



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 2019](#)

## **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 13.8.2019

.....

*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 je v současné době využíváno v mnoha oborech (radioterapie, nukleární medicína, urychlovače, defektoskopie, průmysl). Na odděleních nukleární medicíny 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 ionizujícího záření. Dále je v práci popsán systém radiační ochrany, biologické účinky ionizujícího záření (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 situaci s radiologickými dopady?

Jako metodika výzkumu bylo zvoleno shromažďování informací z odborných publikací s touto tematikou. Dále probíhaly konzultace s radiologickými fyziky na oddělení nukleární medicíny 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 nukleární medicíny. 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 nukleární medicíny.

**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 IZ 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 IZ 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

<b>ÚVOD</b> .....	<b>- 8 -</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>- 9 -</b>
1.1 RADIOAKTIVITA.....	- 9 -
1.2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ .....	- 9 -
1.3 ZDROJE IZ PODLE ZPŮSOBU JEJICH VZNIKU .....	- 10 -
1.4 OCHRANA PŘED IZ.....	- 11 -
1.5 RADIAČNÍ MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST .....	- 12 -
1.5.1 <i>Definice radiační mimořádné události</i> .....	- 12 -
1.5.2 <i>Kategorie ohrožení</i> .....	- 13 -
1.5.3 <i>Vnitřní havarijní plán</i> .....	- 13 -
1.5.4 <i>Připravenost k odezvě</i> .....	- 14 -
1.6 KATEGORIZACE ZABEZPEČENÍ RADIONUKLIDOVÝCH ZDROJŮ .....	- 14 -
1.7 RADIOLOGICKÁ UDÁLOST .....	- 16 -
1.7.1 <i>Definice radiologické události</i> .....	- 16 -
1.7.2 <i>Klasifikace radiologických událostí</i> .....	- 16 -
1.8 RADIAČNÍ OCHRANA .....	- 17 -
1.8.1 <i>Veličiny a jednotky radiační ochrany</i> .....	- 17 -
1.8.2 <i>Veličiny charakterizující zdroje záření IZ</i> .....	- 18 -
1.8.3 <i>Veličiny charakterizující působení záření IZ na látku</i> .....	- 18 -
1.8.4 <i>Veličiny radiační ochrany</i> .....	- 19 -
1.9 SYSTÉM RADIAČNÍ OCHRANY.....	- 21 -
1.9.1 <i>Typy expozičních situací</i> .....	- 21 -
1.9.2 <i>Kategorie expozice</i> .....	- 22 -
1.9.3 <i>Principy radiační ochrany</i> .....	- 22 -
1.9.4 <i>Monitorování v radiační ochraně</i> .....	- 24 -
1.10 VLIV IZ NA ZDRAVÍ ČLOVĚKA.....	- 27 -
1.10.1 <i>Vnější kontaminace</i> .....	- 27 -
1.10.2 <i>Vnitřní kontaminace</i> .....	- 27 -
1.10.3 <i>Deterministické účinky</i> .....	- 27 -
1.10.4 <i>Stochastické účinky</i> .....	- 28 -
<b>2 POUŽITÍ ZIZ V LÉKAŘSTVÍ</b> .....	<b>- 28 -</b>



2.1	RADIODIAGNOSTIKA .....	- 28 -
2.1.1	<i>Požadované zkoušky ZIZ.....</i>	- 29 -
2.2	NUKLEÁRNÍ MEDICÍNA .....	- 31 -
2.2.1	<i>Radiofarmaka a radionuklidy .....</i>	- 31 -
<b>3</b>	<b>PRŮMYSLOVÉ ZDROJE IZ.....</b>	<b>- 32 -</b>
3.1	DEFEKTOSKOPIE .....	- 32 -
3.1.1	<i>Typy defektoskopie.....</i>	- 33 -
3.1.2	<i>Radiační ochrana v průmyslové defektoskopii .....</i>	- 35 -
3.2	OZAŘOVAČE .....	- 36 -
3.2.1	<i>Typy ozařovačů .....</i>	- 37 -
3.3	GAUGING DEVICES .....	- 38 -
3.3.1	<i>Typy měřidel .....</i>	- 39 -
<b>4</b>	<b>VÝZKUMNÁ OTÁZKA A METODIKA.....</b>	<b>- 40 -</b>
4.1	VÝZKUMNÁ OTÁZKA.....	- 40 -
4.2	METODIKA.....	- 40 -
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>- 41 -</b>
5.1	STATISTICKÉ ÚDAJE .....	- 41 -
5.2	PRŮMYSL .....	- 43 -
5.2.1	<i>Události v průmyslu .....</i>	- 44 -
5.3	ZDRAVOTNICKÁ ZAŘÍZENÍ .....	- 44 -
5.3.1	<i>Události ve zdravotnictví .....</i>	- 46 -
<b>6</b>	<b>DISKUZE .....</b>	<b>- 46 -</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>- 49 -</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>- 50 -</b>
	<b>SEZNAM ZKRTEK .....</b>	<b>- 53 -</b>

## ÚVOD

Zdroje ionizujícího záření (dále jen ZIZ) se v dnešní době využívají v mnoha oborech a odvětvích. Podle evidence Státního úřadu pro jadernou bezpečnost 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 využívaných v průmyslu a 183 využívaných ve školství a výzkumu. Používaných otevřených radionuklidových zdrojů 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 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 IZ (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 závislá 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. Naopak umělá radioaktivita je závislá na zásahu zvenčí, který vyvolá nestabilitu jádra uměle. Nejčastějším případem je jaderná reakce (Hála, 1998).

## 1.2 Ionizující záření

Záření, které označujeme jako ionizující (IZ), vzniká buď při jaderných procesech nebo v tzv. generátoru záření, který je závislý na připojení zdroje napětí. Pokud jde o jaderné IZ, jsou z jader 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 ionizujícího záření řadíme částice s elektrickým nábojem, tj. záření alfa, beta, resp. protony. Do nepřímo ionizujícího záření patří rentgenové záření, neutronové 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 minus a beta plus. U beta plus záření je emitován pozitron a u beta minus 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 – 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, těmi jsou přírodní a umělé zdroje. Existenci a působení přírodních 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), (Ullmann, 2005).

