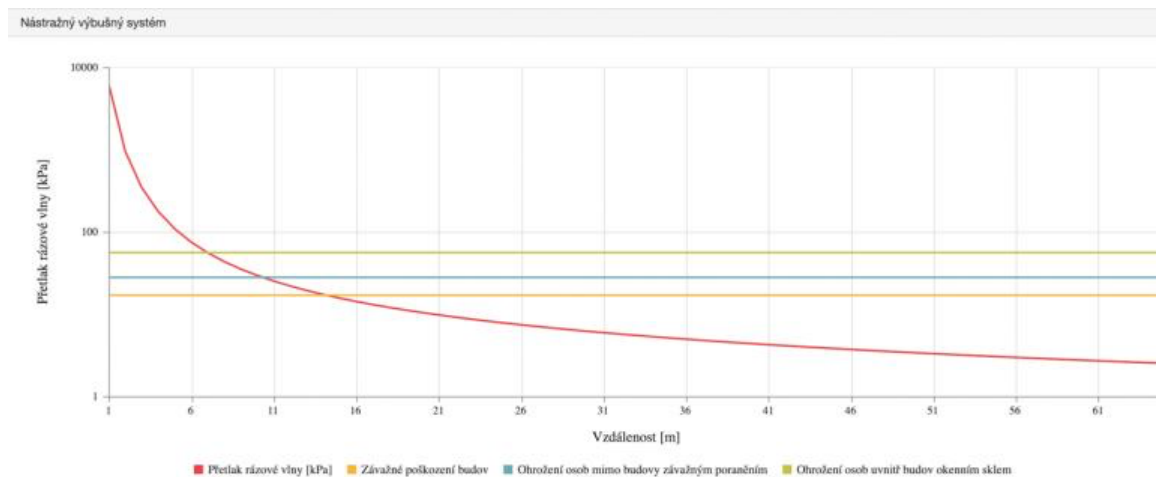
Tabulka 8 – Praviděpodobnost zranění osob dopadajícím přetlakem tlakové vlny [73]

| Přetlak p+ [kPa] | Účinek na osoby |
|------------------|---|
| < 5 | Nepravděpodobná zranění. |
| 5 – 10 | Zranění létajícími troskami. |
| 10 – 30 | Povalení stojících osob, lehké úrazy, poškození ušních bubínků. |
| 30 – 45 | Těžké úrazy, poškození plic, uší, očí, břišní dutiny. |
| 45 – 150 | 20 % úmrtí. |
| 150 – 200 | 100 % úmrtí. |

Tabulka 9 – Poškození objektů dopadajícím přetlakem tlakové vlny [73]

| Přetlak p+ [kPa] | Účinek na objekty |
|------------------|---|
| < 5 | Žádné poškození. |
| 0,5 – 1 | Malé poškození okenních výplní, dílčí vysypání trosk skel. |
| 1 – 2 | Větší poškození okenních výplní, dílčí vysypání trosk skel. |
| 3,5 | Většina zasklení rozbita, vážná poškození lehkých příček, odtržení střech přístřešků. |
| 2 – 5 | Částečná poškození rámu dveří a oken, porušení omítky a vnitřních dřevěných příček. |
| 7,5 | Úplné rozbití zasklení, poškození dveří a oken, trhliny ve zděných příčkách. |
| 5 – 20 | Zničení oken, poškození lehkých staveb. |
| 10 – 30 | Částečné rozrušení staveb. |
| 20 – 30 | Značné rozrušení městských staveb. |
| 30 | Zhroucení nenosných příček, vážné poruchy nosných prvků zděných konstrukcí, propadnutí nebo zřícení střech, převrácení lehkých nákladních automobilů. |
| 50 | Poboření částí nosných prvků zděných konstrukcí, převrácení tanků a těžkých nákladních vozidel. |
| 100 a více | Totální havárie zděných konstrukcí. |

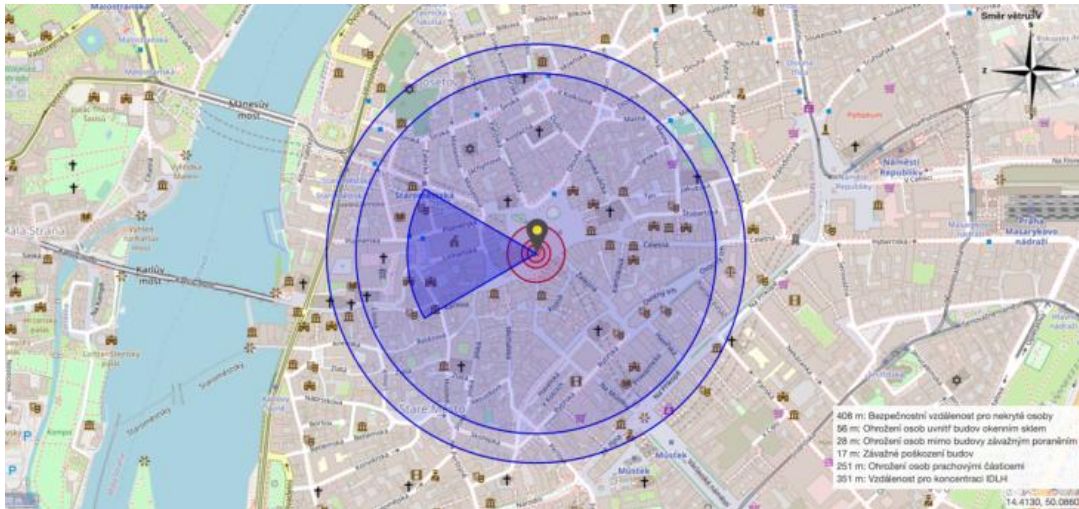
Z tabulek 9 a 10 je patrný obecný – více či méně – nepříznivý účinek přetlaku na osoby a objekty podmíněný danými hodnotami v kPa. Pomocí vyjmenovaných aspektů lze dále zevrubněji specifikovat dopady přetlaku rázové vlny, jejíž vývoj podléhající vzdálenosti od epicentra výbuchu je vyobrazen na obrázku 13.



Obrázek 13 – Závislost přetlaku rázové vlny na vzdálenosti od epicentra výbuchu [TerEx]

Z obrázku 13 je patrné, že přetlak rázové vlny je v místě výbuchu nejsilnější – dosahuje hodnot blízkých se 10 000 kPa. Se vzrůstající vzdáleností od epicentra výbuchu přetlak klesá nepřímou úměrou. Tlaková vlna o přetlaku přibližně 15 kPa může dosáhnout destruktivních účinků a zapříčinit závažné poškození budov ve vzdálenosti 17 m (žlutá křivka). V 28 metrech je znázorněna protínající se křivka tlakové vlny o přetlaku přibližně 10 kPa s hranicí vzdálenosti ohrožující osoby mimo budovy závažným poraněním (modrá křivka). Na zelené přímce představující ohrožení osob uvnitř budov okenním sklem je v 56 m vzdálenosti viditelné protnutí s červenou křivkou (přetlak tlakové vlny), která v místě protnutí dosahuje přibližně 3 kPa.

Pro lepší vizualizaci ve vztahu k lokalitě byl výsledek modelování šíření prachových částic explozí dále přenesen do mapového podkladu. Z mapového podkladu je dobře patrná celková velikost zasaženého území (obrázek 14).



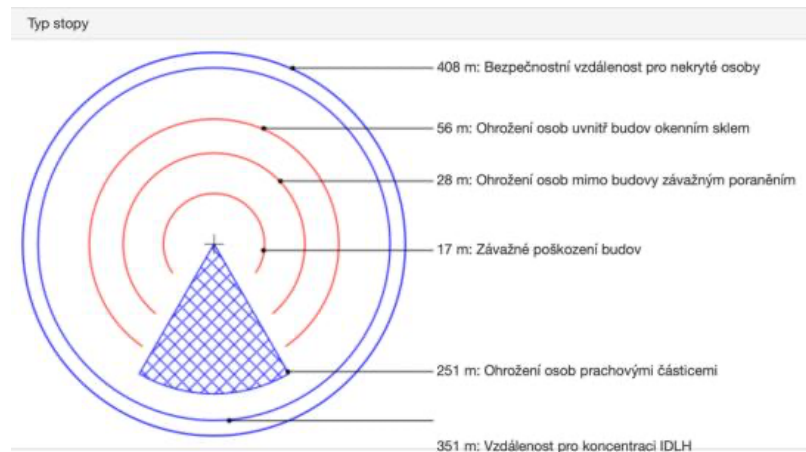
Obrázek 14 – Vizualizace výsledku modelování šíření prachových částic explozi na mapovém podkladu [TerEx]

Na obrázku 14 jsou vygenerované barevně odlišné cyklické útvary znázorňující hranice ohrožení. Nejmenší červená kružnice udává vzdálenost pro závažné poškození budov. Následující červený kruh determinuje hranici pro ohrožení osob v otevřeném prostoru závažným poraněním. Poslední červená kružnice určuje mez pro ohrožení osob, přítomných uvnitř budov okenním sklem. Po zmíněných červených kružnicích následuje modrá kružnice určující limitu pro bezpečnostní vzdálenost pro nekryté osoby. Největší modrý prstenec vytyčuje vzdálenost pro koncentraci IDLH. Zbývající modrá kruhová výseč ukazuje pomezí pro ohrožení osob prachovými částicemi ve směru větru (V) od epicentra výbuchu. Tato hranice může být velmi proměnlivá v závislosti na rychle se měnících meteorologických podmínkách. Znalost vzdálenosti pro ohrožení osob prachovými částicemi je zásadní při realizaci evakuace osob. Osoby vyskytující se v této oblasti by měly být evakuovány primárně.

Modelace 2 (Plutonium)

Při realizaci druhé modelace bylo použito stejných vstupních parametrů, jako při modelaci první. Druhá modelace, pro níž byl použit radionuklid ^{239}Pu , vykazovala při stejně zadaných parametrech stanovených pro modelaci 1 naprosto totožné výsledky, přestože fyzikální vlastnosti a toxicita použitých radionuklidů je velmi odlišná. Je to dáno především tím, že program sice pracoval se stejnou výbušninou typu DAP, stejnými povětrnostními podmínkami a totožným množstvím radioaktivního materiálu (5 kg), nicméně druh zadané radioaktivní látky při výpočtu vůbec nezohlednil. Program v tomto případě tedy opět vyhodnotil vzdálenost pro koncentraci IDLH

na 351 m. V otevřeném prostoru by nekryté osoby byly taktéž ohroženy až do vzdálenosti 408 m. Okenní sklo by osoby nacházející se uvnitř budov ohrožovalo do vzdálenosti 56 m. V 17 m od epicentra výbuchu by s vysokou pravděpodobností docházelo k významnému poškození budov a stavebních konstrukcí. Ohrožení osob prachovými částicemi by mělo největší intenzitu ve vzdálenosti 251 m od epicentra výbuchu, nicméně tato vzdálenost je závislá na směru větru – jak je patrné na obrázku 15.



Obrázek 15 – Grafické zobrazení typu stopy [TerEx]

Parametr dosahu tlakové vlny je opětovně analogický jako v případě modelace 1. Koncentrace toxických látek v této modelaci opět vykazuje obdobnou závislost na vzdálenosti jako v případě přetlaku tlakové vlny (viz obrázek 12 a 13.).

Grafické zobrazení typu stopy bylo po matematickém výpočtu zaneseno na mapový podklad a na větrné růžici viditelné vpravo nahoře na obrázku 16 byl v rozhraní programu zvolen směr větru (V).



Obrázek 16 – Vizualizace výsledku modelace na mapovém podkladu [TerEx]

Na obrázku 16 je zřejmý identicky vymezený prostor ohrožení jako v případě první modelace. Znázorněné červené a modré hranice vykazují shodné parametry jako na obrázku 14. Ve vzdálenosti do 17 m od ohniska výbuchu by se závažné poškození budov nejvíce dotklo samotné Staroměstské radnice s orlojem, jež leží přímo v jeho centru. Osoby nacházející se na ulici v prostoru mezi Staroměstskou radnicí a Grand hotelem Praha, eventuálně domem U Červené lišky či restaurací Oliva Verde, by byly bezprostředně vystaveny život ohrožujícím podmínkám. Hrozilo by jim primární zranění způsobené explozí a následnou tlakovou vlnou, či sekundární zranění způsobené létajícími troskami – a to až do vzdálenosti 28 m. Do vzdálenosti 56 m by byly osoby nacházející se v přilehlých budovách – převážně v ulicích Melantrichova či Železná – ohroženy okenním sklem v důsledku tlakové vlny. Bezpečnostní vzdálenost pro nekruté osoby sahá na severu až ke Španělské synagoze, na severozápadě k Pinkasově synagoze či vstupu do metra A (stanice Staroměstská). Nutnost evakuace z důvodu nebezpečné koncentrace NL v ovzduší by se týkala všech osob nacházejících se v okruhu 351 m od centra výbuchu.

Celková plocha zasaženého území je vypočtena na základě níže uvedeného matematického vzorce.

$$S = \Pi r^2$$

Do výše uvedeného vzorce byla dosazena data z výstupního obrázku 11 ($S = 3,14 * 351^2$). Zamořená plocha tak činí 386 851, 14 m².

Pro obě modelace byla použita stejná výbušnina typu DAP. V tabulce 11 je uvedeno, jak moc se liší vytyčené vzdálenosti pro riziko ohrožení osob při použití stejného množství výbušniny, ale diferenčního typu výbušniny.

