Zdravotně sociální fakulta
Faculty of Health and Social Sciences
Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
University of South Bohemia in České Budějovice

Připravenost k odezvě na radiační mimořádnou událost způsobenou únikem radionuklidů ve zdravotnickém zařízení s cyklotronem

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: OCHRANA OBYVATELSTVA SE ZAMĚŘENÍM NA CBRNE

Autor: Martina, Komůrková

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

České Budějovice 2026

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci s názvem „Připravenost k odezvě na radiační mimořádnou událost způsobenou únikem radionuklidů ve zdravotnickém zařízení s cyklotronem“ vypracovala samostatně 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/diplomové práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé bakalářské/diplomové práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích, dne 14. 4. 2026 ……

Martina Komůrková

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí své bakalářské práce Ing. Evě Zemanové, Ph.D., MBA, manažerce pro radiační ochranu - vedení společnosti Nemocnice České Budějovice, za odborné vedení, cenné rady, trpělivost a podporu při zpracování této bakalářské práce, ale také za její pedagogické vedení a předávání odborných znalostí v průběhu studia.

Dále bych chtěla poděkovat Ing. et Ing. Janu Adamovi, manažerovi výzkumu a vývoje, divize radiofarmak, ÚJV Řež a.s., pracoviště Brno, za odborné konzultace, vstřícnost a sdílení cenných poznatků, které mi umožnily získat komplexní vhled do procesů výroby radiofarmak, jejich distribuce, skladování a likvidaci radioaktivních odpadů, včetně související radiační ochrany.

Mé poděkování patří také MUDr. Zdeňku Řehákovi, Ph.D., primáři Oddělení nukleární medicíny Masarykova onkologického ústavu v Brně, za ochotu, konzultaci a odborné připomínky, které přispěly ke zvýšení odborné úrovně práce.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala Ing. Jiřímu Teršovi, klinickému radiologickému fyzikovi a dohlížející osobě Oddělení lékařské fyziky Nemocnice na Homolce, za poskytnuté odborné informace, konzultaci a praktické zkušenosti z oblasti radiační ochrany

Všem výše uvedeným upřímně děkuji za jejich čas, vstřícnost a ochotu podělit se o své odborné znalosti. A také za umožnění exkurze na jejich pracovištích a za osobní provedení provozem, díky němuž jsem získala cenný a praktický vhled do problematiky řešené v této bakalářské práci.

Připravenost k odezvě na radiační mimořádnou událost způsobenou únikem radionuklidů ve zdravotnickém zařízení s cyklotronem

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá připraveností zdravotnických pracovišť s cyklotronem k odezvě na radiační mimořádné události v České republice. Cílem práce je zhodnotit systém zajištění bezpečnosti provozu, úroveň radiační ochrany a praktickou připravenost těchto zařízení na mimořádné události.

Výzkum vychází z analýzy platných legislativních předpisů, vnitřních havarijních plánů pracovišť, odborné literatury a modelových scénářů radiačních mimořádných událostí. Z provedené analýzy vyplývá, že legislativní rámec radiační ochrany v České republice je dostatečně pevný, avšak jeho uplatňování v praxi vykazuje rozdíly mezi jednotlivými pracovišti.

Mezi hlavní identifikované slabiny patří nedostatečná frekvence praktických cvičení, neaktuální zásahové instrukce a omezené využívání moderních monitorovacích technologií. Práce formuluje návrhy na zlepšení v oblastech digitalizace, pravidelné revize havarijních plánů, automatizace detekčních systémů a zefektivnění krizové komunikace.

Závěry práce poukazují na potřebu užší koordinace mezi zdravotnickými zařízeními, složkami integrovaného záchranného systému a regulačními orgány a na nutnost systematického rozvoje praktické připravenosti personálu prostřednictvím simulačních školení a pravidelného vyhodnocování bezpečnostních postupů.

Klíčová slova

Atomový zákon; cyklotron; radiační ochrana; radiační mimořádná událost; havarijní plán; krizová komunikace; bezpečnost provozu; simulační školení; zdravotnické zařízení; Státní úřad pro jadernou bezpečnost.

Preparedness to responde to a radiation emergency caused by a radionuclides leak in the health care insttitution with a cyclotron

Abstract

This bachelor's thesis focuses on the preparedness of healthcare facilities equipped with cyclotrons to respond to radiological emergencies in the Czech Republic. The aim of the thesis is to assess the system of operational safety, the level of radiation protection, and the practical preparedness of these facilities for radiological emergency situations.

The research is based primarily on an analysis of relevant legislative regulations, professional literature, publicly available information, and general insights obtained through limited on-site observations and expert consultations. Due to restricted access to internal documentation, the study does not rely on a detailed analysis of internal emergency plans but rather on their general evaluation in the context of legislative requirements and recommended practices.

The results indicate that the legislative framework for radiation protection in the Czech Republic is robust; however, its practical implementation varies among individual facilities. The main identified weaknesses include a limited frequency of practical emergency training, insufficient updating of some response documentation, and differences in the level of preparedness across workplaces.

The thesis proposes several measures to improve preparedness, including the digitalization of emergency documentation, regular revision of emergency plans, the implementation of advanced monitoring technologies, and the strengthening of crisis communication systems.

The conclusions highlight the need for closer coordination between healthcare facilities, components of the Integrated Rescue System, and regulatory authorities, as well as the importance of systematic development of staff preparedness through simulation-based training and regular evaluation of emergency response procedures.

Key words

Atomic Act; cyclotron; radiation protection; radiological emergency; emergency plan; crisis communication; operational safety; simulation training; healthcare facility; State Office for Nuclear Safety (SÚJB), Czech Republic.

Obsah

Úvod ... 8

Teoretická část ... 9

1. Princip fungování cyklotronu a jeho využití ... 9
   1.1 Výroba radiofarmak – typy radionuklidů a jejich charakteristiky ... 10
   1.2 Umístění a provoz cyklotronu ve zdravotnickém prostředí ... 11
2. Rizika provozu cyklotronu ve zdravotnických zařízeních ... 12
   2.1 Možné scénáře úniku radionuklidů ... 12
   2.2 Technická a provozní rizika cyklotronu ... 13
   2.3 Rizika spojená s lidským faktorem ... 13
3. Radiační ochrana a legislativní rámec v ČR ... 14
   3.1 Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon a prováděcí předpisy ... 14
   3.2 Radiační mimořádná událost ... 15
   3.3 Biologické účinky záření ... 16
4. Zajištění připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost ve zdravotnických zařízeních ... 17
   4.1 Analýza radiačních mimořádných událostí ... 17
   4.2 Vnitřní havarijní plán ... 18
   4.3 Zásahové instrukce ... 19
5. Cíle práce, výzkumné otázky ... 21
6. Metodika ... 24
   6.1 Sběr dat ... 25
   6.2 Způsob zpracování a vyhodnocení dat ... 26

Praktická (analytická) část ... 27

7. Mapování zdravotnických zařízení s cyklotronem v ČR ... 27
   7.1 Přehled existujících zařízení ... 27
   7.2 Charakteristiky provozu, dostupnost dokumentace ... 29
8. Analýza rizikových faktorů a jejich dopadů ... 32
   8.1 Identifikace zdrojů rizika ... 32
   8.2 Ohrožení personálu, pacientů a okolí ... 33
   8.3 Přístupy k eliminaci nebo snižování dopadů ... 34
9. Vyhodnocení stávajících opatření ... 36

9.1 Studium vnitřní dokumentace ... 36
9.2 Posouzení účinnosti školení a simulací ... 39
9.3 Technické prostředky detekce a monitoringu ... 40
10. Spolupráce se složkami IZS a regulačními orgány ... 42
10.1 Koordinace s Hasičským záchranným sborem, Státním úřadem pro jadernou bezpečnost a Policií České republiky ... 43
10.2 Komunikační toky a návaznost zásahů ... 45
11. Post-havarijní procesy a obnova provozu ... 47
11.1 Postupy dekontaminace ... 47
11.2 Psychologická podpora a ochrana zasažených osob ... 48
11.3 Interní vyhodnocení a revize postupů ... 48
12. Inspirace zahraničními přístupy ... 50
12.1 Automatizované systémy detekce ... 50
12.2 Simulační software a školení v reálném čase ... 51
12.3 Možnosti přenosu zkušeností do českých podmínek ... 52
13. Výsledky ... 54
13.1 Hlavní zjištění ... 54
13.2 Silné stránky a nedostatky zajištění připravenosti ... 55
13.3 Omezení výzkumu ... 56
13.4 Návrhy na zlepšení ... 57
13.5 Doplnění či revize zásahových instrukcí ... 58
13.6 Zavedení pokročilých monitorovacích technologií ... 59
13.7 Změny v organizaci školení a krizové komunikace ... 59
13.8 Závěr praktické části a návrhy opatření ... 60
13.9 Zjištění praktické části ... 61
13.10 Odpovědi na výzkumné otázky ... 62
14. Diskuse ... 65
Závěr ... 68
Seznam zdrojů ... 69
Seznam tabulek, obrázků a grafů ... 75
Obrázky ... 76
Seznam zkratek ... 77

Úvod

V posledních letech se ve zdravotnictví rozšířilo využívání cyklotronů pro výrobu krátkodobě žijících radionuklidů, zejména pro potřeby pozitronové emisní tomografie (PET). Tyto látky mají zásadní význam pro včasnou diagnostiku nádorových onemocnění. V České republice jsou cyklotrony provozovány na několika specializovaných pracovištích, například v Nemocnici Na Homolce, Protonovém centru Praha, v Ústavu jaderného výzkumu, a. s., pracoviště PET centrum Brno, a v Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s., divizi radiofarmak – pracoviště výroby radiofarmak v Řeži (Husinec u Prahy).

Provoz těchto zařízení podléhá přísným technickým a legislativním požadavkům, protože práce s radionuklidy představuje potenciální riziko pro zdravotnický personál, pacienty i životní prostředí. Selhání systému radiační ochrany může vést k úniku radionuklidů, které mohou způsobit kontaminaci prostředí a následné ozáření osob mimo kontrolované prostředí, a proto je nezbytné zajistit odpovídající úroveň bezpečnostních opatření a připravenosti na radiační mimořádné události (RMU).

Cyklotron urychluje nabité částice, jejich dopadem na terč vznikají radionuklidy v důsledku jaderných reakcí (např. (p, n), (p, α)). Tento proces probíhá v uzavřeném systému, jehož narušení může vést ke kontaminaci pracovního prostředí. Z tohoto důvodu musí zdravotnická zařízení disponovat systémem radiační ochrany, vnitřním havarijním plánem (VHP) a pravidelně školeným personálem.

Radiační ochrana je v České republice upravena zákonem č. 263/2016 Sb., atomovým zákonem, a souvisejícími prováděcími vyhláškami, ve znění pozdějších předpisů. Dohled nad dodržováním těchto požadavků vykonává Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Přestože je legislativní rámec komplexní, jeho praktická aplikace se může mezi jednotlivými pracovišti lišit.

Cílem této práce je analyzovat rizika spojená s provozem zdravotnického zařízení s cyklotronem a posoudit jeho připravenost k odezvě na RMU způsobenou únikem radionuklidů. Součástí je identifikace hlavních zdrojů rizik, zhodnocení stávajících opatření a formulace návrhů na zlepšení úrovně připravenosti.

Teoretická část

1. Princip fungování cyklotronu a jeho využití

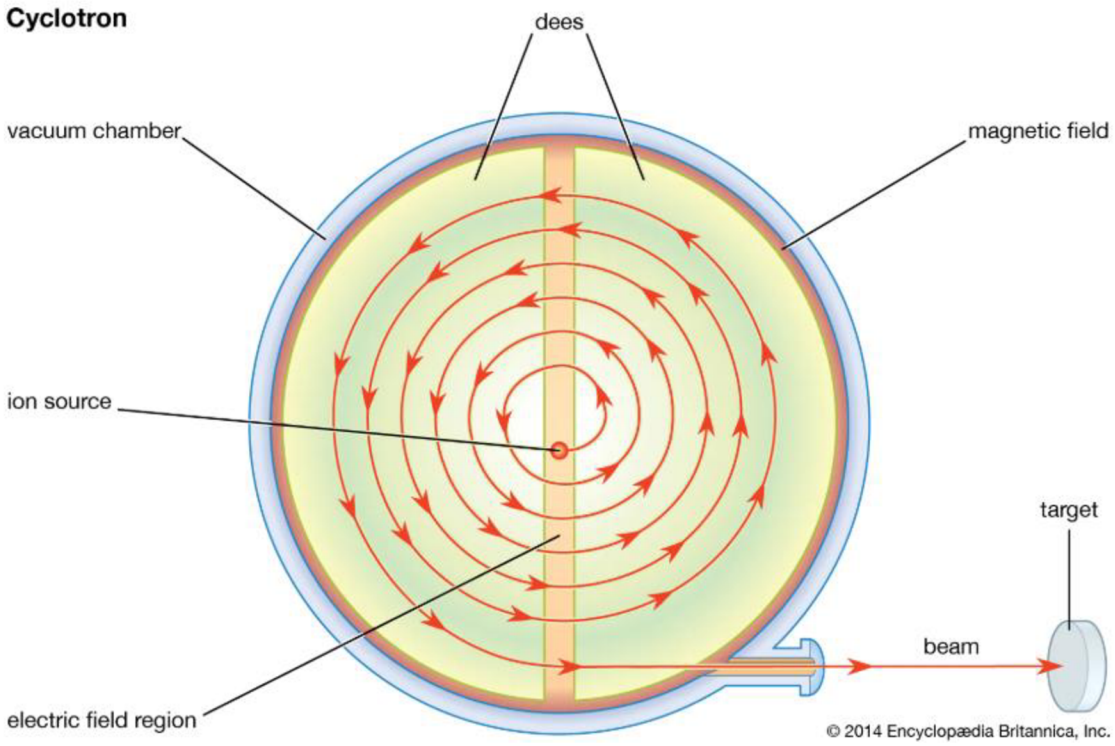
Cyklotron je částicový urychlovač, který využívá kombinaci statického magnetického pole a střídavého elektrického pole k urychlení kladně nabitých částic, nejčastěji protonů, po spirálové dráze. Tyto částice postupně získávají energii a po dosažení požadované hodnoty jsou vyvedeny z urychlovací komory na terčový materiál, kde vznikají radionuklidy. Urychlování probíhá mezi tzv. D-elektrodami, mezi nimiž částice opakovaně přecházejí a získávají energii (Fukátko, 2007).

Ve zdravotnictví se cyklotrony využívají především k výrobě krátkodobě žijících radionuklidů pro nukleární medicínu, zejména pro pozitronovou emisní tomografii (PET). Typickým produktem je radionuklid ^{18}F, z něhož se připravuje radiofarmakum ^{18}F-FDG, používané k zobrazení metabolicky aktivních tkání, například nádorových ložisek. Krátký poločas rozpadu těchto látek vyžaduje jejich rychlou přípravu a bezprostřední aplikaci (Koranda et al., 2014).

Provoz cyklotronu probíhá v uzavřeném systému za podmínek vakua a je doplněn o radiační stínění, které chrání obsluhu před kontaminací Klíčovou roli hraje přesná regulace magnetického pole a synchronizace elektrického signálu (Ullmann, 2009).

Moderní cyklotrony jsou kompaktní zařízení s vysokým stupněm automatizace, která minimalizují lidský zásah a snižují riziko chyb. Součástí systému jsou kromě urychlovací jednotky také řídicí software, chladicí okruhy a zařízení pro manipulaci s terčovým materiálem a syntézu radiofarmak. Konstrukce musí splňovat požadavky radiační ochrany a bezpečného provozu v klinickém prostředí (Chernyaev a Lykova, 2023).

Obrázek 1 Schéma cyklotronu



Zdroj: Encyclopedia Britannica (2025)

Schéma cyklotronu znázorňuje hlavní část zařízení, včetně iontového zdroje, D-elektrod a magnetického pole, které zajišťuje pohyb částic po spirálové dráze směrem k terčovému materiálu (Encyclopedia Britannica, 2025).

1.1 Výroba radiofarmak – typy radionuklidů a jejich charakteristiky

Radiofarmaka produkovaná cyklotronem jsou založena na krátkodobě žijících radionuklidech, které emitují záření vhodné pro diagnostické nebo terapeutické aplikace. Nejčastěji se používají izotopy ^{18}F, ^{11}C, ^{13}N a ^{15}O, z nichž každý má specifické využití v klinické nukleární medicíně. Tyto izotopy vznikají bombardováním stabilních terčů urychlenými částicemi, čímž dochází k jaderným reakcím vedoucím k produkci radionuklidů s krátkým poločasem rozpadu. Vzhledem k jejich rychlé přeměně je nezbytné zajistit syntézu radiofarmaka přímo na místě výroby a jeho okamžité použití (Kumar et al., 2022).

Každý radionuklid má odlišné fyzikální a chemické vlastnosti, které ovlivňují nejen typ zobrazení, ale i způsob aplikace a požadavky na skladování. ^{18}F je využíván hlavně pro syntézu FDG (fluorodeoxyglukóza), což je nejčastější radiofarmakum používané v onkologii. Naopak ^{68}Ga je vhodný pro značení peptidů a receptorových ligandů v neuroendokrinní diagnostice. Výběr radionuklidu závisí na typu onemocnění, dostupnosti izotopu a požadované citlivosti diagnostické metody. Vzhledem k farmakokinetickým parametrům je důležité i přesné časování mezi výrobou a podáním pacientovi (Kraft, 2014).

1.2 Umístění a provoz cyklotronu ve zdravotnickém prostředí

Instalace cyklotronu v nemocničním zařízení podléhá přísným technickým a legislativním požadavkům. Je nezbytné zajistit nejen provozní účinnost zařízení, ale také jeho bezpečné oddělení od ostatních klinických provozů. Umístění musí respektovat zásady radiační ochrany, a to jak ve smyslu odstupu od prostor s veřejným pohybem, tak ve vztahu ke stínění, ventilaci a nakládání s odpady. Speciálně navržené stínicí konstrukce a kontrolovaný přístup do radiačních zón tvoří základ provozní bezpečnosti (IAEA, 2022).

Provoz cyklotronu vyžaduje multidisciplinární tým složený z fyziků, radiochemiků, farmaceutů a techniků, kteří se podílejí na přípravě radiofarmak a údržbě zařízení. Hlavním prvkem je systematické školení zaměstnanců a řízená dokumentace všech činností. Cyklotronová pracoviště musí být vybavena radiačním monitoringem, systémem hlášení RMU a VHP, které definují postupy při RMU. Všechny tyto nároky jsou v ČR legislativně zakotveny v atomovém zákoně a prováděcích vyhláškách (Tlapák Navrátilová et al., 2023).