Do kategorie technických zdrojů IZ řadíme jednak katodové trubice, nebo vakuové obrazovky, průmyslové rentgeny, URZ využívané v defektoskopii, analytické měřidla, hladinoměry atd. Jaderné zdroje jsou využívány v jaderné energetice, resp. výzkumu. Nelze opomenout ani její radioaktivní odpady, které k ní neodmyslitelně patří a je potřeba je bezpečně ukládat. Dále sem můžeme zařadit kontaminaci jako následek havárií na jaderných reaktorech a kontaminaci způsobenou radioaktivním spadem po zkouškách jaderných zbraní (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 jako hlavní cíl snížení rizika vzniku stochastických a deterministických účinků. Projev účinků se liší v orgánech a tkáních dle velikosti intenzity, energie a 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 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 záření 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 pracující 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 takováto událost vyžaduje provést opatření, které z pohledu radiační ochrany zabraňují k překročení limitů ozáření nebo zadržet dále se zhoršující událost (Zákon č. 263/2016 Sb.).

RMU můžeme podle atomového zákona rozdělit na základě připravenosti na reakci RMU na RMU prvního stupně, radiační nehodu a radiační havárii, viz Tab.1

Tabulka 1 Stupně radiační mimořádné události

Radiační mimořádná událost	Popis
RMU prvního stupně	Síly a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž působení RMU vznikla, jsou schopni tuto událost zvládnout.
Radiační nehoda	Síly a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávající práci v aktuální směně osoby, při jejíž působení RMU vznikla, nejsou schopni událost zvládnout sami. Nebo se také může jednat o nález, ztrátu nebo zneužití radionuklidového zdroje, při čemž tato událost nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo.
Radiační havárie	Není možné zvládnout silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávající práci v aktuální směně, při jejíž působení RMU vznikla. Dále se také může jednat o nález, ztrátu nebo zneužití radionuklidového zdroje, v tomto případě si událost vyžaduje zavedení neodkladných ochranným opatření pro obyvatelstvo, tzn. ukrytí, evakuace a jódová profylaxe.

Zdroj: (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.2 (Zákon 263/2016 Sb., 2016).

Tabulka 2 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 štěpně 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.)

### 1.5.3 Vnitřní havarijní plán

Vnitřní havarijní plán (VHP) je dokument, který vypracovává držitel povolení SÚJB pro používání ZIZ a předkládá ho SÚJB k posouzení, resp. schválení (podle kategorie pracoviště). Slouží jako závazný dokument pro havarijní připravenost pro zabránění vzniku RMU, resp. k minimalizování důsledků vzniklé RMU. Obsahem VHP jsou postupy vedoucí k havarijní připravenosti a řešení předpokládaných RMU na konkrétním pracovišti. Požadavky na obsah VHP jsou stanoveny vyhláškou č. 359/2016 Sb.

#### **1.5.4 Přípravenost k odezvě**

Držitel povolení pro využívání IZ má za povinnost zajistit připravenost k odezvě na pracovišti. Dále má za úkol zavést do praxe organizační, technické a personální podmínky, které pomáhají k co nejrychlejšímu zvládnutí RMU při jejím vzniku. Přípravenost k odezvě spolu s přípravou zaměstnanců představují nedílnou součást prevence při vzniku nebo šíření RMU. Příprava a její postupy jsou k nalezení ve VHP (Klener, 2000).

V rámci prevence jsou všichni zaměstnanci a další osoby prokazatelně seznámeni s připraveností k odezvě na RMU tedy i s obsahem VHP. Tímto školením projdou lidé zejména při nástupu do zaměstnání a ostatní jsou znovu školeni minimálně jedenkrát za rok. V případě revize VHP probíhá seznámení v rozsahu relevantních změn. Poté následuje ověření znalostí z obsahu VHP a zásahových instrukcí (Klener, 2000). Tato povinnost je uložena držiteli povolení zákonem č. 263/2016 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. 3

1. ZIZ 1. kategorie zabezpečení:
  - a. Radionuklidový termoelektrický generátor
  - b. Radionuklidový ozařovač, včetně ozařovače tkání a krve
  - c. URZ, u kterého je poměr aktuální aktivity a D-hodnoty roven 1000 nebo větší
  - d. ORZ, u kterého je poměr nejvyšší zpracovávané aktivity na pracovišti a D-hodnoty roven 1000 nebo větší
2. ZIZ 2. kategorie zabezpečení
  - a. URZ určený pro defektoskopii,
  - b. URZ určený k brachyterapii s vysokým nebo středním dávkovým příkonem,



- c. URZ neuvedený v písmenu a) nebo b), u kterého je poměr aktuální aktivity a D-hodnoty menší než 1000 a zároveň roven 10 nebo větší, nebo
  - d. ORZ, u kterého je poměr nejvýše zpracovávané aktivity na pracovišti a D-hodnoty menší než 1000 a zároveň roven 10 nebo větší.
3. ZIZ 3. kategorie zabezpečení
- a. URZ pro karotáž,
  - b. URZ v indikačním nebo měřicím zařízení, který je vysokoaktivním zdrojem,
  - c. URZ neuvedený v písmenu a) nebo b), u kterého je poměr aktuální aktivity a D-hodnoty menší než 10 a zároveň roven 1 nebo větší
  - d. ORZ, u kterého je poměr nejvýše zpracovávané aktivity na pracovišti a D-hodnoty menší než 10 a zároveň roven 1 nebo větší,
  - e. kapalná či pevná látka obsahující více než 30 % uranu, jejíž aktivita je větší než 160 MBq.
4. ZIZ 4. kategorie zabezpečení
- a. URZ určený k brachyterapii s nízkým dávkovým příkonem...
  - b. URZ v indikačním nebo měřicím zařízení, který není HASS,
  - c. URZ v eliminátoru statické elektřiny...
5. ZIZ 5. kategorie zabezpečení
- a. ZIZ pro radionuklidovou rentgenofluorescenční analýzu,
  - b. detektor elektronového záchytu,
  - c. kalibrační zdroj ionizujícího záření pro pozitronovou emisní tomografii...

