

System monitorování ionizujícího záření pro zabezpečení ochrany obyvatelstva

Markéta Pivovarová

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení
Ústav ochrany obyvatelstva

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Markéta Pivovarová**
Osobní číslo: **L20111**
Studijní program: **B1032A020002 Ochrana obyvatelstva**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Systém monitorování ionizujícího záření pro zabezpečení ochrany obyvatelstva**

Zásady pro vypracování

1. Na základě dostupných literárních zdrojů vypracujte teoretickou část a teoretická východiska z řešené problematiky.
2. Zhodnoťte současný stav monitorování ionizujícího záření v systému monitorování radiační situace.
3. Proveďte měření dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu pomocí vybraných sond a vyhodnoťte vhodnost použití přístrojů a sond v systému monitorování radiační situace.
4. Na základě vyhodnocených dat navrhněte případná opatření ke zlepšení současného stavu.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. PODZIMEK, František. *Radiologická fyzika. Fyzika ionizujícího záření*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2021. ISBN 978-80-01-06900-4.
2. ČESKO. Zákon č. 263 ze dne 14. července 2016, atomový zákon. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Částka 102, s. 3938-4060, 2016. ISSN 1211-1244.
3. Kolektiv autorů. *Krizové řízení při nevojenských krizových situacích, ochrana obyvatelstva, kritická infrastruktura: modul A; C; I*. Praha: Ministerstvo vnitra, 2021. ISBN 978-80-7616-097-2.

Další odborná literatura dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivan Princ**
Ústav ochrany obyvatelstva

Datum zadání bakalářské práce: **1. prosince 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **5. května 2023**

L.S.

doc. Ing. Zuzana Tučková, Ph.D.
děkanka

prof. Ing. Dušan Vičar, CSc.
ředitel ústavu

V Uherském Hradišti dne 2. prosince 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohou užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

V Uherském Hradišti, dne: 5. 5. 2023

Jméno a příjmení studenta: Markéta Pivovarová

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na systém, který hraje zásadní roli při zajištění bezpečnosti obyvatelstva a minimalizaci následků radiační havárie. Teoretická část seznamuje s problematikou hrozeb radiační havárie nejen v zahraničí, ale i v České republice, ochranou obyvatelstva a popisuje dozimetrii ionizujícího záření. Praktická část je zaměřena na charakteristiku vybraných sond měřících úroveň ionizujícího záření v prostředí a komparaci naměřených dat u zvolených sond. Na základě vyhodnocení jsou v práci navržena opatření ke zlepšení stávajícího stavu v České republice. Závěr práce obsahuje perspektivu rozvoje přístrojů pro monitorování ionizujícího záření.

Klíčová slova: dávkový příkon, ionizující záření, krizový stav, monitorovací radiační síť, ochrana obyvatelstva, příkon dávkového ekvivalentu

ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on a system which plays a crucial role in ensuring the safety of the population and minimizing the consequences of a radiation accident. The theoretical part introduces the issue of radiation accident threats not only abroad but also in the Czech Republic, protection of the population, and describes the dosimetry of ionizing radiation. The practical part is focused on the characteristics of selected probes measuring the level of ionizing radiation in the environment and comparison of measured data for selected probes. On the basis of the evaluation, the paper proposes measures to improve the current situation in the Czech Republic. The paper concludes with a perspective on the development of ionizing radiation monitoring devices.

Keywords: crisis state, dose rate, dose equivalent rate, ionising radiation, monitoring radiation network, population protection

„Základem charakteru je síla vůle.“

Oscar Wilde

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Ivanu Princovi za vedení, jeho cenné rady, podněty a připomínky. Mé poděkování patří též panu Ing. René Markovi z Institutu ochrany obyvatelstva Lázně Bohdaneč za spolupráci při získávání informací, ze kterých jsem v práci čerpala. Poděkování patří také všem členům mé rodiny za jejich podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 OCHRANA OBYVATELSTVA	11
1.1 PRÁVNÍ PŘEDPISY	11
1.2 KONCEPCE OCHRANY OBYVATELSTVA	12
1.3 ZAJIŠTĚNÍ PREVENCE.....	13
1.4 OPATŘENÍ K OCHRANĚ OBYVATELSTVA	14
2 KLASIFIKACE HROZEB (POSOUZENÍ, ROZPOZNÁNÍ)	16
2.1 MIMOŘÁDNÉ UDÁLOSTI.....	16
2.1.1 Základní dělení.....	16
2.1.2 Sekundární události	17
2.2 KRIZOVÉ STAVY	18
3 RADIAČNÍ HAVÁRIE	20
3.1 OCHRANNÁ OPATŘENÍ	21
3.1.1 Před vznikem radiační havárie	22
3.1.2 Po vzniku radiační havárie	22
3.2 HAVÁRIE VE SVĚTĚ	23
3.3 HAVÁRIE V ČESKÉ REPUBLICĚ	25
4 DOZIMETRIE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	27
4.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY ZÁŘENÍ.....	27
4.2 DRUHY ZÁŘENÍ.....	28
4.3 ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	29
4.3.1 Přírodní zdroje.....	30
4.3.2 Umělé zdroje	30
4.4 ÚČINKY ZÁŘENÍ, LIMITY A NÁSLEDKY OZÁŘENÍ	32
4.4.1 Účinky	32
4.4.2 Limity	33
4.4.3 Následky.....	33
4.5 DETEKTORY IZ.....	34
5 CELOSTÁTNÍ RADIAČNÍ MONITOROVACÍ SÍŤ	35
5.1 RADIONUKLIDY V OVZDUŠÍ	37
5.2 SÍŤ TL DOZIMETRŮ.....	38
5.2.1 Teritoriální síť	39
5.2.2 Lokální síť	39
5.3 SOUČASNÝ STAV MONITOROVÁNÍ IZ	40

II PRAKTICKÁ ČÁST	42
6 MĚŘENÍ POMOCÍ VYBRANÝCH SOND	43
6.1 POPIS VYBRANÝCH SOND A PŘÍSTROJE	45
6.2 HLAVNÍ ETALON.....	47
6.3 POSTUP MĚŘENÍ.....	48
7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ METODOU KOMPARACE	51
7.1 MĚŘENÍ Č. 1	52
7.2 MĚŘENÍ Č. 2	53
7.3 MĚŘENÍ Č. 3	58
7.4 KOMPARACE VÝSLEDKŮ.....	60
8 DOPORUČENÍ OPATŘENÍ KE ZLEPŠENÍ SOUČASNÉHO STAVU	63
9 PERSPEKTIVA ROZVOJE PŘÍSTROJŮ V ČESKÉ REPUBLICĚ	65
ZÁVĚR	66
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	74
SEZNAM OBRÁZKŮ	76
SEZNAM TABULEK	77

ÚVOD

Zabezpečení ochrany obyvatelstva v současné době, kdy Rusko napadlo Ukrajinu, se stává prvotním cílem. Vývoj situace naznačuje, že je pravděpodobné i použití jaderných zbraní. Hrozbou mohou být také útoky na jaderné elektrárny a zařízení a jejich havárie. Proto je práce zaměřena na tuto aktuální otázku, která se týká stavu monitorování ionizujícího záření v systému monitorování radiační situace v České republice.

Ionizující záření je forma elektromagnetického záření, které může mít vážné zdravotní dopady na lidi a životní prostředí. Celá problematika zabezpečení ochrany obyvatelstva z hlediska provádění nezbytných radiačních měření s využitím prostředků dozimetrické techniky tvoří síť systémového monitorování radiační situace. V rámci této bakalářské práce je daná problematika více specifikována a poskytuje základní náhled na to, zda jsou orgány krizového řízení, obce i samotní občané dostatečně připraveni na řešení událostí, které mohou nastat při válečném konfliktu, který již rok ohrožuje svým průběhem také Českou republiku. Obyvatelstvo se obává radioaktivního spadu nejen za válečného stavu v případě použití jaderných zbraní, ale i v době míru při vzniku radiační havárie. Mají v paměti nedávnou mimořádnou událost způsobenou jadernou elektrárnou Fukushima v Japonsku a mnozí pamatují i havárii v Černobylu na Ukrajině.

Hlavním cílem bakalářské práce je navrhnout případná opatření ke zlepšení současného stavu monitorování ionizujícího záření v systému monitorování radiační situace. Ke splnění hlavního cíle práce byly stanoveny následující dílčí cíle: na základě dostupných literárních zdrojů vypracovat teoretickou část a teoretická východiska z řešené problematiky, posoudit současný stav monitorování ionizujícího záření v systému monitorování radiační situace a na základě měření vyhodnotit vhodnost použití přístrojů a sond v systému monitorování radiační situace.

Pro vypracování práce byly použity následující metody: literární rešerše, kde byly využity tištěné a internetové zdroje, rozhovor s pracovníkem autorizovaného metrologického střediska, měření, experiment a komparace získaných údajů. Ze zjištěných a vyhodnocených dat byla navržena případná opatření a doporučení ke zlepšení současných systémů monitorování a měření úrovně ionizujícího záření v životním prostředí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OCHRANA OBYVATELSTVA

Ochrana obyvatelstva, nebo je také označována jako civilní ochrana, je podle stávající legislativy chápána jako souhrn činností v určeném sledu příslušných orgánů a dalších zainteresovaných orgánů, organizací, složek a obyvatelstva, jejichž cílem je minimalizovat negativní dopady případných mimořádných událostí a krizových situací na zdraví a životy lidí a jejich životní podmínky. Ochrana obyvatelstva rozsáhle zasahuje do mnoha resortů, které nelze řešit jen jako plnění úkolů civilní ochrany, ale jako soubor činností a úkolů odpovědných orgánů veřejné správy, právnických osob, podnikajících fyzických osob a také občanů, které vedou k zabezpečení ochrany života, zdraví, majetku a životního prostředí, v souladu s platnými právními předpisy. Hlavní koordinátor činností v oblasti ochrany obyvatelstva je Ministerstvo vnitra – generální ředitelství HZS ČR. (Kolektiv autorů, 2021)

V roce 2000 vznikly nové právní normy, které zavádí pojem ochrana obyvatelstva. Podle zákona č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému (dále jen IZS) a o změně některých zákonů, se ochranou obyvatelstva rozumí „*plnění úkolů civilní ochrany, zejména varování, evakuace, ukrytí a nouzové přežití obyvatelstva a další opatření k zabezpečení ochrany jeho života, zdraví a majetku*“ (Česko, 2000a, s. 3461).

1.1 Právní předpisy

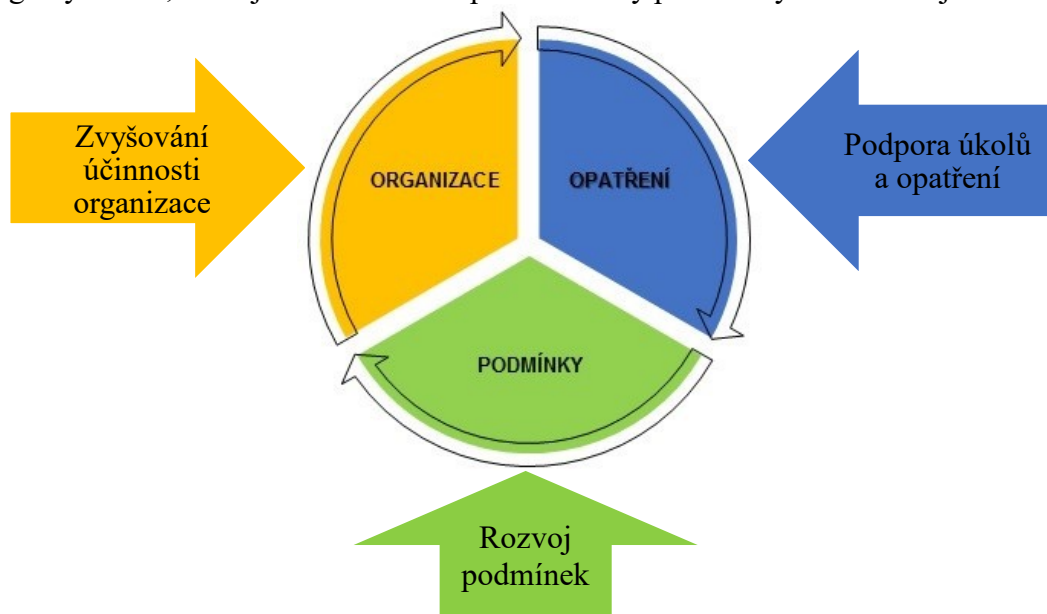
Následující právní předpisy ve formě zákonů, usnesení vlády, vyhlášek Státního úřadu pro jadernou bezpečnost a dokumentů jsou zaměřené na problematiku ochrany obyvatelstva, zvláště před ionizujícím zářením a obsahují o tomto základní informace:

- Ústavní zákon č. 110/1998 Sb., o bezpečnosti ČR, ve znění pozdějšího předpisu,
- Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon,
- Zákon č. 224/2015 Sb., o prevenci závažných havárií způsobených vybranými nebezpečnými chemickými látkami nebo chemickými směsmi a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů,
- Zákon č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a změně některých zákonů,
- Vyhláška Ministerstva vnitra č. 380/2002 Sb., k přípravě a provádění úkolů ochrany obyvatelstva,
- Vyhláška č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiace mimořádné události, (AION CS, 2022)

- Vyhláška č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace,
- Vyhláška č. 408/2016 Sb., o požadavcích na systém řízení,
- Vyhláška č. 409/2016 Sb., o činnostech zvláště důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, zvláštní odborné způsobilosti a přípravě osoby zajišťující radiační ochranu registranta,
- Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, (AION CS, 2022)
- Konceptce ochrany obyvatelstva do roku 2025 s výhledem do roku 2030 (usnesení vlády č. 560 ze dne 21. června 2021), (Úřad vlády České republiky, 2022)
- Bezpečnostní strategie České republiky 2015 (usnesení vlády č. 665 ze dne 8. září 2011). (Úřad vlády České republiky, 2022)

1.2 Konceptce ochrany obyvatelstva

Konceptce ochrany obyvatelstva do roku 2025 s výhledem do roku 2030 (dále jen „Konceptce OOB“) představuje nový pohled na ochranu obyvatelstva a vidinu, jakým směrem by měla ochrana obyvatelstva směřovat do budoucna. Zohledňuje vývoj za období let 2013–2020 a zkušenosti z mimořádných událostí a krizových situací, které se již staly (Dlubalová, 2022). Konceptce OOB předkládá 12 základních úkolů, které je třeba dokončit ke splnění tří strategických cílů, které jsou v této koncepci stanoveny pro změny v nadcházejícím období.



Obrázek 1 – Konceptce ochrany obyvatelstva. (MV-GŘ HZS ČR, 2022)

Tato koncepce rozpracovává přístup státu k zajišťování bezpečnosti České republiky vymezené Bezpečnostní strategií ČR. Předchozí koncepce chápaly pojem ochrana obyvatelstva v širším pojetí. Svým rozsahem zahrnovaly jak civilní ochranu, tak i civilní obranu.

Dle Zprávy o stavu ochrany obyvatelstva v České republice 2018, která představuje zpracované vyhodnocení jednotlivých oblastí a priorit dané Koncepcí ochrany obyvatelstva do roku 2020 s výhledem do roku 2030, byla část úkolů splněna. Ve zprávě NKÚ z konce roku 2022 bylo Ministerstvu vnitra vytknuto, že nezajistil všechny klíčové podmínky k naplnění strategického bezpečnostního zájmu ČR, že plánovalo úkoly bez rozpočtových zdrojů, nebo že nezajistil dostatek prostředků individuální ochrany. Byly posunuty termíny k dalšímu plnění, které ovšem závisí na legislativních změnách. Není dořešena oblast vzdělávání v ochraně obyvatel, kde NKÚ odkazuje na praxi ze zahraničí. V závěru je zhodnoceno, že opatření k přípravě řešení mimořádných událostí a krizových situací jsou vhodná, a že vývojové tendence ochrany obyvatelstva nastavené Koncepcí OOB, představují správný směr. (MV-GŘ HZS ČR, 2022)

1.3 Zajištění prevence

Důležitým prvkem v ochraně obyvatelstva jsou preventivní opatření. Aby byla společnost připravená zvládat krizové situace, musí být vybudovaný systém k řešení těchto situací, kvalitní metodika a musí být připraveni odborníci ke vzdělávání občanů. Vzdělávání v oblasti ochrany obyvatelstva řeší zákon č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému, dle kterého mají fyzické osoby právo být informováni o opatřeních k zabezpečení své ochrany a být proškoleni o svých činnostech při mimořádných událostech. Realizací jsou pověřeny následující subjekty:

- Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR,
- Hasičský záchranný sbor kraje,
- obec, obecní úřad,
- právnické osoby a podnikající fyzické osoby, které jsou zahrnuty v havarijních plánech kraje nebo ve vnějších havarijních plánech,
- občanská sdružení, veřejně prospěšné organizace a jiné orgány působící na úseku ochrany obyvatelstva. (MV-GŘ HZS ČR, 2022)

Uvedená problematika je zařazena i do školních osnov na základních a středních školách v každém ročníku v rozsahu minimálně 6 vyučovacích hodin ročně, a to na základě Pokynu MŠMT, jež vstoupil v platnost 15. března 2003.

