



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

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

Radiační mimořádné události s radiologickými dopady v ČR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: [Ochrana obyvatelstva](#)

Autor: Daniel Vazač

Vedoucí práce: Mgr. Josef Kaňkovský

České Budějovice 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem *Radiační mimořádné události s radiologickými dopady v ČR* jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

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

V Českých Budějovicích dne 2.6. 2020

.....

Daniel Vazač

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Mgr. Josefovi Kaňkovskému za cenné rady, postřehy, připomínky a čas, který mi při konzultacích věnoval. Dále mé poděkování patří Ing. Evě Zemanové Ph.D. za poskytnuté informace a proběhlé konzultace.

Radiační mimořádné události s radiologickými dopady v ČR

Abstrakt

Ionizující záření (IZ) je v současné době využíváno v mnoha oborech (radioterapie, nukleární medicína, urychlovače, defektoskopie, průmysl). Na odděleních nukleární medicíny (NM) jsou využívány zejména otevřené radionuklidové zdroje, na pracovištích radioterapie a při průmyslových aplikacích jsou to zpravidla uzavřené radionuklidové zdroje nebo tzv. generátory záření, jejichž hlavní komponentou je rentgenka. Samozřejmě zde existuje určité riziko vzniku nehodových expozičních situací. Těmto situacím je předcházeno systémem radiační ochrany a havarijní připravenosti. Většinu těchto opatření můžeme nalézt v dokumentu Vnitřní havarijní plán daného pracoviště.

V teoretické části práce jsou uvedeny základní informace o radioaktivitě a zdrojích IZ. Dále je v práci popsán systém radiační ochrany, biologické účinky IZ, veličiny využívané v radiační ochraně, lékařské aplikace IZ a využití IZ v průmyslu.

Znění výzkumné otázky je následující: „Která pracoviště se zdroji ionizujícího záření na území ČR mají největší potenciál ke vzniku nehodové expoziční situací s radiologickými dopady?“

Jako metodika výzkumu bylo zvoleno shromažďování informací z odborných publikací s touto tematikou. Dále probíhaly konzultace s radiologickými fyziky na oddělení NM a radioterapie v Nemocnici České Budějovice, a.s. a s inspektory SÚJB, kam jsou vzniklé radiační mimořádné události hlášeny. Součástí práce je i porovnání systému radiační ochrany a havarijní připravenosti na jednotlivých typech pracovišť.

V praktické části jsou popsány typy pracovišť, která jsem mezi sebou porovnával. Konkrétně jsem se zaměřil na pracoviště využívající IZ v průmyslu a v medicíně, tedy defektoskopické pracoviště a pracoviště NM. Práce poskytuje přehled potenciálních a vzniklých radiačních mimořádných událostí a okolností, za kterých byl zaznamenán jejich výskyt.

Cílem práce bylo porovnat pracoviště se zdroji ionizujícího záření (ZIZ) a seřadit je podle možnosti vzniku radiační mimořádné události. Pomocí prosté analýzy byla zjištěna větší pravděpodobnost vzniku radiační mimořádné události na pracovišti průmyslové radiografie oproti pracovišti NM.

Klíčová slova ionizující záření; radiační ochrana; radiologické události; radiační mimořádné události; pracoviště se zdroji ionizujícího záření

Radiation emergencies with radiological impacts in the Czech republic

Abstract

Ionizing radiation is currently being used in many fields (radiotherapy, nuclear medicine, accelerators, flaw detectors, industry). In particular, open radionuclide sources are used in nuclear medicine departments, radiotherapy workplaces and, in industrial applications, it is usually closed radionuclide sources or so-called. Radiation generators, the main component of which is the X-ray. Of course, there is a certain risk of developing accident exposure situations. These situations are preceded by a system of radiation protection and emergency preparedness. Most of these measures can be found in the workplace internal emergency Plan document.

The theoretical part of the thesis provides basic information about radioactivity and sources of ionizing radiation. In addition, the radiation protection system, the biological effects of ionizing radiation, the quantities used in radiation protection, the medical application of the ionizing radiation and the use of it in the industry are described in the work.

The text of the research question is as follows: "which workplaces with sources of ionizing radiation in the Czech Republic have the greatest potential for the occurrence of an accident exposure situation with radiological implications?"

As a research methodology, the collection of information from professional publications with this theme was chosen. In addition, there were consultations with radiological physics at the Department of Nuclear Medicine and radiotherapy in České Budějovice Hospital, A.S. and with the inspectors of the SÚJB, where the resulting radiological incidents are reported. The work also includes a comparison of the system of radiation protection and emergency preparedness on the different types of workplaces.

The practical part describes the types of workplaces that I have compared with each other. In particular, I have focused on the workplace using ionizing radiation in industry and medicine, i.e. deftoscopical workplace and Nuclear medicine workplace. The work provides an overview of the potential and occurrence of the radiative emergencies and the circumstances in which they were recorded.

The aim of the work was to compare workplaces with sources of ionizing radiation and to sort them according to the possibility of radiation emergencies. A simple analysis found a more likely occurrence of a radiation incident at the workplace of industrial radiography versus a nuclear medicine site.

Key word - Ionizing radiation; radiation protection; radiological events; radiation emergencies workplaces with sources of ionizing radiation.

OBSAH

ÚVOD	- 8 -
1 TEORETICKÁ ČÁST	- 9 -
1.1 RADIOAKTIVITA.....	- 9 -
1.2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ.....	- 9 -
1.3 ZDROJE IZ PODLE ZPŮSOBU JEJICH VZNIKU.....	- 11 -
1.4 OCHRANA PŘED IZ.....	- 11 -
1.5 RADIAČNÍ MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST	- 12 -
1.5.1 Definice radiační mimořádné události.....	- 12 -
1.5.2 Kategorie ohrožení	- 13 -
1.6 KATEGORIZACE ZABEZPEČENÍ RADIONUKLIDOVÝCH ZDROJŮ	- 13 -
1.7 RADIOLOGICKÁ UDÁLOST	- 14 -
1.7.1 Definice radiologické události	- 14 -
1.7.2 Klasifikace radiologických událostí	- 15 -
1.8 RADIAČNÍ OCHRANA	- 15 -
1.8.1 Veličiny a jednotky radiační ochrany	- 16 -
1.8.2 Veličiny charakterizující zdroje záření IZ	- 16 -
1.8.3 Veličiny charakterizující působení záření IZ na látku.....	- 16 -
1.8.4 Veličiny radiační ochrany	- 17 -
1.9 SYSTÉM RADIAČNÍ OCHRANY.....	- 18 -
1.9.1 Typy expozičních situací	- 19 -
1.9.2 Kategorie expozice	- 19 -
1.9.3 Principy radiační ochrany	- 20 -
1.9.4 Monitorování v radiační ochraně	- 22 -
1.10 VLIV IZ NA ZDRAVÍ ČLOVĚKA.....	- 22 -
1.10.1 Vnější kontaminace	- 22 -
1.10.2 Vnitřní kontaminace	- 23 -
1.10.3 Deterministické účinky	- 23 -
1.10.4 Stochastické účinky	- 24 -
1.11 POUŽITÍ ZIZ V LÉKAŘSTVÍ.....	- 24 -
1.11.1 Požadované zkoušky ZIZ.....	- 25 -
1.12 NUKLEÁRNÍ MEDICÍNA	- 26 -
1.12.1 Radiofarmaka a radionuklidy.....	- 26 -

1.13	PRŮMYSLOVÉ ZDROJE IZ	- 26 -
1.14	DEFEKTOSKOPIE.....	- 27 -
1.14.1	Typy defektoskopie	- 28 -
1.14.2	Radiační ochrana v průmyslové defektoskopii	- 29 -
1.15	OZAŘOVAČE	- 30 -
1.15.1	Typy ozařovačů.....	- 31 -
1.16	RADIONUKLIDOVÁ MĚŘIDLA.....	- 32 -
2	CÍL PRÁCE A VÝZKUMNÁ OTÁZKA	- 33 -
2.1	CÍL PRÁCE.....	- 33 -
2.2	VÝZKUMNÁ OTÁZKA	- 33 -
3	METODIKA.....	- 34 -
4	VÝSLEDKY	- 35 -
4.1	STATISTICKÉ ÚDAJE	- 35 -
4.2	PRŮMYSL.....	- 37 -
4.2.1	Události v průmyslu.....	- 38 -
4.3	ZDRAVOTNICKÁ ZAŘÍZENÍ	- 38 -
4.3.1	Události ve zdravotnictví	- 39 -
4.3.2	Události ve světě	- 40 -
5	DISKUZE	- 44 -
6	ZÁVĚR.....	- 48 -
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 49 -
8	SEZNAM ZKRTEK.....	- 53 -

ÚVOD

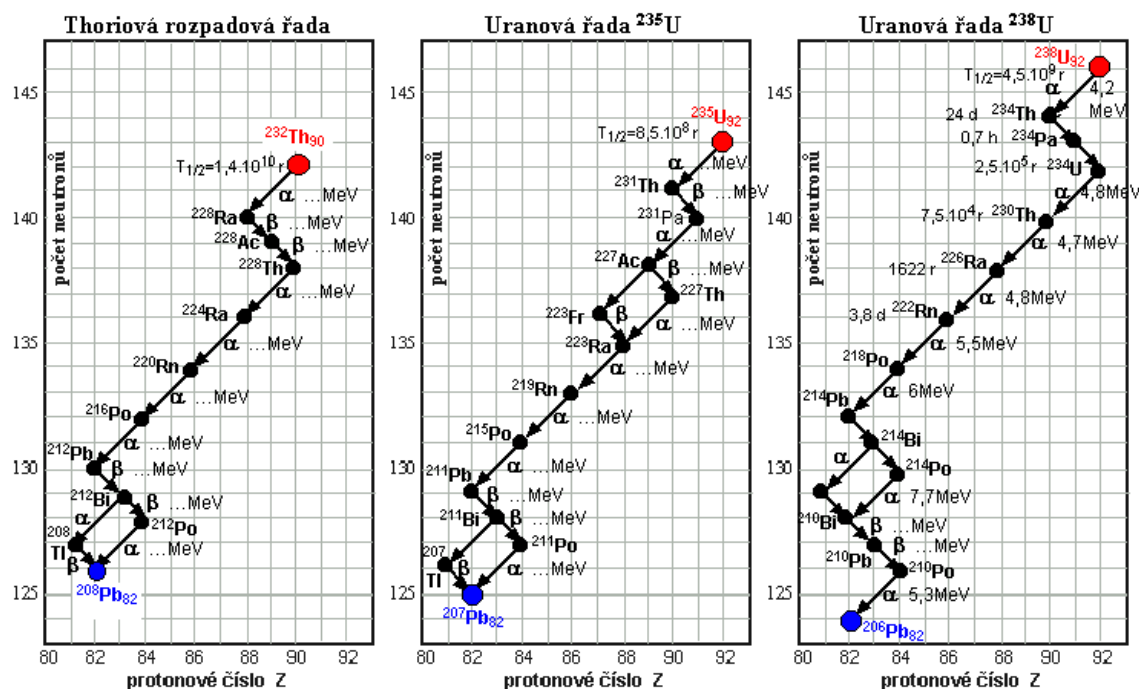
Zdroje ionizujícího záření (dále jen ZIZ) se v dnešní době využívají v mnoha oborech a odvětvích. Podle evidence Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) je na území ČR využíváno celkem 4 324 uzavřených radionuklidových zdrojů (URZ) v oblasti průmyslu, 889 v medicíně a 308 ve školství a výzkumu. Dále SÚJB eviduje používání 13 038 generátorů IZ využívaných pro lékařské ozáření, 1 207 v průmyslu a 183 ve školství a výzkumu. Používaných otevřených radionuklidových zdrojů (ORZ) je na území celkem 212 (registr zdrojů SÚJB ke dni 9.8.2019, data jsou uváděna bez rozlišení kategorizace ZIZ). Radiační ochrana ukotvená v atomovém zákoně č. 263/2016 Sb. a jeho prováděcích předpisech rozlišuje ozáření pacientů (jedná se o tzv. lékařské ozáření), obyvatel a radiačních pracovníků. Pokud jde o provedení chybného lékařského ozáření, hovoříme o radiologické události. Pokud dojde k neplánovanému ozáření radiačních pracovníků nebo obyvatel, jedná se o radiační mimořádnou událost. Při lékařském ozáření je kladen velký důraz na radiační ochranu, jak pacienta, tak i radiačních pracovníků, což souvisí s velikostí aplikované dávky, ale i dodržováním bezpečného provozu pracoviště se ZIZ. Tím je možné předcházet vzniku radiačních mimořádných událostí a radiologických událostí. Při využívání ZIZ v průmyslu (defektoskopie, ozařovače, měřidla) je kladen důraz zejména na zajištění bezpečného používání ZIZ a radiační ochrany radiačních pracovníků a obyvatel. ZIZ využívané v průmyslu jsou přenosné i stacionární, což přináší větší potenciál pro nehodovou expoziční situaci. Při běžném používání či servisech zařízení s ionizujícím zářením (zpravidla URZ) může nastat např. situace, že URZ zůstane v poloze vně pracovního krytu a nelze ho zasunout do polohy, ve které by byl stoprocentně stíněn. Tím je způsobena nehodová expoziční situace. Další možný vznik nehodových expozičních situací je zapříčiněn tím, že se zdroj ztratí nebo je odcizen. V práci se budu zabývat komparací pracovišť se ZIZ, kde se pokusím porovnat možnosti vzniku radiologických a radiačních mimořádných událostí na různých typech pracovišť.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Radioaktivita