2. Rizika provozu cyklotronu ve zdravotnických zařízeních

Provoz cyklotronu v nemocničním prostředí představuje souběh technologických, radiačních a organizačních rizik, která mohou při nedostatečném řízení ohrozit zdraví personálu i pacientů. Mezi hlavní provozní rizika patří možnost technického selhání zařízení, přetížení cílových jednotek, nefunkčnost detekčních a chladicích systémů, nebo lidská chyba při manipulaci s radionuklidy. Vzhledem k tomu, že se jedná o zařízení s intenzivní produkcí záření a vysokou energetickou spotřebou, je nezbytné zavést přísný režim provozního dohledu a pravidelných technických kontrol (Hušák, 2009).

S rostoucím objemem výroby radiofarmak a tlakem na efektivitu provozu se zvyšují nároky na organizaci pracovních činností a tok radioaktivního materiálu v rámci pracoviště. Nedostatečně optimalizované provozní toky nebo opomenutí ve sledování pracovní doby exponovaných osob může vést k překročení limitů ozáření nebo k provozním komplikacím. V některých případech bylo ve světové praxi popsáno i neúmyslné ozáření způsobené chybou v plánování syntéz nebo poruchou uzávěrů oběhového systému radiofarmaka (Pant, 2021).

2.1 Možné scénáře úniku radionuklidů

Únik radionuklidů z cyklotronového pracoviště může mít různé formy v závislosti na typu poruchy, druhu radionuklidu, konstrukci systému a aktuálním provozním režimu. K nejčastějším scénářům patří netěsnost transportních vedení, selhání uzávěrů technologického systému cyklotronu (např. terčového systému), prasknutí cílového kontejneru nebo porušení těsnosti (dehermetizace) systému nebo obalu během syntézy. Tyto události mohou vést k uvolnění radioaktivního aerosolu nebo plynu do pracovního prostředí a k následné kontaminaci osob a povrchů (Eloirdi et al., 2024).

V závažnějších případech může dojít k havárii technologického celku spojené s výpadkem napájení, poruchou ventilace nebo porušení integrity cílového systému (např. v důsledku přehřátí nebo změny tlaku). Tento typ scénáře vyžaduje okamžitou aktivaci VHP, evakuaci a zahájení dekontaminačních postupů. Zásadní roli v této fázi hraje kvalita a intenzita prostorového monitorování a schopnost rychlé lokalizace zdroje úniku. Nezbytným předpokladem účinné odezvy je pravidelné školení personálu a dostupnost osobních ochranných prostředků (IAEA, 2023).

Vedle technických scénářů existují i situace způsobené lidským faktorem – špatná manipulace s otevřeným radionuklidem, chybné značení, záměna kontejnerů nebo selhání při validaci dávky. Tyto případy mají vysoký potenciál pro vznik vnitřní kontaminace, kterou je mnohdy obtížné okamžitě identifikovat. Proto je důležité, aby součástí pracovních protokolů byla redundantní kontrola hlavních operací a existence plánů pro jednotlivé typy úniku, včetně simulovaných nácviků (Khan, 2025).

2.2 Technická a provozní rizika cyklotronu

Provoz cyklotronu je spojen s celou řadou technických a provozních rizik vyplývajících z charakteru zařízení a jeho technologické náročnosti. Mezi nejvýznamnější rizika patří poruchy chladicích systémů, selhání detekčních a bezpečnostních prvků, přehřátí terčového systému nebo výpadky napájení.

Specifickým rizikem je také vysoká míra vzájemné závislosti jednotlivých technologických celků, kdy selhání jedné části systému může ovlivnit funkčnost celého pracoviště.

2.3 Rizika spojená s lidským faktorem

I přes vysokou míru automatizace procesů zůstává lidský faktor jedním z klíčových determinantů bezpečnosti provozu.

Chyby při manipulaci s radionuklidy, nedodržení pracovních postupů, nesprávné značení nebo selhání při kontrole dávky mohou vést ke vzniku RMU. Riziko je dále zvyšováno při vysoké pracovní zátěži a časovém tlaku.

3. Radiační ochrana a legislativní rámec v ČR

Radiační ochrana v České republice je podle § 4 písm. u) zákona č. 263/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů, definována jako soubor opatření k ochraně zdraví osob a životního prostředí před účinky IZ, zejména omezením ozáření a prevencí radiačních havárií. Základem je princip optimalizace (ALARA - „as low as reasonably achievable“), podle kterého má být expozice udržována na co nejnižší rozumně dosažitelné úrovni (Havránková, 2020).

Právní rámec radiační ochrany je tvořen zejména zákonem č. 263/2016 Sb., atomovým zákonem, ve znění pozdějších předpisů, který stanovuje povinnosti držitelů povolení a vymezuje kompetence Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Tento zákon je doplněn prováděcími vyhláškami, například vyhláškou č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, vyhláškou č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace a vyhláškou č. 408/2016 Sb., o požadavcích na systém řízení, ve znění pozdějších předpisů, které upravují požadavky na radiační ochranu, monitorování a systém řízení pracovišť.

V prostředí cyklotronových pracovišť zahrnuje radiační ochrana specifická opatření, jako je manipulace s otevřenými radionuklidy, řízení ventilace, nakládání s odpady a kontrola dávkových příkonů. Kromě osobních dozimetrů a prostorových detektorů se využívá také monitorování kontaminace a dozimetrie prostředí. Správné nastavení těchto procesů je klíčové pro bezpečný provoz a prevenci dlouhodobé radiační zátěže personálu (Kupka et al., 2007).

3.1 Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon a prováděcí předpisy

Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů, dále jen atomový zákon (AZ) představuje základní právní normu upravující podmínky nakládání se zdroji IZ a podmínky zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a připravenosti k odezvě na RMU v České republice. Tento zákon nahradil předchozí zákon z roku 1997 a reflektuje aktuální evropskou i mezinárodní legislativu. V současné době vešla v účinnost jeho novela od 1. 7. 2025 a následovaly novely jeho prováděcích předpisů.

Držitel povolení pro používání zdrojů ionizujícího záření (ZIZ) je podle atomového zákona povinen vytvořit systém řízení radiační ochrany, zavést monitorovací a kontrolní

mechanismy, zajistit odbornou způsobilost pracovníků a připravit VHP pro zvládnutí RMU. Atomový zákon dále stanovuje limity ozáření, kategorizuje pracovníky podle míry expozice a stanovuje požadavky na vymezení kontrolovaných a sledovaných pásem. V případě cyklotronových zařízení, které je kategorizováno jako významný zdroj IZ na pracovišti III. kategorie to zahrnuje rovněž povinnosti týkající se fyzického zabezpečení radionuklidových zdrojů, vybavení pracoviště v souladu s požadavky vyhlášky č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.

Atomový zákon rovněž ukládá provozovateli povinnost průběžného hodnocení rizik, vedení evidence monitorování pracovníků a hlášení všech událostí, které by mohly vést k překročení limitů nebo ke kontaminaci prostředí. Tato ustanovení zajišťují systémovou kontrolu provozu. SÚJB je kontrolním orgánem státní správy, který je oprávněn provádět inspekce a v případě zjištění nedostatků i odebrat povolení, resp. uložit pokutu za nedodržení povinností držitele povolení. Atomový zákon tak plní roli preventivního i represivního nástroje k ochraně zdraví osob a životního prostředí.

3.2 Radiační mimořádná událost

Událost, vedoucí nebo potenciálně vedoucí k překročení limitů ozáření, a která vyžaduje opatření, jež by zabránila jejich překročení nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiační ochrany (z. č. 263/2016 Sb., AZ, ve znění pozdějších předpisů, hlava VIII.).

Pro účely odstupňované připravenosti k odezvě na RMU se RMU kategorizuje na:

Radiační mimořádná událost, stupeň 1 – RMU zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti RMU vznikla.

Radiační nehoda – RMU nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti RMU vznikla, nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo.

Radiační havárie – RMU nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti RMU vznikla, nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která vyžaduje zavedení

neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo, kterými jsou ukrytí, evakuace a jodová profylaxe. (z. č. 263/2016 Sb., AZ, ve znění pozdějších předpisů, §153).

Toto rozdělení umožňuje přesně stanovit rozsah odpovědnosti držitele povolení a postupy pro okamžitou odezvu na RMU. Cílem kategorizace je zajistit, aby každý provozovatel zdroje IZ měl stanovené jednoznačné mechanismy pro vyhodnocení typu RMU a přijetí odpovídajících opatření.

3.3 Biologické účinky záření

Biologické účinky IZ na lidský organismus představují důležitý kontext pro pochopení významu radiační ochrany a opatření přijímaných při RMU. Tyto účinky závisí na typu záření, jeho energii, dávce a době expozice. Podle mezinárodní klasifikace se dělí na deterministické (tkáňové) a stochastické účinky. Deterministické účinky nastávají po překročení určité prahové dávky, která je závislá na typu tkáně (např. čočka oka kolem 0,5 Gy) a jejich závažnost roste s rostoucí dávkou. Typicky zahrnují poškození kostní dřeně, popáleniny kůže, kataraktu oční čočky nebo sterilitu. Vznikají po vysokých dávkách ozáření a mohou vést k akutní radiační nemoci, syndromům gastrointestinálním a hematopoetickým (Kuna, Navrátil a kol., 2005).

Stochastické účinky nemají prahovou dávku a jejich pravděpodobnost vzniku se zvyšuje s dávkou, přičemž závažnost zůstává stejná. Patří sem především indukce zhoubných nádorů a genetické mutace, které mohou být z malého procenta přeneseny i na další generace. Tyto účinky jsou spojeny s dlouhodobou kumulativní expozicí a nízkými dávkami ionizujícího záření. Z tohoto důvodu je zásadní dodržování principu ALARA (As low as reasonably achievable), který je základem radiační ochrany (Katzung, 2006).

Vedle somatických účinků se zohledňují i psychologické a psychosociální dopady na osoby vystavené riziku ozáření. Strach z radiace může vést ke stresovým reakcím, úzkosti nebo ztrátě důvěry v bezpečnost pracoviště. Efektivní zvládání RMU proto vyžaduje také krizovou komunikaci a podporu duševního zdraví postižených osob (Šabata, 2019).

4. Zajištění připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost ve zdravotnických zařízeních

Připravenost k odezvě na RMU v nemocnicích, kde je provozován cyklotron, je komplexní proces zahrnující preventivní plánování, průběžný výcvik, funkční technickou infrastrukturu a koordinovanou komunikaci s vnějšími složkami krizového řízení. Tento systém musí být pevně zakotven v organizační struktuře zařízení a reflektovat specifika práce se zdroji IZ. Z hlediska právních norem vyplývá ze zákona č. 263/2016 Sb., AZ, ve znění pozdějších předpisů a zejména vyhlášky č. 359/2016 Sb., o připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost, ve znění pozdějších předpisů.

Efektivita tohoto systému závisí na schopnosti zařízení rychle vyhodnotit situaci, lokalizovat zdroj úniku, stanovit charakter úniku a rozsah kontaminace a přijmout opatření vedoucí ke snížení radiační expozice. To vyžaduje stálou připravenost technických i lidských zdrojů – od dostupnosti ochranných pomůcek až po připravenost komunikačních kanálů s Integrovaným záchranným systémem (IZS). Zahraniční zkušenosti ukazují, že integrace simulačních softwarů a automatizovaných detekčních systémů výrazně zvyšuje účinnost odezvy při RMU (Ionescu et al., 2024).

Dlouhodobě udržitelná připravenost k odezvě na RMU vyžaduje také systematické testování a pravidelnou aktualizaci všech krizových scénářů. Každá organizační změna, technický zásah nebo revize provozního režimu musí být okamžitě promítnuta do VHP (vždy je na pracovišti k dispozici VHP kladně posouzený SÚJB, jehož kvalita a aktuálnost se však může v praxi lišit). Důraz je kladen také na multidisciplinární spolupráci mezi fyziky, radiology, IT techniky a vedením nemocnice, kteří společně vytvářejí síť funkčních vazeb umožňujících účinnou reakci při vzniku radiačního incidentu (Lebeda, 2022).

4.1 Analýza radiačních mimořádných událostí

Analýza RMU představuje základní nástroj pro identifikaci rizik a plánování odezvy. Jejím cílem je stanovit možné scénáře vzniku RMU, posoudit jejich pravděpodobnost a vyhodnotit jejich dopady na personál, pacienty a životní prostředí.

Součástí analýzy je identifikace zdrojů IZ, jejich možných selhání a popis průběhu potenciálních událostí. Na základě těchto poznatků jsou následně stanovena technická a organizační opatření k minimalizaci rizik.

Význam analýzy spočívá v tom, že vytváří podklad pro zpracování VHP a zásahových instrukcí, které určují konkrétní postupy při vzniku RMU.

4.2 Vnitřní havarijní plán

VHP je základním nástrojem připravenosti k odezvě na RMU na úrovni provozovatele cyklotronového zařízení. Jeho zpracování je podmínkou pro získání povolení SÚJB k činnosti se zdroji ionizujícího záření. VHP musí být vypracován v souladu se zákonem č. 263/2016 Sb., AZ a vyhláškou č. 359/2016 Sb., o připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost, ve znění pozdějších předpisů a obsahuje zejména identifikaci scénářů RMU, určení odpovědných osob, komunikační postupy a technická a organizační opatření. Řešení RMU vychází z předem definovaných scénářů s jasně stanovenými kroky (vyhláška č. 359/2016 Sb., o připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost, ve znění pozdějších předpisů).

Lze předpokládat, že kvalita VHP závisí především na jeho praktické využitelnosti. Nestačí jeho formální existence, ale je nutné jeho pravidelné přezkoumávání a ověřování prostřednictvím cvičení a simulací. Plán musí být propojen s reálným provozem, včetně technologických procesů, poločasů radionuklidů, ventilačních parametrů a dostupného vybavení.

V obecné rovině se jako slabina může jevit nejednotnost dokumentace a nedostatečné sladění mezi jednotlivými složkami zdravotnického zařízení. VHP by měl tyto rozdíly překlenout a vytvořit jednotný rámec řízení RMU. Součástí by měly být i nástroje pro rychlé vyhodnocení situace a rozhodování o zapojení IZS a informování SÚJB (Kupka et al., 2007).

Níže je uvedeno, co Vyhláška č. 359/2016 Sb., o připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost, ve znění pozdějších předpisů, v příloze č. 6 stanovuje pro obsah VHP.

Hlavní požadavky na obsah VHP

1. Identifikace organizace – název držitele povolení, adresa, účel zařízení/provozu.
2. Vymezení zóny havarijního plánování a popis areálu či pracoviště, kde může dojít k RMU.
3. Organizační opatření – určení odpovědných osob (kontaktů), definice kompetencí a postupů pro řízení odezvy.
4. Opatření pro detekci, vyrozumění a varování – technické prostředky, organizační postupy pro aktivaci plánů při podezření či vzniku RMU
5. Postupy pro řízení a provádění odezvy – jak bude provedena evakuace nebo přesun osob, ochranná opatření, zásahy v areálu, komunikace s vnějšími složkami subjekty krizového řízení.
6. Opatření k ochraně zdraví osob a životního prostředí – omezení ozáření, monitorování, případné zdravotnické zabezpečení.
7. Postupy pro obnovu provozu, nápravu stavu po události – jak se vrátí provoz do běžného stavu, jak bude provedeno šetření příčin.
8. Pravidla pro cvičení, aktualizaci plánu a dokumentaci – jak často bude VHP prověřován, aktualizován, archivován.

4.3 Zásahové instrukce

Vyhláška č. 359/2016 Sb., o připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost, ve znění pozdějších předpisů, stanovuje požadavky na havarijní připravenost a obsah VHP, včetně postupů pro zvládání RMU. Tyto postupy jsou zpracovány formou zásahových instrukcí, které musí být pracovníkům dostupné a operativně použitelné bezprostředně při vzniku RMU. Jsou umístěny na viditelném a snadno přístupném místě a slouží jako návod pro postup jednotlivých pracovníků v konkrétních situacích.

Zásahové instrukce musí být jednoduché, přehledné a přizpůsobené místním podmínkám. Obsahují zejména pokyny pro evakuaci osob, použití ochranných prostředků, omezení šíření kontaminace a informování odpovědných osob. Současně musí být jasně určeny kompetence a odpovědnosti v jednotlivých fázích zásahu (Havránková, 2020).

Na základě dostupných zdrojů se jeví, že i kvalitně zpracované instrukce mohou být v praxi neúčinné, pokud s nimi personál aktivně nepracuje. Proto je důležité jejich pravidelné procvičování, kombinace papírové i digitální formy a zapojení do simulačních cvičení. Efektivní zásahové řízení by mělo být založeno na jednoduché rozhodovací logice, která umožňuje rychlou reakci i v zátěžových situacích (Kumar, Tandon a Deep, 2024).

5. Cíle práce, výzkumné otázky

Hlavním cílem této bakalářské práce je posoudit připravenost zdravotnického zařízení s cyklotronem k odezvě na RMU způsobenou únikem radionuklidů.

Za účelem naplnění hlavního cíle byly stanoveny následující dílčí cíle:
Analyzovat rizika spojená s provozem pracoviště s cyklotronem, zejména identifikovat klíčové zdroje rizika související s únikem radionuklidů a posoudit jejich potenciální dopad na zdravotnický personál, pacienty a okolí zdravotnického zařízení.
Vyhodnotit současné postupy připravenosti na RMU a formulovat doporučení k jejich zlepšení, se zaměřením na efektivitu zásahových instrukcí a možnosti využití moderních technologií.
Cíle práce jsou dále rozpracovány prostřednictvím výzkumných otázek, které umožňují systematické zhodnocení řešené problematiky.

Výzkumnými otázkami práce jsou:
VO1: „Jak je zajištěna bezpečnost provozu zdravotnických pracovišť s cyklotronem a radiační ochrana v ČR?“
První otázka směřuje k objasnění, jakým způsobem jsou v České republice legislativně i prakticky nastaveny podmínky pro bezpečný provoz cyklotronových pracovišť. Zaměřuje se na systém povolování činností, plnění požadavků stanovených atomovým zákonem č. 263/2016 Sb., AZ, ve znění pozdějších předpisů a na úlohu SÚJB jako dozorového orgánu. Posuzována je i struktura a obsah vnitřní dokumentace, včetně programu monitorování, režimových opatření, ochranných pomůcek a periodického školení radiačních pracovníků i dotčených ostatních zaměstnanců.