Jedná se o novelizovaný pokyn MŠMT čj. 12 050/03-22 a čj. 13 586/03-22 ze dne 4. března 2003, který začlenil tematiku ochrany člověka za mimořádných událostí v rámcových vzdělávacích programech do konkrétních vzdělávacích oblastí. (Martínek, 2022)

Preventivně výchovné činnosti jsou pořádány v jednotlivých krajích hasičským záchranným sborem. Přípravu obyvatel na ochranu člověka za běžných rizik a mimořádných událostí (dále jen MU) provádí koordinátoři a pracovníci preventivně výchovné činnosti ve spolupráci s Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy. Jsou uskutečňovány vzdělávací programy a poskytovány příručky dostupné celé veřejnosti. (MV-GŘ HZS ČR, 2022)

1.4 Opatření k ochraně obyvatelstva

V Ženevských úmluvách jsou přesně určeny hlavní úkoly a opatření, které patří v České republice mezi významné v oblasti ochrany obyvatelstva. Jedná se o varování a vyrozumění, ukrytí, evakuaci, nouzové přežití, individuální ochranu a humanitární pomoc. Mezi další opatření neméně důležitá k zabezpečení ochrany obyvatelstva, která ohrožují jeho život, zdraví a majetek patří mimo jiné detekce a identifikace nebezpečných látek, improvizovaná a kolektivní ochrana a kontaminace. Ochrana obyvatelstva je součástí bezpečnostní politiky v daném prostředí, v určitém okamžiku a pro daný stát. Je koncipována pro všechny potenciální stavy. V těchto stavech se opatření ochrany obyvatelstva vytváří, posiluje a uplatňuje v praxi. (Štětina, 2014, s. 34)

Opatření, která slouží jako příprava i prevence vzniku závažných situací a pro omezení následků, jsou zpracována v dokumentu, jež se obecně nazývá havarijní plán. Dokument, kde jsou uvedeny popisy činností, které je zapotřebí vykonat při vzniku MU nebo závažné havárie uvnitř objektu je vnitřní havarijní plán a vnější havarijní plán popisuje aktivity vedoucí ke zmírnění dopadů vzniklých v souvislosti s havárií v okolí objektu a slouží k zajištění havarijní připravenosti v zóně havarijního plánování. (MV ČR, 2016)

Vyhláška Ministerstva vnitra č. 328/2001 Sb., o některých podrobnostech zabezpečení IZS stanovuje zásady a způsob zpracování, schvalování a používání havarijního plánu. Podle § 25 a § 26 tohoto zákona se zpracovávají dva základní typy havarijních plánů:

- havarijní plán kraje,
- vnější havarijní plán. (Česko, 2001)

Havarijní plán kraje

Havarijní plán kraje je soubor plánovaných opatření k provádění záchranných a likvidačních prací a dalších opatření na území kraje, schvaluje jej hejtman kraje po předchozím projednání v bezpečnostní radě kraje. (MV ČR, 2016)

Dle vyhlášky č. 328/2001 Sb., se havarijní plán kraje zpracovává pro řešení mimořádných událostí, které vyžadují vyhlášení třetího nebo zvláštního stupně poplachu. Obsahuje popis území kraje, analýzu rizik vzniku MU, informace o silách a prostředcích k provádění záchranných a likvidačních prací a způsob zabezpečení ochrany obyvatelstva v kraji. Člení se na informační část, operativní část a plány konkrétních činností.

Vnější havarijní plán

Je to preventivní doklad, k zajištění havarijní připravenosti v zóně havarijního plánování. Zpracovává se pro oblast v okolí jaderného zařízení nebo pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti nebo se vyskytuje zdroj ionizujícího záření. V souladu s příslušnými předpisy zpracovávají všichni provozovatelé závodů s nadlimitním množstvím nebezpečných látek i vnitřní havarijní plán, jež popisuje zajištěnost pohotovostních zdrojů materiálních, informačních, lidských a ekonomických pro případ vzniku závažné havárie. (MV ČR, 2016)

Vnější havarijní plán se zpracovává pro objekty a zařízení, s potenciálem závažných chemických havárií a dále pak pro jaderná zařízení nebo pracoviště IV. kategorie. Vnější havarijní plán se dělí na informační a operativní část, plány konkrétních činností a obsahuje textovou i grafickou část. (Česko, 2001)

2 KLASIFIKACE HROZEB (POSOUZENÍ, ROZPOZNÁNÍ)

Hrozby jsou potencionálním zdrojem mimořádných událostí, které mohou ohrozit život a zdraví obyvatel, bezpečnost, mohou způsobit škodu na majetku a životním prostředí. Bývají spuštěny náhodně nebo záměrně a mohou mít dopad na ekonomiku státu, na dodávky strategických surovin nebo energií či dopad na kritickou infrastrukturu.

Tyto hrozby, které jsou zdrojem rizika, jsou na základě souhrnného rozboru bezpečnostního prostředí stanoveny v Bezpečnostní strategii České republiky 2015. Mimo jiné, jsou zde uvedeny hrozby z oblasti šíření zbraní hromadného ničení a jejich nosičů nebo pohromy přírodního a antropogenního původu a jiné mimořádné události. (Kolektiv autorů, 2015a)

Bezpečnostní strategie je efektivním nástrojem pro vládu ČR k zajišťování klíčových úkolů, které zahrnují zajištění bezpečnosti obyvatel, obranu svrchovanosti a územní celistvosti země. Bezpečnostní strategie informuje vládu o stavu zabezpečení ochrany obyvatel a plnění úkolů, které byly zaneseny do Koncepce ochrany obyvatelstva. K tomu byly vytvořeny pracovní skupiny, které řeší úkoly z oblastí týkající se školství, zdravotnictví, dopravy, obrany, vnitra, zahraničních věcí, zemědělství, životního prostředí, státních hmotných rezerv a jaderné bezpečnosti za účelem zkvalitnit systému ochrany obyvatelstva. (MV-GŘ HZS ČR, 2022)

2.1 Mimořádné události

Mimořádnými událostmi můžeme nazvat škodlivé působení sil a jevů, či situace vzniklé v určitém prostředí v důsledku živelní pohromy, havárie, nezákonnou činností, ohrožením kritické infrastruktury, nákazami, ohrožením vnitřní bezpečnosti a ekonomiky, které vyžadují provedení záchranných a likvidačních prací. Mimořádné události jsou v současných právních předpisech ČR uváděny jako mimořádné situace, nouzové situace, pohromy, katastrofy nebo havárie. (MV ČR, 2016)

2.1.1 Základní dělení

Za základní lze považovat třídění na MU přírodní – naturogenní a události způsobené člověkem – antropogenní. Antropogenní MU se dělí na technogenní, sociogenní a ekonomické.

Naturogenní mimořádné události lze rozdělit na abiotické, což jsou MU způsobené neživou přírodou, např. zemětřesení, vichřice, krupobití, povodně, záplavy, silné mrazy a námrazy, sopečná činnost, půdní eroze, požáry vzniklé přírodními vlivy, ale také i atmosférické výboje, radioaktivita přírodního prostředí, únik radonu či pády kosmických těles.

Dále se dělí naturogenní MU na biotické, které způsobuje živá příroda, např. epidemie, epizootie, epifytie, přemnožení přírodních škůdců, parazitů, rostlinných plevelů nebo rychlé vymírání druhů. (Kolektiv autorů, 2015b, s. 161–162)

Antropogenní MU můžeme ještě podrobněji rozdělit do čtyř základních skupin:

- technogenní,
- sociogenní interní,
- sociogenní externí,
- agrogenní.

Technogenní MU se týkají provozních havárií a havárií spojených s infrastrukturou. Nejčastějšími jsou dopravní havárie, s tím spojené ropné havárie, požáry, havárie s únikem nebezpečných či toxických látek, ekologické havárie, důlní neštěstí, radiální havárie.

Do sociogenních MU interních se řadí negativní jevy ekonomického, sociálního a společenského charakteru. Takovými mohou být narušení dodávek ropy, zemního plynu, elektrické energie, pitné vody, potravin, krach ekonomiky státu, oslabení finančního a devizového hospodářství státu, přelidnění, migrace, epidemie, terorismus, národnostní, rasové a náboženské nesnášenlivosti a mnoho dalších psychosociálních negativních jevů.

Sociogenní MU externí jsou krizové situace vojenského charakteru, které ohrožují stát z vnějšku a jsou spojeny s politickým, hospodářským a ekonomickým nátlakem. Jsou to též vojenské agrese, násilné akce cizích subjektů s použitím vojenských sil a prostředků na území, kde jsou plněny spojenecké závazky nebo je poskytována mezinárodní humanitární pomoc, nebo jsou-li ohroženy základní demokratické hodnoty státu.

Agrogenní MU jsou spojené se zemědělstvím a půdou. Řadíme mezi ně eroze půdy, degradace kvality půdy, používání převážně jedné odrůdy rostlin na polích, nevhodné používání hnojiv a agrochemikálií, vysychání a znehodnocování vodních zdrojů, zhoršení kvality rostlinné i živočišné produkce vlivem velkoprodukce. (Kolektiv autorů, 2015b, s. 162)

2.1.2 Sekundární události

Díky pozorování mimořádných událostí jsou zjišťovány jejich principy vzniků a následků, které mohou způsobovat další mimořádné události. Těmto dějům, které vznikají působením mnoha jevů současně se říká domino efekty nebo synergické jevy. Domino efekt je lépe řečeno řetězová reakce, neboť jedna událost spustí další obdobné události a tak dále, čímž se původní problém ještě prohloubí. (Káčer, 2015)

Synergický jev vznikne pomocí společně působící jedné příčiny, ale její výsledek má hned několik kombinovaných následků, více faktorů, které mají větší dopad než součet jejich jednotlivých účinků.

Tyto účinky mohou být nebezpečné a destruktivní. Souhrnný dopad nebezpečných faktorů může být mnohem větší než dopad každého z nich zvlášť, což situaci ještě zhoršuje a značně ztěžuje obnovu. Tím, že budeme připraveni, můžeme zajistit, aby následky mimořádné události byly méně škodlivé a lépe zvládnutelné. V rámci ochrany obyvatelstva je cílem tyto jevy omezovat či eliminovat. (Káčer, 2015)

2.2 Krizové stavy

Krizový zákon č. 240/2000 Sb., uvádí, že to jsou mimořádné události podle zákona o integrovaném záchranném systému, které narušují kritickou infrastrukturu nebo jsou to jiná nebezpečí a dle jejich rozsahu je vyhlášen stav nebezpečí, nouzový stav, stav ohrožení státu nebo válečný stav. (Česko, 2000b, s. 3461)

Dále je v krizovém zákoně uvedeno, dle jaké velikosti postižení, druhu a rozsahu mimořádné události jsou vyhlášeny výše uvedené krizové stavy. Při nevojenské krizové situaci se vyhláší stav nebezpečí a nouzový stav a v případě ohrožení demokratických základů státu je vyhlášen stav ohrožení státu. Rozhodnutí o vyhlášení krizového stavu obsahuje krizová opatření a jejich rozsah a jsou zaktivovány orgány krizového řízení. Je důležité, aby orgány krizového řízení byly na následky mimořádné události připraveny, aby zmírnily negativní důsledky a podpořily rychlou a účinnou obnovu. (Kolektiv autorů, 2021, s. 206)

Stav nebezpečí

Vyhláší jej hejtman kraje pro území kraje nebo primátor města Prahy v případě, jsou-li ohroženy životy, zdraví, majetek nebo životní prostředí, pokud nelze odvrátit nebezpečí běžnou činností složek IZS, správních úřadů, orgánů krajů a obcí. Doba účinnosti závisí na intenzitě ohrožení, nejvýše však trvá 30 dnů, se souhlasem vlády může být stav nebezpečí prodloužen.

Hejtman může požádat vládu o vyhlášení nouzového stavu, dosahuje-li intenzita ohrožení značného rozsahu, a když ji nelze odvrátit v rámci stavu nebezpečí. Krizová opatření vyhlášených hejtmanem skončí dnem vyhlášení nouzového stavu vládou. Rozhodnutí o stavu nebezpečí je vyhlášeno ve Věstníku právních předpisů kraje, je zveřejněno hromadnými informačními prostředky a místním rozhlasem a zveřejněno na úřední desce krajského úřadu a obecních úřadů na území, kde je stav nebezpečí vyhlášen. (Kolektiv autorů, 2019, s. 46)

Nouzový stav

Nouzový stav vyhláší vláda, popř. předseda vlády ČR pro rozsah celého státu nebo jeho omezenou část při vzniku živelních pohrom, ekologických, průmyslových nebo jiných havárií, katastrof, nehod nebo jiného nebezpečí, které ve významném rozsahu ohrožují životy, zdraví, majetek, vnitřní pořádek a bezpečnost. Nouzový stav je vyhlášen nejvýše na 30 dnů, ale toto rozhodnutí může být do 24 hodin zrušeno, nebo jej lze i prodloužit se souhlasem Poslanecké sněmovny Parlamentu ČR. S vyhlášením nouzového stavu je vláda povinna definovat omezení práv a rozsah povinností, které musí být v souladu s Listinou základních práv a svobod. (Kolektiv autorů, 2019, s. 46)

Stav ohrožení státu

Na návrh vlády vyhláší Parlament ČR stav ohrožení státu a k jeho přijetí je potřeba souhlasu nadpoloviční většiny všech poslanců a senátorů. Vyhlášení tohoto krizového stavu je platné pro celý stát nebo vymezené území bez omezení časové účinnosti, v případech bezprostředního ohrožení svrchovanosti nebo územní celistvosti státu anebo jeho demokratických základů. Rozhodnutí se zveřejňuje v hromadných sdělovacích prostředcích a vyhláší se stejně jako zákon. Za stavu ohrožení státu lze na nezbytně nutnou dobu a v nezbytném rozsahu omezit lidská práva. (Kolektiv autorů, 2019, s. 47)

Válečný stav

Válečný stav definuje Ústava ČR jako stav napadení České republiky, nebo je-li třeba plnit mezinárodní smluvní závazky o společné obraně proti napadení. Vyhláší jej Parlament ČR pro celý stát bez omezeného trvání. (Česko, 1993, s. 10)

Dle Terminologického slovníku MV jde o stav vzniklý mezi nepřátelými stranami – státy nebo jinými subjekty mezinárodního práva, vypuknutím ozbrojeného konfliktu, a to bez ohledu na to, zda byla vypovězena válka. Rozhodnutí o válečném stavu se zveřejňuje v hromadných sdělovacích prostředcích a vyhláší se stejně jako zákon.

3 RADIČNÍ HAVÁRIE

Zdrojem nebezpečí mohou být nebezpečné látky, které jsou všude kolem nás. Vyskytují se u většiny havárií přímo nebo nepřímo. Mohou ohrožovat přímé účastníky havárie, ale i široké okolí. Může se jednat o látky v kapalném, tuhém nebo plynném skupenství. Rozsah ohrožení je závislý na konkrétní nebezpečné látce, jejím množství, koncentraci a na době, po kterou je organismus vystaven škodlivým účinkům.

Havárie patří mezi mimořádné události. Je náhlá, časově a prostorově ohraničená. Vzniká v souvislosti s poruchou provozu technických zařízení a budov, při použití, zpracování, výrobě, skladování, nakládání, přepravě nebezpečných biologických, chemických nebo radioaktivních látek nebo při nakládání s nebezpečným odpadem. Havárie není ovladatelná, má vážné dopady na život a zdraví osob nebo na životní prostředí a majetek. (MV ČR, 2016)

Pojmem radiační havárie je označována: „*radiační mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiační mimořádná událost vznikla, nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo*“ (Česko, 2016a, s. 3942).