Tabulka 10 – Rozdílnost vzdáleností pro jednotlivé typy výbušnin [TerEx]

| Látka | | Typ výbušniny | | | | | | | |
|------------------|--|---------------|-------|-------|---------|------------|--------|---------|---------|
| | | Neznámá | TNT | C-4 | Typ DAP | Typ Slurry | Semtex | Hexogen | Pentrit |
| ⁶⁰ Co | Ohrožení osob prachovými částicemi | 251 m | 251 m | 251 m | 251 m | 251 m | 251 m | 251 m | 251 m |
| | Vzdálenost pro koncentraci IDLH | 351 m | 351 m | 351 m | 351 m | 351 m | 351 m | 351 m | 351 m |
| | Bezpečnostní vzdálenost pro nekryté osoby | 517 m | 437 m | 481 m | 408 m | 372 m | 481 m | 517 m | 496 m |
| | Ohrožení osob uvnitř budov okenním sklem | 71 m | 60 m | 66 m | 56 m | 51 m | 66 m | 71 m | 68 m |
| | Ohrožení osob mimo budovy závažným poraněním | 35 m | 30 m | 32 m | 28 m | 25 m | 32 m | 35 m | 33 m |
| | Závažné poškození budov | 21 m | 18 m | 20 m | 17 m | 15 m | 20 m | 21 m | 20 m |

Z tabulky 11 je patrné, že vzdálenost pro koncentraci IDLH neboli vzdálenost pro evakuaci osob je u všech vyjmenovaných typů výbušnin neměnná (351 m). Určité nepřesnosti jsou však patrné v bezpečnostní vzdálenosti pro nekryté osoby. Zde jsou odlišnosti viditelné v řádu několika metrů. Jako výbušnina s největším dosahem se jeví výbušnina typu Hexogen, která vyžaduje stejnou bezpečnostní vzdálenost pro ochranu nekrytých osob jako výbušnina neznámá – tedy 517 m. Tlaková vlna, jež by zapříčinila ohrožení osob uvnitř budov okenním sklem, by měla největší vliv v případě, že by byla použita opět výbušnina typu Hexogen anebo výbušnina neznámá (71 m). Nejmenší vzdálenost, kdy by se lidé potýkali se závažným poraněním mimo budovy, by byla při použití výbušniny typu DAP (28 m). Nejmenší vzdálenost pro poškození budov by způsobila výbušnina typu Slurry (15 m), naopak největší vzdálenost vykazuje výbušnina Hexogen/ neznámá (21 m).

5.2 Výsledky strukturovaných rozhovorů

Na úvod je vhodné zmínit, že otázky zodpovědělo celkem 12 expertů, přičemž přibližně polovina dotazovaných jsou členové HZS, dva respondenti jsou z JE Temelín, dva jsou zaměstnanci nemocnice, dva jsou úředníci ze státního sektoru, a jeden dotazovaný je z průmyslové oblasti – defektoskopie. Z první otázky dotazující se na

odbornou specializací expertů vyplynulo, že dvě třetiny dotazovaných pracují na vedoucích pozicích.

Otázka č. 2: *Zaznamenal/a jste nějaké konkrétní případy neoprávněného nakládání se ZIZ a RA materiály? Jestliže ano, můžete jej prosím blíže specifikovat?*

Na tuto otázku odpověděl kladně pouze jeden dotazovaný z JE Temelín, který se s neoprávněným zacházením se ZIZ setkal v rámci své pracovní činnosti. Ostatní dotazovaní uvedli, že se s konkrétními případy nesetkali, ani je nezaznamenali. Jeden z odborníků od HZS uvedl ke své odpovědi dodatek, že při výjezdu k mimořádné události se setkal pouze s legálním převozem ZIZ na území ČR.

Otázka č. 3: *Které RA materiály považujete za nejvíce nebezpečné?*

Nejčastější odpovědi respondentů na tuto otázku bylo jaderné palivo (odpověděli 4 respondenti), anebo materiály způsobující vnitřní kontaminaci (odpověděli 4 respondenti). Dva respondenti zmínili obecně materiály špatně zabezpečené, a jeden odborník vysoce aktivní materiály používané v defektoskopii.

Otázka č. 4: *Domníváte se, že je vhodné informovat laickou veřejnost o detailech konkrétních incidentů, v nichž figurují RA materiály a ZIZ? Pokud ano, o kterých událostech či detailech by dle Vašeho názoru měla být veřejnost informována?*

Z odpovědí na tuto otázku nevyplývala jednoznačná odpověď, a to z důvodu toho, že přesně polovina odborníků se domnívá, že laickou veřejnost není potřeba o konkrétních detailech informovat. Jeden odborník z JE uvedl, že pokud se daný incident laické veřejnosti týká (nějakým způsobem ji ohrožuje nebo ovlivňuje), je potřeba o něm včas a věcně informovat, ale že není vhodné zabíhat do detailů. Nicméně tvrdí, že o tom, co se stalo, proč a jaké důsledky to má, by veřejnost vědět měla. Druhá polovina respondentů si myslí naopak, že informování o detailech je důležité. Odborník z JE Temelín, zabývající se evidencí a kontrolou materiálů, se k otázce vyjádřil tak, že preferuje maximální otevřenost, a o detaily incidentů by se dle jeho názoru mělo informovat, ovšem s ohledem na zabránění úniku informací, které by mohli napomoci zneužití RA materiálů a ZIZ.

Otázka č. 5: *V čem pocítujete největší nedostatky v rámci zabezpečení ZIZ?*

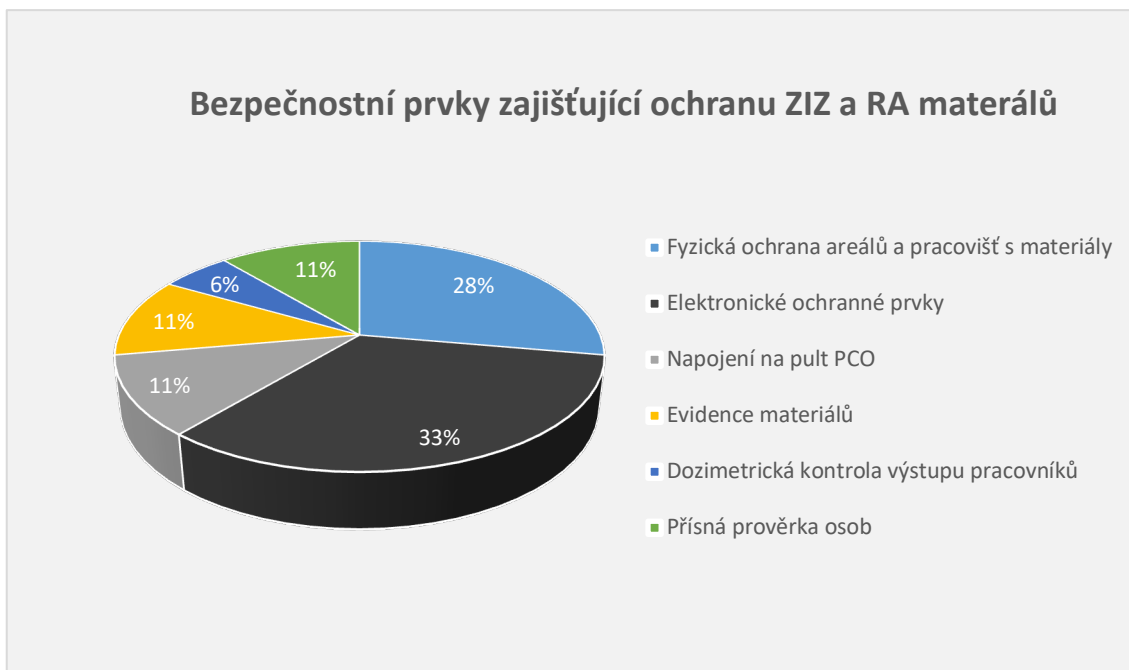
Celkem 6 respondentů uvedlo, že největší nedostatky nejsou v technickém zabezpečení, ale v lidském faktoru. Tři respondenti tuto otázku nezodpověděli z důvodu pocitu nekompetentnosti. Zbylé dvě odpovědi mají zejména finanční a administrativní povahu. Dotazovaní vidí problém v nedostatečném financování oblasti zabezpečení ZIZ. V souvislosti s tím poukazují například na možnost zhoršené údržby zdrojů na některých pracovištích. Dále vidí problém v nedbalém vedení dokumentací.

Otázka č. 6: Jaká je podle Vás pravděpodobnost možného odcizení ZIZ na území ČR z pracovišť, které s těmito zdroji pracují? Jaké pracoviště se ZIZ je dle Vašeho názoru nejrizikovější?

Na první část šesté otázky odpovědělo pouze 11 dotazovaných – jeden z dotazovaných se necítil k zodpovězení kompetentní. Malou či minimální pravděpodobnost odcizení ZIZ na území ČR z pracovišť, které s těmito zdroji pracují, uvedlo celkem 7 specialistů. Jeden specialista uvedl též minimální pravděpodobnost, ovšem pouze v JE Temelín. Relativně vysokou pravděpodobnost odcizení uvedli celkem 3 dotazovaní. Na druhou část otázky odpověděli 4 odborníci tak, že vysoce rizikové jsou ZIZ používané ve zdravotnictví, dále 3 odborníci vidí nebezpečí především v průmyslových defektoskopických pracovištích. Dva respondenti vnímají jako nejrizikovější pracoviště obecně špatně chráněné, a dva experti zmínili oblast mimo pracoviště čili transport. Poslední respondent uvedl jako nejrizikovější pracoviště s nekompetentními osobami.

Otázka č. 7: Víte, či máte povědomí o tom, jaké ochranné prvky zabezpečují znemožnění odcizení RA materiálů a ZIZ z pracovišť, která s těmito zdroji zacházejí?

Jeden odborník z JE Temelín odpověděl, že má povědomí o ochranných prvcích elektrárny, a jako příklad uvedl fyzickou ochranu a dozimetrickou kontrolu vstupů a výstupů z objektu, dále prověřování osob, ale například i nepřetržitý dohled dozorných orgánů. I další odborníci v rámci této otázky vyjmenovali hned několik bezpečnostních prvků, přičemž celkový souhrn zmíněných bezpečnostních prvků vystihuje obrázek 17 níže.



Obrázek 17 – Přehled bezpečnostních prvků zajišťující ochranu ZIZ a RA materiálů [autor]

Z obrázku 17 je patrné, že nejčastěji udávaným prvkem zabezpečení je fyzická ochrana areálů a pracovišť, dále elektronické ochranné prvky (alarm aj.), využití pultu centrální ochrany (PCO), neboli externí bezpečnostní firmy, jež zajistí bezpečnost a monitoring pracoviště. Dále se dva experti shodují, že je nezbytné vést evidenci RA materiálů (zejména radiofarmak). V případě jaderných elektráren experti jako nezbytnou součást zabezpečení uvádí dozimetrickou kontrolu vstupu a výstupu zaměstnanců, a zároveň též přísné bezpečnostní prověrky pracovníků nakládajícími se ZIZ nebo RA materiály.

Otázka č. 8: Jaká je dle Vašeho názoru úroveň bezpečnosti v oblasti transportu RA materiálů a ZIZ? Co by se případně dalo zlepšit?

Z odpovědí na první část osmé otázky vyplývá, že úroveň bezpečnosti převozu je spíše dobrá – k tomuto tvrzení se přiklání 6 dotazovaných. Celkem tři odborníci jsou toho názoru, že stupeň zabezpečení je vysoký. Dva respondenti nedokážou z hlediska své pozice tuto problematiku posoudit. Na druhou část otázky, co by se dalo v této oblasti zlepšit, odpověděli pouze 4 respondenti. Tři respondenti se shodují v názoru, že zlepšit by se mělo zajištění dodržování legislativy a vyhlášky SÚJB. Jeden respondent uvedl, že zlepšit by se mohlo dostatečné stínění RA látek a ZIZ při převozu.

Otázka č. 9: Je dle Vašeho názoru použití špinavé bomby na území ČR reálné?

Tuto otázku zodpovědělo pouze 9 respondentů – tři respondenti se necítili k posouzení této problematiky kompetentní. Celkem 8 respondentů odpovědělo, že použití špinavé bomby je v podmínkách ČR reálné, nicméně pět z nich považuje tuto hrozbu za málo pravděpodobnou. Jeden respondent uvedl, že na území ČR toto reálné není, ale jinde ve světě ano.

Otázka č. 10: Myslíte si, že je IZS a další dotčené orgány dostatečně připraven na hrozbu radiologického terorismu?

V odpovědích na tuto otázku se většina respondentů shodla, že IZS a další dotčené orgány jsou dostatečně připraveni na hrozbu radiologického terorismu. Celkem 7 respondentů z 9 se vyjádřilo kladně, s ohledem na pravidelně prováděné havarijní cvičení (návzik zvládání mimořádných radiačních událostí), a to nejen v lokalitě JE Temelín. Dále někteří zmínili bezpečnostní prvky rozmístěné ve všech krajích – např. stacionární hlásiče úrovně radiace, či přenosné měřicí přístroje radiace, jež mají k dispozici veškeré stanice HZS.

Otázka č. 11: Jak často podstupujete školení v souvislosti s hrozbou radiologického terorismu?

Celkem 6 dotazovaných uvedlo, že podstupuje určitou formu školení v souvislosti s touto hrozbou. Vedoucí reaktorového bloku JE uvedl, že školení podstupuje v rámci školení fyzické ochrany, a to 1x za rok. Odborník od HZS ve své odpovědi zmínil, že s ohledem na pracovní zařazení podstupuje a připravuje spíše školení v oblasti radiační ochrany pro složky IZS, které je mají předepsané při nástupu, a dále uvedl, že 1x za rok se účastní přípravy cvičení radiační havárie, včetně zpracování všech druhů plánů, přípravy obyvatelstva a konferencí, seminářů a pracovních jednání. Dva respondenti se zmínili, že žádné takové školení v rámci své pracovní činnosti nepodstupují, a jeden respondent na otázku neopověděl.

6 DISKUZE

V ČR je dlouhodobě patrný neklesající trend detekce aktivit spojených s neoprávněným zacházením s RA materiály či ZIZ. Tato skutečnost může mít několik příčin. Jedním z aspektů může být dle SÚJB [15] například zvyšování úrovně bezpečnostních prvků v rizikových zařízeních. Z tabulky 6 této práce vyplývá, že jako nejvíce rizikové z pohledu počtu záchyťů a řešení událostí jsou spalovny komunálního odpadu a zařízení určená pro zpracování či shromažďování kovového šrotu. V zařízeních pro zpracování či shromažďování kovového šrotu dochází často ke smísení odpadu s RA materiály a následné kontaminaci. Tento fenomén je v posledních letech odhalován poměrně praktickým způsobem. Zařízení zacházející s kovovým šrotem si instalují takzvané portálové brány, díky kterým jsou schopny prokázat přítomnost kontaminovaného kovového odpadu ihned při vstupu do areálu. V závislosti na kvalitě a počtu scintilačních detektorů dokážou tyto brány více či méně konkrétně indikovat přesnou lokaci ukrytého RA materiálu, ZIZ, či kontaminovaného předmětu v kovovém šrotu.