VO2: „Jaké jsou hlavní rizikové faktory spojené s provozem cyklotronu z hlediska radiační ochrany?“
Druhá výzkumná otázka se zabývá konkrétními provozními a technologickými okolnostmi, které mohou vést k ohrožení radiační ochrany. Posuzují se faktory jako selhání stínění, technické poruchy uzavřených systémů, nesprávná manipulace s radionuklidy, lidská chyba či výpadky systému monitorování. V této souvislosti jsou zvažovány i prostorové dispozice pracoviště, větrací systém a způsoby nakládání s radioaktivním odpadem.

VO3: „Jaká je úroveň připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem k odezvě na radiační mimořádné události způsobené únikem radionuklidů?“

Třetí otázka má za úkol ověřit, do jaké míry jsou zdravotnická pracoviště připravena čelit RMU. Posuzována je kvalita obsahu VHP, dostupnost a účinnost zásahových instrukcí, rozsah a pravidelnost cvičení krizových scénářů, vybavení zařízení monitorovacími a ochrannými prostředky a schopnost komunikace s IZS a SÚJB.

V práci bude uplatněna kombinace metod kvalitativního charakteru, která umožní podrobné zkoumání připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem na RMU. Základním nástrojem bude studium odborné literatury zaměřené na provoz cyklotronů, radiační ochranu, krizové řízení a management RMU. Tyto poznatky budou čerpány z vědeckých článků, technických manuálů, zpráv regulačních orgánů a metodických materiálů mezinárodních institucí, které se zabývají radiační ochranou.

Další metodou bude deskriptivní mapování konkrétních bezpečnostních opatření zavedených ve vybraných zdravotnických zařízeních v České republice. Tento přístup bude zaměřen na praktickou kontrolu technologických procesů, systém školení zaměstnanců, opatření k prevenci RMU a mechanismy zvládání krizových situací. Důraz bude kladen na způsob detekce úniku radionuklidů, kontaminace prostředí a monitorování ozáření, dávkového příkonu, a to jak z hlediska technických prostředků, tak i organizačního zajištění jejich provozu.

Získávání konkrétních údajů z praxe bude probíhat formou náhledu do vnitřní dokumentace vybraných zdravotnických zařízení s cyklotronem. V centru pozornosti budou VHP, zásahové instrukce a postupy pro evakuaci, dekontaminaci a zabezpečení postižených prostor. Na základě této dokumentace bude analyzováno, jak jsou nastaveny postupy při RMU, jaké úlohy mají jednotlivé pracovní pozice a jaké mechanismy jsou připraveny pro ochranu nejen zaměstnanců, ale i dalších osob pohybujících se v nemocničním areálu.

Závěrečnou metodou bude porovnání zjištěných skutečností se zahraniční praxí. Práce bude sledovat, jakým způsobem přistupují k radiační ochraně nemocnice s cyklotronem v zahraničí, zejména v zemích se silně rozvinutou nukleární medicínou. Důraz bude kladen na technologické inovace, jako jsou automatizované systémy detekce záření, digitální simulátory

pro školení personálu nebo softwarové nástroje pro krizové plánování. Tato inspirace ze zahraničí bude podrobena konfrontaci s českým prostředím a její potenciál k implementaci bude posouzen z hlediska technické proveditelnosti, legislativních požadavků a organizačních kapacit zdravotnických zařízení v ČR.

6. Metodika

Metodika této práce je zaměřena na posouzení připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem k odezvě na RMU na základě dostupných zdrojů a odborných poznatků.

Zvolený přístup vychází především z analýzy platné legislativy, odborné literatury a veřejně dostupných informací o provozu cyklotronových pracovišť. Důraz je kladen na identifikaci požadavků na radiační ochranu a připravenost k odezvě na RMU, jak jsou definovány právními předpisy České republiky a doporučeními mezinárodních organizací.

Základním pilířem metodiky je analýza legislativních dokumentů, zejména zákona č. 263/2016 Sb., AZ, ve znění pozdějších předpisů a souvisejících prováděcích vyhlášek upravujících radiační ochranu a havarijní připravenost. Tyto dokumenty vymezují požadavky na provoz zdravotnických zařízení se zdroji IZ a tvoří rámec pro jejich hodnocení.

Další část metodiky tvoří studium odborné literatury a zahraničních zdrojů zaměřených na problematiku cyklotronů, radiační ochrany a řízení RMU. Tyto poznatky slouží k porovnání teoretických požadavků s praxí a k identifikaci možných slabých míst systému.

Součástí zpracování práce byly rovněž odborné konzultace a omezené řízené náhledy do vybraných interních dokumentů zdravotnických zařízení (např. VHP a zásahové instrukce), které proběhly přímo na pracovištích. Tyto náhledy měly výhradně orientační charakter – nebylo možné pořizovat kopie ani provádět systematickou analýzu dokumentace. Získané poznatky byly proto využity pouze v obecné rovině, bez uvádění konkrétních interních údajů.

V rámci práce bylo dále provedeno obecné posouzení dostupných informací o fungování zdravotnických zařízení s cyklotronem v České republice, zejména z hlediska organizačního zajištění, technického vybavení a připravenosti personálu.

Metodika je tedy založena na kombinaci kvalitativní analýzy legislativy, odborné literatury, odborných konzultací a orientačního omezeného náhledu do praxe, přičemž důraz je kladen na obecné zhodnocení systému připravenosti, nikoliv na detailní analýzu interní dokumentace jednotlivých pracovišť. Cílem je formulovat obecně aplikovatelné závěry a návrhy na zlepšení připravenosti zdravotnických zařízení k odezvě na RMU.

6.1 Sběr dat

Sběr dat v rámci této práce je navržen tak, aby postihoval jak formální dokumentaci zdravotnických zařízení, tak i širší kontext, ve kterém tato zařízení fungují. Jedním ze zdrojů informací bylo orientační seznámení s interní dokumentací (např. VHP a zásahových instrukcí) formou řízených náhledů. Tyto dokumenty poskytly obecný vhled do struktury a obsahového zaměření dokumentace, nikoliv však podklad pro detailní analýzu. V obecné rovině bylo zjišťováno, jakým způsobem jsou v dokumentaci řešeny jednotlivé oblasti, zejména struktura plánů, rozsah popsaných scénářů, analýza RMU, vymezení kompetencí a jejich návaznost na legislativní požadavky. V obecné rovině bylo posuzováno, zda dokumentace vykazuje znaky průběžné aktualizace a zda reflektuje základní technické a organizační požadavky praxe.

Další významnou oblastí sběru dat je studium dostupné odborné literatury a zahraničních zpráv, které se věnují provozu cyklotronů a řízení radiační ochrany. Tyto zdroje doplňují pohled na českou praxi o širší mezinárodní souvislosti a umožňují srovnání se standardy a technologiemi využívanými v zahraničí. Získané poznatky se následně propojují s daty z českých pracovišť, čímž vzniká možnost konfrontace reality s ideálním stavem definovaným v odborných materiálech a doporučeních mezinárodních institucí.

Dalším krokem při sběru dat je mapování zdravotnických zařízení s cyklotronem na území České republiky. Tento proces zahrnuje shromáždění základních údajů o provozu jednotlivých pracovišť, jejich kapacitách, technickém zajištění a organizační struktuře krizového řízení. Tyto informace poskytují základní rámec pro následné detailní zkoumání a zároveň pomáhají identifikovat rozdíly mezi jednotlivými zařízeními. Mapování umožňuje také vytvořit přehled, který usnadní formulaci obecných závěrů platných pro celý sektor.

Součástí sběru dat je rovněž zkoumání technických prostředků používaných k detekci úniku radionuklidů, monitorování kontaminace prostředí a následné ozáření. Tyto prostředky jsou nástrojem pro včasné odhalení úniku radionuklidů a pro minimalizaci radiační zátěže personálu a pacientů. Hodnocení se zaměřuje na typy detektorů, jejich umístění, funkčnost, pravidelnost kalibrací a návaznost na havarijní scénáře. Informace o technickém zajištění jsou doplněny posouzením systému školení personálu, jehož připravenost je nezbytnou podmínkou efektivního zvládání RMU.

Při sběru dat je také analyzována dostupná dokumentace o proběhlých cvičeních a školeních zaměřených na krizové situace. Tyto materiály odhalují, jak často se personál připravuje na simulované incidenty, jaké metody se používají při nácviku a zda se vyhodnocují silné a slabé stránky odezvy. Získané údaje mají zásadní význam pro posouzení, zda formálně nastavené procesy nacházejí skutečný odraz v praktické připravenosti pracovníků. Současně je možné odhalit mezery, které by mohly při reálném incidentu představovat riziko.

6.2 Způsob zpracování a vyhodnocení dat

Zpracování dat v této práci vychází především z kvalitativní analýzy dostupných zdrojů, zejména legislativních předpisů, odborné literatury a veřejně dostupných informací o provozu zdravotnických zařízení s cyklotronem.

Vzhledem k omezené dostupnosti interní dokumentace zdravotnických zařízení, jako jsou VHP nebo zásahové instrukce není práce založena na přímé analýze konkrétních dokumentů jednotlivých pracovišť. Interní dokumentace byla využita pouze v omezeném rozsahu pro orientační ověření obecných principů, nikoliv jako primární zdroj dat pro analýzu. Tento limit je zohledněn v metodickém přístupu a je kompenzován důrazem na analýzu legislativního rámce, který stanovuje závazné požadavky na připravenost k odezvě na RMU.

V první fázi byla provedena analýza legislativních požadavků, zejména zákona č. 263/2016 Sb., AZ a souvisejících prováděcích vyhlášek, ve znění pozdějších předpisů. Cílem této analýzy bylo stanovit referenční rámec, který definuje požadovanou úroveň připravenosti zdravotnických zařízení.

Následně byla provedena analýza odborné literatury a zahraničních přístupů, která umožnila identifikovat doporučené postupy a moderní trendy v oblasti radiační ochrany a krizové připravenosti.

Na základě těchto zdrojů byla provedena syntéza poznatků, jejímž cílem bylo identifikovat klíčové oblasti rizik, potenciální slabiny systému a faktory ovlivňující efektivitu odezvy na RMU.

Výsledek analýzy je teoreticko-analytické zhodnocení úrovně připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem v České republice, které slouží jako podklad pro formulaci návrhů na zlepšení v oblasti krizového řízení, radiační ochrany a organizace provozu.

Praktická (analytická) část

7. Mapování zdravotnických zařízení s cyklotronem v ČR

Mapování zdravotnických zařízení s cyklotronem v České republice představuje důležitý krok k vytvoření přehledu o infrastruktuře, která je nezbytná pro výrobu radiofarmak a pro diagnostiku v nukleární medicíně. Cyklotrony jsou specializovaná zařízení umožňující produkci krátkodobě žijících radionuklidů, bez nichž by moderní zobrazovací metody, jako je pozitronová emisní tomografie, nemohly fungovat. Z tohoto důvodu je nezbytné získat ucelený obraz o tom, kde se tato zařízení nacházejí, v jakém provozním režimu pracují a jaká je jejich vazba na klinická pracoviště. Mapování poskytuje základní rámec, který umožňuje posoudit nejen dostupnost zdravotní péče, ale i připravenost ke zvládání RMU.

V rámci tohoto procesu jsou sledovány nejen technické a geografické parametry, ale také organizační struktura a začlenění cyklotronových pracovišť do širšího systému zdravotnictví. Každé zařízení se liší svým umístěním, kapacitou, technologickou vybaveností i odborným zázemím, a proto je nezbytné zpracovat detailní přehled, který tyto odlišnosti zohlední. Mapování přispívá k pochopení, jak jsou jednotlivá zařízení provázána s klinickými centry, jaká je dostupnost produkovaných radiofarmak a zda existují regionální disparity v jejich distribuci. Tyto informace mají význam nejen pro klinickou praxi, ale i pro krizové plánování a rozhodování na úrovni státní správy.

Význam mapování se navíc odráží v oblasti bezpečnosti a připravenosti k odezvě na RMU. Cyklotrony pracují s radionuklidy, jejichž výroba a manipulace vyžadují přísné dodržování pravidel radiační ochrany a krizového managementu. Přehled o rozmístění těchto zařízení proto umožňuje lépe plánovat zajištění zásahových jednotek, monitorování radiační situace a koordinaci činností v případě RMU. Mapování vytváří podklad, který slouží nejen odborníkům v nukleární medicíně, ale také institucím zodpovědným za civilní ochranu a zdravotnickou bezpečnost. Díky tomu lze předejít možným komplikacím a zvýšit efektivitu opatření směřujících k ochraně zdraví obyvatel.

7.1 Přehled existujících zařízení

V České republice lze v současnosti identifikovat několik lokalit, kde cyklotrony fungují buď pro výzkumné účely, nebo jako součást PET center pro výrobu radiofarmak.

Mapování těchto zařízení má širší význam i pro krizové plánování a radiační ochranu. Přehled o tom, kde se cyklotrony nacházejí, jaká je jejich výroba a infrastruktura, umožňuje státním orgánům lépe koordinovat zásoby, monitorování a případné intervence v mimořádných situacích. Zároveň zajišťuje kontinuitu dodávek radiofarmak do nemocnic i v případě odstávek nebo technických výpadků. Například výměna cyklotronu v PET centru Na Homolce – původně provozovaného od roku 1999 – za modernější zařízení Cyclone KIUBE přinesla výrazné zvýšení výkonu, přičemž výroba radiofarmak byla během přechodu zajištěna z dalších PET center v Řeži a Brně.

Tabulka 1: Přehled zařízení s cyklotronem v České republice

Kategorie	Lokalita / Provozovatel	Cyklotron (výrobce)	Rok instalace / provozu	Poznámky
PET centrum – Nemocnice Na Homolce (Praha)	ÚJV Řež / PET Centrum Praha	Cyclone 18/9 → Cyclone KIUBE (IBA)	Původně v provozu od 1999, modernizace na KIUBE v roce 2023	DIAGNOSTIKA Nejstarší PET centrum ČR; KIUBE přinesl vyšší výkon i spolehlivost.
PET centrum – Masarykův onkologický ústav (Brno)	ÚJV Řež / PET Centrum Brno	Cyclone 18/9 (IBA)	Provoz od 2007	DIAGNOSTIKA Zajišťuje PET radiofarmaka pro Moravu.
PET centrum – ÚJV Řež (R&D)	ÚJV Řež / PET Centrum Řež	Cyclone 18/9 (IBA) → pravděpodobně KIUBE	Centrum funguje od 2012	VÝZKUM Zaměřeno na vývoj nových radiofarmak.
Výzkum – Ústav jaderné fyziky AV ČR (Řež)	ÚJF AV ČR	U-120M (volně laditelný cyklotron)	Dlouhodobý provoz (bez konkrétních dat)	VÝZKUM Široké spektrum aplikací včetně vývoje izotopů.
Protonová terapie – Protonové centrum Praha	Protonové centrum Praha, Proton Therapy Center Czech s.r.o.	Systém protonové terapie Proteus (IBA)	Provoz od 2012	TERAPIE Léčebný cyklotron, nikoli pro výrobu radiofarmak.

Zdroj: vlastní zpracování podle ÚJV Řež. (2022), ÚJV Řež. (2023), Technický týdeník. (2012), Ústav jaderné fyziky AV ČR. (2023) a Proton Therapy Center Prague (2012)

Česká republika disponuje jen omezeným počtem cyklotronů, které jsou ovšem technologicky i funkčně rozdílné a slouží jak medicínským, tak výzkumným účelům. Nejstarší nemocniční cyklotron byl instalován v roce 1999 v Nemocnici Na Homolce a původně šlo o typ Cyclone 18/9 od belgické společnosti IBA. Tento model poskytoval energii okolo 18 MeV a proud přibližně 100 µA, což postačovalo pro tehdejší potřeby PET vyšetření.

Druhé zdravotnické PET centrum bylo uvedeno do provozu v roce 2007 v areálu Masarykova onkologického ústavu v Brně. I zde byl nainstalován cyklotron Cyclone 18/9, jehož technické parametry odpovídají původnímu zařízení na Homolce. Brněnský cyklotron zajišťuje stabilní výrobu radiofarmak pro Moravu a rozšířil tak dostupnost PET diagnostiky mimo Prahu. Třetím zdravotnickým zařízením s cyklotronem je PET centrum v Řeži, které funguje od roku 2012. Toto pracoviště je zaměřeno na výzkum a vývoj nových radiofarmak, ale současně vyrábí i registrované přípravky pro klinické využití. Výrobní kapacity Řeže navíc posilují dodávky v případě odstávky nemocničních cyklotronů a centrum se stalo hlavním prvkem v síti nukleární medicíny (Masarykův onkologický ústav, 2017).

Specifické postavení má Ústav jaderné fyziky AV ČR v Řeži, který disponuje výzkumným cyklotronem U-120M. Tento urychlovač umožňuje variabilní nastavení energie v širokém rozsahu 5–55 MeV a může pracovat s protony, deuterony i jinými ionty. Slouží primárně k vědeckým experimentům a k vývoji nových izotopů, nikoli k rutinní výrobě radiofarmak pro nemocnice. Do mapy českých cyklotronů patří také Protonové centrum Praha, kde se od roku 2012 využívá systém protonové terapie Proteus, jehož součástí je cyklotron. Ten urychluje protony pro léčbu onkologických pacientů, avšak na rozdíl od zdravotnických PET center neprodukuje otevřené radionuklidy pro diagnostiku. Tato rozmanitost zařízení ukazuje, že ačkoliv je počet cyklotronů v ČR relativně malý, jejich využití pokrývá jak diagnostické a léčebné potřeby, tak vědecký výzkum a vývoj (Ústav jaderné fyziky AV ČR, 2023).

7.2 Charakteristiky provozu, dostupnost dokumentace

PET centrum Praha – Nemocnice Na Homolce (ÚJV Řež)

Provoz cyklotronu v Nemocnici Na Homolce je primárně orientován na výrobu radiofarmak určených pro klinickou diagnostiku, především ^{18}F-fluorodeoxyglukózy (^{18}F-FDG), jež představuje základní radiofarmakum pro většinu PET vyšetření. Cyklotron je provozován v režimu každodenní produkce a díky modernizaci na model Cyclone KIUBE dokáže pokrývat rostoucí potřeby nejen samotné nemocnice, ale i dalších zdravotnických zařízení v regionu. Výroba probíhá v prostředí s přísnými požadavky na kvalitu a kontrolu, což dokládá pravidelná certifikace podle správné výrobní praxe. Na základě dostupných informací lze předpokládat, že dokumentace týkající se provozu cyklotronu je standardizována a zahrnuje technologické postupy, bezpečnostní protokoly a havarijní plány. Přístup k nim je omezený, protože obsahují citlivé údaje související s výrobou radionuklidů, ale jejich existence je

doložena jak v interních materiálech nemocnice, tak ve veřejně dostupných zprávách ÚJV Řež a Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (ÚJV Řež, 2022).