Radiační havárie velkého rozsahu se řadí mezi technogenní MU a vzniká poruchou technického zařízení, nedodržením technologických postupů, selháním lidského faktoru, jež způsobí zhroucení všech fyzických bezpečnostních bariér zabraňujících úniku radioaktivních látek do okolí (Kolektiv autorů, 2021, s. 59). Projevuje se únikem radioaktivních látek, které vznikají v průběhu činnosti jaderné elektrárny v aktivní zóně reaktoru a chladivu primárního okruhu způsobené porušením celistvosti ochranného obalu, integrity zařízení primárního okruhu a pokrytí paliva. (SÚJB, 2022, s. 2)

Dle atomového zákona České republiky jsou definovány tři stupně radiačních mimořádných událostí:

- radiační mimořádná událost 1. stupně – zdolaná silami a prostředky osobami vykonávající práci v době, kdy radiační MU vznikla,
- radiační nehoda – nezvládnutelná silami a prostředky osobami vykonávající práci v době, kdy radiační MU vznikla, nebo nálezem, zneužitím či ztrátou radionuklidového zdroje, které nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo,

- radiační havárie – nezvládnutelná silami a prostředky osobami vykonávající práci v době, kdy radiační MU vznikla nebo MU vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (Česko, 2016a, s. 3942)

V příručce Mezinárodní agentury pro atomovou energii, která je určena jak pro držitele povolení nakládání s jadernými materiály, tak i veřejnost, je uvedena klasifikace INES, což je Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí. Podle této stupnice se na základě kritérií určuje stupeň úrovně události. Dle Céline Kermisch je úroveň 7 nedostatečně definovaná, neboť nezohledňuje nestandardní události a rozdíly mezi katastrofami. Také navíc tato stupnice nedokáže rozlišit dlouhodobý vývoj nebo události s více iniciátory. (Kermisch a Labeau, 2013)



Obrázek 2 – Mezinárodní stupnice jaderných událostí INES. (Milěr, 2022)

3.1 Ochranná opatření

Plánováním opatření k zajištění ochrany bezpečnosti státu, obyvatelstva a ekonomiky, ochrany kritické infrastruktury, včetně zajištění opatření pro případ radiační havárie, řešením odstraňování následků a zhodnocením potřeby věcných zdrojů nezbytných pro zajištění bezpečnosti se zabývá Výbor pro civilní nouzové plánování, stálý pracovní orgán Bezpečnostní rady státu. (MV ČR, 2016)

V České republice jsou dvě jaderné elektrárny, které se významnou měrou podílí na výrobě elektrické energie. Při provozu jaderných energetických zařízení je povinnost dodržovat pravidla stanovená Mezinárodní agenturou pro atomovou energii. JE Dukovany má zpracovaný vnější havarijní plán pro okruh 20 km od elektrárny, což je zóna havarijního plánování. JE Temelín má zónu havarijního plánování 13 km. (Mertová a Slaná, 2021, s. 155)

Usnesením vlády České republiky č. 1276 byl v roce 2020 schválen Národní radiační havarijní plán, který je zpracován pro celou Českou republiku. Obsahuje odpovědnost dotčených správních úřadů za přípravu k řízení radiační havárie, která může být takového rozsahu, že bude nutné přijímat ochranná opatření obyvatelstva i mimo zónu havarijního plánování, což jsou oblasti bez zpracovaných vnějších havarijních plánů. Tato území nemají předem plánovaná ochranná opatření a tato nejsou ani technicky zajišťována. (SÚJB, 2020)

Státní úřad pro jadernou bezpečnost zajišťující plnění úkolů potřebné v krizovém řízení ČR, zvládnutí radiačních mimořádných událostí, zajišťující kontrolní a správní činnosti v této oblasti podle zákona č. 263/2016 Sb., zpracoval dokument, který řeší radiační havárii. Jedná se o typový plán: Radiační havárie.

3.1.1 Před vznikem radiační havárie

Radiační havárie mohou mít dalekosáhlé následky, protože radioaktivní materiál se může šířit na rozsáhlá území, kontaminovat půdu, vodu a zdroje potravin a představovat hrozbu pro veřejné zdraví po mnoho let. Proto je důležité zavést účinná opatření pro prevenci, reakci a zmírnění následků radiačních havárií, aby byla chráněna veřejnost a životní prostředí. Aby nedošlo ke vzniku radiační havárie, existuje mnoho zákonů, vyhlášek, přípravných prací, poučení, proškolení a výcvik personálu, zpracování pracovních postupů, požární ochrany a havarijní připravenosti, údržby a modernizace zařízení, systémů řízení a kontrol, posilování bezpečnostních systémů a v neposlední řadě také bezpečné ukládání radioaktivních odpadů.

V České republice dohlíží na bezpečnost a spolehlivost provozu jaderných elektráren domácí i mezinárodní úřady: Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA), Světová asociace provozovatelů jaderných zařízení (WANO) a další. Za bezpečný provoz úložiště a ukládání nejen vyprodukovaných, ale i budoucích radioaktivních odpadů zodpovídá státní organizace Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). (ČEZ, 2022b)

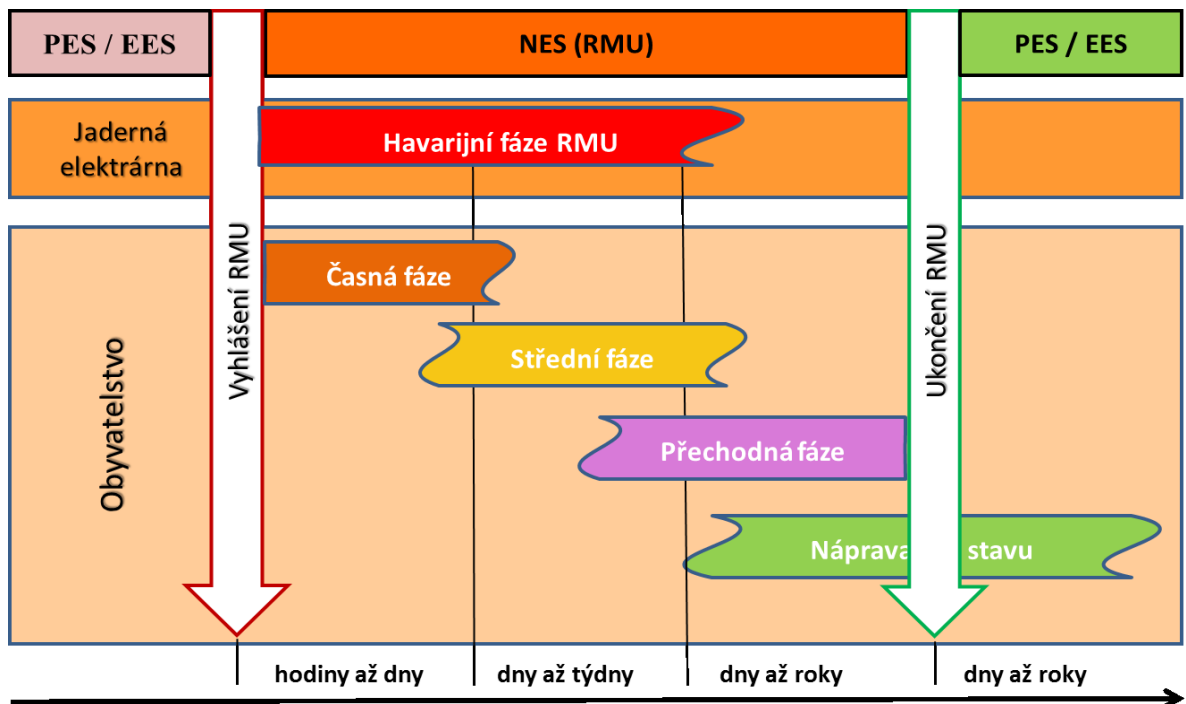
3.1.2 Po vzniku radiační havárie

Jedním z prvořadých úkolů při vzniku radiační havárie je varování a informování obyvatelstva k provedení úkonů vedoucích ke snížení působení uniklých radioaktivních látek na minimum. V zóně havarijního plánování budou zavedena neodkladná ochranná opatření formou ukrytí, jodové profylaxe a evakuace. (Hradil et al., 2018, s. 34)

V souvislosti s vyhlášením radiální havárie bude prováděna detekce a identifikace nebezpečných látek, kolektivní a individuální ochrana, bude poskytnuta humanitární pomoc, zajištěno nouzové přežití. Některá neodkladná ochranná opatření mohou být zavedena i za hranicemi vytyčené zóny havarijního plánování. (Hradil et al., 2018, s. 34)

Dle typového plánu je ukrytí omezeno na 2 dny, evakuace obyvatel ne delší než 7 dní. Bude-li evakuace trvat déle než sedm dní, tj. pokud by překročila efektivní dávka po dobu 12 měsíců referenční úroveň pro existující expoziční situaci, potom evakuace přejde v přesídlení.

V případě neustálého působení následků radiální havárie se zavádějí následná ochranná opatření, která nejsou časově omezena, neboť závisí na rozsahu poškození jaderné elektrárny uvedení ji do studeného režimu a na množství uvolněných radionuklidů v přírodě. (SÚJB, 2022c)



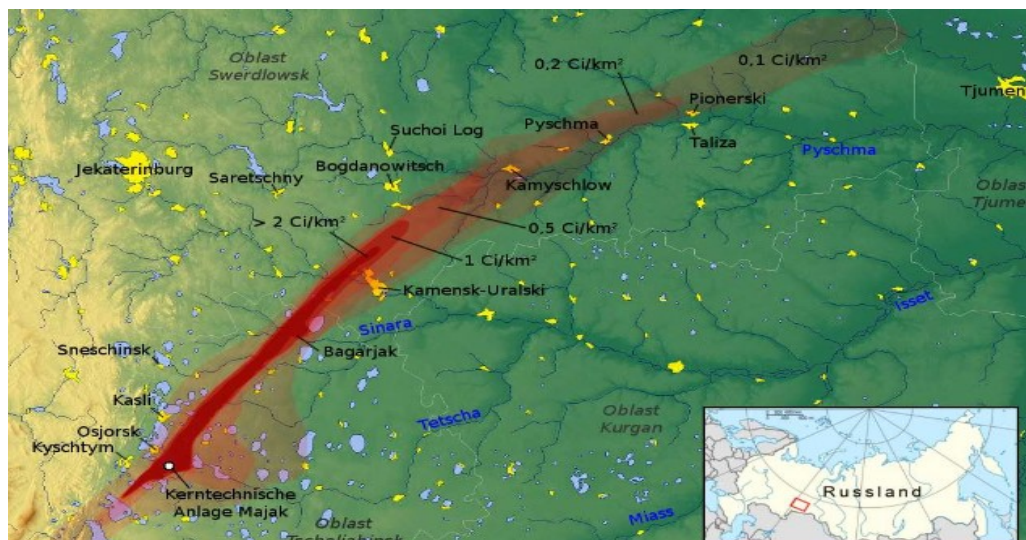
Obrázek 3 – Charakteristika členění nehodové expoziční situace z hlediska řízení neodkladných a následných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (SÚJB, 2022c)

3.2 Havárie ve světě

Již od počátků, kdy začala být využívána jaderná energie k výrobě elektrické energie, a zdrojem se stal atom, docházelo k nehodám menšího rozsahu. Došlo ale i k událostem, které svou závažností dosáhly nejvyššího stupně č. 7. Radiální havárie jsou vzácné, ale potenciální katastrofické události, které mohou mít vážné následky pro obyvatele, životní prostředí a hospodářství.

Three Miles Island, USA, 1979, INES 5

Nejzávažnější havárie v historii jaderné energetiky v USA se stala 28. března 1979 v jaderné elektrárně Three Miles Island v důsledku selhání zařízení a lidského faktoru. Došlo k poruše ventilu a výpadku čerpadel, která tlačila vodu do sekundárního okruhu elektrárny. Tyto ventily byly otevřeny obsluhou 8 minut po zahájení havárie. Protože únik vody pokračoval, hladina vody v systému klesala, tlak v přetlakové komoře klesl tak nízko, že v aktivní zóně reaktoru začala vznikat pára, o které obsluha nevěděla. Následně došlo k zamoření celé budovy radioaktivitou. V reaktoru se kvůli vysoké teplotě začal vytvářet vodík, což způsobilo malou explozi, která nevedla k poškození vnějšího obalu. Únik radioaktivních plynů mimo elektrárnu byl vyhodnocen jako neškodný. K žádnému úmrtí nedošlo, avšak následně 144 tisíc obyvatel dobrovolně opustili svůj domov. (Hanna, 2020)



Obrázek 4 – Oblast radioaktivního spadu po výbuchu v Majaku. (Rieke, 2019)

Kyštym, Sovětský svaz, 1957, INES 6

Na jihu Ruska v Čeljabinské oblasti dne 29. září 1957 došlo k výbuchu a radioaktivitou bylo zamořeno město Ozjorsk. Tato havárie byla utajena až do 70. let. Poblíž města Kyštym byl postaven jaderný komplex Majak, ve kterém se vyráběly jaderné zbraně. Jaderný reaktor s otevřeným okruhem byl chlazen vodou z jezera Kyzyltaš. Voda byla vypouštěna do řeky Teča, následně se odpadní radioaktivní voda vypouštěla do jezera Karačaj, kde se vsakovala do země. V roce 1956 došlo k poruše chladicího systému v jedné z nádrží se 70 tunami tekutého jaderného odpadu. Oprava nebyla provedena a o rok později explodoval celý tank, kdy do okolí uniklo enormní množství radioaktivních částic, viz obrázek 4. Během exploze nikdo nezemřel, ale 30 tisíc lidí, kteří žili v nejhůře postižené oblasti, bylo radiací těžce zasaženo. (Ebrahimi, 2019)

Fukushima, Japonsko, 2011, INES 7

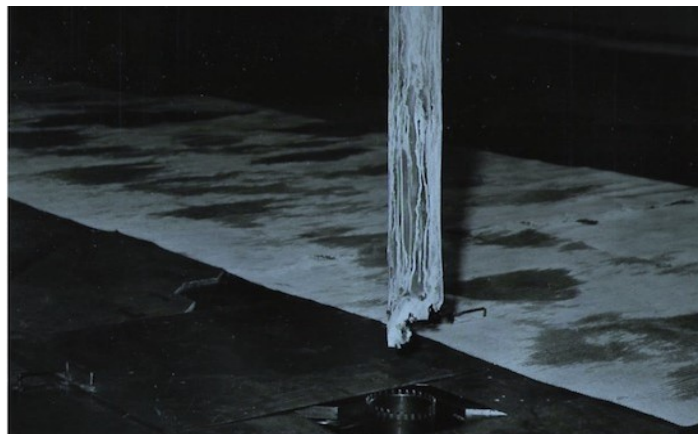
Mimo Černobyli, byla jako druhá jaderná havárie ohodnocena Mezinárodní agenturou pro atomovou energii nejvyšším stupněm 7 v Japonsku, elektrárna Fukushima I – Daiichi. Během zemětřesení o síle 9 stupňů Richterovy škály a následných vlnách tsunami vysokými až 14 metrů, došlo k poškození čtyř jaderných reaktorů, z nichž se tři z části roztavily. Teplota a tlak byly ve vysokých hodnotách, byla vypouštěna radioaktivní pára, ale nahromaděný vodík způsobil explozi. Výbuch zničil budovu reaktoru, poškodil zařízení a do okolí unikla radioaktivita, především ve formě radioaktivní vody. Během exploze bylo zraněno 16 pracovníků a dva byli s popáleninami převezeni do nemocnice. I když byla situace stabilizovaná, byla nařízena evakuace přes 150 000 lidí, ale i přesto důsledkem špatně zvládnuté evakuace zemřelo 1 600 starých a těžce nemocných lidí. Jedna osoba v přímém důsledku ozáření zemřela na rakovinu. (Ebrahimi, 2019)

Po dobu pěti let, tj. do srpna 2016, byly opakovaně měřeny dávkové příkony v ovzduší na polích o ploše velké 80 km v okolí jaderné elektrárny. Průměrný dávkový příkon v ovzduší bez radiačního pozadí se snížil přibližně na 20 % původní hodnoty, což bylo důsledkem radioaktivního rozpadu ^{134}Cs s poločasem rozpadu 2,06 roku. Bylo to přičítáno pronikání radioaktivního cesia do půdy. Snížení dávkového příkonu v ovzduší bylo rychlejší, než se očekávalo. Následky katastrofy měly dalekosáhlé důsledky nejen pro postižené obyvatele, ale i pro světové společenství. Zdůraznila význam účinných opatření pro prevenci jaderných havárií a reakci na ně a vedla ke zvýšení obav o bezpečnost jaderných elektráren na celém světě. Katastrofa měla také významný dopad na japonské hospodářství, přičemž náklady na likvidaci následků se odhadují na desítky miliard dolarů. (Mikami et al., 2019)

3.3 Havárie v České republice

V České republice došlo jen k několika událostem v jaderných elektrárnách, které byly hodnoceny dle mezinárodní stupnice číslem 1 (anomálie) a 0 (odchylka). V Dukovanech počátkem 90. let špatně reguloval jeden z bloků chlazení, následně byly spuštěny dieselgenerátory. V roce 1994 došlo na 3. bloku k požáru transformátoru. V roce 1996 se při revizi vznítily páry acetonu, které následně vybuchly. (Novinky.cz, 2007) V roce 2013 unikla v Temelíně voda z chlazení primárního okruhu při odstávce prvního bloku. Jednalo se o nevýznamnou radiační událost. (SÚJB, 2013)

Velkou radiační havárii zažilo Československo v Jaslovských Bohunicích nedaleko město Trnava na Slovensku. První československá atomová elektrárna byla budována od roku 1958 a do provozu byla spuštěna v roce 1972. Došlo dokonce ke dvěma nehodám. První se stala 5. 1. 1976 na reaktoru A1, ale nezpůsobila vážný unik radioaktivity. Během rutinní výměny palivového článku nedošlo k úplnému vysunutí zajišťovacích kamenů a zátka nebyla uzamčena. Uniklý oxid uhličitý, kterým byla chlazena vysoká teplota reaktoru, začal proudit do spodních pater elektrárny. Dva pracovníci nestihli opustit místnost a udusili se, dalších 60 pracovníků muselo být dekontaminováno. Reaktor se podařilo opravit. (Podzimek, 2022, s. 117)



Obrázek 5 – Horní část přepáleného článku po vytažení z aktivní zóny. (Mareš, 2023)