Radioaktivita je děj, při kterém dochází k samovolnému rozpadu jader atomu a není nijak závislý na okolních podmínkách. Nuklid, který je nestabilní, se samovolně rozpadne a vznikne nuklid jiného prvku. To, zda bude nuklid stabilní či ne, rozhoduje poměr počtu neutronů a protonů v jádře prvku. Čas, za který se přemění přesně jedna polovina z celkového počtu jader atomu, nazýváme poločas přeměny a značíme $T_{1/2}$. (Kroupa, 2010)

Dále můžeme radioaktivitu rozdělit na umělou a přirozenou (přírodní). Přirozenou radioaktivitou označujeme děj, při kterém se nestabilní, těžší nuklid samovolně rozpadá až do té doby, dokud nedosáhne stability. Jako příklad mohu uvést rozpadové řady thoria a uranu, viz obrázek 1. Naopak umělá radioaktivita je závislá na zásahu zvenčí, který vyvolá nestabilitu jádra uměle. Nejčastějším případem je jaderná reakce. (Hála, 1998)



Obrázek 1 Přírodní rozpadové řady thoria ²³²Th a uranu ²³⁵U a ²³⁸U (Ulmann, 2005)

1.2 Ionizující záření

Záření, které označujeme jako ionizující (IZ), vzniká při jaderných procesech nebo v tzv. generátoru záření, který je závislý na připojení zdroje napětí. Pokud jde o jaderné IZ, jsou z jádra postupně uvolňovány částice či fotony, které jsou schopny interagovat

s prostředím tak, že atomy prostředí ionizují nebo je excitují. Podle způsobu interakce s prostředím se rozděluje IZ na přímo a nepřímo ionizující. Do přímo IZ řadíme částice s elektrickým nábojem, tj. záření alfa, beta, resp. protony. Do nepřímo IZ patří rentgenové, neutronové záření a záření gama. (Kroupa, 2010)

Alfa záření – jeho vznik je spojen hlavně s rozpadem těžkých jader (uran, radon). Při rozpadu jádro emituje jádro hélia (alfa částici), alfa částice rychle ztrácejí ionizující energii, proto je dolet alfa záření velmi malý. Ve vzduchu je dolet alfa částic jen několik centimetrů, v pevných a kapalných látkách tento dolet činí pouze zlomky milimetrů. K ochraně před alfa zářením postačí list papíru. Závažnější nebezpečí hrozí při vnitřní kontaminaci v důsledku jejich obrovské ionizační schopnosti na velmi krátkém úseku. (Kroupa,2010)

Beta záření – rozeznáváme dva druhy beta záření, jsou to beta mínus a beta plus. U beta plus záření je emitován pozitron a u beta mínus elektron, tomu však ještě předchází přeměna v jádře, kde se neutron mění na proton, elektron a antineutrino, resp. proton na pozitron a neutrino. Oproti alfa částicím jsou beta částice lehčí a značně menší, tudíž mají větší dolet. V plynném skupenství jejich dolet dosahuje několika metrů, v tkáních je to až 10 milimetrů. Poškození, které částice beta záření mohou způsobit, záleží na jejich energii, množství a době interakce s tkání. Z krátkodobého hlediska většinou částice způsobují popáleniny a rychlé odumírání tkání v organismu. (Kroupa, 2010)

Gama záření – vzniká při jaderných reakcích nebo radioaktivním rozpadu při přechodu jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, zároveň se jádro zbavuje své excitační energie. Většinou se jeho vznik dá očekávat při rozpadech alfa a beta. Vyzářené částice se zde označují jako fotony, které mají velmi krátkou vlnovou délku a nepřímo ionizují okolní prostředí. Záření gama je oproti záření alfa a beta mnohem pronikavější a k jeho odstínění je potřeba materiál o vysokém protonovém čísle, často se používá olovo. (Kolektiv autorů, 2011)

Rentgenové záření – má velmi podobné vlastnosti jako gama záření, též je velice pronikavé a k odstínění se nejčastěji používá olovo. Jedná se o elektromagnetické záření s velmi krátkými vlnovými délkami. Obsahuje dvě složky – brzdné a charakteristické rentgenové záření. Vzniká v rentgence na anodě interakcí emitovaných elektronů z katody a těžkým kovem anody. (Kolektiv autorů, 2011)

Neutronové záření – jedná se o proud neutronů vznikající při jaderných reakcích tím, že jsou uvolňovány z jádra. Neutrony jsou elementární částice bez elektrického náboje, což má za následek, že reagují pouze s jádry dalších atomů. Jejich pronikavost je vysoká, proto se k odstínění používají materiály, které obsahují vodík (voda), jenž neutrony zpomalí. K zpomalení dále slouží absorbátor. Nejlepším absorbátorem je bor nebo kadmium. (Ullmann, 2005)

1.3 Zdroje IZ podle způsobu jejich vzniku

Zdroje IZ dělíme podle jejich původu na dva základní typy, těmi jsou přírodní a umělé zdroje. Existenci a působení přírodních zdrojů IZ nelze zabránit a jsme těmito zdroji ozařováni po celý život (vyjma např. regulace expozice radonem v obytných prostorech atd.). Lidé žijící v ČR jsou z 90% celkové radiační zátěže ozařováni přírodními zdroji. Největší zatížení pochází z působení radonu, terestriálního a kosmického záření. (Ullmann, 2005)

Umělé zdroje IZ dělíme na lékařské zdroje, technické zdroje a jaderné zdroje. Lékařské zdroje IZ jsou nejvýznamnější složkou umělých zdrojů a využívají se při radiodiagnostických a radioterapeutických aplikacích (rentgeny, lineární urychlovače, nukleární medicína). Do kategorie technických zdrojů IZ řadíme jednak katodové trubice, nebo vakuové obrazovky, průmyslové rentgeny, URZ využívané v defektoskopii, analytická měřidla, hladinoměry atd. Jaderné zdroje jsou využívány v jaderné energetice. (Ullmann, 2005)

1.4 Ochrana před IZ

V ochraně před IZ se používá základních způsobů ochrany: ochrana časem, vzdáleností a stíněním. Tyto tři základní způsoby mají za hlavní cíl snížit rizika vzniku stochastických a deterministických účinků. Projev účinků se liší v orgánech a tkáních dle velikosti intenzity, energie, druhu záření, délky ozařování a tím, zda mezi zdrojem IZ a ozařovanou osobou byla nějaká překážka. Proto se v ochraně před IZ používá kombinace všech tří výše uvedených postupů. (Klener, 2000)

Ochrana vzdáleností – zde platí jednoduché pravidlo, které udává, že dávkový příkon se zmenšuje s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje IZ. Jednoduše řečené pravidlo – být od zářiče co nejdále. (Klener, 2000)

Ochrana časem – ochranou časem se rozumí omezení doby vystavení se IZ. Velikost absorbované dávky je závislá na době expozice, což má za následek, že celková radiační zátěž ze zdroje IZ stoupá s časem pobytu v zóně, která je neustále ozařována. V praxi je toto pravidlo uplatňováno tím, že pracovníci, kteří pracují v této zóně, jsou často střídáni za jiné. (Klener, 2000)

Ochrana stíněním – podle druhu a energie záření se používají různé materiály, které jsou schopné IZ absorbovat. (Klener, 2000)

1.5 Radiační mimořádná událost

1.5.1 Definice radiační mimořádné události

Radiační mimořádná událost (RMU) je událost, která přispívá nebo může přispět k překročení limitních hodnot ozáření. Poté si událost vyžaduje provést opatření, která z pohledu radiační ochrany zabraňují k překročení limitů ozáření nebo by byla schopna zadržet dále se zhoršující událost. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

RMU můžeme podle atomového zákona rozdělit na:

RMU prvního stupně – radiační mimořádná událost zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Radiační nehoda – radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vznikla v důsledku nálezů, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

Radiační havárie – radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vznikla v důsledku nálezů, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

1.5.2 Kategorie ohrožení

Podle velikosti možných dopadů radiační nehody nebo radiační havárie na území České republiky se jaderné zařízení, pracoviště se zdroji ionizujícího záření nebo činnosti v rámci expozičních situací zařazují do kategorie ohrožení A až E, viz Tab.1. (Zákon 263/2016 Sb., 2016)

Tabulka 1 Kategorie ohrožení podle velikosti možných dopadů

Kategorie ohrožení	Zařízení nebo činnost
A	Energetická jaderná zařízení
B	Jaderná zařízení nepatřící do kategorie ohrožení A, a pracoviště IV. kategorie, kromě pracovišť s jaderným zařízením, na kterém se předpokládá, že může vzniknout radiační havárie
C	Jaderná zařízení nebo pracoviště se zdroji ionizujícího záření, na kterém může vzniknout radiační havárie
D	Činnost v rámci expozičních situací, včetně nálezu, ztráty nebo zneužití radionuklidového zdroje nebo přepravy radioaktivní nebo štěpné látky, která může být příčinou vzniku radiační nehody nebo radiační havárie na nepředvídatelném místě, a tím i havarijní ozáření
E	Oblasti na území České republiky, na kterých mohou být realizována ochranná opatření pro obyvatelstvo v důsledku radiační havárie vzniklé na jaderném zařízení nebo pracovišti se zdroji ionizujícího záření umístěném na území státu sousedícího s Českou republikou

Zdroj: (Vyhláška č. 359/2016 Sb.)

1.6 Kategorizace zabezpečení radionuklidových zdrojů

Tato kategorizace zdrojů byla vytvořena za účelem vytvoření vodítka pro výběr a zavedení bezpečnostních opatření (odstupňovaný přístup). Pokud radionuklidový zdroj nebude bezpečně řízen, představuje velkou škálu potenciálních nebezpečí a s nimi spojené následky. U zdrojů s vysokou aktivitou mohou tyto následky v poměrně krátké době způsobit vážné deterministické účinky, viz Tab. 2. (IAEA, 2005)

D-hodnota (Dangers value) je množství radioaktivního materiálu, které je považováno za nebezpečný zdroj IZ. Nebezpečným zdrojem IZ je ten, který pokud není pod kontrolou, může způsobit smrt nebo zranění s trvalými následky, které snižují kvalitu života dané osoby. (IAEA, 2005)

Tabulka 2 Kategorizace zabezpečení radionuklidových zdrojů

Kategorie zabezpečení	Relativní nebezpečí	Poměr aktivity a D hodnoty
1	Extrémně nebezpečný	$A/D \geq 1000$
2	Velmi nebezpečný	$1000 > A/D \geq 10$
3	Nebezpečný	$10 > A/D \geq 1$
4	Npravděpodobně nebezpečný	$1 > A/D \geq 0,01$
5	Velmi npravděpodobně nebezpečný	$0,01 > A/D$

Zdroj: (IAEA, 2005)

1.7 Radiologická událost

1.7.1 Definice radiologické události

Jako radiologická událost (RU) se označuje nežádoucí událost při lékařském ozáření vedoucí k chybnému ozáření pacienta. Chybné ozáření pacienta je takové ozáření, které je nezáměrné a je způsobené chybou přístroje nebo lidskou chybou. V oblasti radioterapie bývá chybné ozáření pacienta zapříčiněno např. záměnou pacienta, ozářením jiného orgánu nebo tkáně, než bylo prvotně plánováno, použití špatně předepsané dávky, jež způsobí odlišný radiobiologický efekt, než byl plánovaný. V radiodiagnostice se jedná zejména o opakování snímku z důvodu pohybové neostrosti pacienta, špatné centrace, špatné projekce, chybné volby expozičních parametrů nebo selhání rentgenového přístroje nebo jeho příslušenství. (Vyhláška č. 422/2016, 2016)

1.7.2 Klasifikace radiologických událostí

Klasifikace RU dle kritérií je uvedena v příloze č. 23 vyhlášky č. 422/2016 Sb. Podle jejich závažnosti, jsou stanoveny tři kategorie A, B nebo C. RU patřící do kategorie A B jsou považovány za závažné, viz Tab. 3.

Tabulka 3 Klasifikace radiologických událostí

Kategorie RU	Popis
A	Příhoda, u které je možno očekávat závažný klinický projev, jenž může mít za následek trvalé poškození zdraví nebo předčasnou smrt nebo lze očekávat pozdní účinky ionizujícího záření v souvislosti s nadměrným ozářením jinak zdravé tkáně.
B	Příhoda, u které je možné očekávat důležitý klinický projev, který ale neohrozí život pacienta, ale je zvýšená pravděpodobnost nežádoucího výsledku např. komplikace léčby.
C	Všechny ostatní RU, které nevyhovují výše uvedeným, je zde velmi nízká pravděpodobnost výskytu klinického projevu. Patří sem např. chybné léčebné podmínky.

Zdroj: (Vyhláška 422/2016 Sb.)