PET centrum Brno – Masarykův onkologický ústav (ÚJV Řež)

V brněnském PET centru je cyklotron provozován od roku 2007 a slouží zejména k zajištění radiofarmak pro klinická oddělení Masarykova onkologického ústavu a nemocnic v okolí. Provoz má charakter rutinní výroby, přičemž plánování cyklotronových běhů vychází z objednávek a kapacity diagnostických oddělení. Centrum je součástí sítě ÚJV Řež, což znamená jednotnou metodiku a sdílenou infrastrukturu v oblasti kvality. Dostupné zdroje naznačují, že dokumentace provozu je vedena v souladu s legislativou EU a českými normami, přičemž důraz je kladen zejména na oblast správné výrobní praxe, validace postupů a kontroly kvality. Přístup k těmto dokumentům je interní a podléhá přísnému režimu, avšak souhrnné informace o provozu a činnosti centra se objevují ve výročních zprávách MOÚ i v odborných prezentacích ÚJV (Masarykův onkologický ústav, 2017).

PET centrum Řež – ÚJV Řež

Toto PET centrum má odlišný charakter než nemocniční pracoviště, protože spojuje výzkumnou činnost s komerční výrobou radiofarmak. Provoz je rozdělen mezi rutinní produkci radionuklidů pro klinická pracoviště a experimentální činnost zaměřenou na vývoj nových diagnostických metod. Specifickou součástí provozu je testování ultra-krátkodobě žijících radionuklidů, jejichž výroba a aplikace vyžadují rychlou logistiku a přesné časování. Dostupné zdroje naznačují, že dokumentace tohoto pracoviště je komplexní a zahrnuje nejen standardní výrobní protokoly, ale i výsledky experimentálních programů a vývojových projektů. Zatímco část těchto dokumentů je neveřejná a přístupná jen oprávněným pracovníkům, některé souhrnné výstupy jsou publikovány v odborných časopisech nebo prezentovány na konferencích, čímž se Řež podílí na mezinárodní výměně znalostí v oblasti nukleární medicíny (ÚJV Řež, 2023).

Ústav jaderné fyziky AV ČR – Řež (cyklotron U-120M, TR-24)

Ústav jaderné fyziky AV ČR provozuje cyklotrony především pro experimentální a vývojové účely, nikoli pro rutinní zdravotnický provoz. Cyklotron U-120M umožňuje variabilní nastavení energie a využívá se k široké paletě vědeckých úkolů – od výzkumu jaderných

reakcí, přes vývoj nových radioizotopů až po materiálové testy. TR-24, instalovaný v posledních letech, slouží také k výzkumu v oblasti aplikované jaderné fyziky. Dokumentace provozu těchto zařízení je soustředěna zejména na experimentální protokoly, technické popisy a provozní manuály. Tyto materiály nejsou určeny veřejnosti, ale částečné informace o provozu a projektech jsou zveřejňovány ve výročních zprávách ústavu a v odborných publikacích. Transparentnost je tedy zajištěna na úrovni vědeckého sdílení, zatímco detailní provozní dokumenty zůstávají interní (Ústav jaderné fyziky AV ČR, 2023).

Protonové centrum Praha (systém protonové terapie Proteus, jehož součástí je cyklotron)

Protonové centrum v Praze se odlišuje tím, že cyklotron zde neslouží k výrobě radionuklidů, ale k urychlování protonů pro léčebné účely. Provoz je organizován podle potřeb klinické onkologie a zahrnuje každodenní plánování protonových terapií. Cyklotron Proteus je integrovaný do komplexního systému protonové terapie, který zahrnuje svazkovody, ozařovny a řídicí systémy. Dokumentace se soustředí na provozní protokoly léčebného charakteru, bezpečnostní manuály a validace ozařovacích režimů. Na rozdíl od PET center se zde nevede farmaceutická výrobní dokumentace, ale zdravotnická a fyzikální dokumentace odpovídající požadavkům SÚJB a Ministerstva zdravotnictví. Část těchto dokumentů je veřejně dostupná ve formě odborných publikací a informací o metodikách léčby, zatímco detailní provozní materiály jsou přísně chráněny (Proton Therapy Center Prague, 2012).

8. Analýza rizikových faktorů a jejich dopadů

Prvním krokem při hodnocení bezpečnosti cyklotronových pracovišť je detailní analýza rizikových faktorů, které se vážou k výrobě a manipulaci s radionuklidy. Mezi nejvýznamnější patří technické poruchy cyklotronu, selhání chladicích a ventilačních systémů, únik radioaktivních látek a také chyby lidského faktoru.

Tabulka 2: Přehled hlavních rizikových faktorů cyklotronových zařízení

Rizikový faktor	Možné projevy	Typické dopady
Technická porucha	Selhání chlazení, výpadek napájení	Poškození zařízení, odstávka
Únik radionuklidů	Kontaminace pracovního prostoru	Ohrožení personálu, dekontaminace
Chyba lidského faktoru	Nesprávná manipulace, nedodržení postupů	Radiační expozice, ztráta materiálu
Nedostatečné zajištění	Neaktuální havarijní plán	Zpomalení reakce na incident

Zdroj: vlastní zpracování

Významná část rizik souvisí také s externími okolnostmi. Patří sem výpadky elektrické energie, živelní události či nedostatečná koordinace mezi zdravotnickým zařízením a složkami IZS. Takové faktory sice nelze zcela eliminovat, ale jejich dopad lze snížit pravidelným testováním záložních systémů a nácviky krizových scénářů. Výsledky naznačují, že i zdánlivě vzdálené hrozby mohou mít významný vliv na provoz cyklotronu a následně na kontinuitu dodávek radiofarmak.

8.1 Identifikace zdrojů rizika

Zdroje rizika lze rozdělit do několika základních kategorií: technické, lidské, organizační a environmentální. Technické zdroje jsou spojeny s konstrukcí cyklotronu, jeho servisními intervaly a životností komponent. Chyby lidského původu zahrnují nedostatečnou odbornost, únavu nebo podcenění bezpečnostních pravidel. Organizační zdroje rizika spočívají v neaktuálních dokumentech, slabé komunikaci mezi útvary a v absenci pravidelných cvičení. Konečně environmentální zdroje zahrnují nečekané vnější vlivy, jako jsou živelní pohromy nebo výpadky infrastruktury.

Tabulka 3: Kategorizace zdrojů rizika

Kategorie	Konkrétní příklady	Potenciální následky
Technické	Porucha chlazení, netěsnost stínění	Únik radionuklidů, odstávka výroby
Lidské	Nedbalost, únava, neznalost postupů	Radiační expozice, nesprávná reakce
Organizační	Neaktuální havarijní plán, slabá komunikace	Chaotická reakce, prodloužení zásahu
Environmentální	Záplavy, výpadky proudu, požár	Poškození zařízení, nutná evakuace

Zdroj: vlastní zpracování

Identifikace zdrojů rizika není jednorázovou činností, ale procesem, který se musí pravidelně opakovat. Cyklotronová technologie i radiofarmaka se vyvíjejí, a proto je nezbytné aktualizovat havarijní plány a metodické postupy. Tento proces zahrnuje nejen interní kontrolu, ale také externí audity a spolupráci s regulačními orgány.

8.2 Ohrožení personálu, pacientů a okolí

Personál je nejvíce ohrožen v důsledku přímého kontaktu s radionuklidy při výrobě a manipulaci s radiofarmaky. I když je provoz cyklotronů konstruován s důrazem na dálkové ovládání a stínění, lidský faktor zůstává kritickým místem. Chyby při manipulaci, nesprávné nošení ochranných pomůcek nebo nedodržení procedur mohou vést ke zvýšené dávce ozáření.

Pacienti jsou vystaveni riziku spíše nepřímo, protože přicházejí do styku až s hotovými radiofarmaky. Riziko pro ně spočívá v aplikaci přípravku s nesprávnou aktivitou nebo kontaminovaného jiným radionuklidem. Přísná kontrola kvality má proto zásadní význam pro minimalizaci těchto rizik.

Tabulka 4: Možné ohrožení jednotlivých skupin

Skupina	Riziková situace	Typické dopady
Personál	Manipulace s terči, únik radionuklidů	Zvýšené dávky, nutnost dekontaminace
Pacienti	Chybná dávka, kontaminovaný přípravek	Nesprávné vyšetření, zdravotní komplikace
Okolí zařízení	Únik do ventilačního systému	Kontaminace vzduchu, panika veřejnosti

Zdroj: vlastní zpracování

Ohrožení okolí je spojeno zejména s možností úniku radionuklidů do životního prostředí. I když jsou cyklotronová pracoviště vybavena filtračními systémy a víceúrovňovým stíněním, existuje hypotetická možnost selhání. Takový incident by mohl vést k omezení pohybu v okolí zařízení, evakuaci a zásahům složek integrovaného záchranného systému.

8.3 Přístupy k eliminaci nebo snižování dopadů

Pro eliminaci nebo snížení dopadů rizikových situací se uplatňuje kombinace technických, organizačních a personálních opatření. Technická opatření zahrnují pravidelnou údržbu cyklotronu, kalibraci detekčních systémů a instalaci víceúrovňových bezpečnostních prvků. Tyto kroky zajišťují, že případná porucha je včas detekována a následky zůstávají omezené.

Organizační opatření představují tvorbu a pravidelnou aktualizaci havarijních plánů, zajištění jasně definovaných kompetencí a funkčních komunikačních kanálů. Součástí je i plánování simulovaných cvičení, která testují reakci personálu v krizových situacích. Výsledky těchto cvičení se promítají do revizí postupů a zvyšují připravenost.

Tabulka 5: Přístupy k eliminaci dopadů rizik

Typ opatření	Konkrétní příklad	Přínos
Technické	Víceúrovňové stínění, záložní napájení	Snížení pravděpodobnosti úniku
Organizační	Havarijní plán, krizová komunikace	Rychlá reakce, jasná odpovědnost
Personální	Školení, simulace havárií	Znalost postupů, menší chybovost

Zdroj: vlastní zpracování

Personální opatření zahrnují systematické vzdělávání pracovníků a jejich průběžné školení v oblasti radiační ochrany. Důležitou součástí je také péče o psychologickou připravenost personálu, protože krizové situace bývají doprovázeny vysokou mírou stresu. Posílení schopnosti personálu zvládat stres a reagovat podle předem daných scénářů významně přispívá ke snížení dopadů mimořádné události.

V neposlední řadě je nezbytné zapojení státních institucí a externích kontrolních orgánů, které přispívají k udržování vysokého standardu bezpečnosti. Spolupráce s IZS a pravidelná komunikace s veřejností posilují důvěru a zajišťují, že opatření nejsou jen formální, ale mají praktický dopad na ochranu zdraví i bezpečnost okolí.

9. Vyhodnocení stávajících opatření

Prvním krokem při vyhodnocení stávajících opatření je detailní zmapování jejich skutečného uplatnění v praxi, a to nejen na formální úrovni, ale i v každodenním provozu. Analýza ukázala, že mnohé procesy jsou sice zavedeny, avšak jejich důsledná aplikace se liší podle oddělení a podle úrovně odpovědnosti jednotlivých pracovníků. Takový stav vede k nerovnoměrné úrovni zabezpečení a vytváří prostor pro vznik mezer, které mohou oslabit systém ochrany. V rámci šetření byla proto zohledněna i interní zpětná vazba zaměstnanců, jež potvrdila, že určité opatření bývá spíše vnímáno jako administrativní formalita než nástroj prevence s reálným dopadem.

Dalším významným výstupem hodnocení byla identifikace nedostatků ve sledování a vyhodnocování účinnosti jednotlivých opatření. Přestože organizace disponuje souborem kontrolních mechanismů, jejich aplikace je nerovnoměrná a chybí systematické vyhodnocování získaných dat. To vede k tomu, že management disponuje jen omezenými podklady pro rozhodování o případných úpravách. V praxi se tak některá opatření provádějí rutinně, aniž by existovalo prokazatelné ověření jejich přínosu nebo identifikace slabých míst. Tato skutečnost snižuje efektivitu celého systému a prodlužuje dobu reakce na vznikající hrozby.

Významným závěrem vyhodnocení je také skutečnost, že současná opatření jsou nastavena relativně plošně, bez výraznější diferenciace podle konkrétních rizikových scénářů. To sice zajišťuje určitou univerzálnost, ale zároveň vede ke ztrátě cílenosti a efektivity. V oblastech, kde je riziko výrazně vyšší, působí opatření nedostatečně, zatímco v oblastech s nižší hrozbou znamenají spíše administrativní zátěž. Z toho vyplývá nutnost zavést sofistikovanější systém vyhodnocování, který umožní dynamické přizpůsobování opatření aktuálním potřebám organizace a reálným rizikovým podmínkám.

9.1 Studium vnitřní dokumentace

Na základě orientačního seznámení s interní dokumentací a odborných konzultací lze konstatovat, že její struktura je poměrně rozsáhlá, avšak místy ne zcela přehledná. V dokumentech se může nacházet řada duplicitních ustanovení. Z odborných konzultací vyplynulo, že zaměstnanci mohou mít problémy orientovat se v rozdílech mezi jednotlivými směrnicemi a často volí spíš neformální přístup založený na zkušenostech, než postup podle

přesně definovaných pravidel. Tento stav oslabuje právní jistotu a zvyšuje riziko chyb v procesu, zejména v situacích vyžadujících rychlé a jednoznačné rozhodování.

Držitel povolení je povinen vykonávat činnost v souladu s tímto zákonem a podmínkami stanovenými v povolení. Zajistit aktualizaci dokumentace podle změn a výsledků cvičení (např. u havarijní připravenosti), minimálně jednou za 4 roky. Držitel povolení je povinen zajistit, aby dokumentace související s provozem byla aktuální a odpovídala skutečnému stavu v souladu s požadavky zákona č. 263/2016 Sb., a souvisejících předpisů.

V kontextu legislativních změn, zejména novely účinné od 1. 7. 2025, je navíc nezbytné zajistit přizpůsobení dokumentace novým požadavkům ve stanovené lhůtě – jeden rok. Nedodržení této povinnosti může představovat závažný nedostatek při kontrolní činnosti dozorových orgánů a potenciální zdroj sankcí.

Dalším zjištěním je skutečnost, že dokumentace je koncipována spíše z pohledu řízení organizace, než z pohledu její praktické aplikace v každodenní činnosti. Formulace postupů bývají příliš obecné a neposkytují dostatečně konkrétní vodítka pro řešení situací, s nimiž se zaměstnanci reálně setkávají. Přesto, že je dokumentace formálně úplná, její uživatelská hodnota je tímto snížena. Tento závěr je v souladu s obecnými poznatky z praxe, kdy zaměstnanci v případě nejistoty častěji konzultují své nadřízené kolegy, než aby vyhledávali odpovědi v interních materiálech.

Z veřejně dostupných informací vyplývá, že všechna zdravotnická a výzkumná zařízení provozující cyklotrony v ČR musejí disponovat VHP a provozními řády schválenými SÚJB. U nemocničních PET center, jako je Nemocnice Na Homolce a Masarykův onkologický ústav v Brně, je dokumentace úzce navázána na klinické procesy a výrobu radiofarmak pro pacienty. V případě modernizace, například při instalaci nového cyklotronu Cyclone KIUBE na Homolce, lze z praxe podobných provozů předpokládat, že dokumentace byla aktualizována tak, aby reflektovala nové technické parametry a bezpečnostní opatření.

PET centrum ÚJV Řež kombinuje klinickou výrobu s výzkumem nových radiofarmak, což podle veřejných podkladů zvyšuje nároky na vedení dokumentace v různých režimech. V takovém případě je obvyklé, že se dokumentace dělí na část určenou pro rutinní výrobu a část zaměřenou na výzkumné protokoly. Ústav jaderné fyziky AV ČR, provozující výzkumný cyklotron U-120M, se zaměřuje především na vědecké projekty a experimenty. Podle charakteru zařízení lze usuzovat, že jeho interní dokumentace je více orientována na radiační

ochranu a bezpečnost výzkumu než na klinickou praxi. Protonové centrum Praha, kde se cyklotron využívá k protonové terapii, má podle dostupných popisů propracované havarijní a radiační protokoly související s léčbou pacientů, avšak jejich komplexnost může být pro externí složky IZS obtížně čitelná.

Tabulka 6: Základní charakteristiky dokumentace na vybraných pracovištích

Pracoviště	Stav VHP a zásahových instrukcí	Rok vzniku VHP a zásahových instrukcí	Poslední revize	Identifikované nedostatky
PET centrum Nemocnice Na Homolce (Praha)	Dokumentace zpracována v souladu s legislativou, navázána na klinický provoz PET centra	Neuvedeno	Pravděpodobně při modernizaci (např. instalace Cyclone KIUBE v roce 2023)	Potenciální složitost dokumentace, náročnost orientace při zásahu, obtížná orientace pro externí složky IZS
PET centrum Masarykův onkologický ústav (Brno)	Dokumentace integrována do klinických procesů a výroby radiofarmak	Neuvedeno	Neuvedeno	Možná obecnost zásahových instrukcí, rozdíly mezi teorií a praxí, obtížná orientace pro externí složky IZS
PET centrum ÚJV Řež (R&D)	Kombinace klinické a výzkumné dokumentace, rozdělení podle režimu provozu	Neuvedeno	Neuvedeno	Vyšší komplexnost, různorodost dokumentace podle typu činnosti, obtížná orientace pro externí složky IZS
Protonová terapie Protonové centrum Praha	Rozsáhlá dokumentace zaměřená na léčebný provoz a radiační ochranu	Neuvedeno	Neuvedeno	Vysoká komplexnost, obtížná orientace pro externí složky IZS
Obecné poznatky (syntéza)	Dokumentace vychází z požadavků legislativy a SÚJB			Převaha formálního přístupu, rozdíly v praktické použitelnosti, složitost dokumentace, nedostatečná součinnostní cvičení s externími složkami IZS

Zdroj: vlastní zpracování

Konkrétní údaje o roku vzniku a revizích dokumentace nejsou veřejně dostupné, neboť se jedná o interní materiály podléhající režimu radiační ochrany a bezpečnosti. Z tohoto důvodu jsou v tabulce uvedeny pouze obecné charakteristiky vycházející z dostupných informací. Z hlediska legislativy však platí, že VHP musí být aktualizován nejméně jednou za 4 roky nebo při změně podmínek.