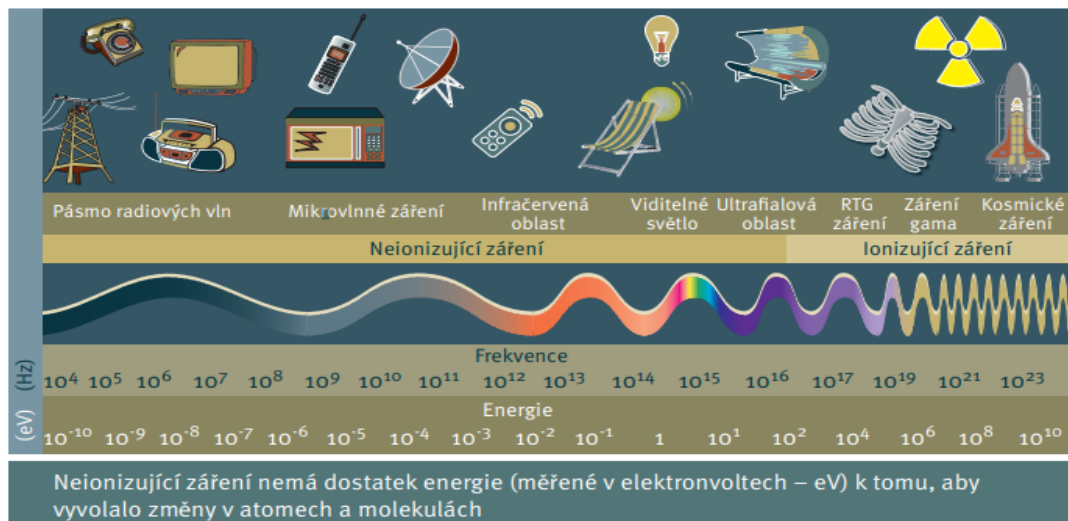
O rok později, 22. února 1977, došlo během výměny palivového článku ke znemožnění průtoku chladícího plynu díky kuličkám silikagelu, které byly přichyceny na válci s palivovými pruty. Články se zahřály na teplotu 1 400 °C a protavily kanálovou trubku a do primárního okruhu se dostala těžká voda. Navíc začal hořet uran, který reagoval s oxidem uhličitým. Radioaktivita kontaminovala primární okruh, sekundární okruh parovodů, turbíny a kondenzátoru, ale zaměstnanci nebyli ohroženi ani ozáření. Došlo také ke kontaminaci potoka, ve kterém tekla odpadní voda. (ČEZ, 2022a)

Provoz elektrárny byl ukončen, štěpná reakce byla zastavena v roce 1979 a postupně došlo k její likvidaci. Palivo bylo odvezeno do Ruska na základě dohody. Rizikem stále zůstávají nádrže s radioaktivními kaly a pevné radioaktivní odpady. Vyřazování elektrárny je naplánováno až do roku 2035. Obě havárie byly v Jaslovských Bohunicích ohodnoceny stupněm 4 INES. (Podzimek, 2022, s. 118–119)

4 DOZIMETRIE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Ionizující záření bývá zaměňováno s názvem „radioaktivní záření“ a používáno ne zcela správně. „Obecnější pojem je ionizující záření, neboť zahrnuje všechny druhy ionizujícího záření, bez ohledu na jeho původ. Pojem radioaktivní záření se váže pouze na ionizující záření, které je emitováno při jaderných přeměnách z radioaktivních nuklidů.“ (Podzimek, 2021, s. 10)

„Ionizace je proces, při kterém atom získá kladný nebo záporný náboj v důsledku ztráty nebo získání elektronu. Ionizující záření nese takovou energii, že může odtrhnout elektrony z jejich oběžné dráhy a vytvářet nabité atomy zvané ionty“ (UNEP, 2016a, s. 5). Atomový zákon 263/2016 Sb., vysvětluje ionizující záření jako „přenos energie v podobě částic nebo elektromagnetických vln vlnové délky nižší nebo rovnající se 100 nm s frekvencí vyšší nebo rovnající se 3×10^{15} Hz, který je schopen vytvářet ionty“ (Česko, 2016a, s. 3939).



Obrázek 6 – Příklady různých aplikací elektromagnetického záření. (UNEP, 2016b)

Ionizující záření je měřitelné, měří se dávkový příkon nebo příkon dávkového ekvivalentu. Hodnota dávkového příkonu je závislá na místě měření nebo vzdálenosti od zdroje ionizujícího záření. (GŘ–HZS ČR, 2017)

4.1 Základní veličiny záření

Veličiny, které jsou níže vysvětleny, jsou veličiny fyzikální. Přesně nezohledňují souvislost s biologickými účinky ionizujícího záření.

Aktivita udává počet radioaktivních přeměn v radioaktivní látce vztažený na jednotku času. Jednotkou aktivity je s^{-1} (reciproká sekunda) a dostala název becquerel (Bq). Jelikož je tato jednotka nepatrná, používají se její násobky, např. 1 kBq, 1 MBq, 1 GBq. Dojde-li v látce k jedné přeměně za 1 sekundu, má aktivitu 1 Bq.

Dávka je veličina, ve které se vyjadřuje množství energie předané živé hmotě. Dávka záření, kterou člověk obdrží, je důležitým faktorem při určování možných zdravotních účinků expozice záření. Energie záření může poškozovat živou tkáň. Dávka záření může být způsobována kterýmkoliv radionuklidem. Udává, kolik energie ionizujícího záření pohltí 1 kg látky. Její jednotkou je J.kg^{-1} a dostala název grey (Gy). Pro přesnější vyjádření vlivu záření na člověka se zavedla veličina zvaná dávkový ekvivalent, jehož jednotkou je sievert (Sv), častěji mSv. Různé druhy záření mají při shodné dávce odlišné účinky.

Dávkový příkon je přírůstek dávky v závislosti na čase, obvykle vyjádřený v jednotkách grey za sekundu (Gy.s^{-1}) v praxi se používají spíše $\mu\text{Gy.h}^{-1}$. Dávkový příkon vyjadřuje intenzitu pole záření, hodinovou dávku a je mírou rychlosti ozařování předmětů. (HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 25)

Kerma charakterizuje působení nepřímo ionizujícího záření z hlediska předání energie nenabitých částic nabitým částicím v daném prostředí. Její jednotkou je gray. Do kermy se nezapočítává energie nabitých částic uvolněných brzdným zářením generovaným v daném objemu materiálu.

Expozice vyjadřuje fotonové záření ve vzduchu. Popisuje a kvantifikuje ionizační účinky záření RTG nebo gama záření. Její jednotkou je coulomb na kilogram (C.kg^{-1}). (Podzimek, 2021a, s. 88)

4.2 Druhy záření

Ionizující záření je druh záření, které má dostatek energie na to, aby z atomů odstranilo pevně vázané elektrony, vytvořilo ionty a mohlo tak poškodit živou hmotu. Ionizující záření se dělí na přímo ionizující záření a nepřímo ionizující záření. Přímě ionizující záření se skládá nabitými částicemi: elektrony, pozitrony, protony, částicemi α , β , jež mají dost energie k vyvolání ionizace. (HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 8)

Zatímco nepřímo ionizující záření zahrnuje nenabitě částice fotony (též označováno jako γ záření, foton s energií nad 10 keV) a neutrony. Tyto nemohou prostředí samy ionizovat, ale při vzájemném působení s prostředím se uvolňují přímo ionizující částice a prostředí ionizují těmito druhotnými částicemi. Obě formy ionizujícího záření mohou způsobit poškození živé tkáně a je důležité porozumět specifickým vlastnostem každého typu, aby bylo možné účinně zmírnit jejich potenciální škodlivost. (HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 8)

Dále můžeme ionizující záření rozdělit na pronikavé a nepronikavé. Pronikavost závisí na druhu ionizujícího záření a na fyzikálních vlastnostech látky, která absorbuje energii IZ.

Záření α řadíme mezi nepronikavé z důvodu, že jeho částice mají velkou vazebnou energii, jsou nositeli největšího náboje a působí jako jedna částice. Tento větší náboj vede k vyšší interakci s okolními atomy, což je spojeno s rychlou ztrátou energie částic. Záření α není při vnějším ozáření nebezpečné, může být zadrženo např. papírem a při dopadu na kůži se vstřebává v jejích horních vrstvách. (HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 17)

Záření β se řadí mezi nepronikavé z toho důvodu, že jeho částice nesou menší náboj, proto mohou pronikat do hloubky 1 až 2 mm živé tkáně. Dosah částice beta závisí na energii. Jeho elektrony jsou malé a lehké a jsou rozptylovány s malou ztrátou energie. Jejich dráha může být hodně klikatá. (UNEP, 2016a, s. 9)

Záření γ je mimořádně pronikavé. Vzniká vyzářením přebytku energie jádra atomu při jeho přechodu z jednoho stavu (vzbuzeného) do jiného (vzbuzeného/stabilního) stavu. Záření γ se neodklonuje od svého směru ani v elektrickém ani v magnetickém poli, volně se rozptyluje interakcemi v prostředí. Gama záření projde i ocelovým plátem, přičemž se oslabí. Jeho intenzitu je možné zmírnit, ale ne zcela pohltit. K tomu slouží polovrstva, která oslabí záření γ na polovinu. (Podzimek, 2021b, s. 135)

Neutrony jsou částice elektricky neutrální, vyskytují se běžně v přírodě v kosmickém záření, jsou vysoce pronikavé. Jaderné reakce s neutrony jsou nejrozmanitější a nejčastější, neboť neexistuje coulombovská bariéra bránící průniku do jádra. Proud rychle letících neutronů má vysokou pronikavost, protože nenese elektrický náboj. Neztrácí energii přímou ionizací atomů. (Podzimek, 2021b, s. 141)

Rentgenové záření neboli paprsky X jsou zvláště pronikavé. Rentgenové záření je tvořeno dvěma složkami. Jedno vzniká přeskokem elektronů ve vnitřních sférách atomů s vysokým atomovým číslem nazvané charakteristické záření. Druhé se nazývá brzdné záření a vzniká zabrzděním elektronů v elektrostatickém poli atomového jádra, které mají vysokou kinetickou energii. (Podzimek, 2021b, s. 138)

4.3 Zdroje ionizujícího záření

Zdroje ionizujícího záření definuje atomový zákon, který v § 2 říká: „radioaktivní látka a předmět nebo zařízení ji obsahující nebo uvolňující, nebo generátor záření, kterým je zařízení způsobilé generovat ionizující záření“. Dle § 61 se zdroje ionizujícího záření řadí do kategorií: nevýznamné, drobné, jednoduché, významné a velmi významné. (Česko, 2016a)

Radioaktivní záření v prostředí ozařuje člověka z vnějšku nebo zevnitř. Oba způsoby cesty ozařování jsou přibližně v rovnováze. Radionuklidy jsou používány v laboratořích, ve zdravotnictví k ozařování, k vědeckým a výzkumným účelům, jako zdroj energie v elektrárnách. Jisté nebezpečí může vzniknout při dopravní havárii při převozu nebezpečné látky, např. zářičů. V případě většího rozsahu nehody by se jednalo už o radiační havárii.

4.3.1 Přírodní zdroje

Přírodním zdrojem ozáření člověka jsou tzv. primordiální radionuklidy, které se nachází v zemské kůře a v půdě. Radionuklidy mohou přecházet z hornin a minerálů do rostlin, následně do živočichů, proto i příjem z potravin a nápojů je zdrojem vnitřní dávky. Mezi nejvýznamnější řadíme radium. Je to prvek podobný vápníku a obdobným způsobem také vstupuje do potravinových řetězců. Území s vysokými hodnotami dávek, které mohou lidé obdržet, se vyskytují v Brazílii, Číně, Iránu Nigérii a na Madagaskaru.

Dalším přírodním radionuklidem je radon. Vzniká postupnou přeměnou uranu. Tento plyn uniká běžným způsobem z půdy. Po vdechnutí jsou jeho rozpadové produkty zachyceny v dýchacích cestách a ozařují je, což vede ke vzniku rakoviny plic obzvláště tam, kde je jeho výskyt ve větší míře. Radon prostupuje přes sklepní prostory štěrbinami, dutými prostory do budov, kde se kumuluje, je-li budova málo větraná. Jeho koncentrace závisí na místních geologických podmínkách, propustnosti půdy a na použitém stavebním materiálu budovy. Česká republika patří svým průměrným množstvím objemové aktivity radonu v budovách k zemím s nejvyšší koncentrací radonu. (UNEP, 2016a, s. 30–32)

Významným zdrojem je i kosmické záření, které ozařuje Zemi přímo díky erupcí ze Slunce, z dalších hvězd a z celé řady dosud neznámých zdrojů. Částice kosmického záření dosahují velmi vysokých energií a při jejich interakci s atmosférou dochází ke vzniku dalších částic. Důležitá je nadmořská výška, neboť vzduch zde působí jako stínění, a proto lidé žijící ve vyšší nadmořské výšce jsou vystaveni efektivní dávce ve vyšší míře. Kosmické záření se dělí na primární, přicházející z vesmíru, a sekundární, jehož částice vznikají v atmosféře. Podstatnou složkou sekundárního záření jsou fotony záření gama. (Podzimek, 2021a, s. 49)

4.3.2 Umělé zdroje

Umělé zdroje ionizujícího záření jsou všechny, které se neřadí mezi přírodní zdroje. Patří mezi ně zejména různé generátory záření, např. rentgenové přístroje a urychlovače nabitých částic, dále jaderné reaktory, jaderné zbraně a radionuklidy, které jsou uměle vytvořeny. (Podzimek, 2021b, s. 50)

Rentgenové přístroje jsou zařízení, při jejichž provozu vzniká ionizující záření. Tato zařízení jsou využívána ve zdravotnictví při léčení některých nemocí a při diagnostice. Toto využívání ionizujícího záření je největším umělým zdrojem ozáření. Zdrojem záření je rentgenka, která je zaměřena na vybranou část těla a její paprsky prochází tkáněmi a jsou zobrazeny na fotografickém snímku. Princip rentgenky spočívá ve vysokém napětí, které je připojeno mezi katodou a anodou a které uděluje rychlost elektronům. Elektrony na anodě vytvářejí energii, jejíž část se mění v teplo a část na rentgenové záření.

Urychlovače nabitých částic jsou složitější přístroje jak přístroje rentgenové, např. betatrony, lineární urychlovače nebo cyklotrony. Podle tvaru dráhy částic dělíme urychlovače na lineární a kruhové. Urychlovač proti sobě posílá dva paprsky částic (protonů nebo iontů) a jejich srážkou vznikají nové částice. Při urychlování těchto částic je nutné zajistit, aby se urychlované částice na své trase k terči nesrazily s jinými částicemi, které by je svými nárazy zpomalily. Proto musí k urychlování částic docházet ve vakuu. Ke srážkám dochází za podobných okolností, které panovaly několik zlomků sekundy po velkém třesku. Hlavním úsekem urychlovače je kruhový tunel s potrubím, ve kterém panuje téměř absolutní vakuum a tak částice dosahují 99,999 999 1 % rychlosti světla a tím i obrovských energií. Dále obsahuje zdroj částic, urychlovací systém, vhodný terč a další zařízení. (Podzimek, 2021b, s. 166)

Umělé radionuklidy jsou vyráběny ze stabilního jádra změnou počtu protonů či neutronů. Požadovaná výtěžnost produkce závisí na energii ozařujících částic a je odlišná pro různé druhy produkčních reakcí. Při požadované reakci vznikají jiné radionuklidy než požadované, nazvané radionuklidové nečistoty. Pro medicínu je požadující vysoká radionuklidová čistota čítající 99,9 %, neboť radionuklidové nečistoty mohou účinkovat rušivě při zobrazovacích měřeních a vyvolat nechtěnou radiační zátěž ošetřované osoby. (Ullmann, 2022)

U jaderných zbraní se nepoužívá moderátor, který by zpomaloval štěpnou reakci, proto štěpení dostatečného množství čistého materiálu probíhá s neutrony. Neutrony s velkou energií vznikají při slučování a vysokou rychlostí se šíří do okolí a snadno pronikají i do kovových předmětů. Jaderná reakce vznikne v tzv. kritické hmotnosti materiálu. Je-li vytvořen objem větší než kritický, vypukne řetězová reakce a neutrony rozbíjejí více jader. Jakmile se vyvine nadkritické množství uranu či plutonia, vznikne řetězová reakce a v okamžiku exploze se uvolní velké množství gama záření, které prudce ohřeje okolní vzduch. Začne se šířit velmi intenzivní záření, které může oslepit živé organismy na vzdálenost až několika desítek kilometrů a gama záření poškodí živé organismy. Elektromagnetický puls poškodí elektronické přístroje, přeruší rádiové vysílání a radary. (Králová, 2007)

Explozí vzniká řada radioaktivních prvků, které kontaminují zemský povrch v okolí, může dojít k rozlehlému narušení ozonové vrstvy nebo na nějaký čas ke změně trasy atmosférických proudů. Nejnovějším typem jaderné zbraně je neutronová bomba se speciálním obalem munice s obsahem beryllia, bóru nebo bizmutu. (Králová, 2007)

Jaderné reaktory jsou využívány k výzkumnému testování jaderného paliva, v jaderné fyzice, biologii, v průmyslu a medicíně. Jaderné reaktory jsou velmi významným zdrojem ionizujícího záření. Reaktory výzkumné i energetické využívají procesu jaderného štěpení uranu nebo plutonia. Jejich izotopy jsou zasaženy neutrony, při tom se rozštěpí jádro na dvě jádra. Současně se uvolní energie a neutrony. Tyto neutrony opět zasáhnou jiná jádra, rozštěpí se a opakuje se celý proces. V jaderných elektrárnách je takto vzniklá řetězová reakce pod kontrolou. (UNEP, 2016a, s. 39)

Dle Světové jaderné asociace (WNA) bylo v lednu 2022 v provozu 438 jaderných reaktorů na celém světě. Jejich instalovaná kapacita byla 390 174 MWe. Nejvíce jaderných zdrojů používá USA, Francie a Čína. Je zamýšleno postavit ve světě dalších 325 reaktorů s instalovaným výkonem 353 812 MW. (ČEZ, 2022c)

4.4 Účinky záření, limity a následky ozáření

Všichni, kdo používají jadernou energii, vykonávají činnost v rámci expozičních situací, jsou povinni zajistit svou bezpečnost, bezpečnost okolí, dodržovat ochranu před radiací, musí být poučeni o radionuklidovém zdroji, musí být ověřeny jeho znalosti, znát zabezpečení a způsob nakládání se zdrojem.