1.8 Radiační ochrana

Paprsky X byly objeveny v roce 1985, už 2 roky poté byla zjištěna těžká onemocnění u lidí, kteří přicházeli do styku s IZ. To mělo za následek potřebu chránit své zdraví. Vznikl tedy obor radiační ochrana. (Drábková, 2005)

1.8.1 Veličiny a jednotky radiační ochrany

Radiační ochrana má za cíl regulaci ozáření osob. K tomu je nutné blíže charakterizovat zdroj ionizujícího záření a pole záření, které může působit na ozařovaný objekt ať už na látku, nebo člověka. (Klener, 2000)

1.8.2 Veličiny charakterizující zdroje záření IZ

Poločas radioaktivní přeměny – tato veličina určuje čas, za který klesne počet atomů na polovinu původní hodnoty a označujeme jí jako $T_{1/2}$. Jednotka poločasu přeměny často bývá sekunda (s) nebo jiná vhodná jednotka času. Čím je čas poločasu přeměny delší, tím se radionuklid rozpadá pomaleji. Poločasy přeměny se u různých radionuklidů liší a pohybují se od velmi krátkých (mikrosekundy) až po neuvěřitelně dlouhé (miliardy let). Další veličinou charakterizující rychlost přeměny radionuklidu je přeměnová konstanta (λ). Mezi uvedenými dvěma veličinami platí následující vztah: (Matoušek et al., 2007)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Aktivita – je veličina popisující fyzikální jev radioaktivity. Aktivitou radionuklidu rozumíme počet radioaktivních přeměn (rozpadlých atomů) v určitém radionuklidu za časovou jednotku. Značí se písmenem „A“ její jednotkou je becquerel (Bq) s rozměrem s^{-1} . V praxi se používají násobky této jednotky (kBq, MBq atd.), jelikož je velmi malá a značí jednu přeměnu za vteřinu. Odvozenými jednotkami aktivity jsou pak hodnoty vztažené k vhodné objemové jednotce (m^3), hmotnostní (kg) nebo plošné jednotce (m^2). Veličina není konstantní, ale klesá s časem. (Matoušek et al., 2000)

1.8.3 Veličiny charakterizující působení záření IZ na látku

Veličin, které popisují vzájemné působení pole ionizujícího záření s látkovým prostředím, je mnoho. Jedněmi ze základních jednotek jsou dávka a dávkovým příkon.

Dávka – značí se písmenem D s jednotkou gray (Gy) a její rozměr je $J \cdot kg^{-1}$. Tato veličina tedy určuje energii záření, která byla pohlcena ozařovanou látkou v hmotnostní jednotce. Lze říct, že dávka 1 Gy znamená, že v jednom kilogramu látky, kterou ozařujeme, se absorbuje energie záření o velikosti 1 J. (Matoušek et al., 2007)

Dávkový příkon – veličina určující změnu dávky za časovou jednotku. Jeho jednotkou je $Gy \cdot s^{-1}$.

1.8.4 Veličiny radiační ochrany

Ekvivalentní dávka v orgánu nebo tkáni – určuje citlivost dané tkáně k různým druhům IZ. Její jednotkou je sievert (Sv) a je určena následujícím vztahem: (Klener, 2000)

$$H_T = W_R \cdot D_{TR},$$

D_{TR} – střední dávka záření typu R ve tkáni nebo orgánu T (Gy)

W_r – radiační váhový faktor

Radiační váhový faktor nám sděluje relativní biologickou účinnost jednotlivých typů záření vzhledem k fotonovému záření, viz Tab. 4.

Tabulka 4 Radiační váhové faktory

Typ záření	Radiační váhový faktor
Fotony	1
Elektrony a miony	1
Protony a nabitě piony	2
Částice alfa, štěpné fragmenty, těžké ionty	20
Neutrony	Spojité závislosti na energii neutronů

Zdroj: (ICRP, 2007)

Efektivní dávka – v závislosti na druhu IZ, časovém rozestupu a velikosti dávky vznikají při ozáření lidského organismu biologické účinky, které mají negativní dopad na organismus a dochází tak k zdravotní újmě. Tkáně a orgány mají ale odlišnou radiosenzitivitu (reakce na dávku) na určitou ekvivalentní dávku, proto dochází na určitých částech těla k různým zdravotním újmám (např. žaludek má velmi vyšší citlivost na IZ než např. kůže nebo kostní povrchy). Proto bylo třeba vyjádřit hodnocení celotělového ozáření. Začaly se provádět radiobiologické studie ohledně hodnocení účinků na postiženém obyvatelstvu při radiačních nehodách, při radioterapiích a po jaderných výbuchách v Japonsku. Byly zavedeny koeficienty popisující rozdílnou

radiosenzitivitu dané tkáně nebo orgánu na IZ a tyto koeficienty posloužily k formulování tzv. efektivní dávky E. Ta je definována jako součet vážených středních hodnot ekvivalentních dávek H_T v orgánech nebo v tkáních lidského organismu. (Matoušek et al.,2007)

$$E = \sum W_t H_t$$

H_T – ekvivalentní dávka v orgánu nebo tkáni

W_T – tkáňový váhový faktor

Jako jednotka efektivní dávky se používá sievert (Sv). Tkáňový váhový faktor popisuje, jak přispívá daný orgán nebo tkáň k celkové zdravotní újmě při rovnoměrném celotělovém ozáření. Při sečtení váhových faktorů všech tkání a orgánů v lidském organismu, se jejich součet rovná jedné, viz Tab. 5. (Matoušek et al., 2007)

Tabulka 5 Hodnoty tkáňových váhových faktorů

Tkáň	Tkáňový váhový faktor	Tkáň	Tkáňový váhový faktor
Plíce	0,12	Jícen	0,04
Žaludek	0,12	Močový měchýř	0,04
Kostní dřev	0,12	Játra	0,04
Prsa	0,12	Kostní povrch	0,01
Zbytek těla*	0,12	Kůže	0,01
Vaječníky, varlata	0,8	Mozek	0,01
Štítná žláza	0,04	Slinné žlázy	0,01

Zdroj: (ICRP, 2007)

1.9 Systém radiační ochrany

Hlavní agenturou je Mezinárodní agentura pro atomovou energii IAEA (International Atomic Energy Agency). Ta je celosvětovým ústředním mezivládním fórem pro vědeckou a technickou spolupráci v jaderné oblasti. Podílí se na bezpečném a mírovém

využití jaderné vědy a technologie, přispívá k mezinárodnímu míru a bezpečnosti a k cílům OSN v oblasti udržitelného rozvoje. (IAEA, 2019) Dále ICRP (International Commission on Radiological Protection) je nezávislá mezinárodní organizace, jejímž hlavním zaměřením je rozvoj radiační ochrany. To se děje hlavně skrze doporučení a metodikami, které se zabírají všemi aspekty ochrany před IZ. Evropské společenství pro atomovou energii Euroatom (European Atomic Energy Community) bylo založeno v roce 1958. Jeho hlavním cílem je přispět k navození podmínek nezbytných pro rychlé vybudování jaderného průmyslu a jeho růstu. A nastavení mechanismů ke kontrole možného zneužití jaderných materiálů. Právní předpisy Euroatomu musely všechny země EU implementovat do 1.2. 2018. Tak se také stalo v ČR a v listopadu 2016 byl vládou schválen nový atomový zákon č. 263/2016 Sb. s účinností od 1.1.2017. (SÚJB, 2019)

1.9.1 Typy expozičních situací

Komise ICRP apeluje, aby doporučení, která vydává, byla použita na všechny zdroje a na veškeré jednotlivce exponovaného záření. Následně jsou uvedeny všechny myslitelné expozice:

Plánované expoziční situace – zahrnují cílené zavádění a provoz zdrojů. Do plánovaných expozičních situací se zařazují jak normální expozice (u nichž se předpokládá, že nastanou), tak i potenciální expozice (u nichž se nepředpokládá, že nastanou). (ICRP, 2007)

Nehodové expoziční situace – se mohou vyskytnout během provádění plánované situace nebo při jakékoliv jiné neočekávané situaci, při které je zapotřebí zavést neodkladná opatření, která mají za cíl zabránit nežádoucím důsledkům nebo alespoň tyto důsledky omezit. (ICRP, 2007)

Existující expoziční situace jsou situace, které už vznikly, rozhoduje se o jejich regulaci nebo se jedná o dlouhodobé expoziční situace po nehodách. (ICRP, 2007)

1.9.2 Kategorie expozice

ICRP rozlišuje tři kategorie expozic: profesní, lékařská expozice pacientů a expozice obyvatelstva. (ICRP, 2007)

Profesní expozice je expozice, do které spadá veškerá radiační expozice, která má původ v práci radiačních pracovníků bez ohledu na zdroj. Dle této definice by se do profesní

expozice řadilo i všudypřítomné záření, což by mělo za následek, že by všichni pracovníci měli být podřízeni režimu radiační ochrany. Proto se komise rozhodla omezit používání profesní expozice pouze na ozáření, plynoucí z výsledku práce, za které je z rozumných důvodů odpovědný provozovatel. (ICRP, 2007)

Lékařská expozice pacientů nastává při intervenčních, diagnostických a léčebných výkonech. Radiologie v medicíně má několik odlišných vlastností, kvůli kterým se přístup od radiační ochrany v jiných plánovaných expozičních situacích velmi liší. Ozáruje se zde záměrně za účelem přímého prospěchu pacienta. Hlavně v radioterapii je využíváno vysokých dávek záření ve prospěch pacienta (usmrcení buněk, k léčbě chorob). (ICRP, 2007)

Do expozice obyvatel patří veškeré další expozice kromě profesní a lékařské expozice pacientů. Jako výsledek expozice obyvatel je působení širokého spektra zdrojů záření. Z hlediska velikosti je ozáření obyvatel z přírodních zdrojů největší, to však neznamená snížení pozornosti u umělých zdrojů ozáření, které se mnohem snadněji kontrolují. Do ozáření obyvatel zahrnujeme i expozici zárodku a plodu těhotných pracovníků. (ICRP, 2007)

1.9.3 Principy radiační ochrany

Principy radiační ochrany uvedené v Doporučení ICRP se dříve vztahovaly pouze na činnosti, které nesouvisely s nehodovými situacemi. Tyto principy byly ICRP vnímány jako základní pilíře pro systém radiační ochrany. Komise zároveň nově definovala soubor principů, které lze uplatnit stejně pro situace nehodové, plánované i pro expoziční situace. Dále vysvětluje aplikaci základních principů u zdrojů a jednotlivců. Existují tři principy radiační ochrany vztažené ke zdroji, jež se používají ve všech expozičních situacích, a to princip zdůvodnění, princip optimalizace radiační ochrany a princip zabezpečení zdrojů. Dále existuje princip vztažený k jednotlivcům a jeho použití je využíváno v plánovaných expozičních situacích. Jedná se o princip aplikace dávkových limitů. (Kupka, et al., 2007) Tento princip se však nevztahuje na lékařské ozáření pacientů, neboť zdůvodněná např. terapeutická dávka nemůže být limitována. Jako ukazatel optimalizované aplikované dávky byly stanoveny národní diagnostické referenční úrovně uvedené ve vyhlášce č. 422/2016 Sb. Dodržování všech principů radiační ochrany způsobem stanoveným prováděcími předpisy je zákonnou povinností každého držitele povolení pro nakládání se ZIZ. Například princip optimalizace radiační ochrany zahrnuje optimalizaci dávek pro

pacienta podstupujícího lékařské ozáření, tak i pro radiační pracovníky, kteří dávku aplikují. (Prouza, 2008)

Princip zdůvodnění – je primární pravidlo, které říká, že jakékoliv rozhodnutí, které by znamenalo jakoukoliv změnu radiační expoziční situace, by mělo přinést převažující benefit nad riziky spojenými s užitím IZ. (SURO, 2000)

Princip optimalizace ochrany – principem optimalizace ochrany je udržování pravděpodobnosti způsobení expozice, množství exponovaných lidí a velikosti individuálních dávek exponovaných lidí na co nejnížší, rozumně dosažitelné úrovni s ohledem na ekonomická a společenská hlediska. V praxi lze tomuto principu rozumět tak, že stupeň radiační ochrany má být co nejvyšší, jak to za daných podmínek jen jde. (Kupka, Kubinyi, Šámal, c2007)

Tento princip je definován rovněž ve zkratce ALARA (As Low As Reasonably Achievable) a znamená, že každý, kdo vykonává radiační činnost, má za povinnost používat dávky tak nízké, jak je rozumně dosažitelné z hospodářského a společenského hlediska. (Sharp, et al., 2005)

Princip zabezpečení zdrojů – znamená pro každého, kdo nakládá s jadernou položkou, vykonává jakoukoliv činnost v rámci expozičních situací nebo jakýmkoliv způsobem využívá jadernou energii, přednostně zajistit jadernou bezpečnost, bezpečnost jaderných položek a radiační ochranu s ohledem na stávající úroveň vědy, techniky a správné praxe. Tyto povinnosti zahrnují zabezpečení radionuklidových zdrojů před neoprávněným použitím, nepovoleným přístupem, přemístěním, zneužitím, odcizením. K tomu je nutné poučení pracovníků, kteří mají přístup k radionuklidovému zdroji, o jeho zabezpečení a ověřování jejich znalostí. Prakticky musí být zabezpečení radionuklidového zdroje provedeno podle kladně posouzené dokumentace SÚJB. Způsob, jakým má být radionuklidový zdroj zabezpečen, je stanoven ve vyhlášce č. 422/2016 Sb., vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.