Tabulka shrnuje základní charakteristiky dokumentace na vybraných pracovištích v České republice na základě veřejně dostupných informacích a obecně známých principů provozu cyklotronových zařízení. Z důvodu omezeného přístupu k interním materiálům nejsou uvedeny konkrétní údaje o dokumentaci. Uvedené poznatky mají obecný charakter a slouží k ilustraci rozdílů v přístupu vedení dokumentace v různých typech pracovišť.

9.2 Posouzení účinnosti školení a simulací

Podle vyhlášky č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládání radiační mimořádné události, ve znění pozdějších předpisů jsou držitelé povolení povinni zajistit pravidelné prověřování připravenosti personálu a to formou nácviků a havarijních cvičení. Tato cvičení musí být plánována, realizována a vyhodnocována, přičemž jejich výsledky jsou následně zapracovány do vnitřní dokumentace.

Současně je vyžadováno pravidelné ověřování znalostí osob určených k řízení a provádění odezvy, minimálně jednou ročně. Posouzení účinnosti školení a vzdělávacích programů vychází z dostupných poznatků z praxe, doplněných o neformální konzultace s pracovníky některých zařízení a vlastní pozorování. Vyhodnocení účinnosti školení ukázalo, že vzdělávací programy jsou organizovány pravidelně, avšak jejich přínos pro zaměstnance se výrazně liší. Někteří pracovníci oceňují praktické příklady a simulace, které jim pomáhají lépe zvládat krizové situace, jiní je vnímají spíše jako povinnou formalitu bez přímého přínosu. Tento rozdíl vychází mimo jiné z odlišných zkušeností a pracovní náplně jednotlivých skupin, což potvrzuje potřebu diferencovaného přístupu při plánování školení.

Dále se ukázalo, že hodnocení účinnosti školení není vždy systematické. Přestože po každém školení probíhá zpětnovazební anketa, její výsledky nejsou využívány k cíleným úpravám obsahu či metodiky.

Významným problémem je také rozdílná úroveň připravenosti mezi pracovníky různých oddělení. Někteří zaměstnanci prokazují vysokou míru znalostí a schopnost aplikovat postupy v praxi, zatímco jiní selhávají i při řešení základních modelových situací. To poukazuje na nedostatečně nastavený systém následného prověřování znalostí a dovedností.

Podle požadavků atomového zákona a vyhlášek SÚJB musejí mít provozovatelé cyklotronů systém pravidelných školení a cvičení pro personál (§ 12 vyhlášky č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládání radiační mimořádné události, ve znění pozdějších předpisů). Ve veřejně přístupných zdrojích je uváděno, že nemocniční PET centra organizují školení nejen pro techniky obsluhující cyklotron, ale i pro zdravotnický personál podílející se na výrobě a aplikaci radiofarmak.

U Nemocnice Na Homolce lze z popisů odvodit, že po modernizaci zařízení byla provedena instruktáž k novým technologiím, zatímco v Brně je výhodou propojení školení přímo s chodem onkologického ústavu.

U PET centra ÚJV Řež jsou veřejně zmíněny cvičné akce za účasti složek IZS, což odpovídá charakteru tohoto zařízení jakožto základního výrobního a vývojového centra.

U výzkumného cyklotronu U-120M v ÚJF AV ČR lze očekávat, že školení jsou zaměřena zejména na vědecké pracovníky a technický personál v oblasti radiační ochrany, zatímco krizová cvičení s externí účastí nejsou pravděpodobně prioritou.

Protonové centrum Praha se podle dostupných zpráv soustředí na pravidelné evakuační zkoušky a bezpečnost pacientů, což je pro zdravotnické zařízení tohoto typu logické, přičemž simulace spojené s technickými poruchami cyklotronu jsou spíše doplňkové.

9.3 Technické prostředky detekce a monitoringu

Technické prostředky detekce a monitoringu hrají zásadní úlohu při zajišťování bezpečnosti, protože umožňují včasné odhalení anomálií a podezřelých jevů v prostředí organizace. Analýza ukázala, že využívané technologie jsou rozděleny do několika kategorií: kamerové systémy, senzory pohybu, elektronické kontrolní systémy a softwarové nástroje pro monitoring.

Tabulka 7: Přehled využívaných technických prostředků detekce a monitoringu

Typ prostředku	Silné stránky	Slabé stránky	Možnosti zlepšení
Kamerové systémy (CCTV)	Široké pokrytí veřejných prostor, záznam incidentů	Nedostatečné pokrytí zázemí a technických vstupů	Rozšíření kamerových bodů, využití analytického SW
Senzory pohybu	Včasná signalizace neoprávněného vstupu	Statické rozmístění, náchylnost k falešným poplachům	Dynamická konfigurace podle provozu
Elektronické kontrolní systémy	Kontrola přístupu, evidence vstupů	Omezená návaznost na ostatní systémy	Propojení s CCTV a logováním uživatelů
Softwarové nástroje monitoringu	Záznam činností v IS, odhalování anomálií	Oddělený provoz, nízké využití výstupů	Zavedení jednotné analytické platformy

Zdroj: vlastní zpracování

Další zjištění se vztahují k integraci jednotlivých prostředků. Zatímco fyzické technologie, jako kamery a senzory, jsou napojeny na centrální dispečink, softwarové monitorovací systémy fungují odděleně, bez jednotné analytické platformy.

Zákonné požadavky a praxe v oblasti radiační ochrany ukazují, že všechna zařízení s cyklotronem využívají kombinaci fyzického a elektronického monitoringu. Nemocnice Na Homolce i Masarykův onkologický ústav mají podle veřejných popisů kamerové systémy, elektronické vstupní kontroly a radiační detektory v prostorách cyklotronu a laboratoří. Tyto prostředky zajišťují kontrolu přístupu a radiační bezpečnost, i když detailní informace o jejich integraci nejsou veřejně dostupné.

ÚJV Řež deklaruje využívání moderních monitorovacích prostředků, které sledují jak radiační parametry, tak produkční data z cyklotronu. Tento přístup odpovídá standardům, které se u výzkumně-výrobních pracovišť očekávají.

Ústav jaderné fyziky AV ČR podle popisů disponuje standardními radiačními měřiči zaměřenými na výzkumné experimenty a ochranu personálu, přičemž rozsah monitoringu je menší než u klinických center.

Protonové centrum Praha má podle svých veřejně dostupných materiálů špičkový systém monitoringu v léčebných sálech, kde se kontroluje dávkování protonového svazku i radiační pole, což odpovídá primární orientaci zařízení na pacientskou bezpečnost.

10. Spolupráce se složkami IZS a regulačními orgány

Poznatky z praxe o spolupráci se složkami IZS vycházejí z omezeného náhledu do provozu vybraných zdravotnických pracovišť, doplněného o neformální konzultace s personálem a vlastní pozorování. Vzhledem k omezenému přístupu k interní dokumentaci a absenci systematického empirického šetření je nutné tyto závěry interpretovat jako orientační.

Z dostupných poznatků vyplývá, že kontaktní vazby mezi zdravotnickými zařízeními a složkami IZS jsou zpravidla nastaveny na formální úrovni prostřednictvím smluvních vztahů a stanovených postupů. V rámci plánovaných cvičení bývá komunikace se složkami, zejména s Hasičským záchranným sborem (HZS) funkční a organizačně zajištěná. Na druhé straně lze předpokládat, že při nenadálých událostech mohou vznikat časové prodlevy při předávání informací, a to zejména v důsledku rozdílných komunikačních kanálů a nejednotného formátu sdílených dat.

Dalším zjištěním je rozdílná míra informovanosti jednotlivých složek IZS. Zatímco některé složky, zejména HZS, mají v rámci areálu zdravotnického zařízení k dispozici podrobnější podklady, jiné složky, například Policie České republiky (PČR), pracují spíše s obecnějšími informacemi o prostoru a rizikových zónách. Tento stav může být způsoben absencí jednotného protokolu pro sdílení interní dokumentace, což může v praxi vést k prodloužení koordinace zásahu.

Z hlediska praktické připravenosti bylo zjištěno, že společná školení se složkami IZS nejsou vždy zaměřena specificky na provoz cyklotronového nebo PET pracoviště. Školení mohou probíhat na úrovni celého zdravotnického zařízení, avšak bez detailního zaměření na specifika práce s radionuklidy. Tento faktor může ovlivnit úroveň připravenosti složek IZS na řešení RMU přímo v těchto specifických provozech.

Spolupráce s regulačními orgány, zejména se SÚJB a krajskými úřady, má převážně formální a periodický charakter. Zdravotnická zařízení plní zákonné ohlašovací povinnosti a podléhají pravidelným kontrolám, nicméně kontinuální operativní komunikace není vždy zajištěna, kontakty nejsou aktualizovány. V případě RMU tak může docházet ke zpoždění v zapojení regulačních orgánů do řešení situace, což může snižovat efektivitu jejich odborného dohledu.

Uvedené poznatky nejsou výsledkem systematického empirického výzkumu, ale slouží především jako identifikace potenciálních problematických oblastí v systému spolupráce a je třeba tyto závěry vnímat jako orientační.

10.1 Koordinace s Hasičským záchranným sborem, Státním úřadem pro jadernou bezpečnost a Policií České republiky

Koordinace s HZS vychází z požadavků na zpracování VHP, jehož obsah je definován legislativou, zejména vyhláškou č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládání radiační mimořádné události, ve znění pozdějších předpisů. Tento plán standardně zahrnuje popis technologických procesů, evakuačních postupů a opatření k ochraně osob. Spolupráce se složkami IZS a regulačními orgány není stanovena jedním konkrétním ustanovením, ale vyplývá z kombinace požadavků AZ, vyhlášky 359/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů a zákona 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému. Konkrétní postupy spolupráce jsou definovány zejména ve VHP, jehož obsah je stanoven v příloze č. 6 vyhlášky č. 359/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů, kde jsou zahrnuty postupy vyrozumění a koordinace s orgány veřejné správy a složkami IZS. Rozsah zapojení těchto složek se liší podle závažnosti RMU.

Z dostupných poznatků a konzultací z praxe vyplývá, že spolupráce s HZS bývá funkční zejména při plánovaných cvičeních, kdy jsou postupy ověřovány v kontrolovaném prostředí.

Na druhé straně lze předpokládat, že při neohlášených RMU mohou vznikat komplikace spojené s přístupem zasahujících složek do specifických prostor s omezeným režimem. Tyto situace mohou vést k časovým prodlevám, například v důsledku nutnosti operativního řešení vstupních oprávnění nebo orientace v technologicky specifickém prostředí. Podle AZ a vyhlášek SÚJB musejí všechna pracoviště s cyklotronem v ČR spolupracovat s HZS, PČR a SÚJB při plánování i řešení RMU. Nemocniční PET centra v Praze (Na Homolce) a Brně (Masarykův onkologický ústav) podle veřejně dostupných zpráv organizují pravidelná cvičení ve spolupráci s HZS, přičemž se simulují zejména evakuace a zásahy při RMU.

Koordinace s HZS je založena na schválených VHP, které obsahují podrobný popis technologických procesů, evakuačních cest a rozmístění ochranných prostředků. Analýza ukázala, že tato spolupráce je funkční zejména při plánovaných cvičeních, kdy jsou postupy testovány v reálném prostředí. Problém nastává ve fázi neohlášených událostí, kde se ukazuje

nedostatečné zajištění rychlého vstupu hasičů do určitých prostor s omezeným přístupem. Přístupová oprávnění bývají řešena ad hoc, což vede k prodlevám při zásahu.

Spolupráce se SÚJB se soustředí zejména na zajištění provozní bezpečnosti a kontrolu nakládání se zdroji IZ a radioaktivními látkami v souladu s požadavky platné legislativy. Dokumentace předkládaná SÚJB je rozsáhlá a detailní, nicméně praktická koordinace v případě incidentů je omezena. Inspektoři se účastní pravidelných prověrek, avšak při RMU bývají zapojováni až sekundárně. Tento stav oslabuje jejich přínos, protože některé kroky mohly být s jejich odbornou podporou provedeny rychleji a efektivněji.

Spolupráce s PČR má odlišný charakter, neboť se zaměřuje na ochranu perimetru, prevenci neoprávněného vstupu a řešení incidentů s možným bezpečnostním nebo kriminálním pozadím. Z dostupných poznatků a charakteru nastavení bezpečnostních procesů vyplývá, že policejní složky bývají zpravidla zapojovány až v situacích, kdy dojde k eskalaci události nebo k narušení veřejného pořádku, což snižuje možnosti preventivního zásahu. Primární reakce na incidenty v rámci zdravotnického zařízení je obvykle zajišťována interními bezpečnostními mechanismy, jako je fyzická ostraha nebo technické zabezpečovací systémy. Lze předpokládat, že v některých situacích by dřívější zapojení PČR mohlo přispět k efektivnějšímu zvládnutí incidentu a snížení rizika pro zaměstnance zařízení. Tento aspekt však závisí na konkrétním nastavení interních postupů a komunikačních mechanismů daného pracoviště.

Koordinace se složkami HZS, SÚJB a PČR funguje na základní úrovni, ale chybí vyšší úroveň integrace. Každá složka disponuje vlastními postupy a kanály, které nejsou plně synchronizovány s procesy organizace. V praxi to znamená, že jednotlivé intervence probíhají paralelně, bez plného využití synergického efektu.

ÚJV Řež uvádí ve svých výročních zprávách a veřejných prezentacích, že spolupracuje se SÚJB v oblasti dohledu nad radiační ochranou a s HZS při nácviku krizových situací. Toto centrum je vzhledem k výrobě radiofarmak významným článkem infrastruktury, a proto je koordinace s regulačním úřadem a složkami IZS považována za zásadní. Ústav jaderné fyziky AV ČR (cyklotron U-120M) má na základě svého výzkumného charakteru jiný režim spolupráce – podle veřejných informací jde zejména o povinné kontroly SÚJB a součinnost při nakládání s radionuklidy. Přímé krizové cvičení s HZS se zde nezdůrazňuje, což odpovídá orientaci na vědecký provoz.

Protonové centrum Praha je zdravotnické zařízení, které poskytuje léčbu protonovou terapií. Veřejně dostupné materiály potvrzují, že zařízení má zpracované krizové plány, které jsou koordinovány s HZS hl. m. Prahy. Vzhledem k tomu, že se jedná o pracoviště s pacienty, je do krizových plánů zapojena i PČR, a to zejména v oblasti evakuace a zajištění prostoru. Spolupráce se SÚJB je přirozenou součástí provozu, protože jde o zařízení pracující s urychlovačem a ionizujícím zářením.

10.2 Komunikační toky a návaznost zásahů

Analýza komunikačních toků odhalila, že současný systém přenosu informací je složen z několika vrstev – od interní ostrahy, přes dispečink, až po kontaktní osoby ve složkách IZS. Tento model sice zajišťuje formální dodržení hierarchie, ale v praxi způsobuje prodlevy a ztrátu některých informací. Významný nedostatek se ukázal i v komunikaci směrem dovnitř organizace. Zatímco vedení je informováno prostřednictvím formálních zpráv a hlášení, běžní zaměstnanci se k informacím dostávají až sekundárně. V praxi to znamená, že při zásahu často panuje nejistota ohledně toho, zda a jak mají zaměstnanci spolupracovat.

Hlavní slabinou současného systému je oddělené fungování jednotlivých komunikačních kanálů. Každá složka IZS i interní jednotky využívají vlastní nástroje, které nejsou plně kompatibilní. To omezuje možnost jednotného vyhodnocení situace a prodlužuje dobu reakce. Pokud by byla komunikace centralizována prostřednictvím jednotné digitální platformy, umožnilo by to okamžité sdílení obrazu, dat i instrukcí mezi všemi zúčastněnými.

U nemocničních PET center, jako je Homolka a Brno, je podle veřejných zdrojů zajištěn komunikační kanál prostřednictvím nemocničních krizových plánů, které určují, jakým způsobem je aktivován HZS a jak jsou informováni pacienti a personál.

ÚJV Řež ve svých výročních zprávách uvádí, že má zavedený systém hlášení a předávání informací regulačním orgánům, především SÚJB. V praxi to znamená, že při jakékoli události spojené s radiačním provozem probíhá notifikace přes určené kontaktní osoby. Komunikační toky s HZS jsou podle veřejných prezentací testovány během nácviků, což umožňuje ověřit funkčnost přenosu informací mezi provozem a zasahujícími složkami.

Výzkumný cyklotron U-120M v ÚJF AV ČR má, jak ukazují veřejné podklady, odlišný komunikační rámec. Prioritou zde je přenos dat a hlášení směrem k SÚJB a spolupráce s akademickými partnery. Návaznost na zásahy IZS není tak častá, ale i zde je povinnost zajistit komunikační mechanismy pro případ RMU.

Protonové centrum Praha podle svých informačních materiálů udržuje přímé komunikační linky s HZS a PČR, protože zajišťuje léčbu pacientů a musí být připraveno na rychlou evakuaci i na zvládání technických závad.

Z dostupných informací lze shrnout, že všechna zařízení disponují formálně nastavenými komunikačními toky s IZS a regulačními orgány, avšak jejich praktická úroveň odpovídá typu provozu. Nemocniční PET centra a Protonové centrum se zaměřují na propojení s HZS a PČR kvůli ochraně pacientů, zatímco ÚJV Řež a ÚJF AV ČR kladou větší důraz na interakci se SÚJB a odborný dohled nad radiační bezpečností.

11. Post-havarijní procesy a obnova provozu

Podle požadavků atomového zákona a prováděcích vyhlášek SÚJB musí všechna zařízení provozující cyklotrony disponovat postupy pro zvládání následků RMU. V případě nemocničních PET center, jako je Homolka a Masarykův onkologický ústav, se podle veřejně dostupných podkladů předpokládá důraz na rychlé obnovení výroby radiofarmak. To je nezbytné pro zachování kontinuity diagnostické péče, protože radiofarmaka mají krátký poločas rozpadu a jejich nedostatek by mohl narušit dostupnost PET vyšetření. Obnova provozu se zde typicky spojuje s provedením technické kontroly cyklotronu, měřením úrovní IZ a ověřením integrity stínění.

V případě ÚJV Řež, kde dochází k výrobě i vývoji nových přípravků, je veřejně zdůrazňována nutnost koordinace obnovy provozu nejen s klinickými partnery, ale i s regulačními orgány. Obnova probíhá postupně: nejprve je provedeno vyhodnocení incidentu, následně dochází k autorizaci provozu ze strany SÚJB, a teprve poté je možné obnovit výrobu radiofarmak. Výzkumný cyklotron ÚJF AV ČR, který slouží k experimentům, má odlišnou prioritu – jeho post-havarijní procesy se podle charakteru provozu zaměřují spíše na bezpečné ukončení výzkumných experimentů a ochranu personálu než na rychlé obnovení výroby.