4.4.1 Účinky

Pravděpodobně nejdůležitější skutečností týkající se působení ionizujícího záření je jeho kvantová povaha. Radiační energie se neabsorbuje hmotou postupně, ale po určitém množství zvané „kvanta“. Výchozí děj při působení ionizujícího záření je absorpce množství energie atomem a její využití na ionizaci atomu.

Proces ionizace odděluje elektron z atomu nebo molekuly, ke kterému byl vázán díky energii, jejíž kvantita závisí na složení absorbující látky. V cytoplazmě živé buňky, je její hodnota přibližně 33 eV. *„Elektromagnetické ozáření odpovídá energii 33 eV přenesená jedním fotonem vlnové délce 40 nm. Proto má ionizující záření maximální vlnovou délku 40 nm. Záření není ionizující, pokud má delší vlnovou délku.“* (HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 39)

4.4.2 Limity

Požadavky na zajišťování radiační ochrany v expozičních situacích jsou stanoveny Vyhláškou SÚJB č. 422/2016 Sb., ze dne 14. 12. 2016. Limity pro radiační pracovníky se vztahují na ozáření, kterému jsou vystaveni v přímém vztahu ke své práci, proto byly zavedeny přísné hranice pro množství záření, kterému mohou být v daném časovém období vystaveni.

Tabulka 1 – Základní limity ozáření. (dle Česko, 2016b a dle HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 33 sestavil autor)

	Radiační pracovníci	Obyvatelé
Efektivní dávka ze zevního ozáření	20 mSv/rok	1 mSv/rok
Roční ekvivalentní dávka v oční čočce	100 mSv	15 mSv
Roční ekvivalentní dávka v kůži	500 mSv na 1 cm ² kůže	50 mSv na 1 cm ² kůže
Roční ekvivalentní dávka na rukou a nohou	500 mSv	---
Roční dávka jednotlivců	3–4 mSv/rok	
Lékařská vyšetření	0,7 mSv	
Přírodní pozadí	0,05–0,3 mSv.h ⁻¹	
Přírodní zdroje	1 mSv	
Radon v budovách	1,2–2,4 mSv	
Provoz jaderných elektráren	0,01 mSv	

Tyto limity obvykle vycházejí z pracovních povinností pracovníka a typu záření, kterému je vystaven, aby jej chránily před škodlivými účinky záření, jako je rakovina, nemoc z ozáření a genetické poškození, a zároveň mu umožnily bezpečně vykonávat jeho pracovní povinnosti. K ochraně před ionizujícím zářením se využívají fyzikální metody: ochrana časem, ochrana vzdáleností a stíněním.

4.4.3 Následky

Účinky záření se liší dle druhu záření, chemickými vlastnostmi radioaktivní látky a druhu buňky, kterou záření zasáhlo. Nejcitlivější jsou buňky rostoucí a dělící se. Do organismu může radioaktivní látka vniknout dýchacími cestami vdechnutím, trávicím ústrojím, zraněním na kůži a sliznici, přes kůži a oči, stykem s kontaminovanými zvířaty a věcmi. Velmi vážným následkem ionizujícího záření je změna genetického materiálu člověka. (Princ a Vičar, 2023)

Akutní nemoc z ozáření vzniká vyšší dávkou ozáření těla, nebo jeho části. Následky se mohou projevit po několika desítkách minut nebo v rámci několika let či desetiletí po vysoké dávce ozáření. Následky můžeme rozdělit:

- stochastické účinky – vznik je náhodný, nepředvídaný,
- deterministické účinky – účinky předvídatelné,
- somatické následky – projev přímo u ozářené osoby,
- genetické následky – vlivem poškozené DNA se projeví až u dětí ozářené osoby,
- časné následky – somatické i deterministické, projeví se po dnech, týdnech až měsících,
- pozdní následky – jsou stochastické, projeví se po letech,
- akutní nemoc z ozáření – poškození krve (dávka 1–6 Gy), poškození střev (>10 Gy), poškození nervového ústrojí s následkem smrti (několik desítek Gy),
- akutní radiační dermatitida – zarudnutí kůže, ztráta ochlupení, vznik puchýřů a vředů,
- další významné účinky – sterilita, zákal oční čočky, chronický zánět kůže, zhoubné nádory, genetické změny a mutace, vývojové vady. (HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 42–45)

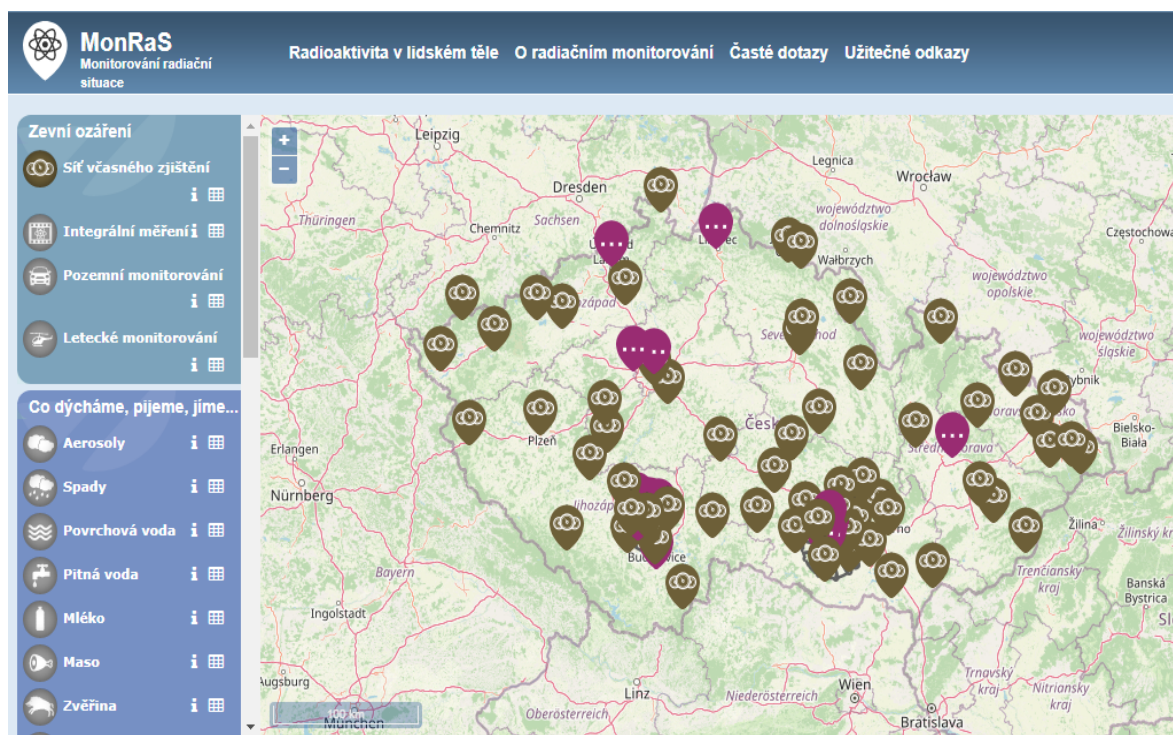
4.5 Detektory IZ

Z hlediska radiační ochrany obsahuje systém zpravidla osobní monitorování (filmový dozimetr, termoluminiscenční detektor, fotoluminiscenční detektor), monitorování pracoviště (integrální, spektrometrické, detektory fotonů, neutronů, beta a gama záření), okolí a výpusť. Důležitou součástí znalosti toho, jaký typ detektoru použít, je mít představu o tom, jak a kde bude použit. Různé aplikace a nastavení vyžadují rozdílné typy detektorů. Přístroje pro detekci záření lze široce rozdělit do několika základních úloh: měření, ochrana a vyhledávání. Nejčastěji používané jsou plynem plněné detektory, scintilátory a polovodičové detektory. Každý z nich má různé silné a slabé stránky. (Mirion Technologies, 2022)

Detektory plněné plynem se rozlišují dle napětí na detektoru na ionizační komory, proporcionální počítače a Geiger-Müllerovy trubice. Scintilační detektory jsou založené na principu vydávání světla, uvolňování fotonů a schopnosti vzniku světelných záblesků v některých materiálech při vystavení ionizujícího záření. Scintilační detektory se používají pro detekci i velmi slabého záření, především záření gama. Polovodičové detektory jsou schopny odolat mnohem vyššímu množství záření než jiné typy detektorů. Polovodiče, jako např. křemík, mají vysokou odolnost vůči elektronickému proudu. Jejich mřížky atomů obsahují elektrony, které se mohou připojit k jinému atomu. (Švec, 2018, s. 49)

5 CELOSTÁTNÍ RADIČNÍ MONITOROVACÍ SÍŤ

Radiační ochrana v jaderných zařízeních je v ČR upravena zákonem č. 263/2016 Sb., atomový zákon, který nahradil dosavadní zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon). Zákon č. 18/1997 Sb., je stále v platnosti a upravuje občanskoprávní odpovědnost za jaderné škody. V roce 2016 vešel v platnost zákon č. 264/2016 Sb., kterým se mění některé zákony v souvislosti s přijetím atomového zákona. Radiační ochrana je dále upravena prováděcí vyhláškou č. 409/2016 Sb., o činnostech zvláště důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, zvláštní odborné způsobilosti a přípravě osoby zajišťující radiační ochranu registranta. (SÚRO, 2022a)



Obrázek 7 – MonRaS: Síť včasného zjištění. (SÚJB, 2022b)

Monitorování radiační situace na území ČR zajišťuje Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) pomocí celostátní Radiační monitorovací sítě. Dále se na této činnosti podílí Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO), Regionální centra SÚJB, provozovatel jaderných elektráren, Ministerstvo obrany (Armáda ČR), Ministerstvo vnitra (HZS ČR, Policie ČR), Ministerstvo financí (Celní správa), Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo životního prostředí (Český hydrometeorologický ústav).

Monitorování se provádí prostřednictvím monitorovacích sítí a podle území se dělí na řídkou a hustou monitorovací síť. Soustavné sledování je realizováno prostředkem MonRaS – **Monitorování Radiační Situace**. Tento nástroj slouží pro shromažďování, posuzování stavu ozáření, vyhodnocování, ukládání, zpracování a zveřejňování dat radiačního monitorování území ČR, zejména od složek radiační monitorovací sítě definovaných ve státní legislativě.

V případě radiační havárie slouží pro rozhodování o opatřeních vedoucích ke snížení nebo odvrácení ozáření. Závazným dokumentem pro osoby podílející se na monitorování radiační situace na území ČR je Národní program monitorování. Dokument stanovuje rozsah zajištění monitorování radiační situace na území ČR, upřesňuje požadavky na předávání dat do datového střediska SÚJB, včetně datových formátů a rozhraní.

Data jsou k dispozici i pro veřejnost jak pro jednotlivé oblasti v republice tak i pro zóny havarijního plánování. Jsou zde uveřejněny odkazy na stránky aktuálních informací o radiační situaci různých zemích Evropy, na území Ruska nebo Japonska. Dostupné jsou výsledky měření vzorků životního prostředí, aktuální dávkový příkon, obsahu radionuklidů v ovzduší, spadech, v určitých druzích potravin, v pitné či povrchové vodě. (SÚJB, 2022b)

Radiační monitorovací síť se skládá ze stálé složky a pohotovostní složky, která je v činnosti v případě havarijního režimu.

Stálé složky:

- síť včasného zjišťování,
- síť termoluminiscenčních dozimetrů,
- mobilní skupiny,
- laboratorní skupiny,
- letecká skupina,
- centrální laboratoř monitorovací sítě,
- měřicí místo kontaminace ovzduší,
- měřicí místo kontaminace potravin,
- měřicí místo kontaminace vod,
- měřicí místo na hraničních přechodech,
- Český hydrometeorologický ústav.

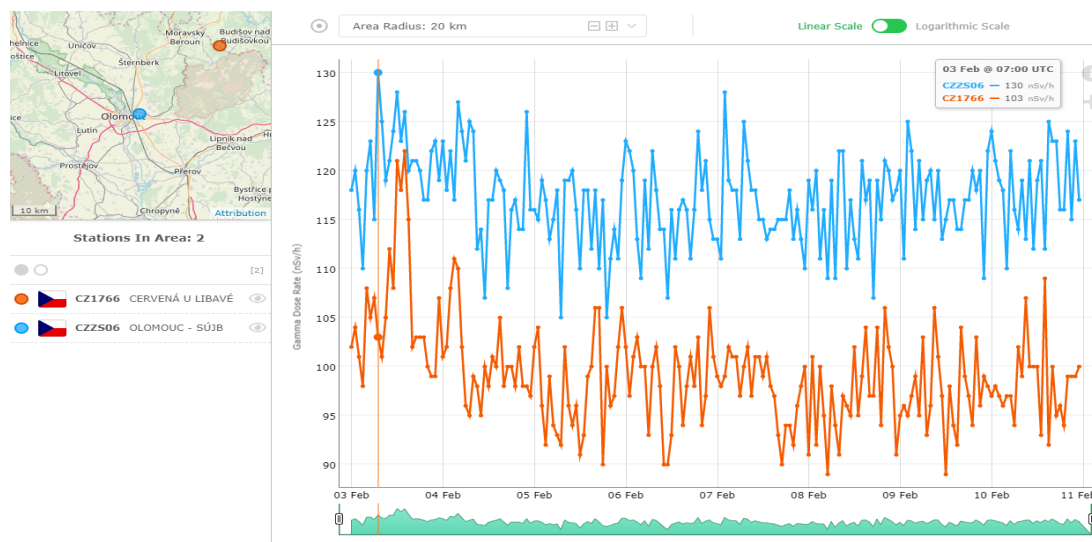
Pohotovostní složky:

- mobilní skupiny,
- laboratorní skupiny,
- letecké prostředky průzkumu,
- měřicí místo na hraničních přechodech,
- měřicí místo na uzávěrách,
- měřicí místo kontaminace potravin,
- měřicí místo kontaminace vod.

(Podzimek, 2022, s. 296)

5.1 Radionuklidy v ovzduší

V České republice se zjišťuje obsah radionuklidů v ovzduší měřením aktivity aerosolů a spadů. V ČR dosahuje běžná úroveň přírodní radiace 100–200 nSv.h⁻¹. Tento dávkový příkon způsobí jedinci přirozenou roční dávku přibližně 1–2 mSv. Odběry aerosolů se provádějí odběrovými zařízeními ve vybraných lokalitách po celém území ČR s vhodným filtrem, kterým je prosáván vzduch rychlostí 40–900 m³.h⁻¹. Filtr s aerosolem je obměňován v týdenních intervalech a následně je spektrometricky posouzena aktivita stěžejních radionuklidů. Spad se sbírá do sběrných nádob umístěných 1–2 m nad zemí, a to po dobu 1 měsíce, poté se provádí měření vzorků polovodičovou spektrometrií gama. (SÚRO, 2022b)



Obrázek 8 – Časová osa monitorování 3.–10. 2. 2023 v Olomouci a Červené u Libavé. (European Commission, 2023)

Stanice jsou zpravidla umístěny na pracovištích SÚJB, Českého hydrometeorologického ústavu, Hasičského záchranného sboru a ve správě Armády České republiky. Odběr aerosolů je prováděn na 10 odběrových místech a odběr spadů na 9 místech. V okolí jaderné elektrárny Dukovany je rozmístěno 6 a v okolí jaderné elektrárny Temelín 7 odběrových míst aerosolů, jejichž provoz zajišťuje ČEZ, a. s. V okolí jaderných elektráren je prováděn odběr spadů u 11 odběrových míst, které obhospodařuje jak ČEZ, a. s., tak i SÚJB. (SÚJB, 2022b)

Všechny subjekty, které monitorují radiační situaci, předávají data z monitorování státnímu podniku DIAMO. Správa úložišť radioaktivních odpadů předává výsledky monitorování jednotlivých úložišť prostřednictvím smluvních laboratoří Ústavu jaderného výzkumu a Státního ústavu radiační ochrany. (SÚJB, 2021, s. 74)

5.2 Síť TL dozimetrů

Síť termoluminiscenčních dozimetrů (TLD) je umístěna ve volném prostranství a je doplněna měřicími místy v přilehlých budovách. TLD síť spočívá ve dvou základních složkách – teritoriální síti a lokálních sítích v okolí JE (jaderných elektráren). Měřenou veličinou je prostorový dávkový ekvivalent záření gama $H(10)$ v jednotkách μSv , které jsou následně přepočteny na průměrné hodnoty příkonu prostorového dávkového ekvivalentu $H'(10)$ v $\text{nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, čtvrtletně pro každé měřicí místo. Výsledky se pohybují v rozmezí $70 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$ až $270 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, což odpovídá variacím přírodního pozadí v ČR. Za celou dobu používání TLD sítě nebylo dosaženo překročení vyšetřovací úrovně, což je $500 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$.