Poznatky shrnuté ve vědeckém článku Sabola a kol. [74] se shodují s některými poznatky uvedenými v této práci. Z článku vyplývá, že radiofarmaka, průmyslová měřidla, měřiče vlhkosti či karotážní aplikace představují střední nebezpečí. Zatímco zdroje používané v brachyterapii, defektoskopii a teleterapii představují vysoké riziko nebezpečí. S tímto tvrzením se do jisté míry ztotožňují popsané poznatky v teoretické části, ale též poznatky získané pomocí strukturovaných rozhovorů. V teoretické části je poznamenáno, že radiofarmaka, vzhledem ke zpravidla nízkému poločasu rozpadu, nepředstavují příliš velké riziko z hlediska jejich zneužití v rámci radiologického terorismu. ZIZ používané v brachyterapii či defektoskopii jsou zejména vysokoaktivní zářiče obsahující ^{137}Cs anebo ^{60}Co , emitující zpravidla gama záření o vysoké aktivitě. Využití těchto ZIZ je zjevné i v potravinářském průmyslu v rámci ozařování a sterilizace potravin. Vzhledem k jejich emitovanému záření představují tyto zdroje závažné riziko v případě neoprávněného nakládání s nimi. Z provedené analýzy o záchytech RA materiálů na území ČR vyplývá, že ZIZ s ^{60}Co jsou mnohdy zachytávány ve spalovnách komunálního odpadu, či v zařízeních pro shromažďování a zpracování kovového šrotu v důsledku nesprávné likvidace či ztráty. I z tohoto důvodu dle mého názoru představují pro občany velké riziko.

Z vědecké studie Fergustona a kol. [75] vyplývá, že mimo radionuklidy uvedené v této práci jsou nebezpečné v rámci radiologického terorismu, a vhodné pro sestavení radiologické zbraně i radionuklidy ^{192}Ir a ^{252}Cf .

Pokud bychom vzali v úvahu, že by v rámci radiologického terorismu došlo k útoku na jaderné zařízení, je možné hypotetický rozsah následků takového napadení demonstrovat například na poznatcích o následcích způsobených jadernou havárií v Černobylu. Na základě provedených výzkumů, o nichž hovoří například Aleksijevič [76] či Hála [13], anebo jež jsou též zmíněny například v Doporučení vládám Běloruska, Ruské federace a Ukrajiny [77], je známo, že následkem výbuchu v JE v Černobylu bylo do ovzduší vyneseno obrovské množství vzácných plynů (xenonu, kryptonu aj.), radioizotopu jódu $[(1,3-1,8) \cdot 10^{-8} \text{ Bq}]$, dále ^{137}Cs ($9 \cdot 10^{16} \text{ Bq}$).

Radionuklidy se postupně v důsledku cirkulace vzduchu rozšířily i do okolních, zejména Evropských, zemí. Celkově lze relativně rozsáhlé zasažení Evropy považovat, při nejmenším, za znepokojivé.

Nejvíce zasažená byla Ukrajina, Bělorusko, ale i Rusko. Pozorovaná úroveň kontaminace půdy a vody byla, z důvodu častých změn meteorologických podmínek, po havárii velice proměnlivá. Na základě pozorování byl rovněž zaznamenán negativní vliv na vegetaci a zvěř, nacházející se v okruhu do 30 km od místa havárie. Nepříznivý dopad se projevoval zvýšenou četností úmrtnosti zvířat, případně neschopností jejich reprodukce, a dále poškozením rostlin v důsledku absorpce radionuklidů. Z těchto poznatků je tedy patrné, že v případě použití jaderného zařízení jako radiologické zbraně, by v případě nejhoršího možného scénáře, mohly být účinky na obyvatelstvo a zejména na životní prostředí mnohem závažnější než v případě zbraní typu RDD, RED či RID.

6.1 Diskuze k simulaci špinavé bomby

Při zhodnocení možných dopadů v souvislosti s použitím špinavé bomby je zde vycházeno především z kazuistik a poznatků o použití nástražného výbušného zařízení, a dále z již provedených výzkumů dotýkajících se této problematiky.

V souvislosti s oběma modelacemi lze očekávat zdravotní důsledky nejen u přímo zasažených osob, ale i osob jim blízkých či osob útoku nezúčastněných, jež se o incidentu posléze dozvědí například v médiích a u nichž to vyvolá značné obavy.

Zdravotní dopady při použití výbušniny mají obecně několik podob – fyzického i psychického charakteru. O fyzických dopadech se zmiňuje Pudil [78]. Ten ve svém odborném článku uvádí, že fyzické dopady vyplývají především z destruktivních účinků nástražného výbušného zařízení, které vyvolávají specifický obraz poranění, který může mít v mnoha případech fatální důsledky. Klasifikaci poranění vznikajících při explozích a mechanismus účinku dělí do čtyř kategorií – primární, sekundární, terciární a ostatní poranění či postižení. Z jeho popisu je zjevné, že primární poranění osob způsobuje zejména samotná tlaková vlna, přičemž poškození je dáno dopadem tlakové vlny na povrch těla, odkud následně proniká do hlubokých tkáňových struktur. S účinky tlakové vlny je spojován jev známý jako blast syndrom, jenž představuje komplexní soubor příznaků, zranění či komplikací, které jsou spojovány s přímým působením tlakové vlny na jedince v důsledku exploze. Ve vztahu ke vzdálenosti jsou rozlišovány celkem dva faktory indikující možný rozsah poranění. V případě obou modelací by v bezprostřední blízkosti výbuchu, do vzdálenosti zhruba 4 m, došlo následkem výbuchu k přímému usmrcení osob tlakovou vlnou. Tato 4metrová zóna, v níž nastává přímé usmrcení osob (znázorněná na obrázku 13) je považována za tzv. zónu letální. Přibližně od 4 m dále se síla tlakové vlny rapidně snižuje a osobám již nehrozí bezprostřední úmrtí, nicméně do vzdálenosti 28 m se jedinci mohou potýkat s druhotnými poraněními způsobenými rozletem fragmentů směrem od epicentra výbuchu.

Letící úlomky dle Pudila [78] způsobují dvojí povahu zranění. V první řadě úlomky způsobují zranění řezná, která se objevují ve formě tržných ran a průstřelů a nejčastěji je způsobují úlomky střepin o hmotnosti do 10 g. Mezi fragmenty nezpůsobující řezné rány lze zařadit velké předměty, které při zasažení osoby způsobují masivní vnitřní poranění. Zranění způsobená kolizí s předměty nemusejí být vždy na první pohled viditelná. Z tohoto důvodu může být obtížnější stanovení správné diagnózy. Míru závažnosti poranění v důsledku rozletu fragmentů nelze nikdy předběžně určit. V závislosti na prostředí, ve kterém se tlaková vlna šíří, je rozlišován blast syndrom vzdušný, pevný a vodní. Z obrázku 12 a 15 této práce vyplývá, že v rámci vyobrazených modelových scénářů by se jednalo především o šíření tlakové vlny vzduchem. Zdravotní

následky by proto zahrnovaly především poranění hlavy a mozku, hrudníku či gastrointestinálního traktu. Uvádí, že dle zkušeností z praxe je patrné, že klinické příznaky poranění hlavy a mozku jsou v takových případech velice různorodé. U zasažených osob se mohou projevovat například ve formě poranění akustického ústrojí – kontuze či ruptura bubínku, disrupce středoušních kůstek, poškození kochleárního ústrojí, ztráta sluchu doprovázena bolestí, krvácení ze zevního zvukovodu, tinnitus či vertigo. Dále pak poranění očí a orbity – komoce a kontuze očního bulbu, nitrokomorové krvácení, fraktury orbity.

Dalším následkem výbuchu je vznik paniky a panického chování, v jehož důsledku může dojít ke zranění či usmrcení osob v davu. O tomto jevu blíže pojednává ve svém článku Martínková. [79] Dav charakterizuje jako sročení většího počtu osob odlišného pohlaví, rasy, inteligence aj., přičemž uvádí, že tyto osoby v rámci davu ztrácejí svou vědomou osobnost, a jednají a smýšlejí jedním vyhraněným směrem v rámci tzv. kolektivní duše. V rámci kolektivní duše se tak může i inteligentní jedinec chovat primitivním způsobem. Způsob logiky, sugestibility a šíření informací v davu je velmi specifický. V případě výbuchu nástražného výbušného zařízení panika často přechází do jevu zvaného davová psychóza. Téměř všichni jedinci nacházející se v davu, ve kterém se šíří jak opodstatněné, tak i neopodstatněné přesvědčení, že jsou ohroženi na životě, se budou snažit dostat do bezpečí – a to i na úkor ostatních.

Toto zkratkovité jednání popsal ve své knize i Štětina [80], který uvádí, že v důsledku paniky šířící se v davu řetězovou reakcí, vzniká chaos, a často dochází k ušlapání upadnuvších, k polytraumatu vzniklém v důsledku pádu, udušení v důsledku znemožnění dýchacích pohybů hrudníku po natlačení těl na sebe či na překážku.

Na psychickém zdraví osob se může zásadně odrazit i stres. Negativní vlivy stresu popisuje Gustave Le Bone [81]. Z jeho poznatků lze vyvodit, že v případě obou modelací by měl na jedince vliv stres – a to nejen krátkodobý na místě události, ale i dlouhodobý. Více vulnerabilní jedinci by například mohli pociťovat jistý diskomfort a obavy z dalších teroristických útoků. Případně nepříznivě vnímat skutečnost, že při útoku byly použity radioaktivní látky. Mohou trpět například i obavami ze vzniku stochastických účinků.

Výbuch výbušniny, nehledě na přítomnost RA látky, lze bezpochyby považovat za traumatizující událost. V důsledku traumatizujících událostí se dle Hašta a Vojtové

[82] u zasažených osob často projevuje posttraumatická stresová porucha (PTSD). Z jejich odborné knihy je patrné, že tato porucha je nejčastěji provázena znovuprožíváním události, jež se projevuje ve formě živých vzpomínek, záblesků minulosti či znovuprožívání traumatu v situacích, které oběti traumatickou zkušenost třeba jen připomínají. V důsledku toho se mohou zasažené osoby uchýlit k vyhýbavému chování – například přestanou navštěvovat místa s vyšší koncentrací lidí. Následky prožitého traumatu se dle poznatků z praxe mnohdy odrážejí i v chování a celkovém prožívání zasažené osoby. Mohou se u nich objevovat poruchy senzitivity a excitace v podobě výbuchů hněvu, podrážděnosti, zhoršení koncentrace a spánku či zvýšení úlekových reakcí. Symptomy PTSD mohou mít delší časovou prodlevu – mohou se objevit například do 6 měsíců od prožitého traumatu, ale i později.

V obou modelacích jsou nástražným výbušným zařízením rozptýleny radioaktivní látky. Radioaktivní látky taktéž způsobují specifický klinický obraz poranění, který většinou není na první pohled patrný. Biologické účinky IZ na organismus mohou mít povahu deterministickou či stochastickou. Z poznatků z teoretické části vyplývá, že by u jedinců došlo k zevní kontaminaci. Ovšem ke vzniku deterministických účinků by došlo spíše ojediněle, jelikož v případě rozptýlení RA látky by dávka záření zřejmě nebyla natolik vysoká, aby deterministické účinky zapříčinila. V případě rozptylu RA látek může dojít k jejich inhalaci, jež představuje riziko pro vnitřní orgány, zejména v případě ^{239}Pu , který je silně toxický. Významnou roli zde hraje i druh emitovaného záření obou radionuklidů zvolených pro simulaci. Alfa záření, jež emituje právě ^{239}Pu , je z hlediska aspirace (ale i ingesce) považováno za nejrizikovější z hlediska možných následků. V důsledku poranění způsobeným výbuchem může dojít k vnitřnímu ozáření a následné koncentraci radionuklidu v kostech, játrech anebo slezině. Přítomnost radionuklidu v těle může z dlouhodobého hlediska zapříčít pravděpodobnost vzniku stochastických účinků.