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.

Tabulka 3 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	Nepravděpodobně nebezpečný	$1 > A/D \geq 0,01$
5	Velmi nepravděpodobně nebezpečný	$0,01 > A/D$

Zdroj: (IAEA, 2005)

## ***1.7 Radiologická událost***

### ***1.7.1 Definice radiologické události***

Jako radiologická událost 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, jenž 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 rtg. 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 a B jsou považovány za závažné, viz. Tab. 4.

Tabulka 4 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, 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 ( $\lambda$ ). Mezi uvedenými dvěma veličinami platí vztah (Matoušek et al., 2007):

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

Aktivita – je veličina popisující fyzikální jev radioaktivita. 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).

Energie emitovaných částic – určuje jednoznačnou charakteristiku daného radionuklidu, jelikož na energii výrazně závisí vlastnosti emitovaného záření (dolet částic, působení záření na člověka atd.) Jednotkou je joule (J). V atomové a jaderné fyzice se jako jednotky používají elektronvolty (eV) nebo jejich násobky. Platí zde  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Většina radionuklidů nevyzařuje pouze záření o jedné energii, a proto daný radionuklid popisujeme energetickým spektrem, které rozděluje vyzářené částice podle jejich druhu a energie (Klener, 2000).

### **1.8.3 Veličiny charakterizující působení záření IZ na látku**

Veličiny, 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 říci, 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  $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ .

#### 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 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. 5.

Tabulka 5 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 závislost 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 k 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 k IZ a tyto koeficienty posloužili 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. 6 (Matoušek et al., 2007).

Tabulka 6 Hodnoty tkáňových váhových faktorů

Tkáň	Tkáňový váhový faktor	Tkáň	
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***

Mezinárodní agentura pro radiační ochranu IRPA, která vznikla v roce 1965, pořádá mezinárodní schůzky jejích členů a společenství. Hlavním úkolem setkání je řešení problematiky radiační ochrany (IRPA, 2019). Další agenturou je Mezinárodní agentura pro atomovou energii. 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). ICRP je nezávislá mezinárodní organizace, jejímž hlavním zaměřením je rozvoj radiační ochrany. To se děje hlavně skrze různé doporučení a metodiky, které se zabývají všemi aspekty ochrany před IZ. Evropské společenství pro atomovou energii (Euroatom) byl založen 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 exponované záření. Následně jsou uvedeny všechny myslitelné expozice

Plánované expoziční situace jsou situace, které 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 jsou takové situace, které se mohou vyskytnout během provádění plánovaných situací nebo při jakékoliv jiné neočekávané situaci, při které je zapotřebí neodkladné opatření, které má za cíl zabránit nežádoucím důsledkům nebo aspoň 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 expozice, 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. Do profesní expozice se obvykle nezapočítávají expozice, které jsou vyňaty z regulace a expozice ze zdrojů a činností vyloučené z regulace. Zaměstnavatel a držitel povolení odpovědný za zdroj jsou odpovědní za ochranu pracovníků (zaměstnavatel může být zároveň držitelem povolení). V případě že zaměstnavatel nemá pod kontrolou zdroj IZ, měli by s držitelem povolení odpovědným za zdroj spolupracovat, vyměňovat si informace za účelem usnadnit zavedení správné regulace radiační ochrany pracovníků (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. Ozařuje 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 nevhodnými 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, jenž 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 jak optimalizaci dávek na 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 na riziky spojenými s užitím IZ.

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

Tento princip je definován rovněž ve zkratce ALARA 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 bezpečnosti zdroje IZ je míněno zajištění technické bezpečnosti, tj. vlastnosti zdrojů IZ. To je prováděno systémem zkoušek, ověřováním a hodnocením ZIZ při po jeho instalaci či převzetí do držby ( pomocí přijímacích zkoušek) a dále v průběhu používání ZIZ 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 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 pracoviště jsou tyto části (Damio, 2019):

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

Podle frekvence provádění rozlišujeme monitorování soustavné, pravidelné, operativní. Soustavné monitorování je nepřetržité, neustále monitoruje a potvrzuje, že současné pracovní podmínky jsou stále bezpečné v souladu s požadavky a postupy pro optimalizaci radiační ochrany. Soustavné monitorování je vždy spojenou s danou praxí. Pravidelné

monitorování má stejný cíl jako soustavné, tedy prokazovat, že dané pracovní podmínky jsou stále bezpečné, ale na rozdíl od soustavného je prováděno v určených intervalech a je opakováno. Posledním typem je operativní monitorování. To je prováděno pouze při specifické činnosti a má za cíl hodnocení a přijatelnost konkrétní situace z pohledu systému limitování (Klener, 2000).

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).

### **Program monitorování**

Program monitorování je dokument, který je předkládán SÚJB k posouzení či schválení v rámci povolované činnosti se ZIZ. Jeho obsah musí být sestaven tak, aby popisoval způsoby monitorování na konkrétním pracovišti s konkrétním ZIZ a výsledky byly postačující pro posouzení, zda je optimalizace radiační ochrany na konkrétním pracovišti dostatečná a k ověření, zda jsou pracovní podmínky přijatelné a odpovídají podmínkám ve vydaném povolení k nakládání se ZIZ, resp. v platné legislativě.

Musí obsahovat:

- pravidla monitorování pro běžný provoz pracoviště,
- předvídatelné odchylky od běžného provozu pracoviště,
- radiační nehodu a radiační havárii

Musí umožňovat:

- ověření dodržování limitů ozáření,
- prokazování, že radiační ochrana je optimalizována,
- včasné zjištění odchylek od běžného provozu pracoviště.

(Vyhláška č. 422/2016 Sb.)