Druhou částí principu zajištění bezpečností zdroje IZ je míněno zajištění technické bezpečnosti, tj. vlastnosti zdrojů IZ. To je prováděno systémem zkoušek, ověřováním a hodnocením ZIZ při a po jeho instalaci či převzetí do údržby (pomocí přijímacích zkoušek). Dále v průběhu používání ZIZ je zdroj kontrolován periodickými zkouškami dlouhodobé stability a zkouškami provozní stálosti.

Princip nepřekročení dávkových limitů je jako jediný z výše uvedených principů vztažen na jednotlivce a jeho využití je nejčastěji v plánovaných expozičních situacích. Tento princip nám v podstatě říká, že celková dávka u jakéhokoliv jednotlivce by neměla překročit limity stanovené národní legislativou, resp. doporučené od ICRP. Přičemž tyto dávky pochází z kontrolovaných zdrojů při plánovaných expozičních situacích kromě lékařských expozicí pacientů. (SURO, 2000)

1.9.4 Monitorování v radiační ochraně

Monitorování v radiační ochraně bylo zavedeno za účelem prokazování, že byly splněny požadavky na limitování ozáření osob, optimalizaci radiační ochrany a dalších požadavků na bezpečný provoz pracovišť se ZIZ. Slovo monitorování je obvykle chápáno jen jako měření veličin. V tomto případě monitorování zahrnuje nejen měření dozimetrických veličin, ale i interpretaci a hodnocení ozáření pracovníků a dalších osob. Obsahem dokumentu Program monitorování v radiační ochraně jsou tyto části: (Damio, 2019)

- Monitorování pracoviště
- Osobní monitorování
- Monitorování výpustí
- Monitorování okolí

Podle frekvence provádění rozlišujeme monitorování soustavné, pravidelné a operativní. Dále se monitorování dělí na bilanční a signalizační. U bilančního monitorování je kontrolováno dodržování stanovených limitů a podmínek pro určitou praxi. Signalizační monitorování funguje k podávání zpráv o odchylkách od normálního provozu. (Klener, 2000)

1.10 Vliv IZ na zdraví člověka

1.10.1 Vnější kontaminace

Jako vnější kontaminaci označujeme stav, kdy se na povrchu těla nebo objektu nachází radionuklidy. Přítomnost radionuklidů na nechráněné kůži může mít za následek vysoké dávky záření a popáleniny, záleží na povaze radionuklidu. (Kuna et al., 2005)

1.10.2 Vnitřní kontaminace

O vnitřní kontaminaci mluvíme v případě, že se radionuklid dostal do organismu. Přičemž máme několik cest, kterými se může radionuklid do organismu dostat:

- Ingesce (požití)
- Inhalace (vdechnutí)
- Penetrace přes kůži
- Aplikace radiofarmaka

Předpoklad chování radionuklidu, který se dostal do organismu, se odvíjí od jeho chemických vlastností. Poté co se radionuklid dostane do těla, je distribuován jako radioaktivní látka do cílových orgánů. Ta je postupem času metabolizována a vyloučena z těla ven. (Kuna et al., 2005)

Existují ale i některé radionuklidy, které se dlouhodobě udržují v cílových orgánech, takovým typickým příkladem je stroncium ^{90}Sr , který se váže v kostech nebo jod ^{131}I , který je trvale vázán ve štítné žláze. (Mika, 2003)

Ať už je člověk kontaminován vnitřně či zvnějšku, může mít kontaminace za následek zhoršení zdravotního stavu, což se projevuje vznikem stochastických nebo deterministických účinků.

1.10.3 Deterministické účinky

Specifickým znakem deterministických účinků je určitá prahová dávka. Účinky IZ vznikají po jejím překročení. Avšak jednotlivé tkáně nebo orgány mají různé prahové dávky (radiosenzitivita). Závažnost z hlediska zdravotního postižení roste přímo úměrně s obdrženou dávkou. Účinky se velmi rychle projeví, obvykle během několika dní až týdnů po ozáření. Nejnižší prahová dávka, která má za následek vznik deterministického poškození, je 0,15 Gy. (Sharp et al., 2005)

Mezi deterministické účinky řadíme:

- Akutní nemoc z ozáření
- Akutní lokální změny
- Poškození plodu v těle matky
- Chronická nenádorová poškození

1.10.4 Stochastické účinky

U stochastických účinků se předpokládá bezprahový stav mezi dávkou a účinkem. S rostoucí dávkou záření se zvyšuje i pravděpodobnost vzniku stochastických účinků. Záření nezpůsobí smrt buňky, ale poruší její genetickou informaci. Doba latence od ozáření je velmi dlouhá, někdy to bývá i několik měsíců až let. Do stochastických účinků patří: (Sharp et al., 2005)

- Leukémie
- Zhoubné nádory
- Genetické mutace příštích generací

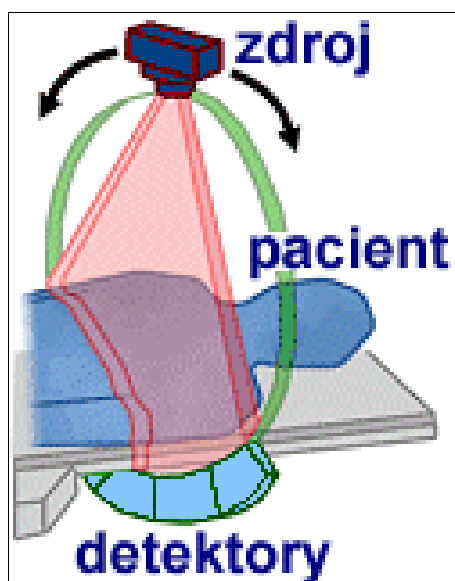
1.11 Použití ZIZ v lékařství

Radiodiagnostika

V lékařství slouží radiodiagnostika k diagnostickým účelům a spadá do oboru radiologie. Radiodiagnostika nemá za úkol jen určovat diagnózu pacienta, ale také získává informace po provedeném chirurgickém zákroku v obrazové podobě, k pozorování průběhu onemocnění nebo slouží k prevenční kontrole uskutečněného intervenčního terapeutického výkonu, např. v kardiologii. V lékařské diagnostice zaujímá radiodiagnostika nepostradatelné místo, vedle sonografie a magnetické rezonance, které však nevyužívají IZ. (Malíková, 2019)

Rentgenová vyšetření se dělí na skiaskopická a skiagrafická. Skiagrafická vyšetření jsou vyšetření, u kterých se jedná pouze o statické pozorování nálezů, u skiaskopických se jedná o dynamické studie. Počítačová tomografie a mamografie jsou speciální radiodiagnostické techniky. (Malíková, 2019)

Počítačová tomografie (většinou označená zkratkou CT) získává obrazové informace sběrem dat z detektorů rentgenového záření. Detektory měří, jak moc se zeslabí vějířkovitý svazek záření, který prošel pacientem různými směry a následně provede rekonstrukci obrazu, viz Obrázek 2. Počítačová tomografie poskytuje velmi přesné a kvalitní vyšetření spojené s diagnostickou informací. (Malíková, 2019)



Obrázek 2 Počítačová tomografie

Velmi specifické vyšetření mléčné žlázy se nazývá mamografie. Při tomto vyšetření je kladen velký důraz a požadavky na konečnou kvalitu zobrazení, zejména při screeningovém vyšetření, které je jako jediné akreditováno Ministerstvem zdravotnictví v rámci preventivní péče za účelem včasného odhalení karcinomu prsu. (Malíková, 2019)

1.11.1 Požadované zkoušky ZIZ

Od 80. let minulého století Světová zdravotnická organizace rozvíjí program, který má za úkol zajišťování určité kvality radiodiagnostických vyšetření. Mnoho studií prokázalo jeho nutnost a přínos. Cílem programu je zlepšení kvality zobrazení, a to vedlo k zvětšení obsahu diagnostické informace, snížení nákladů spojených s radiodiagnostickými vyšetřeními a se snížením radiační zátěže, jak u zdravotnického personálu, tak i u pacientů. S příchodem programu byly zavedeny i různé druhy zkoušek. Nově vznikly přejímací zkoušky, zkoušky dlouhodobé stability a zkoušky provozní stálosti. (Klener, 2000)

Systém zkoušek (tzv. hodnocení vlastností zdrojů) jejich četnost a metodika je v současné době ukotvena ve vyhlášce č. 422/2016 Sb.

1.12 Nukleární medicína

Lékařský obor nesoucí název nukleární medicína se využívá pro diagnostiku a v menším měřítku i pro léčbu aplikací radioaktivních látek. Radiofarmaka jsou přípravky s chemickou sloučeninou, jejíž účinnou složkou jsou radionuklidy, které fungují jako zdroj IZ. Radiofarmaka řadíme do kategorie ORZ a většinou jsou aplikována v podobě roztoků, plynů nebo pevných látek. (Mysliveček, 2007)

1.12.1 Radiofarmaka a radionuklidy

V oboru NM se používají jen umělé radionuklidy, navíc musí mít vhodné fyzikální vlastnosti: fyzikální poločas (v řádu několika hodin až desítek dnů), energie záření gama a emise záření beta a gama. (Mysliveček, 2007)

V NM se k diagnostickým metodám využívá zářičů gama, resp. beta. Toto vyšetření můžeme rozdělit na in vitro a in vivo vyšetření. Metoda in vitro neboli radiosaturační analýza je využívána ke stanovení např. koncentrace protilátek v krvi. Zde je pracováno pouze se vzorkem a radioaktivní látka není vůbec pacientovi aplikována. Naopak u vyšetření in vivo se radiofarmaka do těla dostávají intravenózně za pomoci speciálně stíněných aplikátorů. Detekcí záření gama se pak neinvazivním způsobem studují biochemické a fyziologické procesy v těle. (Mysliveček, 2007)

1.13 Průmyslové zdroje IZ

Průmyslových zdrojů IZ je mnoho, ať už ve světě nebo jen v ČR. Používají se jednak generátory záření, které vyzařují rentgenové záření, nebo URZ – gama, beta a alfa zářiče. (Kolektiv autorů, 2011)

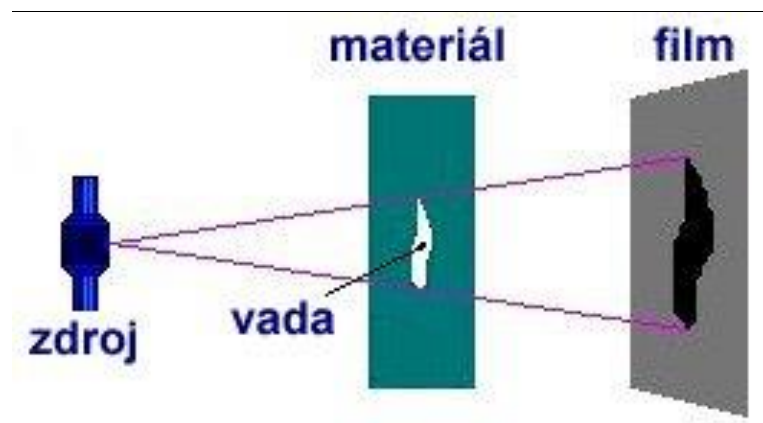
- **Defektoskopie** – testování materiálu, kde se využívá hlavně rentgenové a gama záření. Tento typ testování nijak nepoškodí materiál.
- **Gauging devices (radionuklidová měřidla)** – do této skupiny přístrojů patří hlavně měřidla a indikátory. Jako jsou hladinoměry, hustoměry, tloušťkoměry, vlhkoměry nebo jiné přístroje či analyzátory využívající zejména gama, beta a neutronové záření.
- **Karotážní práce** – využívané pro geologické účely ve vrtech, zde se využívá alfa, gama a neutronové záření.

- **Iontové generátory** – do této kategorie řadíme ionizační hlásiče požáru, eliminátory statické elektřiny a chromatografy, kde je využíváno hlavně alfa záření.
- **Průmyslové ozařovače** – nejčastěji využívají gama záření nebo elektronové svazky.