Z poznatků Horáčka, Jebavého a Žáka [26] lze usuzovat, že pokud bude jedinec vystaven v důsledku použití špinavé bomby záření, hrozí mu pravděpodobnost vzniku stochastických následků. U zasažených jedinců se tak proto mohou dostavit různé psychosociální stresy, spojené s obavami ze stochastických důsledků. Pokud by se po určitém časovém odstupu u jedinců skutečně projevíly stochastické účinky, mohly by po takovém zjištění prožít určitou formu traumatu. Obranné psychické

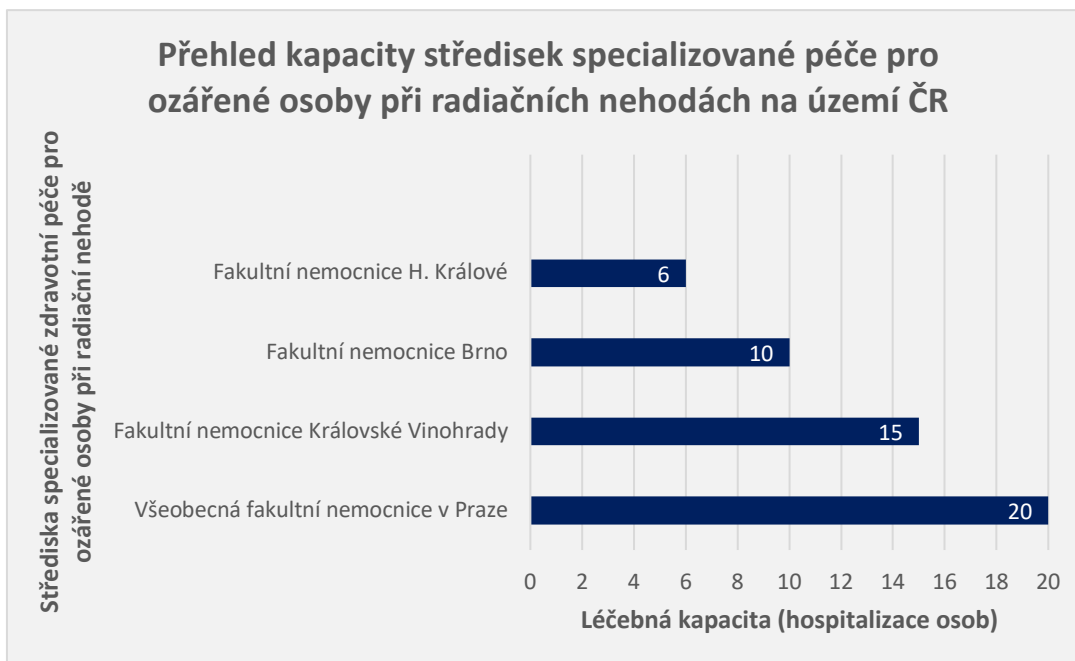
reakce a způsoby prožívání v důsledku onkologického onemocnění jsou podobné například PTSD. Onkologický pacient může procházet při adaptaci na trauma podobnými fázemi jako v případě PTSD. Jedná se o prvotní fázi šoku, kdy je pacient mnohdy až paralyzován skutečností, že je nemocen. Po fázi šoku častokrát následuje fáze agrese, během níž pacient ventiluje hněv vůči svému okolí a potýká se s vtíravými myšlenkami, proč nemoc postihla právě jeho. V období smlouvání se pacienti zpravidla zaměřují na činnosti či sny, které by si ještě rádi před svým odchodem splnili, případně hledají naděje na vyléčení u léčitelů. Onkologičtí pacienti se často dostávají do fází deprese, ze kterých se zřídkakdy dostávají do tzv. fáze smíření. Proces adaptace na trauma je značně individuální a nevyzpytatelný – jedinec se může opakovaně dostávat do fází, které již překonal.

HZS ČR [83] vymezuje algoritmus činností či prvotní kroky, jež by měli příslušníci HZS při výjezdu k radiační události učinit z důvodu ochrany zdraví, a to jak svého, tak ostatních jedinců, kteří se v zasažené oblasti nacházejí. V první řadě je, kromě použití ochranného oděvu proti radiaci, nezbytné provedení kontroly samotného přístroje na měření dávkového příkonu – a to jednak vizuální kontrolu, jež by měla odhalit případné porušení vyhodnocovací části, detekční části a ovládacích prvků přístroje. Dále je nutná kontrola baterie a funkčnosti. U ověřování funkčnosti je důležité přihlédnout k okolnostem, zda se provádí během přesunu na místo zásahu, nebo v místě zásahu. Detekční přístroj bude s největší pravděpodobností vykazovat odlišnou četnost zvukových impulzů v závislosti na tom, v jakém prostředí bude zkouška funkčnosti prováděna. Pokud tedy bude zkouška funkčnosti prováděna během přesunu, přístroj bude pravděpodobně vykazovat standardní hodnoty s ohledem na přírodní pozadí, jež jsou obvykle menší než $0,3 \mu\text{Sv/h}$. [84] V místě zásahu při radiologickém útoku budou naměřené hodnoty, v důsledku kontaminace prostředí radionuklidy, podstatně vyšší. Po ověření výše zmíněných atributů přístroje lze přistoupit k samotnému měření na místě zásahu. V průběhu měření je důležité dbát na oddělení detekční části od části vyhodnocovací a zároveň dbát i na ochranu přístroje před kontaminací. V závislosti na naměřených hodnotách se následně vytyčí hranice vnější zóny a nebezpečné zóny pro zevní ozáření.

V případě všech složek IZS při radiační události Prouza [44] zdůrazňuje důležitost koordinované spolupráce. V rámci přednemocniční péče by bylo u zasažených osob

v první řadě nezbytné zaměřit se na jejich kontaminaci. Pokud by osoby nebyly kontaminovány RA látkami, bylo by s nimi nakládáno standardním postupem. Jestliže by však osoby kontaminovány byly, bylo by nutné neprodleně zahájit dekontaminační procesy dle Bojového řádu požárních jednotek [85]. Tento řád ve svém znění uvádí, že v případě radiační události je nejprve nutné na dekontaminačním stanovišti provést tzv. suchou dekontaminaci osob. Ta spočívá v odstranění svrchního kontaminovaného oděvu, který je následně ukládán do označených uzavíratelných obalů. Z odkrytých částí těla je RA látka odstraňována formou otírání dekontaminačním roztokem obsahujícím nejčastěji borovou vodu či fyziologický roztok. V případě zasažení očí RA látkou musí být zahájeno jejich okamžité vymývání pod tekoucí vodou minimálně po dobu 20 minut. Po provedení suché dekontaminace je zpravidla provedeno kontrolní měření úrovně radiace. V případě, že je úroveň radiace přijatelná, zahájí se standardní úkony nezbytné k zajištění stavu pacienta – tedy zajištění životních funkcí a převoz pacienta do zařízení, jež má volnou kapacitu. Prchal [86], který ve své diplomové práci zpracoval modelaci použití radiologické zbraně na Staroměstském náměstí uvádí, že by zasažení jedinci byli rozvezeni do většiny pražských nemocnic, přičemž zmiňuje, že nejbližší od místa události jsou Nemocnice Na Františku, anebo Všeobecná fakultní nemocnice v Praze.

Bojový řád [85] ovšem dále zohledňuje i skutečnost, že provedení suché dekontaminace nemusí být úspěšné. Pokud je naměřená hodnota stále vyšší, než je hodnota přijatelná, zahájí se dekontaminace těla mokřím způsobem. Ta zahrnuje řádné omytí celého těla (včetně vlasů) vodou nepřesahující teplotu 37 °C a tekutým mýdlem či dekontaminační směsí. Po řádném omytí je opět provedeno kontrolní měření povrchové úrovně radiace. Je-li výsledná hodnota i po opakovaném provedení mokré dekontaminace opět vyšší, než je přípustná hranice plošné aktivity, je důvodné podezření, že u osoby došlo k vnitřní kontaminaci. Takové osoby se po konzultaci s SÚJB transportují do speciálně určených středisek, která jsou na příjem kontaminovaných osob vybavena. Střediska jsou vymezena ve Věstníku Ministerstva zdravotnictví ČR [15]. Léčebná kapacita vytipovaných středisek je shrnuta na obrázku 18 níže.



Obrázek 18 – Přehled léčebné kapacity středisek specializované péče pro ozářené osoby ČR [87]

Z obrázku 18 je patrné, že výše určená střediska specializované zdravotní péče o osoby ozářené při radičních nehodách mají dohromady po provedení součtu léčebnou kapacitu maximálně pro 51 osob. Nicméně doba a celkový rozsah schopnosti hospitalizovat osoby se v jednotlivých zařízeních značně liší. Vezmeme-li údaje na obrázku 18 postupně od nejpočetnějšího střediska – Všeobecné fakultní nemocnice v Praze. Toto zařízení garantuje schopnost přijmout a léčit dvacet osob, u nichž je například podezření na vnitřní kontaminaci radionuklidy či jim je indikována hospitalizace z důvodu celotělového ozáření IZ dávkou nepřevyšující 1 Gy, po dobu 1 až 2 týdnů. Ačkoliv Fakultní nemocnice Královské Vinohrady disponuje nižším počtem léčebné kapacity (15) oproti Všeobecné fakultní nemocnici v Praze, její rozsah zdravotní péče zahrnuje specializovanější hospitalizaci ozářených osob s lokálními kožními projevy, chirurgické ošetření lokálního depozitu radionuklidu a kontaminovaných poranění a ošetření pozdních lokálních následků akutního ozáření. Schopnost léčby 15 ozářených pacientů toto středisko garantuje po dobu 4 týdnů. Podobný rozsah poskytované zdravotní péče má Fakultní nemocnice Brno. Doba garance léčby 10 pacientů se pohybuje v rozmezí 10 až 14 dnů. Pro pacienty je vždy vyhrazeno 5 lůžek na Dermatovenerologické klinice, a na Klinice popálenin a rekonstrukční chirurgie. Předposlední středisko, tedy Fakultní nemocnice Hradec Králové, se specializuje na hospitalizaci osob, u nichž je podezření na celotělové ozáření IZ dávkou převyšující

1 Gy. U těchto pacientů je středisko schopno zaručit léčbu po dobu 4 týdnů. Posledním střediskem, jež sice není uvedeno na obrázku 18, a které se nesespecializuje na příjem a léčbu pacientů, ale na provedení a vyhodnocení cytogenetického vyšetření lymfocytů periferní krve u ozářených osob a určení ekvivalentu celotělové dávky IZ, je Thomayerova nemocnice. Nemocnice je tedy primárně orientována na analýzu krve, kterou je schopna provést u dvou ozářených osob v rámci 1 týdne. [15]

Na základě výstupních dat, které jsou v této práci podloženy grafickými schémata, lze orientačně odvodit i ekonomické následky. Na obrázku 16 této práce je zobrazen rozsah zasaženého území, jež by muselo být v důsledku kontaminace uzavřeno. Dle bojového řádu požárních jednotek [84] by bylo v takto uzavřeném prostoru nezbytné provést evakuaci osob, dekontaminaci a dále dezaktivaci. Dezaktivací se rozumí odstranění radioaktivní látky z povrchu, přičemž je zde nutné přihlídnout k významné skutečnosti, že radioaktivní látky není možné zničit – lze pouze vyčkat, až radioaktivní látky podlehnou samovolnému procesu přeměny. Celková plocha zasaženého území, kterou bude potřeba dezaktivovat činí 386 851,14 m². Na této ploše se nachází významné kulturní památky – Týnský chrám, Dominikánský klášter, Španělská synagoga, Židovská radnice, a další významné barokní stavby.

Náklady na evakuaci osob z místa události, dekontaminaci osob, techniky a dezaktivaci půdy by pravděpodobně byly vysoké.

Na ekonomickém stavu by se dále odrazila skutečnost, že by zasažené území muselo být po určitou dobu zcela uzavřené. Významnou položkou by byly i náklady na opravu a obnovu poškozených staveb a stavebních konstrukcí, inženýrských sítí, produktovodů aj. Nevyčíslitelnou hodnotu by mělo poškození samotné Staroměstské radnice s orlojem. Ekonomické důsledky výbuchu by byly v každém případě bezpochyby rozsáhlé a dlouhodobé.

S enormní ekonomickou zátěží, v případě použití špinavé bomby na Staroměstském náměstí, souhlasí i Prchal [86], který se rovněž zabýval zhodnocením rizika radiologického terorismu, a jako největší problém vnímá kontaminaci historických budov, v jejichž případě by dle jeho názoru nebyla prováděna demolice, nýbrž pouze jejich dekontaminace, a to bez ohledu na náklady. Dále jako negativní aspekt vnímá obecně značnou kontaminaci přilehlého okolí, jako například chodníků, automobilů,

zeleně, kanalizace aj. Ke svým závěrům dospěl na základě modelace rozptylu anorganického prachu pomocí neznámé výbušniny o hmotnosti 5 kg s příměsí několika desítek gramů ^{137}Cs . Pozoruhodné je, že výsledky jeho modelace se oproti modelacím v této práci odlišují ve výstupních vzdálenostech, přestože pro rozptyl látek bylo použito stejné množství výbušniny. Doporučená vzdálenost pro evakuaci v jeho simulaci činí 516 m, ohrožení střepy je nezanedbatelné do vzdálenosti 71 m, ohrožení osob mimo budovy do 35 m, poškození budov do 21 m, doporučený průzkum koncentrace prachovými částicemi je do 491,4 m, a ohrožení osob prachovými částicemi pak 130,5 m. Přestože autor použil stejné množství výbušniny, zjevné odlišnosti mohou být zapříčiněny právě odlišným typem výbušniny. Skutečnost, že typ výbušniny značně ovlivňuje celkovou vzdálenost zasaženého území, je patrná i z tabulky 11 této práce, kde jsou porovnány rozdílnosti ve vzdálenostipro jednotlivé typy výbušnin, jež jsou v TerExu v nabídce. Ovšem i při provedeném porovnání vzdáleností, jež vyšly ve výzkumu Prchalovi [86], s tabulkou 11, která zahrnuje pro obě modelace v této práci i neznámou výbušninu, jsou patrné odlišnosti zejména ve vzdálenostech pro koncentraci IDLH. To může být zapříčiněno s největší pravděpodobností rozličnými vstupními meteorologickými údaji. Je totiž zjevné, že při rychlosti větru 1 m/s (ve výšce 10 m), a při typu atmosférické stálosti F – inverze, autor práce v modelaci dosáhl o téměř polovinu menšího okruhu vzdálenosti, ve které by byly ohroženy osoby prachovými částicemi. Tato skutečnost tedy naznačuje, že meteorologické podmínky hrají významnou roli. Byť jen nepatrná změna meteorologických podmínek může výrazně ovlivnit výsledné vzdálenosti pro ohrožení prachovými částicemi.

O významu meteorologických podmínek, zejména ve vztahu k typu atmosférické stálosti, pojednává ve svém vědeckém článku Vaman [88], jež uvádí viditelný rozdíl v dosahu zasaženého území v závislosti na typu stálosti. Vaman se dále zmiňuje i o nedostacích simulačních programů z hlediska modelace radiologických zbraní typů RDD. Uvádí, že programy nedokážou adekvátně zahrnout všechny proměnné – změny meteorologických podmínek aj.

Značné dopady by použití špinavé bomby mělo i na půdu. Zasažená plocha půdy činí asi 386 851 m². Vzhledem k tomu, že se jedná o zastavěnou obytnou část, není zde tak vysoké procento nepříznivých účinků na faunu a flóru, jako by bylo například v případě zasažení polí, luk, lesní krajiny či chráněné krajinné oblasti.