## **1. Monitorování pracoviště**

Monitorování pracoviště musí být podle druhů používaných zdrojů ionizujícího záření prováděno

- a) monitorováním příkonů dávkového ekvivalentu na pracovišti,
- b) monitorováním objemových aktivit v ovzduší pracoviště a plošných aktivit na pracovišti, nebo
- c) měřením neúčinného záření u zdroje ionizujícího záření. nové

Monitorování kontaminace na pracovišti s otevřeným radionuklidovým zdrojem (ORZ) musí být prováděno tak, aby potvrdilo nepřekročení hodnot pro radioaktivní kontaminaci povrchu, které stanovuje příloha č. 18 vyhláška č. 422/2016 Sb. (vyhláška 422/2016 Sb.)

Monitorování povrchové kontaminace radionuklidy na pracovištích s ORZ slouží ke včasnému rozpoznání odchylky od běžných optimalizovaných postupů nebo nedostatečné funkce bariér bránících rozptýlu radioaktivních látek. (Rozlívka, 2006).

## **2. Osobní monitorování**

Hlavní úlohou osobního monitorování je určit individuální dávku ze zevního i vnitřního ozáření u jednotlivých osob i skupin osob. Rozlišujeme dvě kategorie pracovníků pro účely monitorování a hodnocení ozáření. Pracovník kategorie A je pracovník, který nakládá se ZIZ v rámci povolených činností, a je vystaven pravděpodobnosti překročení efektivní dávky 6 mSv ročně nebo 3/10 ročního limitu ekvivalentní dávky na oční čočku, končetiny či kůži, Tento pracovník musí podstupovat pravidelné lékařské kontroly a podléhat osobnímu monitorování s jednoměsíční lhůtou vyhodnocení osobních dávek (Klener, 2000, zákon č. 263/2016 Sb.).

## **3. Monitorování výpustí**

Cílem tohoto monitorování je nepřetržitě, resp. pravidelně měřit, sledovat a zaznamenávat celkovou hmotnost či objemovou aktivitu vypuštěných radioaktivních

látek do životního prostředí. Mohou to být kontaminované odpady v pevném, kapalném nebo plynném skupenství (Rozlívka, 2006).

## ***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  $^{90}\text{Sr}$ , které se váže v kostech nebo jod  $^{131}\text{I}$ , 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 přímo úměrně roste

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

## **2 POUŽITÍ ZIZ V LÉKAŘSTVÍ**

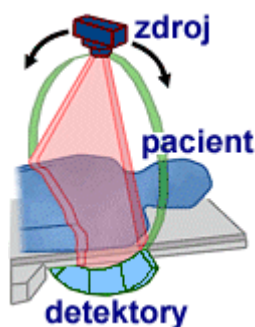
### ***2.1 Radiodiagnostika***

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 nevyužívá IZ atd. (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 1. Počítačová tomografie poskytuje velmi přesné a kvalitní vyšetření spojené s diagnostickou informací (Malíková, 2019).



Obrázek 1 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 MZ v rámci preventivní péče za účelem včasného odhalení karcinomu prsu. (Malíková, 2019).

### **2.1.1 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.

## **Přejímací zkoušky**

Přejímací zkouška musí být provedena vždy, když po instalaci nového zařízení nebo byla provedena modifikace zařízení. Cílem zkoušky je zkontrolovat, zda nové nebo modifikované zařízení je v souladu s vlastnostmi zařízení, které výrobce uvedl v technické dokumentaci, se specifickými ustanoveními technických norem a s dalšími potřebami uvedenými v kupní smlouvě mezi odběratelem a dodavatelem. Přejímací zkoušky vykonávají pouze osoby, které mají povolení SÚJB pro vykonávání hodnocení vlastností ZIZ (Klener, 2000 a vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Podle účelu, ke kterému je zařízení určeno, a podle složitosti zařízení se odvíjí i rozsáhlost zkoušky. Nejnižší rozsah, který může zkouška mít u jednotlivých typů zařízení (skiaskopii, skiografie, mamografie, CT atd.), najdeme uvedený v řadě norem ČSN EN61223-3. Uvedu zde alespoň pár základních parametrů jako je přesnost anodového napětí, kvalita svazku rentgenového záření ovlivňující dávku aplikovanou pacientovi a kontrast zobrazení, přesnost vymezení ozařovaného pole atd. Archivované výsledky přejímacích zkoušky ve formě protokolu později poslouží k porovnávání všech ostatních zkoušek během doby provozu rentgenového zařízení (Klener, 2000).

## **Zkoušky dlouhodobé stability**

Po přejímací zkoušce zpravidla v periodě jeden rok následuje zkouška dlouhodobé stability (ZDS). Hlavním účelem zkoušky je ověření správné funkčnosti zařízení. Provedením zkoušky se prokáže dlouhodobá spolehlivost a běžná výkonnost zařízení. Zkouška je prováděna pravidelně v ročních intervalech a při podezření na špatnou funkci rtg. zařízení, po kalibracích či opravách rtg. přístroje. Stejně jako zkoušky přejímací, mohou zkoušky dlouhodobé stability provádět jen osoby, které mají povolení SÚJB pro vykonávání hodnocení vlastností ZIZ (Klener, 2000 a vyhláška č. 422/2016 Sb.).

## **Zkoušky provozní stálosti**

Zkoušky provozní stálosti slouží ke kontrole kvality standardnosti zobrazení, při každodenním provozu. Zkoušky jsou jednoduché, snadné a jejich postupy jsou časově nenáročné. Prováděny jsou rutinně s krátkými časovými intervaly nebo pokud někdo z obsluhy má podezření na špatné fungování některé z částí zobrazovacího řetězce. Tyto zkoušky mohou a většinou jsou prováděny radiologickým asistentem, která ZIZ obsahuje (Klener, 2000 a vyhláška č. 422/2016 Sb.).