Obrázek 9 – Umístění sondy ve volném prostranství. (foto autor)

Každý rok jsou výsledky monitorování zveřejněny ve Zprávě o monitorování radiační situace na území ČR, která tvoří II. část Zprávy o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochrany. Data z monitorovací sítě jsou přenášena do mezinárodní databáze v rámci programu EURDEP (European Radiological Data Exchange Platform). (SÚRO, 2022c)

5.2.1 Teritoriální síť

Teritoriální síť TLD tvoří celkem 180 stejnoměrně rozmístěných měřících míst na území celé České republiky. Síť je určena k zajištění nepřetržitého monitorování úrovně ionizujícího záření v životním prostředí a k zajištění ochrany obyvatelstva před případnými škodlivými účinky. Termoluminiscenční dozimetry se běžně používají v programech monitorování radiace díky své jednoduchosti, přenosnosti a nízké ceně. SÚRO provádí měření a zpracovává výsledky za pomoci regionálních center, které přepravují dozimetry do měřících míst a z nich.

Měření se provádí formou integrálních měření po dobu tří měsíců, v případě radiační mimořádné události se interval zkracuje. Ve volném prostranství nezastíněném budovami nebo vegetací je situováno 127 měřících míst ve výšce 1 metr nad zemí a ostatních 53 je v budovách, aby bylo možné stanovit účinnost ukrytí obyvatel v případě radiační havárie. (SÚJB, 2022d)

Počet měřících míst sítě TLD provozovaná SÚRO ve spolupráci s Regionálními centry SÚJB:

Severní Čechy	• venku: 17 • uvnitř: 6	celkem: 23
Jižní Čechy	• venku: 18 • uvnitř: 10	celkem: 28
Východní Čechy	• venku: 16 • uvnitř: 5	celkem: 21
Západní Čechy	• venku: 16 • uvnitř: 9	celkem: 25
hl. m. Praha	• venku: 9 • uvnitř: 5	celkem: 14
Severní Morava	• venku: 16 • uvnitř: 5	celkem: 21
Jižní Morava	• venku: 18 • uvnitř: 5	celkem: 23
Česká republika	• venku: 127 • uvnitř: 53	celkem: 180

Obrázek 10 – Struktura a počet míst sítě. (dle SÚRO sestavil autor)

5.2.2 Lokální síť

Měřící místa lokálních TLD sítí jsou rozmístěna v okolí JE Dukovany a JE Temelín. Provoz těchto lokálních sítí zajišťuje SÚRO ve spolupráci s Regionálními centry SÚJB. Mimo sítí v rámci rezortu SÚJB jsou Laboratořemi radiační kontroly okolí JE provozovány i sítě TLD. Lokální monitorování v okolí JE Dukovany má 15 měřících míst a v okolí JE Temelín má 11 měřících míst. Dozimetry v lokální síti JE Dukovany jsou umístěny 3 m nad zemí. Měření je realizováno formou integrálního měření po dobu tří měsíců a v případě potřeby se může interval zkrátit. (SÚRO, 2022c)

5.3 Současný stav monitorování IZ

Měřicí a odběrová zařízení, se kterými se pracuje při monitorování ionizujícího záření na území ČR, musí splňovat požadavky dle Vyhlášky č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace.

Všechna zařízení je třeba udržovat v dobrém technickém stavu, provádět kontrolu všech kritérií a kalibraci, aby všechna zařízení, běžně používaná pouze pro nácviky, byla plně použitelná a funkční i pro havarijní monitorování. Měřicí a odběrová zařízení používána pro normální i havarijní monitorování jsou shodná.



Obrázek 11 – Postupy pro monitorování radiační situace. (dle SÚJB, 2018 sestavil autor)

Hlavním cílem monitorování je sledování radiační situace na území ČR za všech expozičních situací. Informace z monitorování jsou uplatňována k posouzení ozáření obyvatelstva a za nehodové expoziční situace slouží k upřesnění radiační situace v postižené oblasti a k následnému zavádění ochranných opatření.

O výsledcích monitorování SÚJB informuje vládu České republiky, Evropskou komisi a výsledky jsou dostupné i pro obyvatelstvo. K dosažení cílů monitorování je zapotřebí dostatečný počet monitorovacích míst, použití vhodných postupů měření k získání komplexních údajů o radiační situaci, měřicí a odběrová zařízení udržovat v dobrém technickém stavu, plánování a provádění obnovy měřicích a odběrových zařízení, prohlubování znalostí osob provádějících monitorování radiační situace, udržovat a vyvíjet systémy a prostředky datového střediska, udržovat připravenost osob a zařízení k monitorování za nehodové expoziční situace, provádět havarijní cvičení, nácviky a porovnávací měření. (SÚJB, 2018)

Dílčí závěr

Teoretická část obsahuje základní informace z oblasti ochrany obyvatelstva na základě dostupných literárních zdrojů. Definuje mimořádné události, které mohou nastat neočekávaně, včetně vzniku následných krizových situací. Práce je zaměřena na radiační havárie a pravidelné sledování úrovně ionizujícího záření v okolním prostředí. Jsou zde blíže definovány zdroje ionizujícího záření, jakou cestou mohou být obyvatelé ozařováni, včetně limitů pro ně stanovené a včetně limitů určené pro pracovníky s otevřenými radionuklidovými zdroji. Závěr teoretické části zahrnuje monitorování radiační situace na území České republiky.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 MĚŘENÍ POMOCÍ VYBRANÝCH SOND

Využití přístrojů a sond pro měření dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu v systému radiačního monitorování v České republice je důležitým aspektem zajištění ochrany obyvatelstva před ionizujícím zářením. Existuje několik různých typů přístrojů a sond, které lze k tomuto účelu použít, přičemž každý z nich má své výhody a nevýhody. Vhodnost těchto přístrojů pro použití v České republice bude záviset na řadě faktorů, včetně druhu měřeného záření, citlivosti a přesnosti přístroje, ceny a snadnosti použití přístroje. Přístroje dělíme dle účelu měření na:

- radiometry – slouží k určení úrovně radioaktivity v dané oblasti,
- spektrometry – měří energii ionizujícího záření a druhy ionizujícího záření.

Radiometrické přístroje a metody měření jsou založeny na charakteristikách ionizujícího záření a jeho působení na hmotné prostředí. Z naměřeného záření je možné kvalitativně a kvantitativně posoudit zdroj záření, pole záření a jeho účinek na okolí. Detektor je vstupem pro měřicí přístroje nebo snímače záření, který transformuje vlastnosti záření, obvykle energii, na měřitelnou odezvu, zpravidla elektrický signál nebo zčernání filmu. Měřicí přístroje zpracovávají a vyhodnocují odezvu z detektoru a poskytují kvalitativní a kvantitativní hodnocení.

Termoluminiscenční dozimetr (dále jen TLD)

TLD jsou malá pasivní zařízení, která se používají k měření ionizujícího záření tím, že zachycují energii záření a přeměňují ji na světlo. Záření na předmět způsobí zachycení elektronů v defektech krystalové mřížky materiálu. Při zahřátí se tyto zachycené elektrony uvolní a vyzařují světlo, které TLD měří a určuje množství přijatého záření. Toto světlo je „uloženo“ v TLD pro pozdější odečtení, což umožňuje určit intenzitu ionizujícího záření. TLD se běžně používají díky své jednoduchosti, přenosnosti a nízké ceně v osobní dozimetrii.

Ionizační komora

Komora naplněná plynem je vystavena záření, které ionizuje částice plynu a vytváří elektrický proud. Velikost proudu je úměrná množství přítomného záření, což umožňuje měření dávky záření. Ionizační komory jsou citlivější a přesnější než TLD, používají se v lékařské radioterapii a jaderných elektrárnách. Jsou také dražší, neboť ke svému chodu potřebují zdroj energie. (Švec, 2018, s. 46–54)

Scintilační detektor

Tento přístroj používá k detekci ionizujícího záření scintilační krystal. Při průchodu záření krystalem vzniká světlo. Světlo je pak pomocí fotonásobiče převedeno na elektrický signál a zaznamenáno. Scintilační detektory jsou vysoce citlivé a přesné, používají se v lékařském zobrazování, výzkumu jaderné fyziky a monitorování životního prostředí, ale jsou také složitější a dražší než TLD a ionizační komory.

Geiger-Müllerův počítač

GM detektor se skládá z válcové trubice naplněné plynem, obvykle směsí argonu a malého množství zhasacího plynu, jako je neon nebo helium. Plášť je z kovu nebo umělé hmoty, katoda je tvořena válcem z tenkého plechu, anodu tvoří tenký drátek, který je napnutý v ose trubice. Když do trubice vstoupí ionizující záření, ionizuje atomy plynu a vytvoří lavinu elektronů, která vyvolá puls elektrického proudu, jenž je detekován anodou. Citlivost GM detektoru závisí na použitém napětí a směsi plynů. Při nízkých napětích je detektor na záření necitlivý, ale s rostoucím napětím se stává citlivějším. Při vysokých napětích však může dojít k nasycení detektoru, což snižuje jeho citlivost. GM detektory se běžně používají při monitorování životního prostředí, v lékařské diagnostice a v jaderných elektrárnách. (Švec, 2018, s. 48–50)

Polovodičový detektor

Polovodičový detektor se používá v medicíně ke zobrazení RTG záření, neboť má velmi dobrou energetickou rozlišovací schopnost, zpravidla lepší než 1 keV, což je 30× lepší než scintilační detektor. Polovodičový detektor se podobá ionizační komoře. Skládá se z tenkého, vysoce čistého materiálu, obvykle z křemíku nebo germania, který je napájen napětím. Když ionizující záření vstoupí do materiálu, vytvoří páry elektron-díra, které se pohybují v elektrickém poli a vytvářejí elektrický signál, který je detekován elektrodami připojenými k polovodiči. Elektrickým obvodem projde krátký proudový impuls. Amplituda impulsu je úměrná energii detekovaného záření. Polovodičové detektory mají oproti jiným detektorům záření několik výhod, například vysoké energetické rozlišení, nízký šum, rychlou odezvu a kompaktní rozměry. Mají však také některá omezení, jako je jejich citlivost na změny teploty, náchylnost k poškození zářením a cena.


Při provádění měření se sonda obvykle umístí do zájmové oblasti a nechá se po určitou dobu detekovat záření. Zjištěný signál je poté analyzován přístrojem pro detekci záření, který poskytuje měření dávkového příkonu nebo příkonu dávkového ekvivalentu nebo dávkový ekvivalent jako dávky ozáření osob. (Švec, 2018, s. 46–54)

6.1 Popis vybraných sond a přístroje

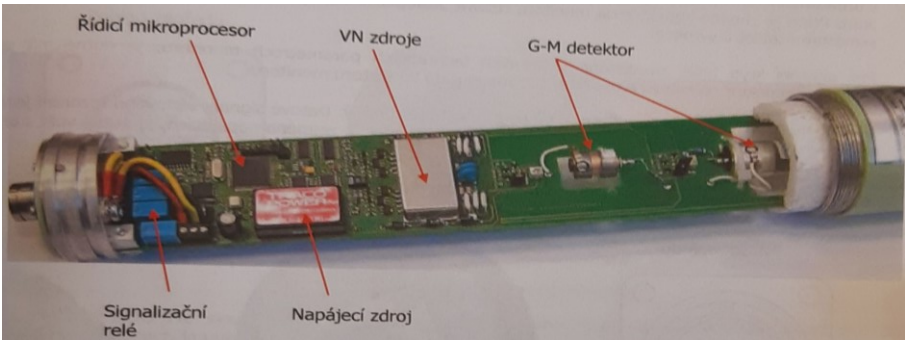
K provedení měření dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu byla zvolena následující měřidla, která splňují požadavky mezinárodní normy IEC 60532 a mají platné certifikace ČSN EN 55022, ČSN EN 6100-6-2, ČSN EN 61326-1:

- sonda – monitor dávkového příkonu MDG-02,
- sonda – monitor příkonu dávkového ekvivalentu MDG-07e,
- přístroj – nespektrometrické měřidlo aktivit a dávek v oblasti radiační ochrany a havarijního měření DC-3E-98.


Tabulka 2 – Popis MDG-02. (dle VF, 2009a vypracoval autor, foto autor)

Monitor dávkového příkonu	MDG-02
<p>Monitor dávkového příkonu záření gama v prostředí s dávkovými příkony od přirozeného pozadí až do $100 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Jako detektor je použita GM trubice, impulsy jsou vyhodnocovány mikroprocesorem. Lze jej použít jako součást monitorovacího systému nebo s lokální zobrazovací jednotkou jako autonomní monitor.</p>	

Tabulka 3 – Přehledové konstrukční uspořádání MDG-07e. (VF, 2009b)

Přehledové konstrukční uspořádání


Tabulka 4 – Popis MDG-07e. (dle VF, 2009b vypracoval autor, foto autor)

Monitor příkonu dávkového ekvivalentu	MDG-07e
<p>Je určen pro měření od velmi nízkých hodnot až do $1 \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, tj. do vyšších hodnot příkonu dávkového ekvivalentu gama záření. Je možné jej použít ve vnitřním i venkovním prostředí. Má dvě nastavitelné signalizační úrovně, lokální cyklickou paměť a je možné jej připojit přímo k signalizační jednotce nebo k řídicímu systému. Jeho výhodou je možnost různých výstupů, může být součástí rozsáhlých monitorovacích systémů, které využívají různá rozhraní a komunikační protokoly.</p>	

Tabulka 5 – Popis DC-3E-98. (dle Ministerstvo obrany ČR vypracoval autor, foto autor)

Nespektrometrické měřidlo aktivit a dávek v oblasti radiační ochrany a havar. měření	DC-3E-98
<p>Elektronické zařízení – radiometr se skládá z přenosného přístroje a ze sondy. Používá se v rozsahu $0-10 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ ke kvantifikaci dávkových příkonů záření gama, identifikaci záření beta, stanovení povrchové aktivity na kontaminovaných površích a měření měrné aktivity kapalin a sypkých materiálů. Pro dlouhodobější měření se používá časový interval měření. Vyhodnocuje měření v 1sec. intervalech a přítomnost zdroje záření indikuje zvukovým signálem.</p>	

V tabulce 6 jsou seřazeny technické parametry sond a přístroje. Dále je zde zobrazen rozsah dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu, který jsou schopné změřit a další vlastnosti měřidel.

Tabulka 6 – Technické parametry. (dle VF, 2009a; VF, 2009b; Ministerstvo obrany ČR vypracoval autor)

	MDG-02	MDG-07e	DC-3E-98
Měřicí rozsah	od 0,1 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ do 100 $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$	od 0,02 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ do 1 $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	0,01 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ do 10 $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ gama záření 0 do 30 000 $\text{Bq}\cdot(\text{cm}^2)^{-1}$ plošná aktivita
Typ detektoru	GM-čítač	2× GM-čítač	GM-čítač SBT-10
Rozsah pracovních teplot	-25 °C až +50 °C	-25 °C až +50 °C	-10 °C až +40 °C
Rozměry	ø 65 × 275 mm	ø 65 × 562 mm	40 × 76 × 42 mm
Napájení	24 V	24 V	monočlánek 1,5 V
Hmotnost	0,7 kg	1,2 kg	0,47 kg přístroj bez akumulátorů a 0,89 kg sonda

6.2 Hlavní etalon

V oblasti měřidel pro atomovou a jadernou fyziku jsou přesnost a preciznost měřících přístrojů rozhodující pro spolehlivé a korektní výsledky. Aby byla zajištěna přesnost a spolehlivost měřících přístrojů, musí být kalibrovány a ověřovány v autorizovaném metrologickém středisku. Pro tuto bakalářskou práci byl vybrán etalon, jehož zřizovatelem je stát a stará se o jeho udržování. Péče o státní etalony zakotvena a definována zákonem č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů, a technické zabezpečení je obvykle svěřeno národnímu metrologickému institutu. Zákon dále stanovuje, že státní etalony v ČR schvaluje Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, který též stanoví způsob jejich tvorby, uchovávání a používání. (ČSFR, 1990, s. 1882–1888)

Etalon provádějící měření má následující dispozice: Hlavní etalon ionizujícího záření MV GŘ HZS ČR, kolimované svazky gama ^{137}Cs , navázáno na státní etalon ČMI Oblastní inspektorát, etalony plošné aktivity (beta záření izotopu ^{90}Sr) ověřeny ČMI Oblastním inspektorátem Praha. V etalonu je používáno celkem 5 různě silných cesiových zdrojů záření gama. Protože je etalon osazen silnými zdroji ionizujícího záření, je jeho zařízení z bezpečnostních důvodů rozmístěno do dvou místností: ozařovny a místnosti operátora etalonu.

Ochrana pracovníků před účinky ionizujícího záření je zajištěna tímto komplexem opatření:

- ozařovací systém je uzavřen v ozařovně, což je železobetonová komora s 1,1 metr tlustými stěnami a stropem,
- ozařovač OG-8 je konstruován tak, že když je uzavřen, jsou v něm zářiče bezpečně ukryty a na jeho povrchu intenzita záření nepřekračuje přísně stanovené limity SÚJB, pravidelným monitorováním prostředí se hodnoty blíží hodnotám pozadí a kosmickému záření,
- celý systém ozařovače je řízen 2 počítači a 3 podpůrnými procesorovými jednotkami,
- několikaúrovňový bezpečnostní systém, který zajišťuje ochranu obsluhy před ozářením.