Ohrožení vodního toku a vodovodních sítí, v případě obou modelací, není pravděpodobné. Na obrázku 14 je viditelně ohraničeno zasažené území, které nezasahuje do oblasti přiléhající řeky. Čili kontaminace vodního toku by neměla nastat. Prouza [89] je toho názoru, že při rozptýlení RA látek je velmi nepravděpodobná možnost, že by nastala významně nebezpečná úroveň kontaminace ve vodovodní síti. A to i v případě, že by byla rozptýlena RA látka rozpustná ve vodě.

Uvážíme-li však, že by ke kontaminaci řeky a vodovodních sítí přeci jen došlo – v důsledku např. náhlého deště, bylo by vhodné zahájit preventivní opatření vedoucí k posouzení míry následků a případně k jejich minimalizaci. A to i za předpokladu, že by s největší pravděpodobností samovolně došlo k významnému naředění a značné eliminaci následků. Jednoduchá preventivní opatření by v takovém případě mohla mít podobu odběru kontaminované vody – přímo z vodního toku, s následným určením míry kontaminace ve vodě, a případně průběžného sledování vývoje ohrožení životního prostředí.

Otázkou možných následků teroristického útoku za použití radionuklidu ^{60}Co se ve své diplomové práci zabýval Kotyza [90]. Pro zhodnocení zasaženého území použil taktéž softwarový program TerEx. Nicméně jeho simulace byla situována v uzavřeném prostředí obchodního centra. Na základě provedených simulací tak lze porovnat míru odlišností odrážejících se ve výsledcích při použití zbraně typu RDD, a to jednak v uzavřeném, a jednak v otevřeném prostoru. Autor v rámci modelace použil 0,5 kg výbušniny DAP, s příměsí radionuklidu ^{60}Co v podobě válečků. Jeho výstupním parametrem byla ohrožená zóna do vzdálenosti 100 m od epicentra výbuchu. Dále poškození budov do vzdálenosti 8 m, přičemž v této vzdálenosti autor považuje všechny přítomné osoby za vážně zraněné, kontaminované či usmrcené. Na základě jeho simulace lze usoudit, že v případě výbuchu uvnitř budovy by zasažené území nebylo tak rozsáhlé, jelikož by zděné konstrukce budovy zamezily rozptylu látek do velké vzdálenosti. Větší nebezpečí v tomto případě představuje ohrožení osob uvnitř budov samotnou explozí. Zatímco v otevřeném prostoru je méně překážek, látky se tedy mohou šířit vzduchem podstatně rychleji a do větších vzdáleností než v případě výbuchu uvnitř budovy. Avšak riziko plynoucí z výbuchu je závažnější spíše v případě exploze uvnitř budovy, kde navíc hrozí větší nebezpečí zavalení osob sutinami.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.1 této práce, druhá provedená modelace, pro niž byl použit radionuklid ^{239}Pu , vykazovala při stejně zadaných parametrech stanovených pro modelaci 1 této práce naprosto totožné výsledky. Nicméně zde je nutné přihlídnout k několika faktorům. Prvním faktorem je, že ZIZ obsahující ^{239}Pu , má podstatně vyšší aktivitu oproti ^{60}Co . Z výzkumu Prouzy [89] vyplývá, že aktivita uzavřeného zářiče se v případě rozptýlení radioaktivní látky mnohdy i několikanásobně liší. Dalším faktorem je odlišný poločas přeměny obou radionuklidů. Rozdílnost nastává i v případě dekontaminace povrchu, při zasažení ^{60}Co by spočívala jednak v pokrytí kontaminovaného povrchu suchým pískem nebo zeminou z důvodu rizika samovznícení látky, jednak v odstranění všech zdrojů iniciace a v zamezení vniknutí látky do vodních zdrojů a kanalizace. V případě ^{239}Pu riziko samovznícení sice nehrozí, nicméně doba zamoření by zde byla několikanásobně vyšší než v případě ^{60}Co , toto tvrzení vyplývá z tabulky 12.

| Radionuklid | Typ záření | Poločas radioaktivní přeměny | Aktivita (TBq) | |
|--------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------|----------------|
| | | | URZ | Rozptýlená RaL |
| ^{60}Co | β, γ | 5,27 let | 30 | 30 000 |
| ^{90}Sr | β | 29,1 let | 4000 | 1000 |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | β, γ | 6,0 hodin | 700 | 700 00 |
| ^{131}I | β, γ | 8,0 dnu | 200 | 200 |
| ^{137}Cs | β, γ | 30,2 let | 100 | 20 000 |
| ^{192}Ir | β, γ | 73,8 dnu | 80 | 20 00 |
| ^{210}Po | α | 138,4 dnu | 8 000 000 | 60 |
| ^{239}Pu | α, β, γ | 2,41E+4 let | 1000 | 60 |
| ^{252}Cf | α, γ, n | 2,65 let | 20 | 100 |

Tabulka 11 – Nebezpečné zdroje ionizujícího záření [89]

Prouza [89] na základě tabulky 12, ve svém výzkumu konstatuje, že uvedené aktivity pro URZ mohou způsobit významné, a dokonce i smrtelné zevní ozáření. Je to však dáno předpokladem, že se osoba nachází v těsné blízkosti URZ po dobu minut až 1 hodiny. V případě rozptylu RA látek zmiňuje možnou kontaminaci prostředí do vzdálenosti několika desítek metrů od epicentra rozptylu. V případě obou modelací vyšla vzdálenost pro koncentrace IDLH na 351 m, nicméně z výzkumu Prouzy vyplývá, že výsledná vzdálenost by byla ovlivněna zejména chemickými vlastnostmi radionuklidů,

dále charakterem kontaminované oblasti a meteorologickými podmínkami. V souvislosti s tím se Prouza dále odkazuje na provedené terénní testy v letech 2008–2010.

6.2 Diskuze k rozhovorům

Ze strukturovaných rozhovorů vyplynulo hned několik zajímavých aspektů. Poznatky získané prostřednictvím strukturovaných rozhovorů jsou zde shrnuty dle jednotlivých sekcí, a zároveň dle specializací dotazovaných odborníků.

Sekce první: Oblast vztahující se k bezpečnosti RA materiálů a ZIZ

Z odpovědí na otázku zaměřující se na zaznamenání konkrétních případů neoprávněného nakládání s RA materiály a ZIZ vyplynulo, že pouze jeden respondent – z JE, se setkal s neoprávněným nakládáním s RA materiály. Uvedl, že podezřelá osoba měla v držení malé množství jaderného odpadu. Šlo pravděpodobně spíše o neznalost předpisů, nikoliv o úmyslné zneužití. Zbytek dotazovaných neznamenal žádné konkrétní případy neoprávněného nakládání se ZIZ a RA materiály. Dle výsledku dotazníků zde usuzuji, že neoprávněné zacházení s RA a ZIZ je na území ČR spíše ojedinělé.

Téměř polovina dotazovaných ve své odpovědi na otázku týkající se nejvíce nebezpečných RA materiálů uvedla, že považuje za nejvíce rizikový RA materiál vyhořelé palivo – například z JE, anebo z Ústavu jaderného výzkumu Řež. To může být zapříčiněno například tím, že mají určité pracovní vazby na JE, a míra rizika pramenící z vyhořelého paliva je jim tak známá i z hlediska odborné stránky. Třetina respondentů se nejvíce obává materiálů způsobujících vnitřní kontaminaci organismu člověka. Názor asistenta VŠ se specializací na CBRN látky je, že z hlediska kontaminace organismu jsou rizikové zejména látky ve formě prášku, kapaliny nebo plynu. Lze říct, že s tímto názorem částečně souzní i vedoucí radiologický asistent, který je toho názoru, že nebezpečné jsou radionuklidy otevřené, používané v nukleární medicíně. Pro dva z respondentů nerozhoduje povaha materiálu, ale úroveň zabezpečení, přičemž u jednoho z nich hraje významnou roli vytýčení sledovaného, nebo kontrolovaného pásma. Zde je patrné, že odborník zřejmě pracuje i na přechodném defektoskopickém pracovišti, a je si dobře vědom rizik plynoucích z menší míry zabezpečení.

Další nastíněnou problematikou byla míra vhodnosti informování veřejnosti o detailech událostí souvisejících s neoprávněným nakládáním s RA materiály a ZIZ. Ze získaných odpovědí nelze vyvodit jednoznačné závěry. A to sice z toho důvodu, že přesně polovina respondentů by v případě incidentu o konkrétních detailech případu laickou veřejnost informovala, a druhá polovina nikoliv. Ojedinelý pohled na tuto problematiku má vedoucí radiologický asistent kategorie B z pražské kliniky, který se domnívá, že je vhodné informovat laickou veřejnost o podrobnostech, a který svou odpověď dále konkrétněji specifikoval ve vztahu k aktuálnímu dění na Ukrajině. Jelikož na Ukrajině probíhá válka, je toho názoru, že by veřejnost měla být informována i o případném ohrožení celistvosti jaderných elektráren. V rámci této oblasti mají zajímavé pohledy i odborníci z HZS. Expertka z oblasti havarijního plánování ve své odpovědi zdůraznila, že je zbytečné sdělovat laické veřejnosti detaily ohledně konkrétních incidentů. Dle jejího názoru by většina populace podrobnosti nepochopila. Obecná znalost RA materiálů z pohledu fyziky, chemie a biologie v populaci je, dle jejího názoru, nízká. Pro znalou veřejnost by klíčové informace umístila na speciální stránky. Pro laickou veřejnost doporučuje spíše rámcové informování o zavedených opatřeních, aby mezi obyvatelstvem nevznikala panika. S tímto názorem se ztotožňuje většina dotazovaných odborníků od HZS. Pouze jeden odborník uvedl jako problém nízké povědomí veřejnosti o této problematice. Dle mého názoru je zveřejnění detailů veřejnými kanály, jako jsou noviny, nebo televize riskantní, a to z důvodu možné paniky a šíření dezinformací. Přikláním se proto spíše k názoru, že veřejnost by měla být informována především o faktech, které jsou pro ně zásadním způsobem důležité.

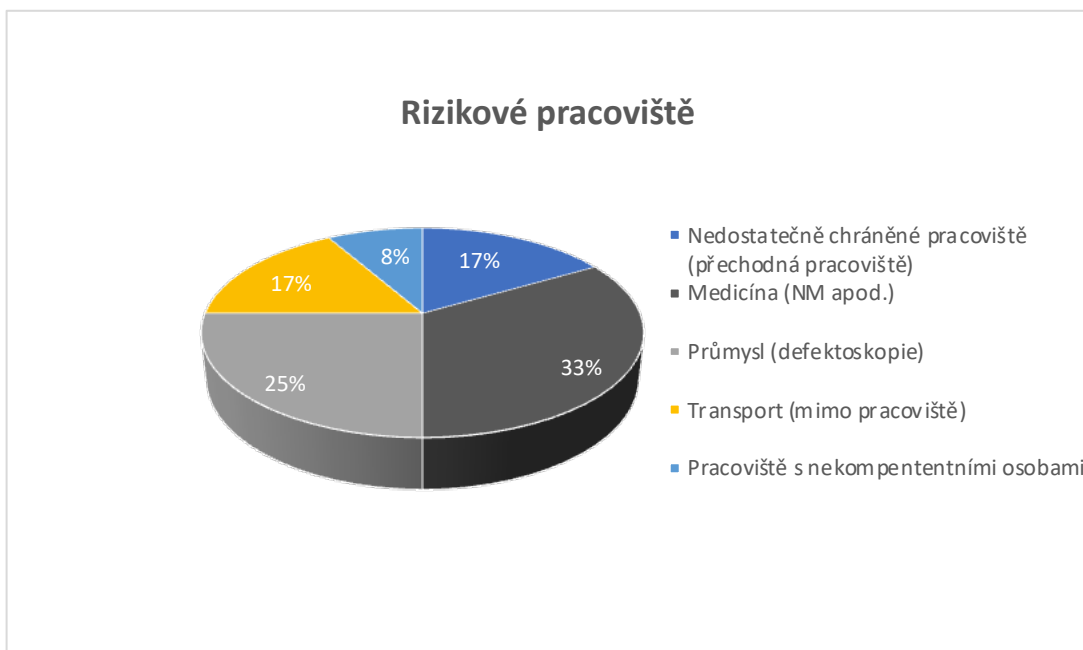
Odpovědi na otázku o největších nedostatcích v rámci zabezpečení ZIZ byli velmi různorodé. Radiologický pracovník například pociťuje značný nedostatek v nedbalém vedení administrativní agendy, a zároveň i v ne příliš důsledném dodržování pravidelných zkoušek dlouhodobé stability a provozní stálosti. Vyjádřena byla i obava jednoho z hasičů z tzv. Sloní nohy v Černobyli. Jedná se o substanci jménem korium – roztavenou část aktivní zóny reaktoru, a to včetně paliva a moderátoru – uranu a grafitu, reagujícím s betonem a dalšími materiály, jež byly použity při konstrukci obálky reaktoru. Je zjevné, že odborníkovi je dobře známá nehoda v JE Černobyl, a je si vědom nebezpečí pramenícího z velkého množství toxických substancí které zůstaly na místě havárie. Čtyři z jedenácti dotazovaných se nejvíce obávají materiálů, se kterými pracují, nebo které se týkají jejich specializace – např. URZ v defektoskopii či radiofarmaka. V rámci

významných nedostatků zabezpečení ZIZ se pak téměř polovina respondentů obává zejména lidského selhání. Myslím si, že lidský faktor lze obecně považovat za nejrizikovější vzhledem k tomu, že závažnou chybu lidského činitele může mnohdy zapříčinit pouhá nepozornost. Žádný z respondentů si však nemyslí, že by JE na území ČR byly nedostatečně, či špatně zabezpečené. Jelikož JE mají ze všech pracovišť zřejmě nejlepší bezpečnostní prvky chránící RA materiály, myslím si, že je jejich názor s velkou pravděpodobností relevantní. V ostatních, například hůře financovaných odvětvích, někteří respondenti vidí značné nedostatky v zabezpečení ZIZ. Obávají se například nedostatečné údržby, či nedodržování všech důležitých pravidel. Tento názor patrně pramení z vlastní zkušenosti některých dotazovaných.