Výchozí zkouška provozní stálosti je prováděna ihned po úspěšném provedení přijímací zkoušky a uvedení ZIZ do provozu. Výsledky výchozí zkoušky fungují jako referenční data pro všechny následující zkoušky provozní stálosti (ZPS), aby se prokázalo, že znovu naměřené hodnoty se pohybují v určitých tolerancích. ZPS se provádění s četností denní, měsíční, resp. čtvrtletní, půlroční a roční dle Doporučení SÚJB zveřejněného na webových stránkách SÚJB. Za řízení a hodnocení ZPS je odpovědný radiologický fyzik. Výsledky všech ZPS musí být dokumentovány a archivovány nejméně po dobu 1 rok do další ZDS (Klener, 2000, vyhláška č. 422/82016 Sb.).

## **2.2 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 otevřených radionuklidových zdrojů a většinou jsou aplikována v podobě roztoků, plynů nebo pevných látek (Mysliveček, 2007).

### **2.2.1 Radiofarmaka a radionuklidy**

V oboru nukleární medicíny 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 nukleární medicíně 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, resp. stanovuje kumulace radionuklidu v ložisku karcinomu. (Mysliveček, 2007).

### 3 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 uzavřené radionuklidové zdroje - gama, beta a alfa zářiče (Kolektiv autorů, 2011)

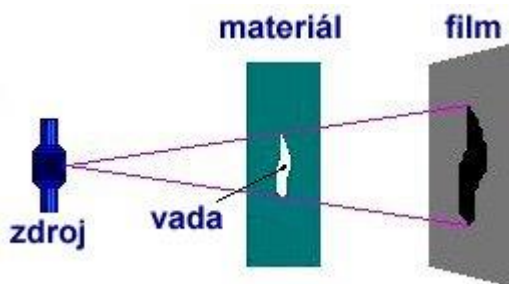
- Defektoskopie – testování materiálu, kde se využívá hlavně rentgenové a gama záření. Tento typ testování nijak nepoškodí materiál.
- Gauging devices (radionuklidová měřidla) – do této skupiny přístrojů patří hlavně měřidla a indikátory. Jako jsou hladinoměry, hustoměry, tloušťkoměry, vlhkoměry nebo 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.

#### 3.1 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 poškodili. 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 2. 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 2 Zobrazování vady na defektoskopu

### 3.1.1 Typy defektoskopie

Typické vlastnosti zdrojů záření využívaných v defektoskopii a rozsahy energie se kterými se pracuje, viz Tab. 7.

Tabulka 7 Typické vlastnosti zdrojů záření pro defektoskopii

Zkoumaný materiál		Defektoskopické aplikace		
Ocel: tloušťka [mm]	Lehké slitiny: tloušťka [mm]	Generátory záření [kV]	Gama defektoskopie	
			Zářič	Aktivita [TBq]
2,5 – 12,5	7,5 – 45	60–140	$^{170}\text{Tm}$ , $^{169}\text{Yb}$	<1
10-60	40-190	140-400	$^{192}\text{Ir}$ , $^{75}\text{Se}$	0,05 – 10
50-150	150-450	<8000	$^{60}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$	0,1 - 100

Zdroj: (Klener, 2000)

### 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, buď to 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 kryt (Klener, 2000).

Speciální typ krytu u expozičního defektoskopu MLOK se ovládá pomocí elektronického dálkového ovládní, pomocí impulsů záření uzavřeného zdroje  $^{137}\text{Cs}$ . 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).

### ***3.1.2 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, jenž mají náležité vybavením, 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 říci, 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.

### **3.2 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 či gama svazků. Obvykle se používají ke sterilizaci zdravotnických léčiv a výrobků, ošetřování produktů z potravinářského průmyslu, polymerace a hubení nežádoucího hmyzu, viz Tab. 8. 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 8 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 kulek hmyzu před vypuštěním
Krevní deriváty	0,015 – 0,05	Bezpečné transfuze pro imunodeficitní pacienty

Zdroj: (Klener, 2000)

### 3.2.1 Typy ozařovačů

#### Ozařovače využívající gama záření

Podle kategorizace International Atomic Energy Agency (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 stínicí 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 systémem zábran (Klener, 2000):

**Kategorie I** – Do této kategorie se řadí ozařovače s uzavřeným zdrojem IZ a ke stínění se zde používá suchý kontejner. Do ozařovacího prostoru je nemožné fyzické vniknutí. Vzorky, které jsou určeny k ozařování, se přesunují do ozařovacího prostoru skrze komory, které jsou vybaveny uzávěrem bránící úniku IZ.

**Kategorie II** – Znovu jsou to ozařovače s uzavřeným zdrojem IZ a suchým kontejnerem sloužící ke stínění. Nachází se zde systémem zábran, který má za úkol zamezit fyzickému vniknutí. Obvykle ozařovače nacházející se v této kategorii mají větší ozařovací prostor. Havarijní stop tlačítka jsou několikanásobně jištěna.

**Kategorie III** – V této kategorii jsou ozařovače mokrého typu. Nachází se zde šestimetrový bazén s demineralizovanou vodou, na dně bazénu je uložen uzavřený radionuklidový zářič, jenž je trvale stíněn vodou v bazénu.

**Kategorie IV** – Opět sem řadíme ozařovače mokrého typu, které mají uzavřený zdroj IZ. V čase, kdy se neozařuje, jsou zářiče spuštěny na dno bazénu. Hloubka bazénu je totožná jako v předchozím případě.

Druhým typem ozařovačů jsou elektronové urychlovače, které také můžeme rozdělit do dvou kategorií. Kritériem zde je provedení ozařovacího prostoru (Klener).

**Kategorie č. 1** – Zde jsou urychlovače, jejichž výbava obsahuje stínění, které jim umožňuje provoz, bez nutného přemístění do zvláštní ozařovny. Rozebírání stínících prvků ochrany má za následek úplné zablokování urychlovače. Konstrukce ozařovacího prostoru neumožňuje neschválené vniknutí do ozařovacího prostoru.

**Kategorie č. 2** – Ve druhé kategorii jsou zařazeny urychlovače umístěné v nezávislé ozařovně. Jakýkoliv přístup do ozařovny v průběhu expozice je zabráněn spolehlivým systémem zábran s několikanásobným jištěním.