1.14 Defektoskopie

Defektoskopie neboli průmyslová radiografie je zkušební postup, který nijak nepoškodí zkoušený materiál a pomocí této zkoušky se sledují různé vlastnosti materiálů např. nehomogenita materiálu a nedostatky ve svaru dvou částí materiálu. V defektoskopii je využíváno vlastností rentgenového nebo gama záření, jelikož snadno projdou různými druhy materiálů bez toho, aby jej poškodily. Při průchodu materiálem je záření zeslabováno a rozptylováno dle absorpčního koeficientu a struktury materiálu. Výsledný obraz je tvořen dopadem prošlého záření materiálem buď na radiografický film, nebo na elektronický receptor obrazu, viz Obrázek 3. Vzniklý signál je digitalizován a zobrazen na monitoru obrazu. (Klener, 2000)

Defektoskopická zařízení mohou být jak mobilní, tak i stacionární. Stacionární zařízení jsou pevně nainstalována v defektoskopických provozovnách. Mobilní zařízení jsou přenosná, mohou být využívána jak na stálých pracovištích, tak i na přechodných pracovištích. Jako příklad defektoskopického využití uvádím např. kontrolu svařovaných spojů, kontrolu ochranných krytů, strukturální kontrolu materiálů a kontrolu zavazadel či balíků. (Klener, 2000)



Obrázek 3 Zobrazování vady na defektoskopu

1.14.1 Typy defektoskopie

Rentgenová defektoskopická zařízení

Rentgenová defektoskopická zařízení jsou rentgenové přístroje o napětí 60–320 kV, občas najdeme i výjimky o napětí do 450 kV. Nyní se zaměříme na důležité parametry z pohledu ochrany před zářením. (Klener, 2000)

Kryt rentgenky a jeho ochranné vlastnosti: stínění pomocí krytu rentgenky je jedním z nejdůležitějších prvků, který ovlivňuje velikost dávkového příkonu v okolí, kde se prozařuje. Nepoškozenost celého přístroje je zapotřebí kontrolovat pravidelně a pokaždé, když dojde k nestandardnímu mechanickému namáhání např. pádu. (Kopec, 2008)

Dalším parametrem je délka kabelů. Délka kabelů, které spojují rentgenku a ovládací panel, by měla být co nejdelší. Např. u zařízení, které má napětí do 300 kV, musí být minimální délka kabeláže 20 m. (Klener, 2000)

Kolimace nebo kolimační clony jsou jedním z velmi významných prvků radiační ochrany. Díky těmto clonám buďto pevně přidělaným, nebo nastavitelným, se vymezi svazek záření do tvaru jehlanu či kužele. To má za následek redukci expozice personálu obsluhujícího zařízení, ale i ostatních osob. (Klener, 2000)

V poslední řadě musí být zařízení vybaveno výstražnou signalizací, která odpovídá předepsaným normám. Tato signalizace má za úkol varovat personál i jiné osoby nacházející se v blízkosti, že rentgenka je v provozu a probíhá ozařování. U výstražní signalizace musí být jasně rozpoznatelné, zda je rentgenka v klidu či v provozu. (Klener, 2000)

Urychlovače používané v defektoskopii

Urychlovače elektronů se někdy používají při kontrolách materiálů, které mají velkou tloušťku. V minulosti byly využívány zejména betatrony, v současné době jsou to častěji lineární urychlovače s nosnou vlnou, která produkuje brzdné záření s vysokou energií 3 až 5 MeV, ve výjimečných případech až 8 MeV. Při práci s urychlovači jsou vyžadována specifická ochranná opatření. (Klener, 2000)

Gama defektoskopie

Zde je jako zdroj IZ radioaktivní látka, která je hermeticky uzavřena. Uzavřený zdroj IZ je připevněn na nosiči zdroje tzv. defektoskopickém krytu. Záření je poté emitováno všemi směry nepřetržitě. (Klener, 2000)

Defektoskopické expoziční kryty mají tři základní typy, které se využívají:

- Projekční expoziční kryty
- Směrové expoziční kryty
- Speciální expoziční kryty

Projekční kryt defektoskopu se skládá z bloku stínícího materiálu, ke kterému je možné připojit vnější výjezdovou koncovku, do které se zdroj záření posunuje z nepracovní polohy, která je stíněná do pracovní pozice. Do pracovní pozice je zdroj posunut pomocí ovládacího panelu. (Klener, 2000)

Směrové expoziční kryty jsou zařízení, kde je zdroj IZ uzavřen, a poté se přesouvá do pracovní pozice uvnitř pracovního krytu nebo se také může zavírat a otevírat výstupní clona. U tohoto typu defektoskopu se zdroj záření nikdy nevysouvá vně vlastního expozičního krytu. (Klener, 2000)

Speciální typ krytu u expozičního defektoskopu MLOK se ovládá pomocí elektronického dálkového ovládní, pomocí impulsů záření uzavřeného zdroje ^{137}Cs . Ve výbavě krytu se nachází vlastní zdroj proudu a mobilní jednotka. Mobilní jednotka slouží k pohybu krytu kontrolovaným potrubím na liniových stavbách. Dále obsahuje okolkový kolimátor a realizuje ústřední expozici celého jednotlivého svaru. (Klener, 2000)

1.14.2 Radiační ochrana v průmyslové defektoskopii

Mezi základní preventivní bezpečnostní opatření patří pravidelná kontrola a údržba zařízení. Tato opatření musí být zavedena do systému zabezpečení jakosti. Opatření se provádí dle instrukcí, které vydal výrobce. Jako příklad zde uvádím pravidelnou vizuální kontrolu, čištění funkčních prvků zařízení a promazávání důležitých částí přístroje. Při používání defektoskopických zařízení se zde vyskytuje relativně vysoké radiační riziko, při práci ve dne i v noci nebo při práci za nepříznivých podmínek. Jako prevence k minimalizování rizika se praktikuje pravidelný trénink a cvičení správných, obvyklých pracovních postupů, ale i nácvik správných postupů při možné radiační nehodě. Pro práci s jakýmkoliv defektoskopem jsou vyžadovány alespoň dvě osoby. (Klener, 2000)

Nestandardní situace, nehody, mimořádné události

Jako nestandardní situaci můžeme označit stav, kdy zdroj nelze normální cestou zasunout do stíněné polohy. Většinou tyto situace neznamenaají zvýšené ozáření pracovníků. Řešení těchto situací však vyžaduje alespoň základní znalosti o konstrukci příslušného přístroje, ale i další zkušenosti. Potřebné znalosti a zkušenosti většina operátorů nemá, proto je velice žádoucí zavolat externisty ze servisu či výrobce přístroje, již mají náležité vybavení, pomocí kterého uspokojivě danou situaci vyřeší. O jakékoliv nestandardní situaci se musí neprodleně informovat pracovník, který je pověřen výkonem soustavného dohledu nad radiační ochranou. Mezi hlavní úkol operátorů při nestandardní situaci patří zamezení vstupu do nebezpečného prostoru nepovolaným osobám. Obecně se dá říct, že mohou nastat čtyři hlavní nestandardní situace: (Klener, 2000)

1. V projekčním kolimátoru se zasekne zdroj záření a jeho opětovné zasunutí do stíněné polohy v pracovním krytu je nemožné. Dávkový příkon zůstává při manipulaci s ovládacím přístrojem stále stejný.
2. Zdroj záření uvízne někde ve výjezdové hadici, přestože už měl být dávno zasunut zpět do ochranného krytu. Při uvíznutí ve výjezdové hadici dávkový příkon při pokusech o zpětné zasunutí zdroje IZ prudce stoupá. Jak se přibližuje pracovnímu krytu, stoupá rovnoměrně, až se zastaví na určité hodnotě.
3. Zdroj záření byl zasunut do pracovního kryt, ale je ve špatné stíněné poloze. Proces u dávkového příkonu je téměř stejný jako v předešlém případě. Je zde však jedna výjimka, a to ve chvíli, kdy je zdroj zatažen do pracovního krytu.
4. Zdroj záření v průběhu zatahování vyjede pryč z krytu, na stranu, kde se nachází ovládací zařízení. Velikost dávkového příkonu se mění stejně jako při standardní situaci.

1.15 Ozařovače

Radiační ozařovače mají široké pole působnosti, využívají se ve zdravotnictví, výzkumu i průmyslu. Nejčastějšími zdroji záření jsou lineární urychlovače s využitím elektronových svazků nebo γ gama svazků. Obvykle se používají ke sterilizaci zdravotnických léčiv a výrobků, ošetřování produktů z potravinářského průmyslu, polymerace a hubení nežádoucího hmyzu, viz Tab 6. Urychlovače elektronů a gama zářiče jsou navrhovány tak, aby za normálního provozu byla radiační zátěž obsluhy

a okolí velmi nízká. Avšak ztráta kontroly nad zářičem či dokonce jeho poškození může vyústit k významné radiační zátěži. V krajních případech může dojít k újmě na zdraví, případně i smrti v důsledku ozáření, a to všechno během velmi krátké chvíle. Proto je důrazně doporučeno dodržovat správné zásady během návrhu a výroby ozařoven, čímž lze riziko vzniku významné radiační zátěže udržet na velmi nízké úrovni. (Navrátil, Rosina, 2005)

Tabulka 6 Příklady aplikací a použitých dávek pro ozařovače

Produkt	Typické hodnoty dávek [kGy]	Požadovaný efekt
Maso, ryby, ústřice, pečené výrobky, polotovary	20-70	Sterilizace, po ozáření lze produkty uchovávat při pokojové teplotě
Ovoce, zelenina	0,05 – 30	Hubení mikroorganismů, hmyzu, prodloužení doby trvanlivosti
Lékařské potřeby, některá léčiva	15-25	Sterilizace, materiál na jedno použití
Plasty	0,2 – 250	Polymerace, řetězení a roubování polymerů
Hmyz	0,001 – 0,1	Sterilizace samčích kukel hmyzu před vypuštěním
Krevní deriváty	0,015 – 0,05	Bezpečné transfuze pro imunodeficitní pacienty

Zdroj: (Klener, 2000)

1.15.1 Typy ozařovačů

Ozařovače využívající gama záření

Podle kategorizace IAEA ve zprávách z roku 1993 a 1996 můžeme tyto ozařovače rozdělit do kategorií I až IV. Kritéria, podle kterých dělíme ozařovače do různých skupin, jsou: způsob stínění, druh, ze kterého je zhotoven stínící materiál a konstrukční provedení ozařovacího prostoru. Dále můžeme ozařovače rozdělit na suché a mokré typy. Suché typy jsou takové ozařovače, které jsou stíněny kontejnerem, naopak u mokrého typu se používá stínění vodou. Na základě typu konstrukce ozařovacího prostoru můžeme tyto

typy rozdělit na druhy, kde není možnost fyzického vniknutí v průběhu ozařování do ozařovaného prostoru. Druhým typem je kategorie, kde je vniknutí do ozařovacího prostoru možné, ale musí se překonat systém zábran: (Klener, 2000)

1.16 Radionuklidová měřidla

Radionuklidová měřidla jsou využívána při kontrolách kvality výrobků nebo při kontrolách průběhů pracovních operací. Obecně se dá říct, že to jsou měřicí a kontrolní zařízení, jež využívají IZ vyzařované z jednoho nebo více uzavřených radionuklidových zářičů. Měřicí přístroje uskutečňují nedestruktivní kontrolu některých vlastností materiálu. Všeobecně jsou využívány pro kontrolu a určení tloušťky materiálu, jeho hustoty, úniku látky apod. Mají velkou výhodu v tom, že nijak nezasahují do výrobního procesu, ale přitom mohou kontrolovat nebo monitorovat takové procesy, které jsou jinými zařízeními velmi těžko sledovatelné. Jsou to hlavně kontroly velice rychlých změn při výrobních procesech, kontroly agresivních, chemických látek, kontroly materiálu o značně vysoké teplotě a kontroly už zabalených výrobků. Měřidla jsou složena z detektoru a krytu zářiče. Užívají se zde zdroje záření beta, gama, rentgenové a neutronové záření. (RadiationAnswers, 2019)

Dělení měřidel se provádí v závislosti na stylu detekce záření a na změně detekovaných vlastností záření na měřidla využívající zpětný rozptyl, na měřidla průchozí (transmisní) a na měřidla aplikující aktivační analýzu a rentgen fluorescenci. Podle způsobu využití se mezi tyto zařízení řadí vlhkoměry, hladinoměry, hustoměry apod. (RadiationAnswers, 2019)

2 CÍL PRÁCE A VÝZKUMNÁ OTÁZKA

2.1 Cíl práce

Vyhodnotit a analyzovat z pohledu ochrany obyvatelstva radiační mimořádné události na území ČR, které se staly v minulosti, ale i radiační mimořádné události, které nenastaly, ale s určitým rizikem mohou na území ČR nastat.

2.2 Výzkumná otázka

Která pracoviště se zdroji ionizujícího záření na území ČR mají největší potenciál ke vzniku nehodové expoziční situaci s radiologickými dopady?

3 METODIKA

Z dostupné literatury a diskuze s radiologickým fyzikem, který pracuje na oddělení nukleární medicíny, jsem získal základní informace o zajištění radiační ochrany, zvládnutí RMU včetně obsahu VHP pracovišť se ZIZ. Dále mi byl poskytnut statistický soubor o RMU a stručné zprávy o pár nastalých RMU od SÚJB. Dostupné informace jsem se pokusil porovnat a předpovědět možnosti vzniku RMU a jejich radiologické dopady. Zvážil jsem postupy uvedené ve VHP při radiačních nehodách, závažnost potenciálních RMU jsem se snažil zhodnotit podle typu zdroje a radionuklidu, jež jsou na konkrétním pracovišti využívány. V neposlední řadě jsem se zaměřil na opatření v rámci radiační ochrany, a to během standardního provozu, ale i při nehodové expoziční situaci. Z hodnocení jsem vyloučil velmi významné ZIZ (jaderné reaktory).