Sekce druhá: Oblast vztahující se k pracovištím se ZIZ

Respondentům jsem v této sekci položila otázku, které pracoviště, jež disponuje se ZIZ považují za nejrizikovější. Jeden pracovník HZS se uvedl jako nejrizikovější takové pracoviště, ve kterém provádí úkoly nepoučená nebo ne úplně prověřená osoba, případně pokud se na pracovišti střídá více osob. Na tuto odpověď lze volně navázat získaným poznatkem plynoucím z druhé otázky z první sekce. Kdy zaměstnanec JE uvedl, že přestože nešlo o úmysl, došlo v důsledku nekompetentnosti osoby k neoprávněnému nakládání s RA materiálem. Z toho lze usoudit, že nekompetentnost osob může vést k neoprávněnému nakládání se zdroji, a v případě nejhoršího možného scénáře též například k nehodě.

Na obrázku 19 je uveden přehled pracovišť, které odborníci uvedli jako nejrizikovější.



Obrázek 19 – Rizikové pracoviště dle dotazovaných odborníků [autor]

Z obrázku 19 je zjevné, že za nejrizikovější oblast je považováno zdravotnictví a následně průmysl. Tento výsledek je v souladu s teoretickou částí práce, jež pojednává o ZIZ v jednotlivých odvětvích, na jejímž základě lze usuzovat, že konkrétně ve zdravotnictví a průmyslu je ve velké míře nakládáno s jednoduchými i významnými ZIZ. Většina respondentů se neobává zneužití RA materiálů a ZIZ na území ČR – pravděpodobnost odcizení považují spíše za minimální, nebo velmi nízkou.

Dále lze zdůraznit, že z odpovědí na otázku týkající se bezpečnostních prvků pracovišť se ZIZ vyplynulo, že všichni dotazovaní mají určité povědomí o ochranných prvcích zastrešujících bezpečnost RA materiálů a ZIZ. Avšak ne všichni se ke konkrétním bezpečnostním prvkům vyjádřili blíže. A to jednak z důvodu, že nechtěli vyrazovat citlivé detaily, jež jsou nevhodné pro sdělení veřejnosti, a jednak z důvodu toho, že se necítili být adekvátně kompetentní, aby konkrétní prvky zmínili.

V oblasti transportu RA materiálů a ZIZ se většina domnívá, že úroveň zabezpečení při přepravě je dostatečná, nebo velmi dobrá. Na otázku ohledně případného zlepšení oblasti zabezpečení při transportu většina dotazovaných neodpověděla přímo, nicméně část respondentů považuje za důležité zajištění dodržování platné legislativy.

Jeden z respondentů dokonce uvedl a navrhl, že zlepšení by bylo možné například v zajištění lepšího stínění RA materiálů a ZIZ, a rovněž ve zlepšení fyzické ochrany ve formě doprovodu vozidel.

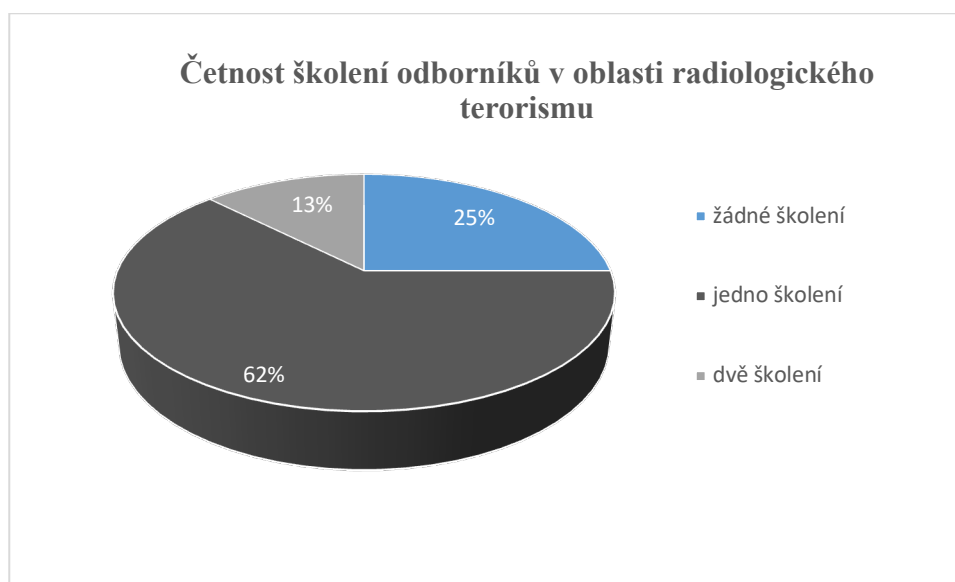
Sekce třetí: Oblast vztahující se k radiologickému terorismu

V této sekci byla s odborníky řešena oblast dotýkající se radiologických zbraní a rizika jejich použití. Konkrétně byla odborníkům položena otázka, zda je použití špinavé bomby reálné na území ČR. Odpovědi na tuto otázku potvrdili stanovenou hypotézu č. 2. Většina respondentů totiž považuje hrozbu použití špinavé bomby na území ČR za reálnou. I přesto, že pravděpodobnost takové události je dle dotázaných buďto malá, nebo velice nízká, nelze ji zcela vyloučit. Avšak pravděpodobnější dle některých expertů je, s přihlédnutím k aktuální krizové situaci ve světě, možné použití takové bomby jinde na území NATO. Názor odborníků na možnost reálného použití radiologické zbraně na území České republiky zjišťovala i Dražanová [91]. Dotazovala se celkem 5 odborníků, a výsledky ukázaly, že se všichni jednoznačně shodli, že toto riziko nelze vyloučit, avšak že pravděpodobnost takové činu je velmi malá. Lze tedy podotknout, že v této práci bylo dosaženo obdobných výsledků. Na základě názorů jedenácti odborníků, jež byli osloveni v rámci realizace této práce, a na základě práce Dražanové [91], lze usoudit, že riziko použití špinavé bomby je sice reálné, byť málo pravděpodobné.

Předposlední otázka, jež byla pro realizaci této práce odborníkům položena, se týkala připravenosti IZS. Nad otázkou, zda je IZS a další dotčené orgány dostatečně připraven na hrozbu radiologického terorismu se odborníci od HZS jednoznačně shodli, že ano. Důvodem jejich jednohlasného výroku může být fakt, že složky IZS pravidelně spolu s dotčenými orgány státní správy cvičí témata špinavé bomby, radiační havárie a události se ZIZ, Dále pravidelně měří úroveň radiace při zásahu a disponují osobními ochrannými prostředky. Pro řešení události s přítomností RA látek a IZ mají zpracované lokální, regionální i republikové plány a postupy. Mají vybudovaný systém předávání zpráv a informací jak v rámci ČR, tak v rámci mezinárodní informační sítě, které jsou trvale funkční. Vzhledem k tomu, že většina příslušníků HZS se některých zmíněných úkonů účastní, jsem toho názoru, že tuto problematiku dokážou adekvátně posoudit, a jsou si vědomi veškerých předvídatelných možností v případě prevence

před radiologickým terorismem. Většina respondentů z ostatních specializací se k názoru, že IZS je dobře připraven přiklání. Jeden z respondentů se například domnívá, že IZS v zóně havarijního plánování je připraven výrazně lépe než v ostatních lokalitách. S tímto názorem souhlasí i další respondent od HZS Středočeského kraje, který si myslí, že kraje na jejichž územně správním obvodu se nachází JE, jsou připraveny lépe než ostatní kraje, v nichž se JE nenacházejí.

V souvislosti s radiologickým terorismem podstupuje většina respondentů školení, avšak v závislosti na pracovní pozici se značně liší četnost těchto školení (obrázek 20).



Obrázek 20 – Četnost školení odborníků v oblasti radiologického terorismu [autor]

Z obrázku 20 je patrné, že dohromady 75 % odborníků podstupuje školení alespoň jednou za rok. Dále mohu na základě odpovědí na otázky podotknout, že dvě školení podstupuje například vedoucí chemické služby HZS. Žádné školení nepodstupují zejména radiologičtí pracovníci. Ti by však takové školené ocenili, jelikož by si, dle jejich názoru, tato oblast zasloužila větší pozornost. Zajímavé je, že dva pracovníci od HZS uvedli, že žádná školení v oblasti radiologického terorismu v rámci své pracovní činnosti nepodstupují, nicméně se v této oblasti vzdělávají sami, a to zejména tím, že pracují s dokumenty, které se této problematice věnují – například typový plán pro Radiační

havárie. Dle mého názoru je iniciativa a zájem o vzdělávání ze strany příslušníků, kteří školení nepodstupují velmi přínosná.

6.3 Vyhodnocení hypotéz

V teoretické i praktické části byly shrnuty základní poznatky týkající se problematiky možností zneužití RA materiálů a ZIZ, na jejichž základě lze vyhodnotit stanovené hypotézy. V diplomové práci jsem si stanovila následující hypotézy.

Hypotéza 1:

V první hypotéze byl stanoven předpoklad, že radionuklid ^{60}Co je potenciálně rizikovější z hlediska biologických účinků než radionuklid ^{239}Pu . Na základě analýzy literatury a diskuze analýzy výsledků z programu Terex byla tato hypotéza vyvrácena.

Hypotéza 2:

Tato hypotéza byla formulována takto – Radiologický terorismus představuje na území České republiky reálnou, byť málo pravděpodobnou hrozbu. Na základě provedených rozhovorů a zhodnocených rozhovorů ve výzkumné části práce byla hypotéza potvrzena.

7 ZÁVĚR

Tato práce měla za cíl vytvoření přehledu, kde se RA látky a ZIZ mohou využívat. Přehled jejich využití, zejména ve zdravotnictví a průmyslu, byl proveden v teoretické části práce. Dále bylo cílem provedení analýzy možného zneužití a neoprávněného držení RA látek a ZIZ. První část analýzy byla zaměřena spíše na incidenty, jež se odehrály z nedbalosti. Druhá část pak byla vztažena zejména k úmyslným činům. V rozboru jsou popsány pokusy o výrobu a použití radiologické zbraně jednotlivcem i teroristickou skupinou. S tímto úzce souvisí následující cíl této práce zhodnocení rizika radiologického terorismu. V rámci zhodnocení byla pozornost věnována radiologickým zbraním typu RDD, RID a RED. Následně i radionuklidům vhodným pro jejich sestavení, a to zejména z hlediska jejich možných účinků na zdraví a životní prostředí.

Cílem praktické části bylo nasimulovat, a následně vyhodnotit dvě modelace v softwarovém programu TeRex. Obě modelace zahrnují scénář použití radiologické zbraně na Staroměstském náměstí, avšak s obsahem odlišného radionuklidu v náloži. Výsledky a nedostatky modelací jsou následně diskutovány a porovnávány na základě výsledků jiných publikací v diskuzi. Z výsledků lze usuzovat, že použití špinavé bomby s radionuklidem ^{239}Pu by zapříčinilo vážnější kontaminaci prostředí, a zároveň i vážnější zdravotní důsledky vzhledem k emitovanému druhu záření.

Pro ucelení představy o úrovni bezpečnosti RA materiálů a zdrojů, o pracovištích se zdroji či radiologickém terorismu, byly v rámci výzkumné části provedeny strukturované rozhovory s odborníky, kteří se ZIZ buďto přímo zacházejí, nebo mají o této problematice povědomí v důsledku svého pracovního zaměření. Díky strukturovaným rozhovorům skládajícím se celkem z 11 otevřených otázek bylo možné od respondentů získat spontánní odpovědi na základě jejich znalostí, zkušeností a názorů na zkoumanou problematiku. Z názorů odborníků je patrné, že riziko použití špinavé bomby je na území ČR reálné, avšak velmi málo pravděpodobné.