### **3.3 Gauging devices**

V češtině se tyto přístroje nazývají radionuklidová měřidla a jsou využívána při kontrolách kvality výrobků nebo při kontrolách průběhů pracovních operací. Obecně se dá říci, že to jsou měřicí a kontrolní zařízení, jenž 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. Dále je můžeme rozdělit na mobilní, stacionární a přenosná měřidla (RadiationAnswers, 2019).

### **3.3.1 Typy měřidel**

#### **Průchozí měřidla**

U transmisních měřidel se detektor a pracovní kryt nachází na protilehlých stranách monitorovaného materiálu. Po přechodu svazku záření přes kontrolovaný materiál se měří změna intenzity záření. Při průchodu záření materiálem, který má vysokou hustotu, intenzita záření se sníží, totéž platí i naopak. Tento princip je využíván u hladinměřů a hustoměřů. U přístrojů fungujících jako tloušťkoměry, je hustota materiálu konstantní a monitoruje se pouze tloušťka materiálu. Beta zdroje u průchozí měřidel se využívají k měření tloušťky hlavně u velmi tenkých plechů. Naopak gama zdroje jsou užívány ke zkoumání velkých tloušťkách materiálu nebo materiálu o velmi vysoké hustotě, monitorování hladiny v obrovských zásobnících aj (Klener, 2000).

#### **Měřidla využívající zpětný odraz**

U měřidel využívající zpětný rozptyl je naopak zdroj záření a detektor připevněn na stejné straně zkoumaného materiálu. Detektor je odstíněn od primárního záření. Záření prostupuje zkoumaným materiálem, na kterém dochází k jeho rozptylu. Detektor změří zpětně rozptýlené záření. Pokud bude aplikace s povahou pevné geometrie, pak detektor

určí změny v hustotě materiálu. V situaci, kdy je hustota materiálu stála, tak se dle změn v dávkovém příkonu dají určit změny v tloušťce materiálu (Klener, 2000).

### **Rentgenfluorescenční analýza**

Rentgenové a nízko energetické gama záření má za následek při vzájemném působení s monitorovaným materiálem emise fluorescenčního záření o typickém spektru. Detektor tedy pomáhá nejen k určování přítomnosti jednotlivých prvků ale i k jejich množství. Tento princip je především využíván pro určení tloušťky vrstvy, popřípadě jejího prvkového obsahu (Ullmann, 2005).

### **Aktivační analýza**

Aktivační analýza je využívána hlavně pro zjišťování určitých prvků v materiálu za pomoci použití neutronových zdrojů, jež aktivují charakteristické gama záření. Tato metoda je velice přesná a lze spolehlivě zjistit jak kvantitativní, tak kvalitativní složení zkoumaného materiálu. Aktivační analýza je používána zejména ke kontrole ve zpracovatelském hornickém průmyslu (Klener, 2000).

## **4 VÝZKUMNÁ OTÁZKA A METODIKA**

### **4.1 Výzkumná otázka**

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

### **4.2 Metodika**

Z dostupné literatury, poptáváním defektoskopických firem a z diskuze s radiologickým fyzikem, který pracuje na oddělení nukleární medicíny jsem získal základní informace o konkrétním obsahu VHP pracovišť se ZIZ. Dále mi byl poskytnut statistický soubor o MU a stručné zprávy o pár nastalých MU 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 a snažil jsem se zhodnotit závažnost potenciálních RMU 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 standartního provozu, ale i při nehodové expoziční situaci. Z hodnocení jsem

vyločil velmi významné ZIZ (jaderné reaktory). VHP pracovišť a statistický soubor o MU mi byly poskytnuty na základě anonymity a dodržení GDPR podmínek.

## **5 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: 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 zvládnutí radiačních mimořádných událostí 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 se ZIZ určených pro radioterapii se zařízením obsahující uzavřený radionuklidový zdroj určený pro brachyterapii, dále na zařízení obsahující uzavřený radionuklidový zdroj sloužící k ozařování předmětů (potraviny, suroviny, předměty běžného užívání) a pracoviště s mobilním defektoskopem, který obsahuje uzavřený radionuklidový zdroj.

### **5.1 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 1033 URZ a lineárních urychlovačů je celkem 5. Dále jsou na území ČR evidovány dva generátory IZ - urychlovače využívané ve školství a výzkumu.

V následující tabulce jsou zapsány jednotlivé MU, které nastaly na pracovištích, kde pracují se ZIZ, a to v letech 2005 – 2018. V tabulce jsem se rozhodl vynechat roky 2013 a 2017, z důvodu nenastalé MU, kterou bych se zabýval.

Tabulka 9 Přehled MU 2005 - 2018

Typ události	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2014	2015	2016	2018
Události na pracovištích se ZIZ – poškozená defektoskopické sondy, demontáže stínících kontejnerů, defektoskopické a karotážní práce	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Události na pracovišti se ZIZ – kontaminované předměty, kontaminace pracoviště – únik radioaktivních látek na pracovišti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2
Události na pracovišti NM	1	1	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Kontaminace pracovníků	0	0	0	2	0	3	3	0	0	0	0	0
Ozáření pracovníků	1	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0
Radiologická událost – radioterapie	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Neřízená oxidace uranu – při likvidace hlavice ozařovače	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ztráta těsnosti URZ při vyjímání z hlavice ozařovače v horké komoře	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Zdroj (SÚJB, 2018)

Při sečtení a rozdělení na MU nastalé v průmyslu a na MU vzniklé ve zdravotnickém zařízení v letech 2005 - 2018 dojdeme k závěru, že během těchto let nastalo více MU ve zdravotnickém zařízení. Celkové počty jsou: MU v průmyslu 13, MU 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.

## 5.2 Průmysl

Typicky jsou na pracovištích zabývajících se průmyslovou radiografií na území ČR k defektoskopickým činnostem využívány zdroje  $^{192}\text{Ir}$  a  $^{75}\text{Se}$ . 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

přepřavě 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 nevládnutelná 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), technické prostředky fyzické ochrany: kamerový systém, prostředky poplachových zabezpečovacích a tíšňových systémů, jenž 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.