4 VÝSLEDKY

Podle kategorizace uvedené ve vyhlášce č. 422/2016 Sb. můžeme ZIZ rozdělit do několika kategorií, a to podle míry ohrožení zdraví člověka a životního prostředí na: nevýznamné, drobné, jednoduché, významné a velmi významné ZIZ. V mé práci jsem se rozhodl vynechat celou kategorii velmi významných zdrojů, do které patří jaderné reaktory. Důvod, proč jsem se rozhodl tuto kategorii nezařadit je jednoduchý, v této oblasti je radiační ochrana i systém zvládnání RMU na velmi vysoké úrovni a zároveň problematiku těchto zdrojů již řeší velké množství prací a analýz, které jsou výrazně odlišné od pracovišť nižších kategorií. Má práce je hlavně zaměřena na kategorii významných ZIZ. Z této kategorie jsem se rozhodl vynechat generátory IZ (urychlovače částic a generátory záření určené k lékařskému ozáření), ale zaměřil jsem se zejména na pracoviště určených pro radioterapii se zařízením obsahující URZ určený pro brachyterapii, dále na zařízení obsahující URZ sloužící k ozařování předmětů (potraviny, suroviny, předměty běžného užívání) a pracoviště s mobilním defektoskopem obsahující URZ.

4.1 *Statistické údaje*

Na základě evidence ZIZ, kterou vede SÚJB, jsem zjistil, že ke dni 11.6.2019 se na území ČR nachází 3092 generátorů IZ určených k lékařskému ozáření, dále 127 URZ též využívaných k lékařskému ozáření a 77 ORZ využívaných jak ve výzkumu, tak i v lékařství. Lineárních urychlovačů aktivně používaných na území ČR v lékařském odvětví najdeme celkem 44. V průmyslovém odvětví ČR je využíváno 1033URZ a lineárních urychlovačů celkem 5. Dále jsou na území ČR evidovány dva generátory IZ – urychlovače využívané ve školství a výzkumu.

V následující tabulce jsou zapsány jednotlivé RMU, které nastaly na pracovištích, kde pracují se ZIZ, a to v letech 2005–2018, viz Tab. 7.

Tabulka 7 Přehled RMU 2005–2018

Typ události	Počet událostí v letech 2005–2018
Události na pracovištích se ZIZ – poškozená defektoskopické sondy, demontáže stínících kontejnerů, defektoskopické a karotážní práce	6
Události na pracovišti se ZIZ – kontaminované předměty, kontaminace pracoviště – únik radioaktivních látek na pracovišti	5
Události na pracovišti NM	8
Kontaminace pracovníků	8
Ozáření pracovníků	5
Radiologická událost – radioterapie	4
Neřízená oxidace uranu – při likvidace hlavice ozařovače	2
Ztráta těsnosti URZ při vyjímání z hlavice ozařovače v horké komoře	1

Zdroj (SÚJB, 2018)

Při sečtení a rozdělení na RMU nastalé v průmyslu a na RMU vzniklé ve zdravotnickém zařízení v letech 2005–2018 dojdeme k závěru, že během těchto let nastalo více RMU ve zdravotnickém zařízení. Celkové počty jsou: RMU v průmyslu 11, RMU ve zdravotnictví 15. Řekl bych, že je to velmi nepatrný rozdíl a nedá se tedy jednoznačně uvést, které pracoviště má větší potenciál ke vzniku RMU. Bohužel jsem do celkového výčtu nemohl zařadit položky ozáření a kontaminace pracovníků, jelikož jsem se blíže nedozvěděl, v jakém odvětví pracovali.

4.2 Průmysl

Typicky jsou na pracovištích zabývajících se průmyslovou radiografií na území ČR k defektoskopickým činnostem využívány zdroje ^{192}Ir a ^{75}Se . Zdroje jsou vybaveny krytem a příslušenstvím pro jeho používání při defektoskopických zkouškách. U těchto zdrojů je při radiačních činnostech předpokládán vznik radiační mimořádné události 1. stupně a radiační nehody. Jejich definice jsou uvedeny v kapitole 1.5.1 nebo jsou k nalezení v atomovém zákoně č. 263/216 Sb.

Ke vzniku RMU 1. stupně může dojít na základě selhání posuvného mechanismu, kdy zdroj záření uvízne v projekčním kolimátoru a nelze jej zasunout zpět do stíněné polohy, v takovém případě se dávkový příkon při zasouvání nemění a zůstává stejný jako při expozici, případně může růst směrem k odhadované pozici zdroje. Další možností vzniku RMU 1. stupně je vniknutí nepovolaných osob do vymezeného přechodného pracoviště se ZIZ přes jeho vyznačení. Posledním evidovaným případem je neplánované ozáření osob spojené s překročením limitů efektivní dávky (radiační pracovníci obdrželi více jak 20 mSv). Ve všech výše uvedených případech platí předpoklad, že aktuální směna bude schopna zvládnout tuto situaci.

V případě radiační nehody se na jejím vzniku mohou podílet zejména tyto situace. Ztráta nebo odcizení krytu s uzavřeným radionuklidovým zdrojem (URZ), dopravní nehoda při přepravě URZ, kdy dojde k poškození jeho krytu, požár v objektu, kde se nacházejí kryty, nebo při použití defektoskopického krytu, kdy je zdroj záření zaseklý v projekčním kolimátoru a nelze jej zasunout zpět do stíněné polohy v rámci časových možností aktuální směny. V okamžiku, kdy dojde k radiační nehodě, je nutná aktivace zasahujících osob držitele povolení, jelikož radiační nehoda je nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně.

S radiační havárií není na defektoskopickém pracovišti počítáno, vzhledem k použitým ZIZ.

Po zjištění vzniku RMU 1. stupně a RN je využíváno technických a organizačních opatření. Patří sem přenosné dozimetrické přístroje, online čidla elektrické požární signalizace (EPS), která jsou neustále připojená na panel signalizace EPS na centrálním hasičském dispečinku JE Dukovany a JE Temelín, technické prostředky fyzické ochrany: kamerový systém, prostředky poplachových zabezpečovacích a tísňových systémů, jež

mohou indikovat násilné narušení střeženého prostoru nebo neoprávněnou manipulaci se ZIZ a posledním případem je systém zjišťování RMU. Tento systém slouží pro případ výpadků elektrické energie, kdy zapne záložní zdroje.

4.2.1 Události v průmyslu

V roce 2017 radiační pracovník kategorie A se snažil vytáhnout pomocí manipulátoru horké komory ze skladovacího kontejneru konkurenční zdroj 22H. Kontejner byl umístěný v uzavřené horké komoře. Po neúspěšných pokusech si pracovník komoru otevřel a snažil se nosič zdroje lehce přizvednout rukou. Přitom kalibrovaným měřákem příkonu dávkového ekvivalentu (PDE) kontroloval radiační pole kontejneru. Povytažnout URZ se nepovedlo, proto pracovník použil větší sílu a nechtěně ho vytáhl celý. Rychle zareagoval a zdroj okamžitě pustil na dno komory a zavřel komoru. Pracovník byl exponován odhadem 2 vteřiny. Vypočítaný dávkový ekvivalent na ruce byl 1920 μSv a na trup přibližně 307 μSv . Podle těchto hodnot nebyl překročen záznamový referenční limit pro tělo a vyšetřovací limit pro ruce, podle plánu monitorování. (SÚJB, 2019)

4.3 Zdravotnická zařízení

Na odděleních NM se používají otevřené radionuklidové zdroje, které jsou nebolestným způsobem aplikovány pacientovi. Aplikace otevřených radionuklidových zdrojů slouží k diagnostickým, resp. terapeutickým účelům. Jedenkrát týdně se používá Technecium 99m o aktivitě 10-13 GBq. Denně je na PET přístrojích užívané ^{18}F (fluorodeoxyglukosa) s aktivitou 5-6 GBq. Dalšími jsou ^{201}Tl do 200 MBq a ^{111}In , zde je aktivita v řádu stovek MBq. V diagnostice a terapii benigních onemocnění štítné žlázy jsou typickými zdroji ^{131}I s aktivitou až 20 GBq, ^{90}Y do 600 MBq, ^{153}Sm do 7 GBq a ^{223}Ra až 15 MBq. Všechny zdroje jsou do sledovaného zdravotnického zařízení dováženy.

Ke kontrole přístrojů je užívané ^{57}Co a ^{137}Cs . Celková aktivita u zdroje ^{57}Co je maximálně 550 MBq a u ^{137}Cs nejvýše 6 MBq.

V případě oddělení NM jsou uplatňována opatření v rámci radiační ochrany. U ZIZ se ověřují technické parametry zkouškami (přejímacími, dlouhodobé stability a provozní stálosti). V prostředí mezi ZIZ jsou využívána opatření jako stínění vyšetřoven, z toho také plyne důsledné zavírání dveří vyšetřoven během ozařování, užívání ochranných pomůcek a pomůcek pro manipulaci s ORZ. U fyzických osob je dbáno na dodržování režimu kontrolovaného pásma a zabránění případného vstupu neoprávněných osob,

system radiacního monitorování osob ve smyslu kontrolování, které osoby v dané chvíli pracují v KP a které KP opouštějí a za jakých podmínek. Tyto informace mi byly poskytnuty radiologickým fyzikem na oddělení NM.

Dále lze na oddělení NM předpokládat, že za běžného provozu na pracovišti s ORZ může dojít při očekávaném způsobu používání zdrojů záření pouze k radiacní mimořádné události 1. stupně, nejhůře k radiacní nehodě. Radiacní havárii můžeme zcela vyloučit. Při manipulaci s ORZ lze očekávat výskyt těchto mimořádných událostí:

RMU 1. stupně:

- Pomočení se naaplikovaného pacienta
- Rozstříknutí nebo rozlití radiofarmaka při manipulaci
- Překročení vyšetřovacích úrovní při monitorování pracoviště stanovených v programu monitorování

Radiacní nehoda:

- Zatopení pracoviště
- Požár na pracovišti
- Ztráta nebo odcizení zdroje záření
- Ucpání a protržení odpadního potrubí z kontrolovaného pásma lůžkové části ONM

Většina výše uvedených mimořádných událostí se dá zjistit pomocí zraku. Jen překročení vyšetřovacích úrovní se zjistí pomocí výsledků monitorování či měřením.

4.3.1 Události ve zdravotnictví

V roce 2012 došlo k radiologické události na radioterapeutickém pracovišti, při kterém v rámci paliativní léčby došlo k ozáření opačné strany těla pacienta.

Další událost se stala v roce 2014, kde na zdravotnickém zařízení, Oddělení kliniky NM došlo k signalizaci havarijního stavu na potrubí pro kapalný odpad.

K dalším dvěma větším událostem došlo až v roce 2018. Kdy v nemocničním zařízení na základě kontroly indikátoru hladiny jímek s radioaktivním odpadem bylo zjištěno, že obsah jímek byl samovolně vypuštěn. Na základě analýzy odebraných vzorků byla hodnota aktivity uniklé do vnitřní kanalizace zařízení stanovena na 1,3 GBq – ¹³¹I.

Důvodem zjištěného úniku byla zastaralá technologie, chybějící systém včasného varování a nedostatečný servis provedený naposled v roce 2013. Druhotně byla zjištěna přítomnost předmětů v jímkách (hadry, plasty), a to zapříčinilo nedostatečné uzavření výpusti.

Ve stejném roce nastala téměř podobná situace. V nemocničním zařízení bylo nahlášeno, že dochází k úniku radioaktivního obsahu sběrných jímek z oddělení NM. Na základě zjištění, že k únikům dochází nepřetržitě, byla zavřena všechna odtoková potrubí. Při největším úniku aktivity do kanalizace nemocnice byla její hodnota 10150 Bq/l – ¹³¹I. Jako příčina úniku byl identifikován vadný ventil na tzv. bypassu záchytných jímek.

4.3.2 Události ve světě

Ciudad Juarez (Mexiko) 1983 - Kde byla do šrotu dána hlavice terapeutického ZIZ i s Co – 60 zářičem o aktivitě 16,6 TBq. Při manipulování s hlavicí se poškodil obal zářiče, ve kterém se nacházely stovky pilin o aktivitě jednotek GBq. Tyto piliny se rozptýlily po šrotišti a následně byly dopravními prostředky převážející šrot, rozesety na území stovek km². Na nehodu se přišlo náhodou, když kamion, který vezl kontaminovanou ocel, projel v Los Alamos (USA) kolem kontrolních detektorů, které spustily alarm.