Protonové centrum Praha v dostupných materiálech zdůrazňuje, že po mimořádné události musí být zajištěna nejen technická bezpečnost cyklotronu, ale i validace terapeutických parametrů protonového svazku, aby bylo možné obnovit léčbu pacientů.

11.1 Postupy dekontaminace

Podle vyhlášek SÚJB musí mít provozovatel cyklotronu stanoveny dekontaminační postupy pro případ úniku radionuklidů. Ve veřejných materiálech nemocnic i regulačních orgánů se uvádí, že standardními opatřeními jsou dekontaminační sprchy, ochranné pomůcky a dekontaminační soupravy umístěné v laboratořích. V nemocničních PET centrech je důraz kladen na rychlé zajištění pracovních prostor a omezení pohybu personálu, dokud není úroveň IZ snížena na bezpečnou úroveň.

ÚJV Řež v rámci své výrobní i výzkumné činnosti deklaruje využívání komplexních systémů pro dekontaminaci technického zázemí. To odpovídá požadavkům, které jsou na taková pracoviště kladeny – včetně možnosti uzavření ventilace, dekontaminace povrchů a kontrolního měření před obnovením provozu. Ústav jaderné fyziky AV ČR podle svých

výzkumných zpráv disponuje postupy pro laboratorní dekontaminaci menšího rozsahu, protože zde se pracuje především s experimentálními izotopy.

Protonové centrum Praha, ačkoli nepracuje s otevřenými radionuklidy pro diagnostiku, má podle veřejných materiálů připraveny dekontaminační postupy zejména pro personál a pacienty v případě incidentu s únikem sekundárního záření nebo kontaminace zařízení.

11.2 Psychologická podpora a ochrana zasažených osob

Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví, ve znění pozdějších předpisů, i krizové plány nemocnic zdůrazňují nutnost zajištění psychologické podpory osob zasažených RMU. Ve zdravotnických PET centrech, jako je Homolka a Brno, se podle veřejně dostupných krizových plánů počítá s poskytnutím psychologické pomoci pacientům, kteří se mohou ocitnout v evakuovaných prostorách. Zároveň je podporován i zdravotnický personál, protože práce v prostředí IZ představuje psychickou zátěž.

ÚJV Řež a ÚJF AV ČR podle svých prezentací a zpráv o výzkumných aktivitách kladou důraz na ochranu odborných pracovníků, kteří mohou být v mimořádných situacích vystaveni zvýšené psychické zátěži spojené s radiačním rizikem. Psychologická podpora zde není primárně zajišťována vnitřními kapacitami, ale je standardní, že součástí krizových plánů je možnost přivolat odborníky z IZS nebo spolupracujících nemocnic.

Protonové centrum Praha vzhledem ke své přímé vazbě na pacienty uvádí, že psychologická podpora je pevnou součástí péče – kromě zdravotní stránky léčby se počítá i s psychologickým doprovodem pacientů, a tento systém lze aktivovat i při RMU.

11.3 Interní vyhodnocení a revize postupů

Ve všech zařízeních s cyklotronem platí, že po RMU je povinnost provést interní analýzu, vyhodnocení účinnosti opatření a případnou revizi postupů. Podle výročních zpráv ÚJV Řež a informací zveřejněných SÚJB se tato vyhodnocení provádějí písemně a jejich výsledky se předávají regulačním orgánům.

ÚJF AV ČR podle charakteru provozu provádí analýzu incidentů v rámci výzkumných zpráv a interních protokolů, které se následně konzultují se SÚJB.

Protonové centrum Praha deklaruje ve svých veřejných materiálech, že pravidelně aktualizuje bezpečnostní dokumentaci a vyhodnocuje zkušenosti ze cvičení i provozu. Tento proces slouží nejen ke splnění legislativních povinností, ale také k průběžnému zvyšování bezpečnosti pacientů a spolehlivosti celého provozu.

12. Inspirace zahraničními přístupy

Zahraniční zdravotnické systémy a instituce, které pracují s radionuklidy a provozují cyklotronová centra, disponují dlouholetými zkušenostmi s krizovým řízením a prevencí RMU. V řadě evropských zemí, jako je Německo, Francie nebo Nizozemsko, je standardem pravidelná aktualizace havarijních plánů a jejich praktické prověřování prostřednictvím celonárodních cvičení, do nichž jsou zapojeny složky státní správy i místní samosprávy. Tyto systémy se vyznačují důrazem na propojení mezi státními dozorovými orgány, provozovateli cyklotronových zařízení a akademickou sférou, která poskytuje expertní podporu a analytické nástroje. Důležitou inspirací je také způsob, jakým zahraniční zařízení integrují požadavky Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) a Evropské komise do svých provozních směrnic, čímž se zvyšuje transparentnost a efektivita kontroly.

Dalším výrazným prvkem, který lze pozorovat v zahraničí, je důsledná digitalizace dokumentace a centralizované řízení informací. V rámci systému krizové připravenosti mají provozovatelé přístup k jednotné databázi plánů, protokolů a hlášení o incidentech, což umožňuje rychlejší reakci a přesnější vyhodnocení situace. Automatizované hlášení prostřednictvím bezpečnostních platforem zajišťuje, že každá RMU je okamžitě evidována, a odpovědní pracovníci tak mohou přistoupit k analýze příčin i návrhu nápravných opatření bez zpoždění. Tento přístup minimalizuje lidskou chybovost a usnadňuje auditní dohled ze strany kontrolních orgánů.

Inspirativní jsou rovněž zkušenosti se vzděláváním a školením pracovníků, které v zahraničních cyklotronových centrech probíhá v úzké spolupráci s univerzitami a specializovanými agenturami. Programy zaměřené na krizové řízení a odezvu na RMU kombinují teoretické vzdělávání s realistickými praktickými simulacemi. Zaměstnanci tak získávají nejen znalosti o technických postupech, ale i dovednosti v oblasti týmové koordinace, komunikace a zvládání stresových situací. Tento komplexní přístup zvyšuje odolnost systému a připravenost personálu reagovat i na neočekávané scénáře.

12.1 Automatizované systémy detekce

Moderní cyklotronová centra se stále více spoléhají na automatizované systémy detekce, které nepřetržitě monitorují úniky radioaktivních látek, kontaminaci prostředí, úroveň ozáření pracovníků a technický stav zařízení. Tyto systémy kombinují senzory pro měření gama a

neutronového záření, zařízení pro sledování kontaminace vzduchu a povrchů, a digitální řídicí jednotky, které v reálném čase vyhodnocují odchylky od normálního provozu. Hlavním prvkem je schopnost systému automaticky vyhlásit varování, zastavit provoz cyklotronu a informovat odpovědné osoby prostřednictvím zabezpečené komunikační sítě. Takto nastavený mechanismus minimalizuje riziko opožděné reakce a přispívá k vyšší ochraně zaměstnanců i okolí zařízení.

Pokročilé detekční systémy využívají umělou inteligenci a algoritmy strojového učení, které dokážou rozlišit mezi běžnými provozními výkyvy a skutečnými anomáliemi. Na základě historických dat systém vytváří prediktivní modely, které dokážou upozornit na možné poruchy ještě předtím, než se projeví. To umožňuje zavést preventivní údržbu a vyhnout se neplánovaným odstávkám nebo ohrožení bezpečnosti. Integrace těchto systémů do centrálního dohledu navíc umožňuje porovnávat údaje z více pracovišť a vytvářet celostátní nebo regionální přehled o úrovni radiační bezpečnosti.

Implementace automatizovaných detekčních systémů však vyžaduje pečlivé plánování a pravidelnou kalibraci měřicích přístrojů. Zkušenosti z praxe ukazují, že efektivita systému závisí na kvalitě sběru dat, jejich přesném vyhodnocení a schopnosti provozního personálu interpretovat výsledky. Proto je nezbytné, aby byl systém doplněn o přehledné rozhraní pro uživatele a o možnost manuální kontroly. Kombinace automatizace a odborného dohledu vytváří rovnováhu mezi rychlostí reakce a odborným úsudkem, která je pro oblast radiační bezpečnosti zásadní.

12.2 Simulační software a školení v reálném čase

Rozvoj moderních technologií umožnil zavedení simulačních platforem, které dokážou věrně napodobit průběh radiační mimořádné události. Tyto systémy jsou využívány k výcviku personálu cyklotronových zařízení i k testování funkčnosti vnitřních havarijních plánů. Simulace probíhají v reálném čase a umožňují sledovat reakce jednotlivých složek krizového řízení, rychlost rozhodovacích procesů a schopnost spolupráce mezi týmy. Díky tomu lze odhalit slabá místa v organizaci práce i v komunikaci, která by mohla v případě skutečné události způsobit prodlevy nebo chybná rozhodnutí.

Software pro simulace obvykle obsahuje moduly pro modelování úniků radionuklidů, šíření kontaminace a hodnocení ozáření osob. V kombinaci s reálnými daty ze senzorů a detekčních

systémů lze vytvářet dynamické scénáře, které reagují na vstupy účastníků školení. Vzdělávací efekt spočívá v tom, že pracovníci se učí reagovat v prostředí, které je velmi blízké skutečné situaci, aniž by došlo k ohrožení bezpečnosti. V některých zemích se tato školení provádějí i v hybridní formě, kdy část účastníků pracuje přímo v provozu a část se účastní na dálku prostřednictvím virtuální reality.

Zkušenosti ukazují, že pravidelná cvičení založená na simulačním softwaru výrazně zvyšují schopnost personálu reagovat efektivně, snižují stres a zlepšují koordinaci mezi útvary. Umožňují také objektivně měřit úspěšnost zásahů a upravovat VHP podle zjištěných nedostatků. Zavedení těchto systémů představuje investici, která se vrací v podobě zvýšené bezpečnosti, rychlejších reakcí a snížení rizika chyb při skutečných RMU.

12.3 Možnosti přenosu zkušeností do českých podmínek

Aplikace zahraničních přístupů do českého prostředí vyžaduje zohlednění legislativního rámce, organizační struktury zdravotnictví i dostupných technických zdrojů. V první řadě je vhodné posílit spolupráci mezi zdravotnickými zařízeními, vysokými školami a výzkumnými ústavy, které mohou přenášet know-how v oblasti krizového řízení, detekce a simulací. Praktické zkušenosti ze zemí s dlouhou tradicí v provozu cyklotronů ukazují, že nejefektivnější cestou je vytvoření národní platformy pro sdílení dat a metodik. Takový systém by mohl fungovat pod patronací SÚJB a umožnit systematické vyhodnocování připravenosti jednotlivých pracovišť.

Dalším krokem by mělo být zavedení moderních technologií, které se již osvědčily v zahraničí. Automatizované systémy detekce a simulační software by mohly být standardní součástí vybavení cyklotronových zařízení, přičemž jejich implementace by měla být podpořena dotačními programy a mezinárodními projekty. Zahraniční zkušenosti potvrzují, že propojení detekce, prediktivních algoritmů a realistického výcviku v jednom integrovaném systému významně zvyšuje úroveň bezpečnosti a připravenosti na RMU.

Úspěšný přenos zkušeností však vyžaduje i systematickou změnu přístupu k odbornému vzdělávání. Provozní i krizový personál by měl být školen podle jednotných standardů, které budou kompatibilní s mezinárodními požadavky (MAAE). Zahrnutí moderních simulačních metod do výuky a pravidelné certifikace pracovníků by mohly vytvořit prostředí, které podpoří jak profesionální rozvoj, tak i kulturu bezpečnosti. Implementace těchto opatření by

umožnila českým zdravotnickým zařízením přiblížit se úrovni komplexního řízení radiační bezpečnosti běžné ve vyspělých evropských státech.

13. Výsledky

13.1 Hlavní zjištění

Na základě provedené analýzy lze konstatovat, že legislativní rámec radiační ochrany v České republice je nastaven na vysoké úrovni a poskytuje komplexní systém požadavků na bezpečný provoz pracovišť se zdroji IZ. Požadavky definované zejména atomovým zákonem a souvisejícími vyhláškami pokrývají technickou i organizační stránku připravenosti k odezvě na RMU.

Z dostupných informací a odborných konzultací však vyplývá, že mezi formálním nastavením systému a jeho praktickým fungováním mohou existovat rozdíly. Připravenost je sice zajištěna prostřednictvím dokumentace, její skutečná využitelnost v praxi však závisí především na úrovni proškolení personálu, frekvenci praktických cvičení a míře aktualizace jednotlivých dokumentů. Významným faktorem je také jejich provázanost s reálným provozem pracoviště.

Legislativa stanovuje jasné požadavky na připravenost k odezvě na RMU, včetně povinnosti zpracování VHP, zásahových instrukcí a zajištění školení pracovníků. V praxi však může docházet k rozdílům v jejich aplikaci, zejména v oblasti pravidelnosti cvičení, aktualizace dokumentace a využívání moderních technologií. Zatímco legislativa definuje, co má být, praxe ukazuje, jak systém skutečně funguje.

Na základě provedené analýzy se domnívám, že hlavním problémem systému není nedostatek legislativních požadavků, ale jejich praktická implementace. Přestože jsou procesy formálně správně nastaveny, jejich efektivita je výrazně ovlivněna lidským faktorem, zejména úrovní školení a schopností personálu reagovat v reálné situaci. Za klíčovou slabinu lze považovat nedostatečný důraz na praktický nácvik krizových situací, který je nezbytný pro ověření funkčnosti nastavených postupů.

Je však nutné zdůraznit, že práce má určitá omezení. Vzhledem k omezenému přístupu k interní dokumentaci nebylo možné provést detailní komparativní analýzu konkrétních VHP a zásahových instrukcí. Zjištěné skutečnosti proto vycházejí z kombinace dostupných zdrojů, omezeného náhledu do praxe a zobecnění poznatků.

I přes tato omezení práce přináší ucelený pohled na problematiku připravenosti na RMU a potvrzuje, že vedle legislativního rámce je klíčovým faktorem především kvalita implementace jednotlivých opatření v praxi.

13.2 Silné stránky a nedostatky zajištění připravenosti

Silnou stránkou systému připravenosti je vysoká úroveň právní regulace, která jasně vymezuje povinnosti provozovatelů, kompetence jednotlivých institucí a postupy při řešení RMU. Česká republika disponuje funkčním systémem dozoru prostřednictvím SÚJB, který zajišťuje metodické vedení a kontrolu dodržování stanovených pravidel. Pozitivním zjištěním je rovněž skutečnost, že většina cyklotronových zařízení má zpracovanou interní dokumentaci v souladu s platnou legislativou a zajišťuje kontrolu radiační ochrany. Tyto prvky vytvářejí stabilní základ systému.

Na druhé straně byly identifikovány významné nedostatky, které ovlivňují praktickou úroveň připravenosti. Mezi jednotlivými zařízeními existuje nerovnoměrná úroveň připravenosti, která se projevuje rozdíly v technickém vybavení, odbornosti personálu a četnosti školení. Nedostatečná standardizace a absence centralizovaného přístupu mohou komplikovat koordinaci zejména při rozsáhlejších RMU.

Dalším problémem je omezená míra propojení mezi zdravotnickými zařízeními a složkami IZS, což může zpomalit výměnu informací a rozhodovací procesy při řešení RMU.

Mezi další identifikované nedostatky patří zejména:

- nedostatečné využívání moderních technologií (automatizované detekční systémy, simulační nástroje, digitalizace dokumentace)
- nízká míra systematického vyhodnocování cvičení
- rozdílná úroveň praktické připravenosti personálu

Uvedené nedostatky ukazují, že přestože je systém formálně dobře nastaven, jeho efektivita v praxi je závislá především na kvalitě implementace jednotlivých opatření.

13.3 Omezení výzkumu

Každý výzkumný proces je spojen s určitými limity, které je třeba zohlednit při interpretaci výsledků. Prvním problémem byla omezená dostupnost dat z interní dokumentace zdravotnických zařízení. Přístup k VHP, zásahovým instrukcím a provozním protokolům podléhá přísnému režimu ochrany, protože jde o materiály se strategickým významem. Tato skutečnost komplikovala detailní mapování zdravotnických zařízení s cyklotronem, zejména při hodnocení připravenosti a organizační struktury krizového řízení.

Významným faktorem je variabilita jednotlivých zdravotnických zařízení. Každé pracoviště využívající cyklotron se liší technickým vybavením, personální kapacitou i způsobem organizace provozu. Tato nejednotnost se projevuje při analýze rizikových faktorů, protože znemožňuje vytvoření univerzálního hodnoticího rámce. Porovnání mezi zařízeními může částečně odrážet rozdíly vyplývající z lokálních podmínek a dostupných zdrojů, nikoli pouze skutečnou úroveň připravenosti.

Specifickým problémem se ukázal nesoulad mezi deklarovaným a skutečným stavem připravenosti zařízení. Na základě orientačního seznámení s interní dokumentací a odborných konzultací lze konstatovat, že dokumentace zpravidla vychází z ideální průběhu reakce na RMU, přičemž její účinnost je podmíněna reálnou úrovni proškolení zaměstnanců a schopností personálu rychle reagovat. Toto omezení se může projevovat při vyhodnocování stávajících opatření, školení a simulačních cvičení, kde rozdíl mezi teorií a praxí může ovlivnit interpretaci závěrů.

Za významný limit lze považovat i absenci přímého zapojení respondentů z řad pracovníků cyklotronových zařízení. Výzkum vychází především z dokumentace, odborných zpráv a dostupných údajů, nikoli z výpovědí zaměstnanců, kteří se podílejí na provozu a komunikaci se složkami IZS. Tím může být oslabena hloubka pohledu na praktické aspekty spolupráce a reálnou koordinaci zásahů.

Limitujícím aspektem je rovněž časová a geografická vymezenost výzkumu. Práce se zaměřuje na zdravotnická zařízení na území České republiky a reflektuje jejich stav v době zpracování. Zjištěné skutečnosti proto nelze zobecnit na jiné státy ani na budoucí období, jelikož legislativa, technologie i organizační procesy v oblasti radiační ochrany a havarijní připravenosti se mohou v čase rychle měnit.

Posledním omezením je absence empirických dat z reálných RMU. V českých podmínkách se takové případy prakticky nevyskytují, a proto se analýza opírá o modelové scénáře, simulační cvičení a zahraniční zkušenosti. Tento přístup umožňuje vytvořit teoreticky podložený rámec připravenosti, ale omezuje možnost prakticky ověřit účinnost navržených opatření. Tyto skutečnosti je třeba mít na paměti při formulaci závěrů a návrhů na zlepšení úrovně připravenosti zdravotnických zařízení.