Závěrem bych zmínila doporučení, jak lze možnostem zneužití radioaktivních materiálů předcházet. Jednou z možností je dle mého názoru zvýšení fyzické ochrany na defektoskopických pracovištích. Další možností je dle mého názoru i zvýšení kybernetické bezpečnosti v internetovém rozhraní, kde si – jak známo lze RA materiály obstarat nelegální cestou.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ADR – Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečného zboží

ADR – Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečného zboží

AERB – Rada pro regulaci atomové energie v Indii

CBRN – bojové, chemické, radiologické a nukleární

CT – výpočetní tomografie

ČR – Česká republika

DAP – dusičnan amonný a palivo

EPR – elektronová paramagnetická rezonance

EU – Evropská unie

EURATOM – Evropské společenství pro atomovou energii

FO – fyzická osoba

HZS – Hasičský záchranný sbor

IAEA – Mezinárodní agentura pro atomovou energii

ICRP – Mezinárodní komise pro radiační ochranu

IDLH – bezprostředně nebezpečné pro život nebo zdraví

IZ – ionizující záření

IZS – Integrovaný záchranný systém

JE – jaderná elektrárna

JPO – jednotka požární ochrany

MAAE – Mezinárodní agentura pro atomovou energii

NATO – severoatlantická aliance

NORM – přirozeně se vyskytující radioaktivní materiál

NL – nebezpečné látky

NEMS – národní systém energetického modelování

ORZ – otevřený radionuklidový zářič

OSN – organizace spojených národů

PCO – pult centrální ochrany

PFO – podnikající fyzická osoba

PO – právnická osoba

PREVOS – prevence předčasné postmenopauzální ztráty kostní hmoty stroncium renelátem

PTSD – posttraumatická stresová porucha

RA – radioaktivní

RDD – radiologické disperzní zařízení

RED – radiologické expoziční zařízení

RID – radiologické zápalné zařízení

RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných látek

RMU – radiační mimořádná událost

RTG – rentgenové zařízení

STRATOS – stroncium administrace pro léčbu osteoporózy

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SÚRO – Státní ústav radiační ochrany

TOS – transportní obalový soubor

URZ – uzavřený radionuklidový zdroj

WNA – světová jaderná asociace

ZIZ – zdroje ionizujícího záření

ŽP – životní prostředí

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. DRÁBKOVÁ, Alena, SÚRO. v.v.i., RADOM Bulletin. 2016. ISSN 2336-7733
2. Rozhodnutí Rady 2013/517/SZBP ze dne 21. října 2013 „o podpoře poskytované Unii na činnosti Mezinárodní agentury pro atomovou energii v oblasti jaderného zabezpečení a kontroly a v rámci provádění strategie EU proti zbraní hromadného ničení“. 2013.
3. BOHÁČ, Radim a kol., Ministerstvo vnitra ČR. Legislativní proces (teorie a praxe). Tiskárna Ministerstva vnitra, s. p. o. 2011. © kolektiv autorů, Praha 2011
4. Zákon č. 263/2016 Sb., Atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů.
5. Zákon č. 18/1997 Sb., Zákon o mírovém využití jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon), ve znění pozdějších předpisů.
6. Vyhláška č. 374/2016 Sb., Vyhláška o evidenci a kontrole jaderných materiálů a oznamování údajů o nich, ve znění pozdějších předpisů.
7. Vyhláška č. 375/2016 Sb., Vyhláška o vybraných položkách v jaderné oblasti, ve znění pozdějších předpisů.
8. Vyhláška č. 376/2016 Sb., Vyhláška o položkách dvojího použití v jaderné oblasti, ve znění pozdějších předpisů.
9. Vyhláška č. 422/2016 Sb., Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, ve znění pozdějších předpisů.
10. SÚJB. *Postup při záchytu radioaktivních materiálů*. Doporučení. MORAVIATISK Vyškov spol. s. r. o. Praha. 2002. [online] dostupné z https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Zachyt_rad_materialu.pdf
11. PEJCHAL, Jaroslav. *Biofyzika pro záchranáře*. [Hradec Králové]: Univerzita obrany, 2013. Studijní texty Fakulty vojenského zdravotnictví Univerzity obrany v Hradci Králové, sv. 369, 371. ISBN 978-80-7231-352-5.
12. PODZIMEK, František. *Radiologická fyzika*. V Praze: České vysoké učení technické, 2021. ISBN 978-80-01-06829-8.
13. HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno: Konvoj, 1998. ISBN 80-85615-56-8.
14. SÚJB. *Radiační ochrana. Uzavřené radionuklidové zářiče v brachyterapii*. 1998.
15. SÚJB. *Dokumenty a publikace. Výroční zprávy SÚJB*. [online] dostupné z: <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/vyrocnizpravy>

16. ŠTAMBERG, Karel. *Technologie jaderných paliv II*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2017. ISBN 978-80-01-06077-3.
17. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements*. 2022. [online] dostupné z <<https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requirements.aspx>>
18. SÚJB. Jaderná bezpečnost. Jaderná zařízení v ČR. SÚJB. [online] dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/jaderna-zarizeni-v-cr>>
19. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, Školní reaktor VR-1. Reaktor VR-2. Praha. 2017. dostupné z: <https://reaktor-vr1.cz/cz/reaktor/reaktor-vr-2>
20. KROPÍK, Martin. *Bezpečnostní systémy jaderných reaktorů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05907-4.
21. MATOUŠEK, Jiří, Jan ÖSTERREICHER a Petr LINHART. *CBRN: jaderné zbraně a radiologické materiály*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2007. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-029-6.
22. MPO ČR. Koncepce nakládání s RAO a VJP. Praha. 2001. [online] dostupné z <https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/02/487_2002.pdf>
23. SÚJB. Doporučení. Radiační ochrana na přechodných defektoskopických pracovištích se zdroji ionizujícího záření. Radiační ochrana. č.j. SÚJB/RCHK/20826/2020. DR-RO-4.0 (Rev. 0.0). Praha. 2020. [online] dostupné z <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/067/52067328.pdf>
24. SOPKO, Vít a Ladislav SAMEK. Repetitorium z fyziky pro přijímací zkoušky na TU. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03446-1.
25. Státní ústav radiační ochrany, Základní pojmy. © 2022 SÚRO. [online] dostupné z: <<https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/zakladni-pojmy>>
26. HAVRÁNKOVÁ, Renata, ed. *Klinická radiobiologie*. Praha: Grada Publishing, 2020. ISBN 978-80-247-4098-0.
27. KRÍVOHLÁVEK, Jiří, Ionizující záření v životním prostředí. dostupné z: <https://is.muni.cz/do/sci/UChem/um/kavarna/docs/radioaktivita.pdf?fbclid=IwAR2uPZdiVKelkuertP8kDg5PNzGWbX8IV7pC6Pth-fKg4YN7VDIzmK5WUXc>

28. SÚKUPOVÁ L. Rozdíl mezi rentgenkami. Rubrika. Radiodiagnostika – technické aspekty zobrazování. 2016. [online] dostupné z <<http://www.sukupova.cz/rozdil-mezi-rentgenkami/>>
29. KLENER, Vladislav. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
30. 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.
31. VALA, Martin. *Analýza defektů na DPS za použití moderních optických metod* [online]. Brno, 2016 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60942>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Pavel Řihák.
32. Vyhláška 133/2004 Sb., Vyhláška o podmínkách ozařování potravin a surovin, o nejvyšší přípustné dávce záření a způsobu označení ozáření na obalu, ve znění pozdějších předpisů.
33. MINISTERSTVO DOPRAVY. Dohoda ADR 2021. [online] dostupné z:<[https://www.mdcz.cz/Dokumenty/Silnicni-doprava/Nakladni-doprava-a-mezinarodni-osobni-doprava/Nakladni-doprava-\(1\)/Preprava-nebezpecnych-veci-dohoda-adr/Dohoda-ADR-2021](https://www.mdcz.cz/Dokumenty/Silnicni-doprava/Nakladni-doprava-a-mezinarodni-osobni-doprava/Nakladni-doprava-(1)/Preprava-nebezpecnych-veci-dohoda-adr/Dohoda-ADR-2021)
34. BOZP.CZ. Dokumentace. Přeprava nebezpečných látek a věcí v režimu ADR. 2018. Copyright © 2022 CRDR spol. s r.o. [online] dostupné z: <<https://www.dokumentacebozp.cz/aktuality/adr-preprava-nebezpecnych-latek-a-veci/>
35. Sdělení č. 29/1998 Sb., Sdělení Ministerstva zahraničních věcí o vyhlášení Přílohy I – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečného zboží (RID) Přípojku B – Jednotné právní předpisy pro smlouvu o mezinárodní železniční přepravě zboží (CIM) k Úmluvě o mezinárodní železniční přepravě (COTIF) ze dne 9. května 1980 (úplné znění, jak vyplývá z pozdějších změn a doplnění)
36. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
37. SKUPINA ČEZ. Výroční zpráva. 2020.[online] dostupné z: <<https://www.cez.cz/cs/pro-investory/hospodarske-vysledky/vyrocnizpravy?cardId=142590>>
38. Pardubický kraj, *Závěrečná zpráva, případ Bělá na Svitavou*, Pardubice, 2011

39. TSILIKIS, Ioannis a kol., Radiological Risks from Potential Exposure of the Population to Radiation from Radioactive Sources. Review paper. Copyright © 2019 Health Physics Society. DOI: 10.1097/HP.0000000000001003.
40. BIS. Terorismus. © 2022 Bezpečnostní informační služba Zpravodajská služba České republiky. [online] dostupné z: <<https://www.bis.cz/terorismus/>>
41. MV ČR. *Analýzy. TE-SAT 2021*. © 2022 Ministerstvo vnitra České republiky. [online] dostupné z: <<https://www.mvcr.cz/cthh/clanek/te-sat-2021.aspx?fbclid=IwAR3A53mvFHkJgCnuslq5sWpFTAatNZGrtiQhz2SupK8nbcGNuVmvltgx9Ec>>
42. SABOL, Josef., NAVRÁTIL, Leoš., ŠESTÁK, Bedřich a HUDZIETOVÁ, Jana., Evropská unie a radiologický terorismus. 17. mezinárodní vedecká konferencia. Riešenie krízových situácií v špecifickom prostredí. 2012. [online] dostupné z: <http://fbiw.uniza.sk/rks/2012/articles/clanky/sabol.pdf?fbclid=IwAR3Zi8KA924qyYmUlpH77hog7KcXIwvF9800L-JUvO4NCw5o_06Q5Rr3kc>
43. KARAM A.P., *Radiological Terrorism. Human and Ecological Risk Assessment*. 11. 2005. Copyright: Taylor & Francis Inc. ISSN: 1549-7680.
44. PROUZA, Zdeněk a Jiří ŠVEC. *Zásahy při radiační mimořádné události*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-046-3.
45. VŠB. *Metodický postup. Metodika pro zasahující pyrotechniky*. [online] dostupné z <<https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/060/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/HodnoceniDopaduHavarie/Priloha5.1.3.pdf>>
46. FERGUSON CH. D., SMITH M.M. *Assesing Radiological Weapons: Attack Methods and Estimated Effects. Defence Against Terrorism Review*. Vol. 2, No. 2, 2009. Copyright © COE-DAT. ISSN: 1307-9190
47. Vyhláška č. 72/1988 Sb., Vyhláška Českého báňského úřadu o výbušninách.
48. Hornická skripta. *Trhací práce*. [online] dostupné z: <<http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/technika/odstrely.htm>>
49. MEDALIA, Jonathan., *Dirty Bombs: Technical Background. Attack Prevention and Response, Issues for Congress*. CRS Report for congress. R41890. 2011. [online] dostupné z: <<https://sgp.fas.org/crs/nuke/R41890.pdf>>
50. United States Environmental Protection Agency. Radionuclides. [online] dostupné z:

- <https://www.epa.gov/radiation/radionuclides?fbclid=IwAR3ypebPeWBzhPAGwoKxWQYgYb3DM6S43MMgmJ-eDbK3eJQpK6JXTAKjp18>
51. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Radiation Protection. Radionuclide Basics: Americium – 241*. 2021. [online] dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-ameridium-241>
 52. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Radiation Protection. Radionuclide Basics: Cesium - 137*. 2021. [online] dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-caesium-137>
 53. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Radiation Protection. Radionuclide Basics: Cobalt – 60*. 2021. [online] dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-cobalt-60>
 54. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Radiation Protection. Radionuclide Basics: Plutonium*. 2021. [online] dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-plutonium>
 55. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Radiation Protection. Radionuclide Basics: Stroncium - 90*. 2021. [online] dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-strontium-90>
 56. FRANĚK, T., PRŮŠA, R., KUKAČKA, J., KIZEK, R. Klinická biochemie a metabolismus. Stroncium v laboratorní medicíně. 4/2009. [online] dostupné z: <http://www.cskb.cz/res/file/KBM-pdf/2009/4-09/KBM-4-09-Franek-239.pdf>
 57. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Radiation Protection. Radionuclide Basics: Uranium*. 2021. [online] dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-uranium>
 58. Public Health. Depleted Uranium. [online] dostupné z: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/depleted-uranium/en/1-2/4.htm?fbclid=IwAR0e9GvOlAurn6SksocKLV3nhIq62Q_ZhyraLSbNK4XtR8oJwWVOb4U81-c#3
 59. Radiobiologie. Záření alfa. [online] dostupné z: http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/14/141.html?fbclid=IwAR2z1lWiSgfv5cbos7KVosdkEWtYL3x_n_f4lrRn62mCzcLEjRtIs5zAmUM
 60. BROAD, William., WISCONSIN PROJECT ON NUCLEAR AMRS CONTROL. Document Reveals 1987 Bomb Test ty Iraq. The New Your Times. 2001. Copyright © 1999–2022. [online] dostupné z:

<https://www.wisconsinproject.org/document-reveals-1987-bomb-test-by-iraq/?fbclid=IwARlrOPd9OnroukEk6Sh1pgjzZ3OoyCe2rW6JwKmduSPf9m7dlWjF7NHFFtQ>

61. VIČAR, Dušan., PRINC, Ivan., MAŠEK, Ivan., MIKA Otakar Jiří., *Jaderné, radiologické a chemické zbraně, radiační a chemické havárie*. Uherské hradiště. 2020. ISBN 978-80-7454-947-2.
62. KROCK, Lexi and DEUSSER, Rebeca., *NOVA. Science Programming on Air and Online. Dirty Bomb. Chronology of Events*. [online] dostupné z:< <https://www.pbs.org/wgbh/nova/dirtybomb/chrono.html>>
63. ACKERMAN G., TAMSETT J., *Jihadists and Weapons of Mass Destruction*. CRC Press, © 2009 by Taylor & Francis Group, LLC, ISBN 978-1-4200-6964-8
64. BBC NEW SERVICES. Convicted terrorist Padilla given new 21year sentence. 2014. © 2022 BBC. [online] dostupné z:< https://www.bbc.com/news/world-us-canada-29131833?fbclid=IwAR1bRCE_IPUwQqxkqNB-HGN9AdJAGzM56VT9b6zBU5YBHX7uw4i8MYAY6JQ>
65. OBODOVSKIY, Ilya., *Radiation, Fundamentals, Applications, Risks, and Safety*. Copyright © 2019 Elsevier B.V. ISBN 978-0-444-63979-0.
66. DATABÁZE POČASÍ. Meteoblue. Simulované historické údaje o počasí pro Praha. [online] dostupné z:< https://www.meteoblue.com/cs/počas%C3%AD/historyclimate/climatemodelled/praha_Česko_3067696>
67. MAPY.CZ. Turistická mapa. [online] dostupné z:< <https://mapy.cz/zakladni?x=15.6252330&y=49.8022514&z=8&q=Staroměstský+orloj&source=base&id=2066267>>
68. PRAGUE CITY TOURISM. Old town Hall. [online] dostupné z:< <https://www.praguecitytourism.cz/en/our-services/old-town-hall>>
69. WATERCOOLER SYSTEM. *Slovníček pojmů*. [online] dostupné z:<<https://w-system.cz/slovnicek-pojmu/>>
70. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. *Center for Disease Control and Prevention*. National Institute of Occupational Safety and Health. 2017. [online] dostupné z: <<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2017-107/pdfs/2017-107.pdf>>
71. RUBIN, Aleš., a RUBINOVÁ, Olga. *Vzduchotechnický systém pro větrání budov s rekuperací. Vnitřní prostředí budov a tepelná pohoda člověka*. 2005. [online]