O čtyři roky později, tedy v roce 1987, se v chudinské čtvrti města Goiânia (Brazílie) stala závažná radiační nehoda. Z tamní opuštěné kliniky odcizili dva muži zářič i s jeho obsahem, kterým byl práškový chlorid cesný, jeho celková aktivita se rovnala 50,9 TBq. Krátce poté začali oba muži zvracet. Oba muži se domnívali, že zvraceli z důvodu pozření špatného jídla. U jednoho z nich se později objevili průjmy, závratě a otok ruky. Rozhodl se vyhledat pomoc v nemocnici, ve které mu byla diagnostikována alergická reakce a byl poslán domů. Druhý muž nezhálel a mezitím se mu povedlo kapsli rozebrat a její části rozprodat v místním šrotišti. Majitel šrotiště spolu se svou ženou v průběhu dalších dní zvali své různé příbuzné a přátele, aby jim ukázali krásné modré světlo, jež kapsle vyzařovala. Někteří z návštěvníků si dokonce brali maličko prášku z kapsle domů, aby se i oni mohli chlubit. Zanedlouho začala žena majitele šrotiště zvracet a měla i silné průjmy. V nemocnici jí byla také diagnostikována alergická reakce. V následujících dnech bylo s kapslí obsahující radioaktivní prášek manipulováno několika lidmi, včetně jednoho dítěte. (IAEA, 1988)

Žena majitele byla prvním člověkem, kterého napadlo, že by zdravotní potíže mohl způsobovat prášek z kapsle. To co zbylo z kapsle, převezla na pracoviště zdravotního dohledu, zde kapsli odevzdala se slovy: zabijí to mou rodinu. Nemocní lidé byli zpočátku léčeni na nějakou tropickou nemoc. Až jednoho lékaře napadlo, že by se mohlo jednat o poškození způsobené radiací. Toto tvrzení bylo po krátkém, ale důkladném vyšetření potvrzeno. Naštěstí potvrzení přišlo v pravou chvíli, jelikož se skupinka místních hasičů chystala hodit tašku i s kapslí do řeky. Stalo se tak 2 týdny po krádeži. (IAEA, 1988)

Zemřeli zde čtyři lidé včetně děvčete ve věku šesti let. Jejich obdržené dávky se pohybovaly mezi 4,5-6 Gy. Podařilo se zachránit dvě osoby, které obdržely podobně vysoké dávky. V roce 1994 zemřel pátý člověk na jaterní selhání, zapříčiněné radiačním poškozením. (IAEA, 1988)

Další případ se stal v Turecku v roce 1998. Zde v nákladu prodaného kovového šrotu dodatečně zjistili přítomnost dvou Co – 60 zdrojů. Ty byly uloženy v nákladu šrotu v přepravních kontejnerech, takže měřením těžko zjistitelné. Nejméně deset osob, které se šrotem manipulovaly, bylo těžce ozářeno a následně léčeno na nemoc z ozáření. (IAEA, 2000)

K další radiologické nehodě došlo 20. února 1999 na vodní elektrárně Yanango (Peru). Od ranních hodin zde začal svářeč svařovat trubku o průměru 2 m. Kolem poledne na místo přijel radiograf s asistentem, ti měli za úkol provést rentgenový snímek opravovaného úseku, aby se co nejdříve mohl provést hydrostatický test potrubí. Kameru tedy umístili do blízkosti potrubí a čekali do 12 hodin, jelikož všichni pracovníci budou pryč mimo oblast na oběd. Oprava však nebyla do oběda dokončena, proto nemohl být ani pořízen radiografický snímek. Kamera byla na místě ponechána bez dozoru. Po obědě se svářeč i s pomocníky vrátili a pokračovali v opravě trubek. O hodinu později se pokusil radiograf udělat ultrazvukový test, pro kontrolu potrubí, zařízení však selhalo a nemohlo být opraveno. Někdy během dne se zdroj oddělil od kamery. Přibližně v 16:00 svářeč zvedl nestíněný zdroj ^{192}Ir pravou rukou a vložil si jej do pravé zadní kapsy u kalhot. Bohužel svářeč neinformoval o zvednutí zdroje radiografa, který následně volal do San Ramonu, kvůli výměně ultrazvukového zařízení. Rentgenová kamera byla stále ponechána bez dozoru po tuto dobu. Dle tvrzení svářeče od zvednutí zdroje strávil alespoň 3 hodiny v potrubí, kde prováděl opravy. Měl na sobě volné džíny a kolem 21. hodiny

začal pociťovat bolest na zadní straně pravého stehna. Z práce odjížděl přibližně ve 22 hodin minibusem, kde cestovalo dalších 15 lidí a cesta trvala asi 30 min. (IAEA, 2000)

Poté co dorazil domů si stěžoval na bolest své ženě. Sundal si džíny a nechal je i se zdrojem v kapse na zemi v domě. Po návštěvě místního lékaře mu bylo řečeno, že to je kousnutí od hmyzu. Mezitím jeho žena strávila 5 až 10 min sezením na jeho džínách, přičemž ještě kojila jejich dítě. Další jejich dvě děti byly od zdroje 2 nebo 3 metry přibližně dvě hodiny. Poté si svářeč uvědomil, že má zdroj stále v džínách, vytáhl jej pravou rukou a odnesl do koupelny. V 1 hodinu ráno 21. února dorazil ke svářečovu domu provozovatel společnosti, zda neviděl zdroj. Svářeč tedy šel do koupelny a přinesl zdroj ve svých rukou. Radiograf mu okamžitě řekl, ať zahodí zdroj na ulici a neprodleně byly zahájeny obnovovací akce. (IAEA, 2000)

K podobné nehodě došlo v Cochabamba (Bolívie) v roce 2002, kde byl vadný radiografický zdroj ^{192}Ir poslán zpět na do sídla příslušné společnosti v La Paz. Transportován byl pomocí obyčejného osobního autobusu. Autobus byl plně zaplněn cestujícími z Cochabamby do La Paz. Cesta trvala přibližně 8 hodin. Bohužel radiografický technik nepoužíval správně osobní dozimetr, což mělo za následek, že zdroj byl po celou dobu jízdy v nestíněné poloze, což znamenalo možnost vzniku vážném potenciálu expozice jak pro cestující v autobuse, tak i pro zaměstnance společnosti, kteří zdroj používali a transportovali. Až při převzetí zdroje pracovníci společnosti při rutinní kontrole zjistili, že je zdroj stále odkryt a byly okamžitě provedené kroky vedoucí k navrácení zdroje do stíněného kontejneru. Naštěstí zde nedošlo k žádnému úmrtí ani nebyly pozorovány deterministické účinky IZ u cestujících či pracovníků. (IAEA, 2004)

V únoru roku 2000 vznikla radiologická nehoda v Samut Parkarn (Thajsko). Ze špatně hlídaného skladu, který byl určen pro nová auta, sebrali dva místní sběrači šrotu nepoužívané zařízení se zdrojem ^{60}Co . Toto zařízení bylo určené k teleterapii. Poté zařízení rozebrali a prodali do sběru. U lidí, kteří se přímo dotýkali zařízení, se objevila radiační dermatitida, u ostatních se za čas objevily nevolnosti a zvracení. Projevy příznaku nemoci z ozáření se vyskytly u 10 lidí, 3 zemřeli. Na nehodu se přišlo díky lékaři, který vyšetřoval několik jedinců a chytl podezření na možnost radiační expozice z nezajištěného zdroje a nahlásil tuto skutečnost příslušné státnímu orgánu. (IAEA, 2002)

Vážná radiologická nehoda se stala dne 2. prosince 2001 v Gruzii, když tři dřevorubci z vesnice Lia našli při sběru dřeva dva teplé kovové předměty. Tyto dva předměty se

rozhodli použít jako topení, k přečkání studené noci. Později se ukázalo, že se jednalo o zdroje ^{90}Sr s celkovou aktivitou 1259 TBq. Po třech hodinách užívání předmětů jako osobní topení se u nich začaly projevovat nevolnosti, závratě, bolesti hlavy a zvracení. Zhruba po 2 týdnech se jim objevily popáleniny na rukách a nohách. Na klinice jim byla diagnostikována nemoc z ozáření. (IAEA, 2014)

5 DISKUZE

Pro komparaci defektoskopických pracovišť s medicínskými pracovišti, kde je využíváno IZ, za účelem zjištění, na kterém pracovišti je vyšší pravděpodobnost možnosti vzniku nehodových expozičních situací, jsem využil dostupných informací o již v minulosti nastalých nehodách. Ze získaných výsledků bohužel nelze jednoznačně určit pracoviště, u kterého je vyšší pravděpodobnost vzniku nehodových expozičních situací. Za relativně nízký počet RMU v ČR vděčíme vysoké úrovni radiační ochrany, která je kladena na všechny držitele povolení pro nakládání se ZIZ.

Z dostupných materiálů je zřejmé, že mnohem větší počet případů, které měly potenciál k vyústění RMU, jsou z oblasti záchyťů a nálezů radioaktivního materiálu. Těchto případů je každoročně evidováno na desítky. Většinou se nejedná o závažné případy. Řešení a likvidace záchyťů nebo nálezů radioaktivního materiálu jsou velmi rychle řešeny.

Osobně se domnívám, že v České republice je událost obdobná výše uvedené RMU v Ciudad Juarez (Mexiko) značně méně pravděpodobná. Důvodem je zejména důslednější administrativní i fyzická kontrola ZIZ ukládaná držitelům povolení k nakládání „atomovým zákonem“ (AZ) 263/2016, ve kterém je naplňování principu zajištění bezpečnosti ZIZ věnována značná pozornost. Explicitně je v AZ požadavek na zajištění bezpečnosti ZIZ řešen například v § 69 - Zvláštní povinnosti držitele povolení v oblasti zajišťování radiační ochrany“, kde je, mimo jiné, uvedeno „Držitel povolení vykonávající činnost v rámci plánované expoziční situace je povinen provádět inventurní kontrolu zdrojů ionizujícího záření včetně fyzické kontroly jejich přítomnosti a její výsledky oznamovat Úřadu“. (263/2016)

Radiačním rizikům spojeným se ztrátou kontroly nad ZIZ má zabránit i požadavek AZ uvedený v § 91 „Opuštěný zdroj“, kde je v bodě 1 uvedeno: „Provozovatel zařízení určeného k tvorbě, shromažďování a zpracování kovového šrotu je povinen přijmout opatření k vyhledávání opuštěného zdroje a pracovníka, který může být vystaven ionizujícímu záření z opuštěného zdroje,

- a) informovat o účincích ionizujícího záření na lidský organismus,
- b) poučit o tom, jak opuštěný zdroj vizuálně rozpoznat,

c) poučit o opatřeních při nálezů opuštěného zdroje nebo vzniku podezření na jeho přítomnost a

d) pravidelně školit o skutečnostech podle písmen a) až c). (263/2016)

Co se týče nešťastné události ve městě Goiânia, při které zemřeli nevinní lidé, nedával bych za největší vinu dvou mužům, kteří odcizili zářič chlorid cesný, ale spíše se zde jako fatální chyba ukázala nebezpečnost opuštěné budovy bývalé kliniky. Jelikož se bývalá klinika nacházela v chudinské čtvrti, troufnu si říct, že riziko nepovoleného vstupu bylo dosti pravděpodobné. Oba muži neměli nejmenší tušení, s jak nebezpečnou věcí si zahrávají, protože vzdělanost v těchto čtvrtích bývá na nízké úrovni. Dle mého názoru je ke krádeži vedla především chudoba a ani v nejmenším neměli za cíl někomu ublížit. V ČR jsou tyto zdroje pod větší administrativní kontrolou, díky tomu je neoprávněný vstup do prostorů se ZIZ mnohem méně pravděpodobnější, a tudíž je zde i minimalizováno riziko vzniku nehodové expoziční situace.

Za nehodou, která se stala v Istanbulu, je hned několik příčin. Zdroje zde byly uloženy bez souhlasu regulačního orgánu Trukish Atomic Energy Authority (TAEK). Opatření společnosti k zajištění bezpečnosti byly neadekvátní a nebyly prováděny ani pravidelné kontroly. Díky těmto faktorům byl umožněn neoprávněný prodej, který způsobil nehodu. Dalším problémem byla evidence, ta měla za následek, že nebylo možné potvrdit o který zdroj se jedná. A to i přesto, že právnické osoby mají za povinnost vést přesné záznamy o svých radioaktivních látkách.

Za událost, která se stala v Peru, nesl hlavní zodpovědnost zaměstnavatel. Dohled nad zdrojem ¹⁹²Ir a opatření k zajištění jeho bezpečnosti byly nepřiměřené. Práce vyžadující pracovní expozici musí být náležitě kontrolovány a zdroje musí být udržovány v bezpečí, aby se zabránilo neoprávněnému užití. Mobilní zařízení jako radiografické kamery nesmí být v žádném případě ponechány bez dozoru. Osoba odpovědná za provedení rentgenového snímku nebyla plně vyškolená. Svářeč neměl nejmenší tušení o nebezpečích zařízení, přesto mu bylo dovoleno pracovat bez dozoru v blízkosti radiografické kamery. Osobám, které přímo nepracují se zdroji záření, ale pracují v okolí, by měly být poskytnuty příslušné informace a mohou vyžadovat i školení.

Jako hlavní příčinu u nehody v Cochabombě bych označil selhání radiografických pracovníků, kteří měli provádět monitorování dávkového příkonu po každé radiografii.

Radiografická organizace, která byla přítomna u nehody, měla některá pravidla neúplná či neaktuální. To nejdůležitější však bylo, že některá pravidla nebyla vůbec dodržována. Žádný z přítomných radiografů neměl dostatečnou kvalifikaci v radiační bezpečnosti, přestože byl tento nedostatek již před nehodou zaznamenán regulačním orgánem. Nebylo zde ani prokázáno, že by společnost měla zavedené nějaké preventivní opatření pro údržbu radiografického zařízení. Je velice nepravděpodobné, že by se něco podobného stalo v ČR, protože na osoby obsluhující radiografické zdroje jsou kladeny vysoké požadavky a musejí být plně vyškoleny a kvalifikovány. Také pravidelné rekvalifikace pomáhají zajistit požadovanou způsobilost.