13.4 Návrhy na zlepšení

Pro zvýšení úrovně připravenosti zdravotnických pracovišť s cyklotronem je vhodné zavést systematický přístup ke kontrole funkčnosti všech bezpečnostních procesů. Doporučuje se vytvořit centralizovanou databázi RMU a interních inspekcí, která by umožnila porovnávání dat mezi jednotlivými zařízeními a identifikaci opakujících se slabin. Tento nástroj by mohl být provozován ve spolupráci se SÚJB a Ministerstvem zdravotnictví, čímž by se zajistila jednotnost postupů a vyšší transparentnost kontroly. Součástí návrhů je rovněž pravidelná evaluace VHP prostřednictvím externích auditů, které by nezávisle ověřovaly jejich funkčnost a aktuálnost vůči technologickému vývoji.

Významným krokem ke zvýšení bezpečnosti je posílení technického zázemí pro detekci úniků radionuklidů a automatizaci vyhodnocovacích procesů. Implementace systémů, které dokážou v reálném čase sledovat dávky záření, teplotu, vlhkost i tlak v laboratořích, umožní rychlejší rozhodování a efektivnější ochranu personálu. Z pohledu organizačního je vhodné vypracovat jednotnou metodiku krizové připravenosti pro všechna cyklotronová centra, aby byly minimalizovány rozdíly v interních postupech a lépe zajištěna vzájemná kompatibilita při RMU.

Klíčovým prvkem efektivní odezvy je i propojení zdravotnických zařízení se složkami IZS prostřednictvím sdílené komunikační platformy. Tím by se zkrátila doba potřebná k předání informací a zefektivnila by se koordinace zásahu v případě radiačního incidentu. Tyto návrhy představují kombinaci legislativních, technických a organizačních opatření, jejichž realizace by vedla ke zvýšení bezpečnosti, snížení rizika lidské chyby a posílení důvěry veřejnosti v provoz cyklotronových zařízení.

Realizace těchto opatření by přispěla nejen ke zvýšení úrovně radiační bezpečnosti, ale také k posílení odolnosti systému vůči RMU a jeho schopnosti efektivně reagovat v reálných podmínkách.

13.5 Doplnění či revize zásahových instrukcí

Zásahové instrukce představují hlavní dokument při řízení RMU, a proto by měly být pravidelně aktualizovány podle nových poznatků a změn v technologickém provozu. V mnoha zdravotnických zařízeních však tyto instrukce zůstávají dlouhodobě beze změny, a to i v případě, že došlo k modernizaci technologií nebo změně organizační struktury. Doporučuje se proto zavést povinný systém ročních revizí, které by zahrnovaly ověření správnosti kontaktů, dostupnosti ochranných pomůcek, technického vybavení i návaznosti na krizové řízení. Součástí revize by mělo být i testování reálné proveditelnosti instrukcí v simulovaných podmínkách.

Pro zvýšení srozumitelnosti a použitelnosti instrukcí se navrhuje jejich grafické přepracování do formátu „Quick Response Sheet“, který by byl dostupný na pracovištích v tištěné i elektronické podobě. Při jeho tvorbě je kladen důraz na vizuální strukturu, stručnost a jednoznačnost instrukcí. Tento formát by měl umožnit rychlou orientaci v prioritních úkolech během prvních minut zásahu a být propojen s digitálním systémem evidence provedených kroků. Při tvorbě instrukcí je rovněž nutné zapojit všechny úrovně personálu – od vedoucích fyziků až po technické pracovníky – aby dokument odrážel skutečné provozní možnosti a nevycházel pouze z teoretických předpokladů.

Zvláštní důraz by měl být kladen na integraci zásahových instrukcí s externími protokoly složek IZS. To znamená sjednocení terminologie, signálů a postupů, které by usnadnily spolupráci při zásahu mimo areál zařízení. Přehledná, aktuální a testovaná zásahová dokumentace tak tvoří základ efektivní reakce na RMU a zajišťuje, že každý zaměstnanec přesně ví, jak postupovat bez prodlení.

Implementace těchto opatření by významně zvýšila použitelnost zásahové dokumentace v reálných podmínkách a současně by minimalizovala riziko chyb v prvních fázích reakce na RMU.

13.6 Zavedení pokročilých monitorovacích technologií

Modernizace monitorovacích systémů představuje nezbytný krok ke zvýšení bezpečnosti provozu cyklotronových zařízení. Doporučuje se instalace automatizovaných senzorových sítí, které dokážou detekovat změny úrovně záření, přítomnost radioaktivních aerosolů i únik radionuklidů z uzavřených systémů. Tyto systémy mohou být propojeny s centrální řídicí jednotkou, jež automaticky vyhodnotí situaci a aktivuje varovné protokoly. Tím se zkracuje čas mezi vznikem události a zahájením odezvy, čímž se minimalizuje expozice pracovníků.

Dalším krokem je zavedení digitální evidence provozních parametrů a měření v reálném čase, která umožní zpětnou analýzu trendů a identifikaci anomálii dříve, než dojde k havarijní situaci. Tato data mohou být využívána i pro vzdělávací účely a tvorbu modelových simulací. Vhodným krokem je rovněž propojení s národní databází SÚJB, která by umožnila přehled o provozních hodnotách a pomohla při centrální koordinaci bezpečnostních opatření.

Pokročilé technologie mohou zahrnovat i využití umělé inteligence pro predikci chování radiačního pole a identifikaci potenciálních míst úniku. Systémy s prvky strojového učení by dokázaly analyzovat velké množství dat z detektorů, senzorů ventilace či tlaku a včas upozornit na neobvyklé odchylky. Takový přístup by nejen zvýšil přesnost monitoringu, ale vedl by i k optimalizaci provozních parametrů cyklotronu s ohledem na bezpečnost a efektivitu. Zavedení těchto technologií představuje klíčový krok směrem k proaktivnímu řízení radiační bezpečnosti, které je založeno na včasné identifikaci rizik a jejich minimalizaci ještě před vznikem RMU.

13.7 Změny v organizaci školení a krizové komunikace

Účinnost havarijní připravenosti je do značné míry závislá na tom, jak dobře je personál proškolen a jak efektivně probíhá komunikace během RMU. Doporučuje se přejít od tradičních teoretických kurzů k prakticky orientovaným simulačním cvičením, která realisticky napodobují průběh RMU. Taková školení by měla probíhat minimálně dvakrát ročně a jejich součástí by mělo být i vyhodnocení chování zaměstnanců v zátěžových situacích.

Dalším opatřením je vytvoření jednotného komunikačního protokolu pro všechny úrovně řízení, který by přesně stanovil, kdo, kdy a jakým způsobem předává informace. Tím by se předešlo zpožděním, duplicitám a zmatkům při zásahu. Pro interní i externí komunikaci by

bylo vhodné zavést záložní komunikační linku fungující nezávisle na běžné síti, aby byl zajištěn nepřerušený přenos informací i v případě technického výpadku.

Doporučuje se zahrnout i psychologickou přípravu zaměstnanců na stresové situace a rozvoj schopnosti rychlého rozhodování. Součástí krizové komunikace by měla být i pravidelná výměna zkušeností s ostatními pracovišti a složkami IZS. Zajištění průběžného vzdělávání, zavedení jednotných komunikačních pravidel a využití moderních simulačních metod by vedlo k výraznému zlepšení reálné připravenosti a zároveň by minimalizovalo riziko chyb v prvních minutách zásahu.

13.8 Závěr praktické části a návrhy opatření

Praktická část této bakalářské práce byla zaměřena na posouzení připravenosti zdravotnických zařízení vybavených cyklotronem k odezvě na RMU a na identifikaci hlavních rizik spojených s jejich provozem. Analýza byla provedena na základě dostupných veřejných zdrojů, legislativních dokumentů a odborných konzultací, přičemž z důvodu omezeného přístupu k interní dokumentaci jednotlivých pracovišť má hodnocení převážně obecný charakter. Výsledky analýzy ukazují, že sledovaná zařízení disponují formálně nastaveným systémem radiační ochrany a krizové připravenosti, který vychází z platné legislativy České republiky a souvisejících prováděcích předpisů.

Analýza rizik ukázala, že provoz cyklotronu je spojen zejména s možností úniku radionuklidů v důsledku technického selhání zařízení, poruch technologických procesů nebo lidského faktoru. Tyto situace mohou vést k úniku radionuklidů, kontaminaci pracovního prostředí nebo ozáření osob. Významnou roli proto hraje nejen technické zabezpečení provozu, ale také důsledné dodržování zásad radiační ochrany a pravidelná odborná příprava personálu.

Analýza připravenosti dále ukázala, že zdravotnická zařízení mají k dispozici základní nástroje pro zvládání RMU, zejména ve formě VHP a zásahových instrukcí. Tyto dokumenty obvykle obsahují postupy pro řešení RMU, evakuaci osob a komunikaci s externími subjekty. Nicméně bylo zjištěno, že mezi formálním nastavením systému a jeho praktickým fungováním mohou existovat určité rozdíly.

Za klíčové nedostatky lze označit především omezenou frekvenci praktického nácviku RMU, nedostatečnou aktualizaci některých dokumentů a rozdílnou úroveň připravenosti mezi

jednotlivými pracovišti. V oblasti spolupráce se složkami IZS bylo zjištěno, že tato spolupráce je často nastavena spíše na formální úrovni, přičemž v praxi může docházet k dílčím problémům v koordinaci a komunikaci, zejména při řešení neplánovaných událostí.

Na základě zjištěných skutečností byly formulovány následující návrhy opatření směřující ke zvýšení úrovně připravenosti:

Zavedení pravidelných simulačních a taktických cvičení zaměřených na řešení RMU, včetně zapojení všech relevantních složek.

Důsledná a systematická aktualizace VHP a zásahových instrukcí v návaznosti na aktuální legislativu a reálné provozní zkušenosti.

Posílení odborné přípravy personálu se zaměřením na praktické zvládání krizových situací a radiační ochranu.

Zlepšení komunikačních mechanismů a koordinace mezi zdravotnickými zařízeními, složkami IZS a regulačními orgány.

Využívání moderních technologií pro detekci, monitorování a vyhodnocování radiační situace.

Podpora sdílení zkušeností a příkladů dobré praxe mezi jednotlivými pracovišti.

Lze konstatovat, že systém připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem v České republice je z hlediska legislativního ukotvení robustní, avšak jeho reálná efektivita je podmíněna zejména kvalitou implementace jednotlivých opatření, úrovní připravenosti personálu a schopností pružně reagovat na mimořádné situace.

13.9 Zjištění praktické části

Na základě provedené analýzy byly identifikovány následující klíčové skutečnosti:

- Ve sledovaných zařízeních je zaveden systém radiační ochrany v souladu s platnou legislativou České republiky.
- Součástí systému jsou VHP a zásahové instrukce.
- Dokumentace krizové připravenosti je formálně zpracována, avšak liší se v rozsahu a míře aktualizace.

- Byla identifikována rizika spojená s provozem cyklotronu, zejména možnost úniku radionuklidů v důsledku technického selhání, poruch technologických procesů a lidského faktoru.
- Existují definované postupy pro řešení RMU, včetně ochrany osob a omezení kontaminace.
- Frekvence praktických cvičení není jednotná a v některých případech je omezená.
- Úroveň praktické připravenosti personálu se mezi jednotlivými pracovišti liší.
- Spolupráce se složkami IZS je formálně nastavena.
- V praxi se mohou vyskytovat dílčí nedostatky v koordinaci a komunikaci.

Uvedená zjištění mají obecný charakter, a to vzhledem k omezenému přístupu k interní dokumentaci jednotlivých pracovišť.

13.10 Odpovědi na výzkumné otázky

Odpovědi na výzkumné otázky vycházejí z triangulace několika zdrojů. Základním podkladem byla analýza legislativních dokumentů, zejména zákona č. 263/2016 Sb., AZ, a vyhlášky č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění ve znění pozdějších předpisů, které stanovují rámec radiační ochrany a připravenosti k odezvě na RMU.

Dále byly využity VHP a doprovodná dokumentace vybraných zdravotnických zařízení provozujících cyklotron, které byly autorce zpřístupněny v omezeném rozsahu pouze k nahlédnutí bez možnosti dalšího šíření či citace. Tyto materiály poskytly obecné informace o organizační struktuře, krizovém řízení a postupech při možných RMU.

Významnou část podkladů tvořily také technické zprávy SÚJB, odborné články zaměřené na bezpečnost provozu urychlovačů částic a údaje ze sekundární analýzy dat o provozu cyklotronů v ČR a zahraničí. Praktická část práce se dále opírala o porovnání dokumentovaných postupů a modelové scénáře RMU, které umožnily posoudit úroveň připravenosti a identifikovat rizikové oblasti.

VO1: *Jak je zajištěna bezpečnost provozu zdravotnických pracovišť s cyklotronem a radiační ochrana v ČR?*

Odpověď: Bezpečnost provozu zdravotnických pracovišť s cyklotronem je v České republice založena na komplexním systému právní regulace a dozoru, který zajišťuje SÚJB. Každé

zařízení pracující se zdroji IZ musí mít schválený VHP, analýzu RMU a provozní řády stanovené podle atomového zákona. Radiační ochrana je zajištěna kombinací technických opatření (stínění, ventilační systémy, detektory záření), organizačních kroků (určení odpovědných osob, školení zaměstnanců) a administrativních kontrol (evidence dávek a revize dokumentace). Každý pracovník, který přichází do styku se zářením, je vybaven osobním dozimetrem a podléhá pravidelným lékařským prohlídkám.

Součástí bezpečnostního rámce je i systém monitorování provozu a kontinuální kontroly dávkových limitů. Cyklotronová centra využívají moderní zařízení pro měření gama a neutronového záření a sledují úroveň kontaminace prostředí i zaměstnanců. Zákon rovněž vyžaduje, aby provozovatel pravidelně prováděl přezkoušení havarijní připravenosti a ověřoval funkčnost svých postupů. Český systém je tak postaven na kombinaci preventivních opatření, kontrolních mechanismů a přísného dozoru ze strany SÚJB.

VO2: *Jaké jsou hlavní rizikové faktory spojené s provozem cyklotronu z hlediska radiační ochrany?*

Odpověď: Rizikové faktory provozu cyklotronu lze rozdělit na technické, organizační a lidské. Technická rizika vyplývají z možnosti úniku radionuklidů při výrobě, transportu nebo manipulaci s cílovými materiály, selhání ventilace, chladicího systému či stínění. Dále sem patří možné poruchy v napájení, které mohou narušit řízení magnetického pole nebo přívod vzduchu. Organizační rizika souvisejí s nedostatečnou aktualizací VHP, nízkou frekvencí cvičení a absencí integrované komunikace s externími složkami. V některých případech se objevuje i nedostatečné propojení mezi provozními techniky, radiačními fyziky a vedením zařízení, což komplikuje rozhodování v krizové situaci.

Z pohledu lidského faktoru představuje riziko nepřesné dodržování pracovních postupů nebo podcenění rutinních úkonů při manipulaci se zdroji IZ. Přetížení personálu, nedostatečné školení nových pracovníků nebo absence praktických nácviků mohou vést ke zpoždění reakce při RMU. Výzkum rovněž ukázal, že některá pracoviště nemají plně digitalizovaný systém evidence ozáření a hlášení incidentů, což zvyšuje riziko ztráty dat a snižuje přesnost dohledu. Největší zranitelnost systému tedy spočívá v kombinaci technických a organizačních nedostatků, které mohou ovlivnit kvalitu a rychlost odezvy při RMU.

VO3: *Jaká je úroveň připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem k odezvě na radiační mimořádné události způsobené únikem radionuklidů?*

Odpověď: Úroveň připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem v České republice lze hodnotit jako odpovídající legislativním požadavkům, avšak s identifikovanými rezervami v oblasti praktické implementace. Většina zařízení má zpracované všechny povinné dokumenty a dodržuje rámec vyhlášky č. 359/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů, ale rozdíly se objevují v míře praktického prověřování funkčnosti systémů. Simulační cvičení probíhají nepravidelně a často pouze v omezeném rozsahu, což snižuje možnost ověření skutečné koordinace mezi jednotlivými složkami. Připravenost personálu je v teoretické rovině na velmi dobré úrovni, ale schopnost okamžité aplikace znalostí při stresové situaci se liší podle individuálních zkušeností a četnosti školení.

Některá zařízení implementovala moderní přístupy, jako jsou automatizované detekční systémy, simulační software nebo integrované komunikační platformy, které umožňují efektivnější odezvu. Jinde však nadále převažuje využívání tradičních papírových postupů a manuálních rozhodovacích procesů. Tento rozdíl se projevuje i v rychlosti reakce a schopnosti přesného hlášení RMU. Obecně lze konstatovat, že česká zařízení splňují minimální legislativní požadavky, ale plná funkčnost systému závisí na důslednosti školení, technickém zázemí a úrovni koordinace se složkami krizového řízení.

Český systém havarijní připravenosti je funkční, avšak vyžaduje větší důraz na praktickou složku výcviku, digitalizaci dokumentace a pravidelnou modernizaci technických prostředků. Zlepšení těchto oblastí by mohlo významně zvýšit reálnou schopnost zařízení reagovat na případný únik radionuklidů a minimalizovat jeho dopady na personál, pacienty i okolní prostředí.

14. Diskuse

Výsledky praktické části této bakalářské práce ukazují, že zdravotnická zařízení vybavená cyklotronem disponují formálně nastaveným systémem radiační ochrany a krizové připravenosti, který vychází z platné legislativy České republiky. Tento závěr je v souladu s požadavky národních právních předpisů i mezinárodními doporučeními, zejména standardy IAEA a principy vyplývajícími z Euratom Basic Safety Standards, které zdůrazňují význam systematického přístupu k radiační ochraně a připravenosti na radiační mimořádnou událost.

Současně však výsledky naznačují, že samotná existence těchto dokumentů nezaručuje jejich efektivní využití v praxi. Tento poznatek odpovídá i závěrům zahraničních studií, které upozorňují na rozdíl mezi formálním nastavením systému a jeho praktickým fungováním při RMU. Podobné závěry lze nalézt například v doporučeních Světové zdravotnické organizace (WHO), která zdůrazňují význam pravidelného testování připravenosti prostřednictvím cvičení.

Zjištěné nedostatky lze interpretovat jako důsledek rozdílných organizačních přístupů, kapacitních možností a priorit jednotlivých zařízení. Praktický nácvik představuje zásadní prvek krizové připravenosti, protože umožňuje ověřit funkčnost nastavených postupů a identifikovat slabá místa systému. Významnou roli zde hraje nejen četnost cvičení, ale i jejich variabilita a schopnost reflektovat reálné scénáře.