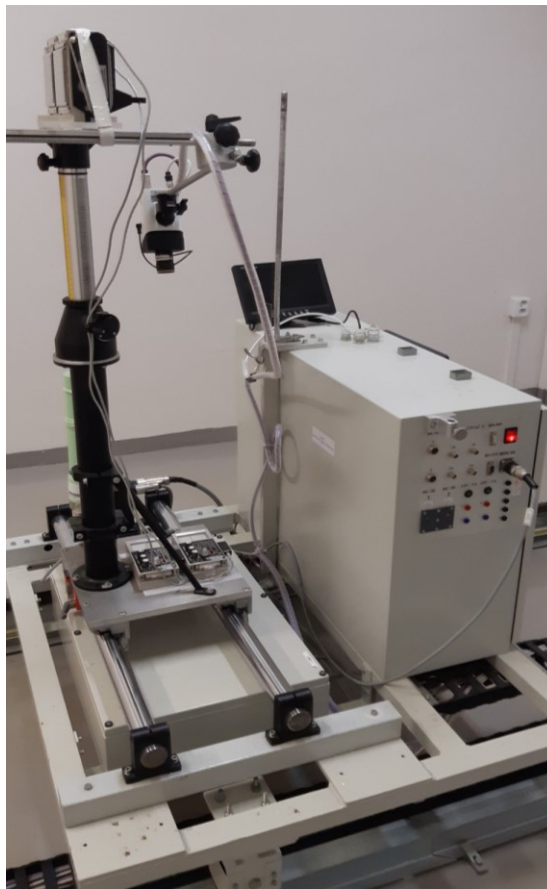


Obrázek 12 – Ozařovač OG-8 v autorizovaném metrologickém středisku. (foto autor)

6.3 Postup měření

Proces měření přístrojů zahrnoval několik kroků. Prvním krokem byl výběr sond a přístroje, které budou měřeny a vhodného referenčního etalonu dle druhu ověřovaného měřicího přístroje, či sondy. Měření přístrojů bylo provedeno v autorizovaném metrologickém středisku (dále jen AMS) pro ověřování stanovených měřidel v oboru měřidel atomové a jaderné fyziky s přidělenou úřední značkou K 96. Měření prováděl zaměstnanec AMS – operátor hlavního etalonu ionizujícího záření.

Druhým krokem byla příprava etalonu a měřicího přístroje k ověření. Hlavní etalon a měřicí přístroje byly zkontrolovány, zda nemají vady nebo poškození, které by mohly ovlivnit jejich funkci. Poté byl měřicí přístroj vyčištěn a seřízen do původního nastavení. Byl připraven ozařovač OG-8 (obrázek 12) dle provozního předpisu, kalibrační lavice KL3D-50 byla nastavena do referenčního bodu a upínací systém byl upraven. V počítači byl otevřen modul DaRS, přístroj byl zadán do databáze programu DaRS. Hlavní panel byl zkontrolován a k dosažení pracovního režimu všech zařízení bylo potřeba počkat 15 minut.



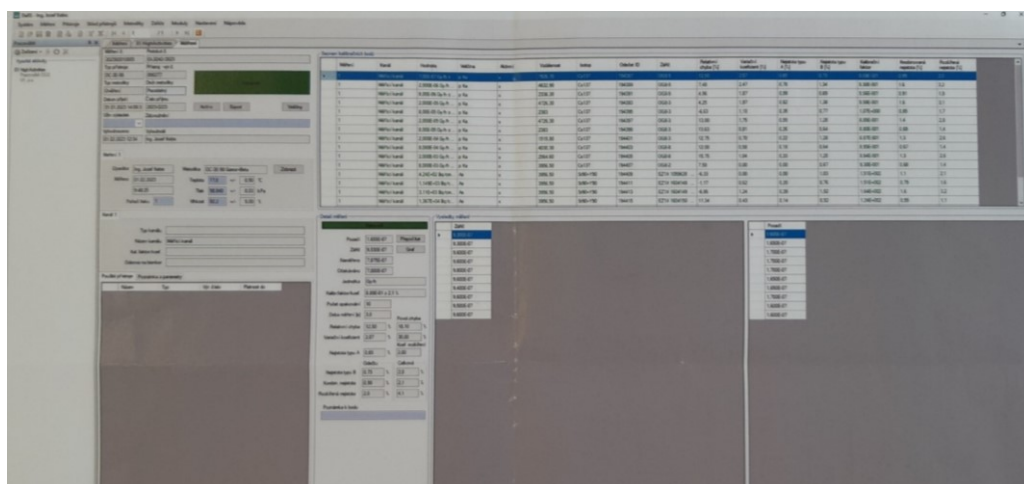
Obrázek 13 – Pohled na zařízení měřicího vozíku. (foto autor)

Třetím krokem bylo provedení měření. Měřidlo bylo umístěno do kontrolovaného prostředí (viz obrázek 13), aby se minimalizovaly vnější faktory, které mohou ovlivnit měření a bylo umístěno přesně do osy vyzařovaného svazku tak, aby bylo natočeno svým referenčními body ke kolimátoru. Vyzařovaný úhel je 15° . Měřidlo bylo zajištěné proti posunutí anebo vychýlení z měřeného směru a připojené kabelem. Bylo zapnuto napájecí napětí. Přístroj byl prověřen pomocí laseru, aby byly detektory dozimetru ve správné výšce vůči svazku záření. V počítači bylo připojené měřidlo vyhledáno, byly zadány parametry přístroje a zkontrolováno, zda se načetlo. Tímto způsobem byla připravena všechna tři měřidla.

Metrologické středisko poté provedlo sérii měření, které již proběhlo automaticky. Bylo využito základního principu atomové fyziky a to, že intenzita záření bodového zdroje klesá se zvyšující se vzdáleností od tohoto zdroje. Na tomto principu pracoval horizontální ozařovací systém, který vytváří homogenní svazek ionizujícího záření gama. Do tohoto svazku byl umístěn testovaný přístroj. Velikost dávkového příkonu byla nastavena volbou jednoho z pěti různě silných zářičů a vzdáleností. Řídicí systém etalonu při zadání určité hodnoty dávkového příkonu zvolil příslušný zářič a vypočítal odpovídající vzdálenost.

Série měření se skládalo z 10 měření, kdy se každých 10 sekund odečetla jedna hodnota měření. Při nejvyšších hodnotách byla provedena série pouze 3 měření v kratších intervalech, a to každých 5 sekund z toho důvodu, aby nedošlo ke zbytečnému namáhání detektoru vysokými příkony ionizujícího záření. Na konci každého měření se ukázalo hlášení o ukončení. Výsledkem byl protokol Záznam z měření. Prvním zkoumaným přístrojem byl monitor dávkového příkonu MDG-02. Pro potřeby rozlišení bylo nazváno „měření č. 1“. Druhým byl monitor příkonu dávkového ekvivalentu MDG-07e, tedy „měření č. 2“ a třetím byl radiometr DC-3E-8, nazváno „měření č. 3“.

Čtvrtým krokem byla analýza měření a výpočet kalibračních koeficientů. Kalibrační koeficienty se používají k přepočtu naměřených hodnot přístroje na skutečné hodnoty a vypočítají se pomocí statistických metod s přihlédnutím k nejistotám spojeným s měřením. Výpočet nejistot je prováděno pomocí softwarového vybavení aplikací DaRS, viz obrázek 14.



Obrázek 14 – Výstup z měření, software DaRS. (foto autor)

Tento software pořizuje, ukládá, zobrazuje a spravuje všechna data a řídí chod kalibrační laboratoře. Poskytuje plně automatizované řízení technologie ozařovny včetně zabezpečovacího systému, řídí kalibraci, verifikaci dle předem definovaných postupů, zaznamenává kalibrovaná zařízení, umožňuje tisk protokolů z měření a certifikátů. (VF, 2022)

7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ METODOU KOMPARACE

Veřejná vyhláška Českého metrologického institutu ukládá opatřením obecné povahy vymezení metrologických a technických požadavků na stanovená měřidla, včetně metod zkoušení pro ověřování měřidel, značení měřidel, proces schvalování typů měřidel, jejich prvotní a následná ověření.

Stanovené podmínky a požadavky dle Opatření obecné povahy č. 0111-OOP-C079-16 pro měření sondy **MDG-02** a současně pro **DC-3E-98**:

- relativní chyba naměřené hodnoty vzhledem k referenčnímu záření pro příslušný referenční radionuklid nesmí přesáhnout ± 25 % přes celý efektivní měřicí rozsah,
- odezva na příkon plošné emise musí být v mezích ± 25 % hodnoty specifikované výrobcem,
- rozsah teploty pro podmínky měření je v rozmezí 18–22 °C,
- rozsah relativní vlhkosti vzduchu musí být 40 % až 85 %, přičemž rozdíl naměřené hodnoty při dolní mezi rozsahu relativní vlhkosti 40 % a při horní mezi rozsahu relativní vlhkosti 85 % musí být menší než $\pm 7,5$ %.

Stanovené podmínky a požadavky dle Opatření obecné povahy č. 0111-OOP-C081-16 pro měření sondy **MDG-07e**:

- relativní odezva měřidla při standardních podmínkách nesmí v celém efektivním měřicím rozsahu překročit -15 % až $+22$ %,
- je-li měřidlo vystaveno příkonu dávkového ekvivalentu, musí do 10 sekund indikovat alespoň 91 % příslušného nárůstu dávkového ekvivalentu,
- změny odezvy měřidla způsobené změnou atmosférického tlaku v rozsahu od 70,0 kPa do 106,0 kPa nesmí překročit -9 % až $+11$ % odezvy měřidla za standardních zkušebních podmínek,
- rozsah teploty pro podmínky měření je v rozmezí 18–22 °C,
- relativní vlhkost prostředí v rozsahu až do 85 % nesmí překročit -9 % až $+11$ % odezvy měřidla za standardních zkušebních podmínek.

7.1 Měření č. 1

Měření dávkového příkonu proběhlo na typu přístroje MDG-02, byl použit ozařovač OG-8, izotop ^{137}Cs . Základem je měření průměrné četnosti impulsů z G-M detektoru. Měření bylo prováděno ve zkušebních bodech $1 \mu\text{Gy.h}^{-1}$, $7 \mu\text{Gy.h}^{-1}$, $70 \mu\text{Gy.h}^{-1}$, $700 \mu\text{Gy.h}^{-1}$, 7mGy.h^{-1} , 70mGy.h^{-1} za podmínek:

- teplota $19,1 \text{ }^\circ\text{C}$,
- tlak $99,6 \text{ kPa}$,
- vlhkost $41,1 \%$.

Výsledek měření:

Tabulka 7 – Výsledky měření MDG-02. (autor)

Etalon Nuklid	Měřená veličina	Konvenčně pravá hodnota Nejistota	Naměřená hodnota Nejistota	Kalibrační faktor/ koeficient Nejistota
OG8-5 ^{137}Cs	p Ka	$1,00\text{E}^{-06} \text{ Gy.h}^{-1}$ $3,12\text{E}^{-08} \text{ Gy.h}^{-1}$ 3,1 %	$1,00\text{E}^{-06} \text{ Gy.h}^{-1}$ 1,3 % $1,35\text{E}^{-08} \text{ Gy.h}^{-1}$	$9,99\text{E}^{-01}$ 3,4 % $3,39\text{E}^{-02}$
OG8-5 ^{137}Cs	p Ka	$7,00\text{E}^{-06} \text{ Gy.h}^{-1}$ $2,18\text{E}^{-07} \text{ Gy.h}^{-1}$ 3,1 %	$6,92\text{E}^{-06} \text{ Gy.h}^{-1}$ 1,0 % $7,07\text{E}^{-08} \text{ Gy.h}^{-1}$	$1,01\text{E}^{+00}$ 3,3 % $3,32\text{E}^{-02}$
OG8-3 ^{137}Cs	p Ka	$7,00\text{E}^{-05} \text{ Gy.h}^{-1}$ $2,04\text{E}^{-06} \text{ Gy.h}^{-1}$ 2,9 %	$6,83\text{E}^{-05} \text{ Gy.h}^{-1}$ 0,7 % $4,92\text{E}^{-07} \text{ Gy.h}^{-1}$	$1,02\text{E}^{+00}$ 3,0 % $3,08\text{E}^{-02}$
OG8-8 ^{137}Cs	p Ka	$7,00\text{E}^{-04} \text{ Gy.h}^{-1}$ $1,97\text{E}^{-05} \text{ Gy.h}^{-1}$ 2,8 %	$6,78\text{E}^{-04} \text{ Gy.h}^{-1}$ 0,1 % $9,41\text{E}^{-07} \text{ Gy.h}^{-1}$	$1,03\text{E}^{+00}$ 2,8 % $2,91\text{E}^{-02}$
OG8-2 ^{137}Cs	p Ka	$7,00\text{E}^{-03} \text{ Gy.h}^{-1}$ $1,97\text{E}^{-04} \text{ Gy.h}^{-1}$ 2,8 %	$6,96\text{E}^{-03} \text{ Gy.h}^{-1}$ 0,0 % $3,17\text{E}^{-06} \text{ Gy.h}^{-1}$	$1,01\text{E}^{+00}$ 2,8 % $2,83\text{E}^{-02}$
OG8-2 ^{137}Cs	p Ka	$7,00\text{E}^{-02} \text{ Gy.h}^{-1}$ $1,98\text{E}^{-03} \text{ Gy.h}^{-1}$ 2,8 %	$6,82\text{E}^{-02} \text{ Gy.h}^{-1}$ 0,0 %	$1,03\text{E}^{+00}$ 2,8 % $2,83\text{E}^{-02}$

Během měření ukazovala sonda měnící se hodnoty, ale v rámci povolené odchylky hodnot měření. Vyhodnocování měření četnosti se provádí jednou za sekundu. Na základě změřené četnosti impulsů se vypočítává dávkový příkon kerma, na základě kalibrační křivky uložené v paměti monitoru MDG-02. Stanovuje se závislost četností impulsů na dávkovém příkonu v řadě bodů vhodně rozmístěných v celém měřicím rozsahu monitoru. Výstupem z měření příkonu kermy ve vzduchu byla tabulka s údaji měření v jednotlivých zkušebních bodech, včetně průměrné naměřené hodnoty v daném bodě měření, relativní chyby, variačního koeficientu a kombinované nejistoty.

7.2 Měření č. 2

Měření příkonu dávkového ekvivalentu proběhlo na typu přístroje MDG-07e, byl použit ozařovač OG-8, izotop ^{137}Cs a bylo prováděno ve zkušebních bodech $1 \mu\text{Sv.h}^{-1}$, $7 \mu\text{Sv.h}^{-1}$, $70 \mu\text{Sv.h}^{-1}$, $700 \mu\text{Sv.h}^{-1}$, 7mSv.h^{-1} , 70mSv.h^{-1} , 700mSv.h^{-1} za podmínek:

- teplota $18,1 \text{ }^\circ\text{C}$,
- tlak 99 kPa ,
- vlhkost $52,9 \%$.