Zodpovědný za nehodu, která se stala v Samut Prakarn, je původní majitel zařízení. Tento držitel oprávnění nakládání se ZIZ, prodal nepoužívaný zdroj bez toho, aby o tom uvědomil příslušný regulační orgán. Svým způsobem je vinen i příjemce, jelikož nebyl oprávněn zdroj přijmout. Dále se na kontejneru se zdrojem nenacházely žádné výstražné značky v místním jazyce. Pokud by tam byly, je možné, že by to muže od rozebrání zařízení odradilo.

Za vážnou nehodu, která se stala v Gruzii, bych jako hlavní příčinu označil nesprávné a neoprávněné opuštění radioaktivních zdrojů ^{90}Sr v Gruzii. Kromě toho na předmětech nebyly žádné jasné štítky ani radiační značky, které by upozorňovaly na potenciální radiační nebezpečí. V ČR jsou tyto zdroje příslušně označeny, dle jednotné normy v souladu s mezinárodními normami, aby se předcházelo možnosti vzniku nehody jako v Gruzii.

Na oddělení NM jsou využívány ORZ, které se aplikují pacientům. Pokud by se stalo, že úroveň kontaminace překročila hodnotu, která je vymezená v havarijním plánu pracoviště NM, je ihned zahájena dekontaminace v souladu s příslušnými havarijními akčními úrovněmi.

V průmyslovém odvětví je více příležitosti při vzniku RMU. Jako příklad zde uvedu RMU, která se stala v roce 2019. Při karotážním měření vrtu došlo k zachycení sondy ve vrtu, v hloubce zhruba 340 m. Jednalo se o hlubinnou sondu gamma karotáž, která slouží k měření hustoty hornin pomocí izotopu ^{137}Cs . Protože se sondu nepodařilo vyprostit v den vzniku RMU, byla zanalyzována situace a navrženy postupy vedoucí k uvolnění uvízlé sondy. Navrženými postupy se sondu podařilo uvolnit a následně vytáhnout z vrtu. Při vzniku, ani při likvidaci RMU nedošlo k žádnému neobvyklému mechanickému

namáhání sondy se zářičem, sonda byla stále připojená ke karotážnímu kabelu a byla plně funkční. Po provedení zkoušky provozní stálosti sondy bylo konstatováno, že nedošlo k žádnému poškození sondy, ani držáku zářiče. Při likvidaci havárie nedošlo k porušení těsnosti zářiče, ani nedošlo k ozáření osob. V tomto případě se naštěstí nic nestalo, ale stačilo, aby se jen trochu porušila těsnost zářiče a následně by došlo k ozáření osob.

Z výsledků, které jsem získal lze vyvodit, že radiační ochrana v ČR je na dobré úrovni. Riziko vzniku nehodové expoziční situace samozřejmě nelze zcela vyloučit, ovšem můžeme se domnívat, že případně vzniklé RMU jsou okamžitě řešeny, aby došlo k co nejmenším radiologickým dopadům. Lidé, kteří jakkoliv manipulují s radioaktivním zářičem, jsou školeni pro případ vzniku RMU. Ale jak z mých výsledků vyplývá, způsobit RMU na pracovištích s IZ, může způsobit jak lidský faktor, tak i technická závada.

Jak je již výše uvedeno, v letech 2003-2018 nastalo celkem 28 RMU na pracovištích s ZIZ vyjma velmi významných zdrojů IZ (jaderné reaktory). Na zdravotnických pracovištích bylo zaznamenáno celkem 15 RMU, zatímco v průmyslu to bylo 13 případů. Rozdíl je velmi nepatrný, tudíž nelze s dostatečnou spolehlivostí říct, která pracoviště mají větší potenciál ke vzniku RMU. Přestože výsledky nejsou jednoznačné, na základě níže uvedených kritérií lze konstatovat, že vyšší potenciál lze usuzovat v průmyslových pracovištích. Mým prvním kritériem byl počet těchto pracovišť. Využití ZIZ v průmyslovém odvětví je mnohem více, a tudíž i počet pracovišť bude větší, což znamená čím více průmyslových pracovišť, tím větší šance, že se na nějakém vznikne RMU. Další kritérium, které mi pomohlo v rozhodování, bylo, zda se ZIZ mobilní, tudíž se s ním dá pohybovat z místa na místo nebo stacionární. Většina zdravotnických pracovišť mají ZIZ stacionární, zatímco u průmyslových tomu tak není a je nespočet mobilních ZIZ využívajících v průmyslovém odvětví. S tím souvisí i pravděpodobnost neoprávněné manipulace nepovolanými lidmi.

6 ZÁVĚR

Pracoviště, kde je využíváno defektoskopických přístrojů i pracoviště NM, mají přísná opatření, co se týče radiační ochrany. V posledních 10 ti letech na zmíněných pracovištích nevznikla radiační nehoda ani radiační havárie. Je nutno zvážit všechny činnosti, které by mohly mít za následek vznik RMU. Z nastalých RMU 1. stupně je zřejmé, že ve zdravotnictví nastalo o dva případy víc než v průmyslu. Myslím si, že toto číslo je zanedbatelné a pracoviště jsou si více méně rovna. Z výše popsaných skutečností ovšem plyne, že průmyslová pracoviště mají větší potenciál ke vzniku nehodových expozičních situací a to zejména z následujících důvodů. Prvním důvodem je větší počet průmyslových pracovišť než zdravotnických. Druhým důvodem je možnost mobilního využití a s tím spojená nižší možnost administrativní kontroly. Specifikem u průmyslových mobilních ZIZ je, že v případě vzniku RMU ohrožují tyto události výrazně menší počet osob z hlediska přítomnosti bariér. Například kartotážní sonda uvízla ve vrtu, pokud při pokusech o vytažení nedojde k porušení těsnosti zářiče, nedojde k ozáření osob, stačí ale jakékoliv neobvyklé mechanické poškození a dojde ke vzniku RMU. A takovýchto případů může být víc. Jelikož nedošlo k poškození zářiče, nic se nestalo, a proto také nekonfigurují v mém výčtu RMU, ale ne vždy musí dojít k poškození zářiče. A v poslední řadě bych také chtěl upozornit na nálezy a záchyty radioaktivního materiálu. Počet případů nálezů či záchyťů radioaktivního materiálu je mnohem větší. Z historie také víme, že tyto radioaktivní materiály ať už jsou ve šrotu či na volném prostranství mohou napáchat dosti velké škody. Naštěstí systém radiační ochrany v ČR je na vysoké úrovni a jsou zde i navržená opatření, aby se nestaly události nastalé v historii jiných zemí.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DRÁBKOVÁ, Alena, 2006. *Historie radiační ochrany v ČR: 10 let Státního ústavu radiační ochrany 1995-2005*. Praha: Státní ústav radiační ochrany. ISBN 80-239-6594-8.
2. Edited by Peter F. SHARP, Edited by Peter F. Howard G. GEMMEL, Edited by Aison D. MURRAY *Practical Nuclear Medicine*. 3rd ed. London: Springer-Verlag London Ltd, 2005. ISBN 9781846280184.
3. HÁLA, Jiří, 1998. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno: Konvoj. ISBN 80-856-1556-8.
4. HUŠÁK, Václav. *Radiační ochrana pro radiologické asistenty*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009, 138 s. ISBN 978-80-244-2350-0.
5. IAEA: International Atomic Energy Agency. [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/about>
6. IAEA: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Categorization of Radioactive Sources, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9, IAEA, Vienna (2005). ICRP: International Commission on Radiological Protection. [online]. [cit. 2019-7-20]. Dostupné z: <http://www.icrp.org/index.asp>
7. IAEA, 1988. The Radiological Accident in Goiânia [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2020-05-29]. ISBN 92-0-129088-8. Dostupné z: https://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub815_web.pdf
8. IAEA, 2000. The Radiological Accident in Istanbul [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2020-05-29]. ISBN 92-0-101400-7. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1102_web.pdf
9. IAEA, 2000. The Radiological Accident in Yanango [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2020-05-29]. ISBN 92-0-101500-3. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1101_web.pdf
10. IAEA, 2002. The Radiological Accident in Samut Prakarn [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2020-05-29]. ISBN 92-0-110902-4. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1124_scr.pdf

11. IAEA, 2004. The Radiological Accident in Cochabamba [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2020-05-29]. ISBN 92-0-107604-5. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1199_web.pdf
12. IAEA, 2014. The Radiological Accident in Lia, Georgia [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2020-05-29]. ISBN 978-92-0-103614-8. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1660web-81061875.pdf>
13. ICRP PUBLICATION 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 2007 [online]. [cit. 2019 01 15]. Dostupné z: <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2013>
14. IRPA: International radiation protection association. [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.irpa.net/page.asp?id=10>
15. KLENER, Vladislav. 2000. *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vyd. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. ISBN 8023837036.
16. KOLEKTIV AUTORŮ. *Radiobiologie*. 2011. [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org>
17. KOPEC, Bernard, 2008. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-807-2045-914.
18. KROUPA, Miroslav a Milan ŘÍHA. 2010. *Průmyslové havárie*. 2. vyd. Praha: Armex. Skripta pro střední a vyšší odborné školy. ISBN 9788086795874.
19. KUNA, Pavel a Leoš NAVRÁTIL. 2005. *Klinická radiobiologie*. 1. vyd. Praha: Manus. ISBN 8086571092.
20. KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína: [učební text]*. 1. vyd. Praha: P3K, c2007, 185, xiv s. ISBN 978-80-903584-9-
21. MALÍKOVÁ, Hana, 2019. *Základy radiologie a zobrazovacích metod*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum. ISBN 978-80-246-4036-5.
22. MATOUŠEK, Jiří, Jan ÖSTERREICHER a Petr LINHART, 2007. *CBRN: jaderné zbraně a radiologické materiály*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-029-6.

23. MIKA, Otakar J., 2003. *Průmyslové havárie*. Praha: Triton. Řešení krizových situací. ISBN 80-725-4455-1.
24. MYSLIVEČEK, Miroslav. *Nukleární medicína*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2007, 131 s. Skriptum (Univerzita Palackého). ISBN 9788024417233.
25. NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, 2005. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada. ISBN 80-247-1152-4.
26. PROUZA, 2008. *Principy radiační ochrany – bezpečnost a ochrana zdraví při práci*. [Online]Praha. Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v. v. i. [cit. 2019-03-01] Dostupné z: <http://www.bozpinfo.cz/principy-radiacni-ochrany-bezpecnost-ochrana-zdravi-pri-praci>
27. *Radiační ochrana*, DAMIO [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.diamo.cz/cs/tuu/radiacni-ochrana>
28. Radiation and Me: *Gauging Devices*, Radiation answers [online]. RadiationAnswers.org [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses/industrial-uses/gauging-devices.html>
29. ROZLÍVKA, Zdeněk RNDr. *Radiační ochrana na pracovištích s diagnostickými rentgeny ve zdravotnictví: učební texty kurzu*. Pardubice: UNIT spol.s.r.o., únor 2006.
30. SABOL, Jozef a Petr VLČEK, 2011 *Radiační ochrana v radioterapii*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04757-6.
31. SINGER, Jan a Jindřiška HEŘMANSKÁ. *Principy radiační ochrany*. 1. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2004, 111 s. ISBN 80-7040-7085
32. SÚRO. 2000. *Principy radiační ochrany*. Státní ústav radiační ochrany [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/principy-radiacni-ochrany>
33. ULLMANN, Vojtěch. 2005. V.: *Astronuklfyzika* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz>
34. Ullmann Vojtěch: *Cíle a metody ochrany před zářením*. [online]. [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>

35. Vyhláška č. 359/2016 Sb. o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události, 2016. In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 14, s. 5613-5641.
36. Vyhláška č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, 2016, In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 172, s. 6618-6904.
37. Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, 2016. In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 102, s. 3938-4060.

8 SEZNAM ZKRTEK

ALARA – As Low As Reasonably Achievable (Tak nízké, jak je roudmně dosažitelné)

AZ – atomový zákon

CT – computed tomography (Počítačová tomografie)

ČSN – Československá státní norma

EPS – elektrická požární signalizace

IAEA – International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)

ICRP – International Commission on Radiological Protection (Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu)

IRPA – International Radiation Protection Association (Mezinárodní asociace radiační ochrany)

IZ – ionizující záření

JE – jaderná elektrárna

KP – kontrolované pásmo

NM – nukleární medicína

ORZ – otevřený radionuklidový zdroj

PDE – příkon dávkového ekvivalentu

PET – Pozitronová emisní tomografie

RMU – radiační mimořádná událost

RN – radiační nehoda

RU – radiologická událost

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SÚRO – Státní úřad radiační ochrany

TAEK – Trukish Atomic Energy Authority

URZ – uzavřeny radionuklidový zdroj

VHP – vnitřní havarijní plán

ZDS – zkouška dlouhodobé stálosti

ZIZ – zdroje ionizujícího záření

ZPS – zkouška provozní stálosti