V tomto kontextu je patrný rozdíl mezi přístupem v České republice a v zahraničí. Přestože legislativní rámec je srovnatelný, jelikož vychází z doporučení mezinárodních organizací IAEA a standardů Euratom, praktická implementace se liší. V zahraničí, v zemích s vysoce rozvinutou nukleární medicínou, je kladen větší důraz na technologickou podporu a praktickou připravenost, například prostřednictvím pokročilých monitorovacích systémů a simulačních nástrojů pro výcvik personálu.

Významný rozdíl je patrný také v přístupu ke školení a cvičením. V České republice jsou školení a cvičení často realizována v omezené frekvenci, zatímco v zahraničí je běžná jejich vyšší intenzita, pravidelnost a důraz na praktickou aplikaci scénářů. Doporučení IAEA (např. Safety Standards Series No. GSR Part 7) zdůrazňují nutnost pravidelného ověřování připravenosti prostřednictvím komplexních cvičení zahrnujících reálné scénáře úniku radionuklidů a zapojení všech složek, včetně zdravotnického personálu, HZS a regulačních orgánů. V zahraničí jsou tato cvičení často realizována formou tzv. full-scale exercises, tedy

cvičení simulující reálný průběh RMU včetně časového tlaku, rozhodování a komunikace mezi jednotlivými složkami.

Například ve Švédsku a Finsku jsou pravidelně organizována cvičení, do nichž jsou zapojena nejen zdravotnická zařízení, ale i složky IZS a regulační orgány, přičemž se simuluje únik radionuklidů, dekontaminace osob i krizová komunikace v reálném čase. Podobně v Německu probíhají tzv. LÜKEX (Länder- und Ressortübergreifende Krisenmanagement Exercises), což jsou národní meziresortní cvičení krizového řízení, která zahrnují i scénáře RMU. Tato cvičení testují nejen technické postupy, ale i koordinaci mezi institucemi, rozhodovací procesy a tok informací.

Oproti tomu v českém prostředí převažují spíše teoretická školení nebo dílčí cvičení, což může vést k nižší připravenosti personálu na komplexní krizové situace vyžadující rychlé rozhodování a koordinaci více subjektů současně.

V oblasti spolupráce se složkami IZS bylo zjištěno, že tato spolupráce je zpravidla formálně nastavena, což odpovídá legislativním požadavkům. V praxi však může docházet k dílčím problémům v koordinaci a komunikaci při řešení neplánovaných nebo méně obvyklých situací. Tento rozdíl v úrovni spolupráce je v odborné literatuře popisován jako běžný jev v oblasti krizového řízení.

Z pohledu legislativních požadavků, vycházejících ze zákona č. 263/2016 Sb., atomového zákona, a souvisejících prováděcích předpisů, lze konstatovat, že většina hodnocených zařízení tyto požadavky formálně naplňuje. Provozovatelé disponují schválenými havarijními plány, zajišťují jejich pravidelnou revizi a deklarují plnění povinností v oblasti výcviku. Problémem však zůstává rozdíl mezi administrativním plněním těchto povinností a jejich skutečným uplatněním v provozní praxi.

Ve srovnání se zahraniční praxí, vycházející z doporučení mezinárodních organizací, lze česká zařízení považovat za dobře vybavená z hlediska technických prostředků detekce a monitorování. Zahraniční přístupy však kladou větší důraz na digitalizaci, automatizaci vyhodnocování a propojení dat v reálném čase. V tomto ohledu se české prostředí nachází spíše ve fázi částečné implementace, kdy jednotlivá zařízení využívají různé systémy bez jednotné integrace, což může komplikovat sdílení informací a koordinaci při řešení RMU.

Při interpretaci výsledků je nutné zohlednit omezení této práce. Hlavním limitem byl omezený přístup k interní dokumentaci zdravotnických zařízení, k VHP, zásahovým instrukcím a

provozním protokolům, které podléhají režimu ochrany. Analýza proto vycházela především z veřejně dostupných zdrojů a odborných konzultací. Dalším omezením je variabilita jednotlivých pracovišť, která se liší technickým vybavením, personálními kapacitami i organizační strukturou. Tato nejednotnost ztěžuje přímé porovnání a neumožňuje vytvoření univerzálního hodnoticího rámce. Z uvedených důvodů mají prezentované závěry obecnější charakter a nelze je plně vztahovat na konkrétní interní nastavení jednotlivých zařízení.

Na základě zjištěných skutečností lze formulovat i doporučení pro praxi. Klíčovým problémem systému připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem není absence legislativního rámce, ale jeho praktická implementace. Vhodným opatřením je zpřehlednění dokumentace tak, aby byla využitelná i v krizových situacích. Dále je vhodné posílit praktický výcvik prostřednictvím pravidelných a variabilních cvičení a zajistit důsledné vyhodnocování jejich průběhu. V oblasti spolupráce se složkami integrovaného záchranného systému je vhodné zaměřit se na zlepšení komunikace a koordinace, například prostřednictvím společných cvičení. Současně je nutné věnovat pozornost lidskému faktoru, zejména podpoře psychické odolnosti personálu.

Zjištěné skutečnosti potvrzují, že klíčovým faktorem efektivní připravenosti není pouze existence legislativního rámce, ale jeho reálné uplatnění v praxi.

Závěr

Tato práce byla zaměřena na posouzení připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem na RMU v podmínkách České republiky. Na základě provedené analýzy lze konstatovat, že systém radiační ochrany a krizové připravenosti je z hlediska legislativního a organizačního nastavení funkční a odpovídá mezinárodním standardům.

Zásadním zjištěním práce však je, že efektivita tohoto systému je významně ovlivněna jeho praktickou aplikací. Skutečná úroveň připravenosti není dána pouze existencí formálních mechanismů, ale především jejich reálným uplatněním v každodenní praxi. Rozdíly mezi jednotlivými pracovišti ukazují, že kvalita připravenosti je úzce spjata s úrovní řízení, systematickým přístupem ke vzdělávání personálu a důrazem na praktický nácvik krizových situací.

Za klíčové oblasti vyžadující další rozvoj lze považovat posílení praktických cvičení, zlepšení využitelnosti interní dokumentace a systematické vyhodnocování připravenosti. Významný potenciál představuje také rozvoj digitalizace a moderních technologií, které mohou přispět ke zrychlení reakce a zvýšení přesnosti rozhodování při RMU.

Práce dále poukazuje na význam koordinace mezi zdravotnickými zařízeními, složkami IZS a regulačními orgány. Efektivní komunikace a sdílení informací představují nezbytný předpoklad pro zvládnutí RMU v komplexních a časově kritických situacích.

Na základě získaných poznatků lze doporučit zaměřit se na další rozvoj systému, především na prohloubení praktické připravenosti, podporu jednotnějších standardů napříč pracovišti a využití moderních nástrojů řízení bezpečnosti. Tyto kroky mohou přispět ke zvýšení odolnosti systému a efektivnější ochraně zdraví personálu i pacientů.

Stanovené cíle práce byly splněny a v kapitole 13.10 byly zodpovězeny výzkumné otázky. Práce přináší ucelený pohled na problematiku připravenosti zdravotnických zařízení s cyklotronem k odezvě na RMU a identifikuje faktory, které mají zásadní vliv na efektivitu krizové odezvy v praxi a celkovou úroveň bezpečnosti provozu.

Seznam zdrojů

ABUBAKR, Abdelhameed; OTHMAN, Abdelrahman I.; EWEDAH, Tassneim M. 2024. The applications of radioisotopes in modern medicine: a review of diagnostic, therapeutic, and research advancements. *ERU Research Journal*.

BENEŠ, Jiří, Daniel JIRÁK a František VÍTEK, 2015. *Základy lékařské fyziky. 4.* Praha: Karolinum, 322 s. ISBN 978-80-246-2645-1.

CAZZOLA, Emiliano; FAVARETTO, Chiara; GORGONI, Giancarlo. 2025. Cyclotron Radioisotope Production: Developments and Challenges in the New Era. In: *Automated Technologies for the Development and Production of Radiopharmaceuticals*. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 3-22.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation*. Official Journal of the European Union, 2014, L 13, s. 1–73. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj/eng

ELOIRDI, Rachel, et al. 2024. Research and Innovation for Sustainable Medical Radionuclide Supply in the European Union.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. (n.d.). *Plan view of the classical cyclotron.* In *Cyclotron | physics*. https://www.britannica.com/technology/cyclotron

FUKÁTKO, Tomáš, 2007. *Detekce a měření různých druhů záření*. Praha: BEN - technická literatura, 189 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-193-3.

GERNDET, Josef a Petr PRŮŠA, 2011. *Detektory ionizujícího záření*. 2. Praha: ČVUT, 182 s. ISBN 978-80-01-04710-1.

HAVRÁNKOVÁ Renata. 2020. *Klinická radiobiologie*, Grada Publishing a.s. ISBN 978-80-247-4098-0.

HUŠÁK, Václav, 2009. *Radiační ochrana pro radiologické asistenty*. Olomouc: Palackého univerzita, 138 s. ISBN 978-80-244-2350-0.

CHERNYAEV, A. P.; LYKOVA, E. N. 2023. State-of-the-Art Nuclear Physics Research in Medicine. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 20.4: 729-744.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). 2015. *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency*. Vienna: IAEA. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7. Dostupné z: https://www.iaea.org/publications/11175/preparedness-and-response-for-a-nuclear-or-radiological-emergency

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). 2022. *Cyclotrone Produced Radionuclides: Operation and Maintenance of Gas and Liquid Targets.* Vienna: IAEA. [online]. Dostupné z: https://www.iaea.org/publications/14797/cyclotron-produced-radionuclides-operation-and-maintenance-of-gas-and-liquid-targets

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). 2022. *Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation*. Vienna: IAE. [online]. Dostupné z: http://www.iaea.org/publications/13408/radiation-protection-and-safety-in-medical-uses-of-ionizing-radiation

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). 2023. *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency.* Vienna: IAEA. [online]. Dostupné z: https://www.iaea.org/publications/15278/preparedness-and-response-for-a-nuclear-or-radiological-emergency

IONESCU, E., et al. 2024. Radiological characterization plan for decommissioning IFIN-HH's Cyclotron. *Progress in Nuclear Energy*, 168: 104988.

JOHNSON, Chelsea, et al. 2022. Radioactive Waste Management in a Medical Cyclotron Facility-A Review. *International Journal of Health Technology and Innovation*, 1.03: 20-23.

KATZUNG, B. G., 2006. *Základní a klinická farmakologie*. Jinočany: H&H Vyšehradská, ISBN 80-7319-056-7

KHAN, Mohammad Nadeem. 2025. Ethical Landscape of Cyclotron Technology in Nuclear Medicine: A Comparative Analysis of National and International Guidelines. *Indian Journal of Nuclear Medicine*, 40.2: 51-61.

KORANDA et al., P., 2014. *Nukleární medicína*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, ISBN 978-80-244-4031-6.

KRAFT, O., 2014. *Vybraná témata nukleární medicíny pro radiologické asistenty*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, ISBN 978-80-7464-581-5.

KUMAR, Rajeev, et al. 2022. Medical cyclotron: operational aspects and its clinical utility. *Journal of Indira Gandhi Institute Of Medical Science*, 8.1: 10-15.
KUMAR, Rajeev; TANDON, Pankaj; DEEP, Kamal. 2024. Mandatory Requirements for Planning and Commissioning of Medical Cyclotron Facility. *Indian Journal of Nuclear Medicine*, 39.4: 243-250.

KUNA, Pavel, Leoš NAVRÁTIL a kolektiv, 2005. *Klinická radiobiologie*. Praha: Manus. ISBN 80-86571-09-2.

KUPKA et al., K., 2007. *Nukleární medicína*. Příbram: P3K, ISBN 978-80-903584-9 2.

LEBEDA Ondřej. 2022. *Podivuhodný svět radionuklidů* – Od fyziky k medicíně (slavnostní přednášky Akademie věd České republiky), Academia, Praha.

MASARYKŮV ONKOLOGICKÝ ÚSTAV. (2017). *10 let PET Centra Brno*. [online].[cit. 2025-08-23]. Dostupné online z https://static.mou.cz/d/mou.cz/files/4955.pdf/s-73fa2cfe09ba?_ts=1623844304

MYSLIVEČEK et al., M., 1995. *Nukleární medicína* I. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, ISBN 80-7067-511-X.

NEMOCNICE NA HOMOLCE. (2022). *V PET centru máme nový cyklotron pro výrobu radiofarmak.* [online].[cit. 2025-08-23]. Dostupné online z https://https://www.homolka.cz/clanky/aktuality/vymena-cyklotronu

PANT, Gauri 2021. Shankar. Radiation Safety in Nuclear Medicine. In: *Basic Sciences of Nuclear Medicine*. Cham: Springer International Publishing, p. 29-46.

PODZIMEK, František, 2013. *Radiologická fyzika: Fyzika ionizujícího záření.* Praha: ČVUT, 336 s. ISBN 978-80-01-05319-5.

PROTON THERAPY CENTER PRAGUE. (2012). *About Proton Therapy Center*. Proton Therapy Center Czech. [online].[cit. 2025-08-23]. Dostupné online z https://www.ptc.cz/en/about-proton-therapy-center

SABOL, Jozef a Petr VLČEK, 2011. *Radiační ochrana v radioterapii*. Praha: ČVUT, 300 s. ISBN 978-80-01-04757-6.

ŠABATA, L., 2019. *Nukleární medicína - technické základy.* České Budějovice: ZSF JU v Českých Budějovicích, ISBN 978-80-7394-734-7.

ŠVEC, Jiří, 2005. *Radioaktivita a ionizující záření*. Ostrava: SPBI. ISBN 80-86634-62-0.

TANDON, Pankaj, et al. 2022. Radiation Safety Consideration in Medical Cyclotron. In: *Radiation Safety Guide for Nuclear Medicine Professionals*. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 125-128.

TANDON, Pankaj, et al. 2022. Radiation Emergencies in Nuclear Medicine and Preparedness. In: *Radiation Safety Guide for Nuclear Medicine Professionals*. Singapore: Springer Nature Singapore, p. 267-280.

TECHNICKÝ TÝDENÍK. (2012). *PET centrum v ÚJV Řež – nejmodernější zařízení na výrobu radiofarmak.* Technický týdeník. [online].[cit. 2025-08-23]. Dostupné online z https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/pet-centrum-v-ujv-rez-nejmodernejsi-zarizeni-na-vyrobu-radiofarmak_26800.html

TLAPÁK NAVRÁTILOVÁ J., BLÁHA J., HADRLICA J., GALOVCOVÁ I., KOCHÁNEK Š., VESELÝ L 2023. *Atomový zákon. Komentář.* Praha: Wolters Kluwer ČR

ÚJV ŘEŽ. (2022). *Měnili jsme cyklotron. Dvacet tun jaderných technologií létalo vzduchem*. ÚJV Řež. [online].[cit. 2025-08-23]. Dostupné online z https://www.ujv.cz/cs/aktuality/menili-jsme-cyklotron-dvacet-tun-jadernych-technologii-letalo-vzduchem-12036

ÚJV ŘEŽ. (2023). *PET centra – radiofarmaka*. [online].[cit. 2025-08-23]. Dostupné online z https://www.ujv.cz/en/products-and-services-1/radiopharmaceuticals/pet-centres

ÚSTAV JADERNÉ FYZIKY AV ČR. (2023). *Experimental facilities – Cyclotron U-120M*. UJF AV ČR. [online].[cit. 2025-08-23]. Dostupné online z https://www.ujf.cas.cz/en/research-and-development/experimental-facilities/cyclotron-u120m

ULLMANN, Vojtěch, 2009. *Jaderná a radiační fyzika.* Ostrava: Ostravská univerzita, 173 s. ISBN 978-80-7368-669-7.

Legislativní zdroje

Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, 2016. [online]. [cit. 2025-07-28]. In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 102, s. 3974–3976. ISSN 1211-1244. Dostupné z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263_2016_AZ_20240101.pdf

Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, 2016. [online]. [cit. 2025-07-28]. In: *Sbírka zákonů České republiky*, částka 172/2016. ISSN 1211-1244. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-422

Vyhláška č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládání radiační mimořádné události, 2016. [online]. [cit. 2025-07-28]. In: *Sbírka zákonů České republiky*. ISSN 1211-1244. Dostupné z: https://sujb.gov.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/defektoskopie-inventarizace-jednoduchych-a-vyznamnych-uzavrenych-radionuklidovych-zdroju-u-drzitele-povoleni-69-odst-1-pism-c-zakona-c-2632016-sb

Vyhláška č. 408/2016 Sb., o požadavcích na systém řízení, 2016. [online]. [cit. 2025-07-28]. In: *Sbírka zákonů České republiky*. ISSN 1211-1244. Dostupné z: https://sujb.gov.cz/legislativa/atomove-pravo

Vyhláška č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace, 2016. [online]. [cit. 2025-07-28]. In: *Sbírka zákonů České republiky*. ISSN 1211-1244. Dostupné z: https://www.suro.cz/cz/rms

Seznam tabulek, obrázků a grafů

Tabulky

Tabulka 1 Přehled zařízení s cyklotronem v České republice……...….. 28

Tabulka 2 Přehled hlavních rizikových faktorů cyklotronových zařízení …….. 32

Tabulka 3 Kategorizace zdrojů rizika …… 33

Tabulka 4 Možné ohrožení jednotlivých skupin …… 33

Tabulka 5 Přístupy k eliminaci dopadů rizik ……... 34

Tabulka 6 Základní charakteristiky dokumentace na vybraných pracovištích …… 38

Tabulka 7 Přehled využívaných technických prostředků detekce a monitoringu …… 41

Obrázky

Obrázek 1 Schéma cyklotronu 10

Seznam zkratek

AZ – atomový zákon

BSS – Basic Safety Standards

CCTV – Closed Circuit Television

ČR – Česká republika

Euratom – Evropské společenství pro atomovou energii

FDG – fluorodeoxyglukóza

HZS – Hasičský záchranný sbor

IAEA – International Atomic Energy Agency

IBA – Ion Beam Applications

ICRP – International Commission on Radiological Protection

IS – informační systém

IZ – ionizující záření

IZS – integrovaný záchranný systém

LÜKEX - Länder- und Ressortübergreifende Krisenmanagement Exercises

MAAE – Mezinárodní agentura pro atomovou energii

PČR – Policie České republiky

PET – pozitronová emisní tomografie

RMU – radiační mimořádná událost

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SW - Software

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

WHO – Wordl health organization

VHP – vnitřní havarijní plán

ZIZ – zdroje ionizujícího záření