- dostupné z:< <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/2650-vnitri-prostredi-budov-a-tepelna-pohoda-cloveka>>
72. FALTUS, Zdeněk. *Přehled jednotek tlaku*. [online] dostupné z:<<https://www.kalibratory.cz/wp-content/uploads/PŘEHLED-JEDNOTEK-TLAKU.pdf>>
73. Ministerstvo vnitra České republiky. *Program bezpečnostního výzkumu ČR. Metodika hodnocení dopadu havárie a minimalizace teroristického útoku*. 2015. [online] dostupné z:<<https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/060/.content/galerie-souboru/studijni-materialy/HodnoceniDopaduHavarie/HodnoceniDopaduHavarie.pdf>>
74. SABOL, Josef a kol. (XX), *Bezpečnostní teorie a praxe 2/2021*. Policejní akademie ČR v Praze. Fakulta bezpečnostního managementu, Katedra krizového řízení
75. FEURGUSTON CH.D., a kol., *Comercial Radioactive Sources: Surveying the Security Risks*
76. ALEKSÌJEVIČ, Svjatlana Aljaksandraŭna. *Modlitba za Černobyl: kronika budoucnosti*. Přeložil Milan JUNGMANN, přeložil Libor DVOŘÁK. Příbram: Pistorius & Olšanská, 2017. ISBN 978-80-87855-76-8.
77. *Dědictví Černobylu: zdravotní, ekologické a sociálně ekonomické dopady: a, Doporučení vládám Běloruska, Ruské federace a Ukrajiny*. [Praha]: ČSVTS, 2006. ISBN 80-02-01806-0.
78. PUDIL, Jiří. *Poranění při explozích. Urgentní medicína: časopis pro neodkladnou lékařskou péči*. 10. České Budějovice: MEDIPRAX CB, 2007. ISSN 1212-1924.
79. MARTÍNKOVÁ, Lenka., *Psychologie chování davu: síla i šílenství*. 2017. [online] dostupné z:< <https://psychologieprokazdeho.cz/chovani-davu/>>
80. ŠTĚTINA, Jiří. *Zdravotnictví a integrovaný záchranný systém při hromadných neštěstích a katastrofách*. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-4578-7.
81. LE BON, Gustave. *Psychologie davu*. Vydání čtvrté, v Portále první, revidované. Přeložil Ladislav HOFMAN, přeložil Zdeněk ULLRICH. Praha: Portál, 2016. ISBN 978-80-262-1028-3.
82. HAŠTO, Jozef a Hana VOJTOVÁ. *Posttraumatická stresová porucha, bio-psycho-sociálně aspekty EMDR a autogénny tréning pri pretrvávajúcom ohrození: prípadová štúdia*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-2944-1.

83. HZS ČR. *Činnosti k zabezpečení radiační ochrany při výjezdu a zjištění radiační události*. 2022.
84. STÁTNÍ ÚSTAV RADIAČNÍ OCHRANY, v.v.i. *Mapa hodnot dávkového příkonu na území ČR*. [online] dostupné z:<<https://www.suro.cz/cz/faq/jake-hodnoty-davkoveho-prikonu-muzeme-v-cr-ocekavat>>
85. *Bojový řád jednotek požární ochrany*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2017. ISBN 978-80-7385-026-5.
86. PRCHAL, Karel. Diplomová práce. Radiologické zbraně jako bezpečnostní hrozba pro Českou republiku. 2017. CEVRO Institut. vedoucí práce plk. prof. MUDr. Jan Österreicher, Ph.D.
87. Věstník MZ ČR. *Střediska specializované zdravotní péče pro ozářené při radiačních nehodách*. 2013. [online] dostupné z:<<https://www.mzcr.cz/wp-content/uploads/wepub/8286/36181/Vestn%C3%ADk%20MZ%20CR%205-2013.pdf>>
88. VAMAN, V. D., and ACASANDREI, T. V. Modeling and Simulation of Radiological dispersion Device Events. 2016. [online] dostupné z: <http://www.rrp.infim.ro/IP/AN714.pdf>
89. PROUZA, Zdeněk a kol., Radiologický terorismus z pohledu zajištění požadavků radiační ochrany. 2008.
90. KOTYZA, Michal. Diplomová práce. Teroristický útok za použití vybraných CBRN agens a činnosti složek integrovaného záchranného systému ve vybraném městě. ČB. 2015. vedoucí práce Ing. Lenka Brehovská, Ph.D.
91. DRAŽANOVÁ, Kristýna. Diplomová práce. Radiologický terorismus. ČB. 2018. vedoucí práce Mgr. Renata Havránková, Ph. D.

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 – Přehled počtu URZ na území ČR za dané období [15]..... | 16 |
| Obrázek 2 – Deterministické účinky IZ [27] | 22 |
| Obrázek 3 – Stochastické účinky IZ [27]..... | 25 |
| Obrázek 4 – Přeprava RA materiálů a ZIZ uskutečněná v ČR za dané období [15].. | 34 |
| Obrázek 5 – Nalezené jaderné materiály – Uranyl nitrát a Uranyl chlorid [38]. | 37 |
| Obrázek 6 – Nalezený Pentrit a další neznámé výbušniny [38]..... | 37 |
| Obrázek 7 – Radiologická zbraň sestavená za vlády Saddama Husseina [61] | 47 |
| Obrázek 8 – Nalezený balík v Izmailovském parku obsahující ¹³⁷ Cs [62]..... | 47 |
| Obrázek 9 – Znázornění umístění radioaktivního zdroje v křesle Vladimíra Kapluna [65]..... | 49 |
| Obrázek 10 – Orloj na Staroměstské radnici [68] | 55 |
| Obrázek 11 – Výsledek výpočtu programu [TerEx] | 56 |
| Obrázek 12 – Vyjádření závislosti koncentrace na vzdálenosti [TerEx] | 57 |
| Obrázek 13 – Závislost přetlaku rázové vlny na vzdálenosti od epicentra výbuchu [TerEx]..... | 59 |
| Obrázek 14 – Vizualizace výsledku modelování šíření prachových částic explozí na mapovém podkladu [TerEx] | 60 |
| Obrázek 15 – Grafické zobrazení typu stopy [TerEx] | 61 |
| Obrázek 16 – Vizualizace výsledku modelace na mapovém podkladu [TerEx]..... | 62 |
| Obrázek 17 – Přehled bezpečnostních prvků zajišťující ochranu ZIZ a RA materiálů [autor] | 66 |
| Obrázek 18 – Přehled léčebné kapacity středisek specializované péče pro ozářené osoby ČR [87]..... | 75 |
| Obrázek 19 – Rizikové pracoviště dle dotazovaných odborníků [autor] | 83 |
| Obrázek 20 – Četnost školení odborníků v oblasti radiologického terorismu [autor] | 85 |

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 2 – Typy transportních obalových souborů (TOS) [33,34]..... | 32 |
| Tabulka 3 – Kategorie kusů a přepravních obalových souborů [33,34]. | 32 |
| Tabulka 4 – Přehled nalezených RA látek [38]..... | 36 |
| Tabulka 5 – Přehled nalezených prekurzorů k výrobě trhaviny [38]. | 36 |
| Tabulka 6 – Přehled záchytů RA materiálů a ZIZ SÚJB na území ČR v letech 2011– 2021 [15]. | 38 |
| Tabulka 7 – Odhadovaná dávka záření u hospitalizovaných osob [39]. | 39 |
| Tabulka 8 – Přehled havarijních modelů [TerEx] | 53 |
| Tabulka 9 –Pravděpodobnost zranění osob dopadajícím přetlakem tlakové vlny [73] | 58 |
| Tabulka 10 – Poškození objektů dopadajícím přetlakem tlakové vlny [73]..... | 58 |
| Tabulka 11 – Rozdílnost vzdáleností pro jednotlivé typy výbušnin [TerEx] | 63 |
| Tabulka 12 – Nebezpečné zdroje ionizujícího záření [89] | 79 |

12 SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|--|-----|
| Příloha A – Přehled nejčastěji používaných radiofarmak v nukleární medicíně (KUPKA a kol.) | 101 |
| Příloha B – Formulář pro odborníky obsahující výzkumné otázky do praktické části DP | 102 |

| Vyšetření | Radionuklid a radiofarmakum | Obvyklá aplikovaná dávka (MBq) |
|--|---|--|
| Ventrikulografie | ^{99m}Tc -erythrocyty ^{99m}Tc -albumin | 700 MBq |
| Radiokardiografie | ^{99m}Tc -DTPA (diethylenetriaminpentaoctová kyselina) ^{99m}Tc -MAG ₃ (merkaptocetyltriglycin) ^{99m}Tc -technecistan sodný | 700 MBq |
| Perfuzní scintigrafie plic | ^{99m}Tc - MAA (makroagregát albuminu) | 200 MBq |
| Ventilační scintigrafie plic | ^{81m}Kr plyn ^{99m}Tc -aerosoly (kapalné fáze) | 6 000 MBq (v generátoru) 2 000 MBq (v nebulizátoru) |
| Scintigrafie ledvin statická | ^{99m}Tc -DMSA (dimerkaptojantarová kyselina) | 100 - 150 MBq |
| Scintigrafie ledvin dynamická | ^{99m}Tc -DPTA (diethylenetriaminpentaoctová kyselina) ^{99m}Tc -MAG3 (merkaptocetyltriglycin) ^{123}I (orthoiodhippuran sodný) | 200 MBq 70 - 100 MBq |
| Lymfoscintigrafie | ^{99m}Tc (nanokoloid) | 100 MBq |
| Endokrinologie - scintigrafie štítné žlázy | $\text{Na } ^{99m}\text{TcO}_4$ pertechnetát ^{99m}Tc -MIBI (metoxyisobutylisonitril) ^{123}I -Nal ^{18}F -chlorin (PET) | 150 - 200 MBq 700 - 800 MBq 100 MBq 100 - 200 MBq |
| Onkologie - scintigrafie nádorů | ^{18}F -FDG ^{18}F -cholin ^{18}F -FLT ^{18}F -DOPA ^{99m}Tc (difosfonáty) ^{123}I -Nal ^{131}I -Nal | 300 MBq 200 - 350 MBq 200 - 350 MBq 200 - 220 MBq 700 MBq 100 MBq 7,5 - 20 MBq |
| Perfuzní scintigrafie (SPECT) mozku | ^{99m}Tc -HMPAO (hexamethylpropylenaminoxim, exametazim) ^{99m}Tc -ECD (bicisát dihydrochlorid) | 700 - 800 MBq |



Vážený pane, vážená paní,

jmenuji se Karolína Peterková a jsem studentkou druhého ročníku magisterského studijního programu Civilní nouzové plánování na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT. Ve své diplomové práci na téma „Možnosti zneužití radioaktivních materiálů a zdrojů ionizujícího záření“ se zabývám problematikou neoprávněného nakládání s RA materiály a ZIZ, a také přehledem současného stavu, jež se týká této problematiky. Ráda bych se na Vás touto cestou obrátila s prosbou o zodpovězení otázek, které poslouží jako podklad pro zpracování výzkumné části mé práce. Zodpovězené otázky budou následně vyhodnoceny pouze s uvedením pracovní instituce/pozice, a Vámi poskytnuté údaje budou použity výhradně za účelem zpracování diplomové práce. Výstupem bude zjištění, jak se liší názory jednotlivých odborníků z různých institucí na aktuální situaci související se zneužíváním RA materiálů a ZIZ. V případě Vaší kladné reakce, bych Vás chtěla poprosit o zaslání odpovědí na emailovou adresu: peterka5@fbmi.cvut.cz. Pokud byste měl/a nějaké dotazy, neváhejte mě kontaktovat na této emailové adrese, kde se je pokusím zodpovědět.

Předem děkuji za Vaši ochotu, vstřícnost, a zejména za Váš čas.

Otázka č. 1: Jaká je Vaše specializace?

Sekce 1: Oblast vztahující se k úrovni bezpečnosti RA materiálů a ZIZ:

Otázka č. 2: Zaznamenal/a jste nějaké konkrétní případy neoprávněného nakládání se ZIZ a RA materiály? Jestliže ano, můžete jej prosím blíže specifikovat?

Otázka č. 3: Které RA materiály považujete za nejvíce nebezpečné?

Otázka č. 4: Domníváte se, že je vhodné informovat laickou veřejnost o detailech konkrétních incidentů, v nichž figurují RA materiály a ZIZ? Pokud ano, o kterých událostech či detailech by dle Vašeho názoru měla být veřejnost informována?

Otázka č. 5: V čem pociťujete největší nedostatky v rámci zabezpečení ZIZ?



Sekce 2: Oblast vztahující se k pracovištím se ZIZ:

Otázka č. 6: Jaká je podle Vás pravděpodobnost možného odcizení ZIZ na území ČR z pracovišť, které s těmito zdroji pracují? Jaké pracoviště se ZIZ je dle Vašeho názoru nejrizikovější?

Otázka č. 7: Víte, či máte povědomí tom, jaké ochranné prvky zabezpečují znemožnění odcizení RA materiálů a ZIZ z pracovišť, která s těmito zdroji zacházejí?

Otázka č. 8: Jaká je dle Vašeho názoru úroveň bezpečnosti v oblasti transportu RA materiálů a ZIZ? Co by se případně dalo zlepšit?

Sekce 3) Oblast vztahující se k radiologickému terorismu:

Otázka č. 9: Je dle Vašeho názoru použití špinavé bomby na území ČR reálné?

Otázka č. 10: Myslíte si, že je IZS a další dotčené orgány dostatečně připraven na hrozbu radiologického terorismu?

Otázka č. 11: Jak často podstupujete školení v souvislosti s hrozbou radiologického terorismu?