### **5.2.1 Události v průmyslu**

V roce 2017 radiační pracovník kategorie A, se snažil vytáhnout pomocí manipulátoru horké komory ze skladovacího kontejneru konkurenční zdroj  $^{22}\text{H}$ . 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. Povytáhnout 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  $1920\ \mu\text{Sv}$  a na trup přibližně  $307\ \mu\text{Sv}$ . Podle těchto hodnot nebyl překročen záznamový referenční limit pro tělo a vyšetřovací limit pro ruce, podle plánu monitorování.

### **5.3 Zdravotnická zařízení**

Na odděleních nukleární medicíny 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  $^{99\text{m}}$  o aktivitě 10-13 GBq. Denně je na PET přístrojích užíváné  $^{18}\text{F}$

(fluorodeoxyglukosa) s aktivitou 5-6 GBq. Dalšími jsou  $^{201}\text{Tl}$  do 200 MBq a  $^{111}\text{In}$ , zde je aktivita v řádu stovek MBq. V diagnostice a terapii benigních onemocnění štítné žlázy jsou typickými zdroji  $^{131}\text{I}$  s aktivitou až 20 GBq,  $^{90}\text{Y}$  do 600 MBq,  $^{153}\text{Sm}$  do 7 GBq a  $^{223}\text{Ra}$  až 15 MBq. Všechny zdroje jsou do sledovaného zdravotnického zařízení dováženy.

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

V případě oddělení nukleární medicíny 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, systém radiačního 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 nukleární medicíny.

Dále lze na oddělení nukleární medicíny předpokládat, že za běžného provozu na pracovišti s ORZ může dojít při očekávaném způsobu používání zdrojů záření pouze k radiační mimořádné události 1. stupně, nejhůře k radiační nehodě. Radiační 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

Radiační 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.

### **5.3.1 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 dvou 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 – <sup>131</sup>I. 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 – <sup>131</sup>I. Jako příčina úniku byl identifikován vadný ventil na tzv. bypassu záchytných jímek.

## **6 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 a již v minulosti nastalých nehod. Ze získaných výsledků, bohužel nelze jednoznačně určit pracoviště u kterého je vyšší pravděpodobnost vzniku nehodových expozičních situací. A za to vděčíme vysoké úrovni radiační ochrany, která je kladena na všechny držitele povolení pro nakládání se ZIZ. V druhé řadě jsou pracovníci manipulující se ZIZ



školení a prověřování, zda se zachovají správně, při vzniku MU, která by mohla vést ke vzniku nehodové expoziční situace.

Během analýz a pročítání všech možných zpráv a souborů, jsem došel k názoru, že mnohem větší počet případů, které v minulosti nastaly, je zejména záchyt a nálezy radioaktivního materiálu ať už na volném prostranství nebo šrotu. Těchto případů je každoročně evidováno na desítky. Většinou se nejedná o závažné případy. Řešení a likvidace záchytů nebo nálezů radioaktivního materiálu, jsou velmi rychle řešeny.

Proto si také myslím, že zde v ČR nemůže nastat stejná situace, která se stala v Ciudad Juarez (Mexiko) v roce 1983. Kde byla do šrotu dána hlavice terapeutického ZIZ i s  $^{60}\text{Co}$  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  $\text{km}^2$ . Na nehodu se přišlo náhodou, když kamion, který vezl kontaminovanou ocel, projel v Los Alamos (USA) kolem kontrolních detektorů, které spustily alarm.

Další případ se stal v Turecku v roce 1998. Zde v nákladu prodaného kovového šrotu dodatečně zjistili přítomnost dvou  $^{60}\text{Co}$  zdrojů. Ty byly uloženy v nákladu šrotu v přepravních kontejnerech, takže měřením těžko zjistitelné. Nejméně deset osob, které se šrotem manipulovali, bylo těžce ozářeno a následně léčeno na nemoc z ozáření.

V současnosti si myslím, že takovýto scénář v ČR nemůže nastat. Samotné vagony či auta se šrotem jsou kontrolovány, zda jejich náklad nevykazuje zvýšený dávkový příkon. Jakékoliv upozornění na podezřelý předmět s označením radioaktivity je hlášen SÚJB. Který obratem pošle odborníky k ověření, zda se jedná o radioaktivní materiál, a po sléze se postará i o jeho likvidaci.

Na oddělení nukleární medicíny jsou využívány ORZ, které se aplikují pacientům. Pokud by se stalo, že úroveň zamoření překročila hodnotu, která je vymezená v havarijním plánu pracoviště nukleární medicíny, je ihned zahájena dekontaminace. Tento celý systém nazýváme havarijní akční úrovně. Úroveň zamoření může být nízko riziková, středně riziková a havarijní. Hodnoty úrovní zamoření se mění v závislosti na druhu radionuklidu a kde ke kontaminaci došlo (V kontrolovaném nebo sledovaném pásmu nebo mimo tyto pásma). Jedno mají úrovně zamoření společné a to, že vždy je nutné o jakémkoliv

překročení úrovně zamoření informovat osobu s přímým dohledem nad radiační ochranou a osobu dohlížející na dané oddělení.

V průmyslovém odvětví je více příležitostí při vzniku MU, k následnému rozvinutí k nehodové expoziční situaci. Jako příklad zde uvedu MU, která se stala tento rok. Při karotážním měření vrtu došlo k zachycení sondy ve vrtu, v hloubce zhruba 340m. Jednalo se o hlubinnou sondu gamma gamma karotáž (GGK), která slouží k měření hustoty hornin pomocí izotopu  $^{137}\text{Cs}$ . Protože se sondu nepodařilo vyprostit v den vzniku MU, 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 MU 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.

## ZÁVĚR

Pracoviště, kde je využíváno defektoskopických přístrojů i pracoviště nukleární medicíny mají přísná opatření, co se týče radiační ochrany. V posledních 10 ti letech na zmíněných pracovištích nevznikla RMU. Musím však zvážit všechny činnosti které by mohli mít za následek vznik RMU. Za posledních 14 let při sečtení a rozdělení MU na ty, které nastaly v průmyslu a ve zdravotnictví, je o dva případy více evidováno ve zdravotnictví. Myslím si, že toto číslo je zanedbatelné a pracoviště jsou si více méně rovna. Avšak přece jen jedno pracoviště si myslím, že má větší šanci ke vzniku nehodové expoziční situace. Jsou to průmyslová pracoviště využívající ZIZ. Jedním z důvodů mého rozhodnutí je, že počet těchto pracovišť je větší, než počet zdravotnických pracovišť využívající ZIZ. Dalším kritériem mého hodnocení je možnost mobilního využití. Zdravotnická zařízení jsou spíše stacionární, samozřejmě existují i mobilní. Ale u průmyslových mobilních ZIZ je větší počet MU, které mohou nastat sami o sobě a nikoho neohrožují, ale pokud by nebyly okamžitě a správně řešeny, mohly by vést ke vzniku RMU. Například karotážní sonda uvízlá ve vrtu, pokud při pokusech o vytažení nedojde k porušení těsnosti zářiče, nedojde k ozáření osob, stačí ale jakékoliv neobvyklé mechanické poškození a nehodová expoziční situace je na světě. Takovýchto případů může být víc. Jelikož nedošlo k poškození zářiče nic se nestalo, a proto také nekonfigurují v mém výčtu RMU, ale ne vždy nemusí dojít k poškození zářiče. V poslední řadě bych také chtěl upozornit na nálezy a záchyty radioaktivního materiálu. Počet případů nálezů či záchytů radioaktivního materiálu je mnohem větší i kdybychom je porovnávali s MU ve zdravotnictví, tak i v průmyslu. Z historie také víme, že tyto radioaktivní materiály, ať už jsou ve šrotu či na volném prostranství, mohou napáchat dosti velké škody. Naštěstí systém RO v ČR je na vysoké úrovni a jsou zde i navržená opatření, aby se nestaly situace nastalé v historii v jiných zemích. Na závěr bych chtěl doplnit, že výčet všech nehodových expozičních situací, které vznikly a jsou popsány v této práci není úplný.

## 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. International Atomic Energy Agency, IAEA [online]. [cit. 2019-08-13]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/about/overview>
7. 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>
8. 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>
9. International Commission on Radiological Protection: ICRP [online], [cit. 2019-08-13]. Dostupné z: <http://www.icrp.org/page.asp?id=3>
10. IRPA: International radiation protection association. [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.irpa.net/page.asp?id=10>
11. KLENER, Vladislav. 2000. *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vyd. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. ISBN 8023837036.
12. KOLEKTIV AUTORŮ. *Radiobiologie*. 2011. [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org>

13. KOPEC, Bernard, 2008. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-807-2045-914.
14. KROUPA, Miroslav a Milan ŘÍHA. 2010. *Průmyslové havárie*. 2. vyd. Praha: Armex. Skripta pro střední a vyšší odborné školy. ISBN 9788086795874.
15. KUNA, Pavel a Leoš NAVRÁTIL. 2005. *Klinická radiobiologie*. 1. vyd. Praha: Manus. ISBN 8086571092.
16. KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína: [učební text]*. 1. vyd. Praha: P3K, c2007, 185, xiv s. ISBN 978-80-903584-9-
17. MALÍKOVÁ, Hana, 2019. *Základy radiologie a zobrazovacích metod*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum. ISBN 978-80-246-4036-5.
18. 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.
19. MIKA, Otakar J., 2003. *Průmyslové havárie*. Praha: Triton. Řešení krizových situací. ISBN 80-725-4455-1.
20. MYSLIVEČEK, Miroslav. *Nukleární medicína*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2007, 131 s. Skriptum (Univerzita Palackého). ISBN 9788024417233.
21. NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, 2005. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada. ISBN 80-247-1152-4.
22. 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>
23. *Radiační ochrana*, DAMIO [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.diamo.cz/cs/tuu/radiacni-ochrana>
24. 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>

25. ROZLÍVKA, Zdeněk RNDr. *Radiační ochrana na pracovištích s diagnostickými rentgeny ve zdravotnictví: učební texty kurzu*. Pardubice: UNIT spol.s.r.o., únor 2006.
26. SABOL, Jozef a Petr VLČEK, 2011 *Radiační ochrana v radioterapii*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04757-6.
27. SINGER, Jan a Jindřiška HEŘMANSKÁ. *Principy radiační ochrany*. 1. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2004, 111 s. ISBN 80-7040-7085
28. Státní Úřad pro Jadernou Bezpečnost: Evropské společenství pro atomovou energii - Euroatom [online], [cit. 2019-08-13]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/evropska-unie/evropske-spolecenstvi-pro-atomovou-energii-euroatom/>
29. 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>
30. ULLMANN, Vojtěch. 2005. V.: *Astronuklfyzika* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz>
31. Ullmann Vojtěch: *Cíle a metody ochrany před zářením*. [online]. [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>
32. Vyhláška č. 359/2016 Sb. o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události, 2016. In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 14, s. 5613-5641.
33. Vyhláška č. 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, 2016, In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 172, s. 6618-6904.
34. Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, 2016. In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 102, s. 3938-4060.

## **SEZNAM ZKRTEK**

ALARA – As Low As Reasonable Achievable

CT – computed tomography

GGK – gamma gamma karotáž

EPS – elektrická požární signalizace

IZ – ionizující záření

IAEA – International Atomic Energy Agency

ICRP – International Commission on Radiological Protection

IRPA – International Radiation Protection Association

KP – kontrolované pásmo

MU – mimořádná událost

NM – nukleární medicína

ORZ – otevřený radionuklidový zdroj

PDE – prostorový dávkový ekvivalent

PET – Physiologically equivalent temperature

RMU – radiační mimořádná událost

RN – radiační nehoda

RU – radiologická událost

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

URZ – uzavřený radionuklidový zdroj

VHP – vnitřní havarijní plán

ZIZ – zdroje ionizujícího záření