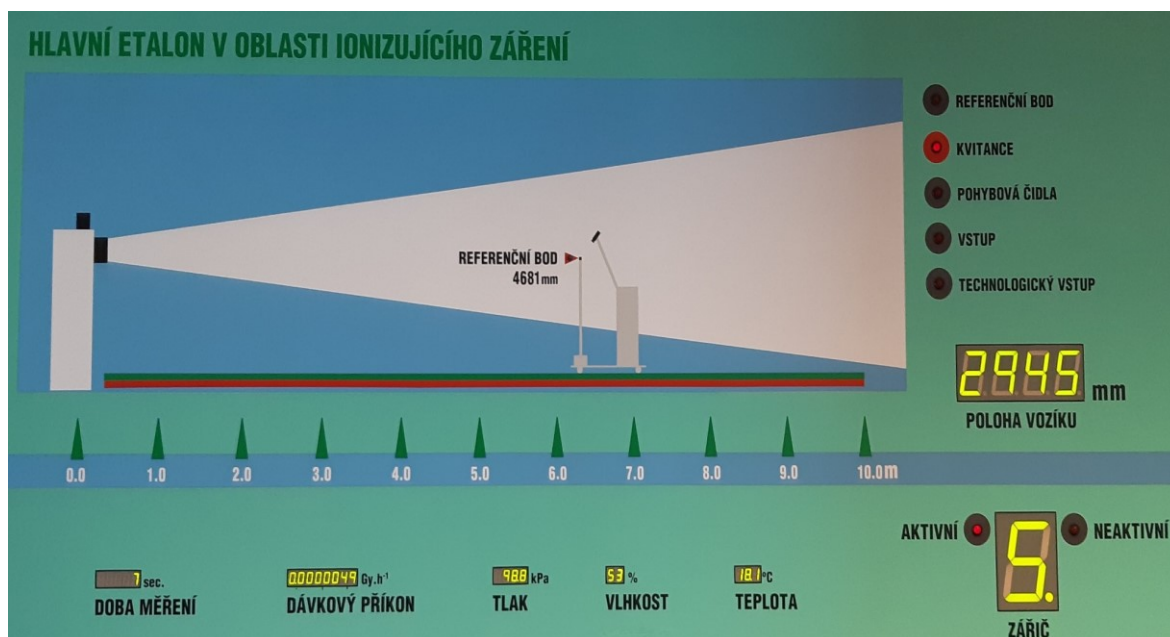
Výsledek měření:

Tabulka 8 – Výsledky měření MDG-07e. (autor)

Etalon Nuklid	Měřená veličina	Konvenčně pravá hodnota Nejistota	Naměřená hodnota Nejistota	Kalibrační faktor/ koeficient Nejistota
OG8-5 ^{137}Cs	p H*(10)	$1,00\text{E}^{-06} \text{ Sv.h}^{-1}$ 3,5 % $3,51\text{E}^{-08} \text{ Sv.h}^{-1}$	$9,45\text{E}^{-07} \text{ Sv.h}^{-1}$ 0,8 % $7,73\text{E}^{-09} \text{ Sv.h}^{-1}$	$1,06\text{E}^{+00}$ 3,6 % $3,81\text{E}^{-02}$
OG8-5 ^{137}Cs	p H*(10)	$7,00\text{E}^{-06} \text{ Sv.h}^{-1}$ 3,5 % $2,46\text{E}^{-07} \text{ Sv.h}^{-1}$	$6,28\text{E}^{-06} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,6 % $1,03\text{E}^{-07} \text{ Sv.h}^{-1}$	$1,12\text{E}^{+00}$ 3,9 % $4,32\text{E}^{-02}$
OG8-3 ^{137}Cs	p H*(10)	$7,00\text{E}^{-05} \text{ Sv.h}^{-1}$ 2,6 % $1,83\text{E}^{-06} \text{ Sv.h}^{-1}$	$6,04\text{E}^{-05} \text{ Sv.h}^{-1}$ 0,8 % $5,10\text{E}^{-07} \text{ Sv.h}^{-1}$	$1,16\text{E}^{+00}$ 2,7 % $3,18\text{E}^{-02}$
OG8-8 ^{137}Cs	p H*(10)	$7,00\text{E}^{-04} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,9 % $1,34\text{E}^{-05} \text{ Sv.h}^{-1}$	$6,54\text{E}^{-04} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,2 % $7,58\text{E}^{-06} \text{ Sv.h}^{-1}$	$1,07\text{E}^{+00}$ 2,2 % $2,40\text{E}^{-02}$
OG8-2 ^{137}Cs	p H*(10)	$7,00\text{E}^{-03} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,7 % $1,20\text{E}^{-04} \text{ Sv.h}^{-1}$	$6,65\text{E}^{-03} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,0 % $6,81\text{E}^{-05} \text{ Sv.h}^{-1}$	$1,05\text{E}^{+00}$ 2,0 % $2,10\text{E}^{-02}$
OG8-2 ^{137}Cs	p H*(10)	$7,00\text{E}^{-02} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,7 % $1,21\text{E}^{-03} \text{ Sv.h}^{-1}$	$5,77\text{E}^{-02} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,7 % $1,01\text{E}^{-03} \text{ Sv.h}^{-1}$	$1,21\text{E}^{+00}$ 2,5 % $2,98\text{E}^{-02}$
OG8-1 ^{137}Cs	p H*(10)	$7,00\text{E}^{-02} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,7 % $1,20\text{E}^{-02} \text{ Sv.h}^{-1}$	$5,85\text{E}^{-01} \text{ Sv.h}^{-1}$ 1,7 %	$1,20\text{E}^{+00}$ 2,5 % $2,98\text{E}^{-02}$

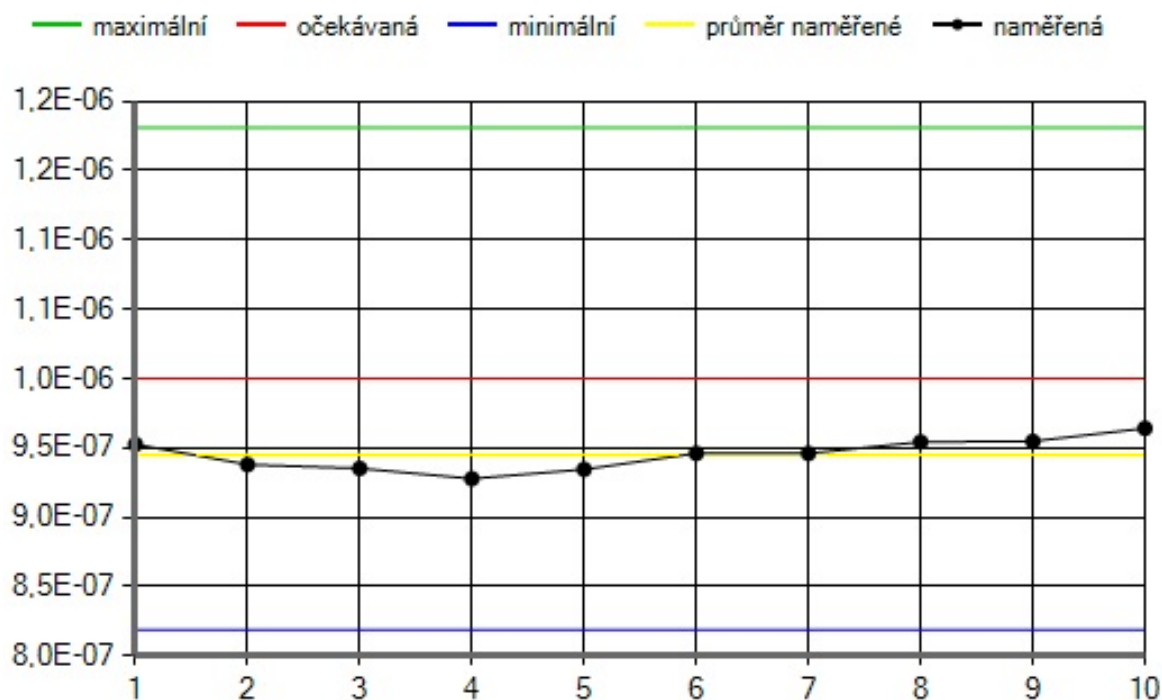
Během měření ukazovala sonda měnící se hodnoty, ale v rámci povolené odchylky hodnot měření. Měřené hodnoty byly předávány do nadřazeného systému přes rozhraní RS-485. Sonda byla k nadřazenému systému připojena pomocí 12pinového konektoru, kterým byly přiváděny vstupní a výstupní signály. Výstupem z měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu byla tabulka s údaji měření v jednotlivých zkušebních bodech, včetně průměrné naměřené hodnoty v daném bodě měření, relativní chyby, variačního koeficientu a kombinované nejistoty.

V místnosti operátora etalonu je umístěn panel hlavního etalonu v oblasti ionizujícího záření (obrázek 15), který zobrazuje jednotlivé parametry měření.



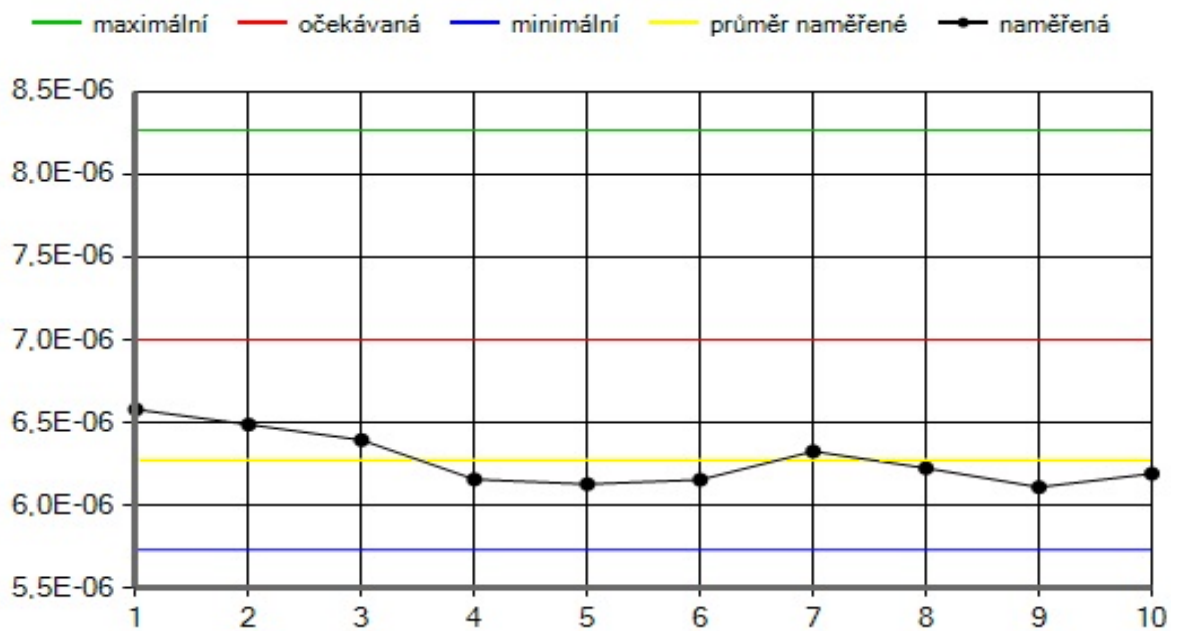
Obrázek 15 – Panel hlavního etalonu při prováděném měření. (foto autor)

Na grafech jsou znázorněny přesné hodnoty měření v jednotlivých měřeních v každé vzdálenosti od ozařovače. Je zde zobrazeno maximum a minimum měřícího rozsahu, očekávané měření, výsledné měření a žlutě znázorněný průměr naměřených hodnot.



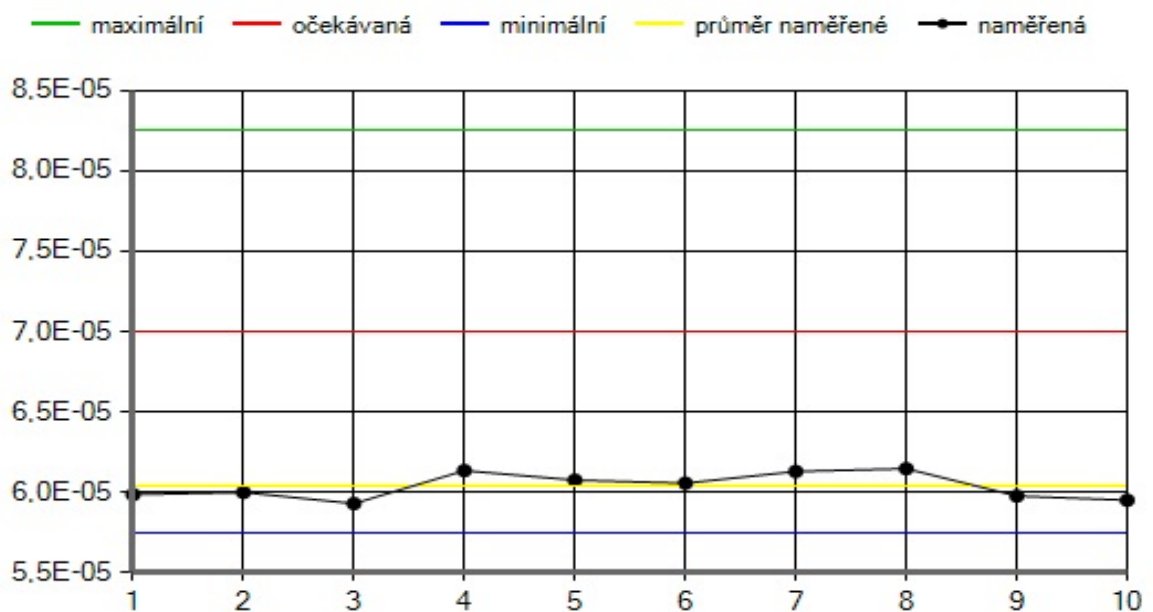
Obrázek 16 – Graf ve zkušebním bodě $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)

Graf (obrázek 17) znázorňuje hodnoty získané měřením ve vzdálenosti 5,85 m od ozařovače. Naměřené hodnoty jsou blíže určené veličině.



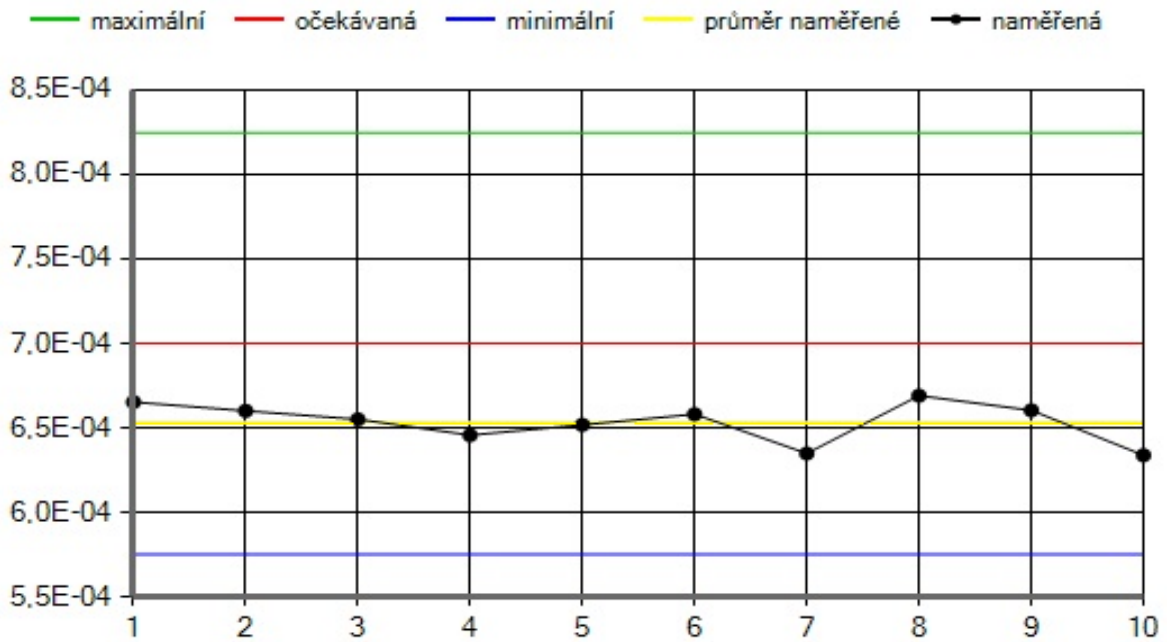
Obrázek 17 – Graf ve zkušebním bodě 7 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)

Graf (obrázek 18) zobrazuje hodnoty získané měřením ve vzdálenosti 4,72 m od ozařovače. Je zde patrné, že naměřené hodnoty jsou velmi blízko minimálnímu intervalu měření.



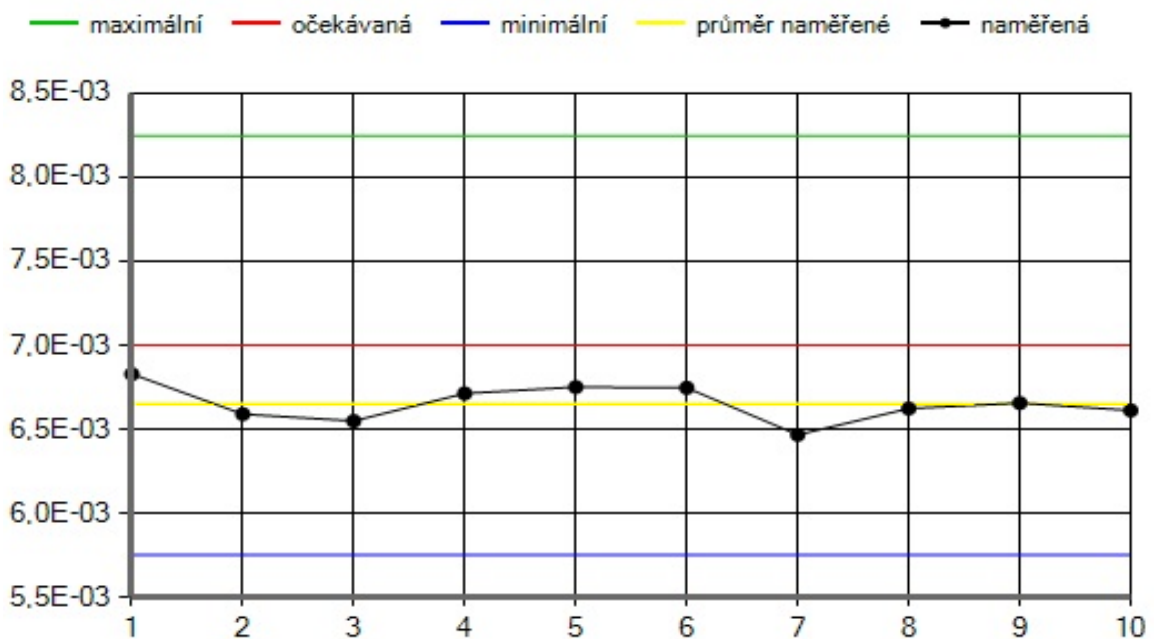
Obrázek 18 – Graf ve zkušebním bodě 70 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)

Obrázek 19 znázorňuje graf s hodnoty získanými měření ve vzdálenosti 3,76 m od ozařovače. Naměřené hodnoty jsou velmi blízko očekávané hodnotě.



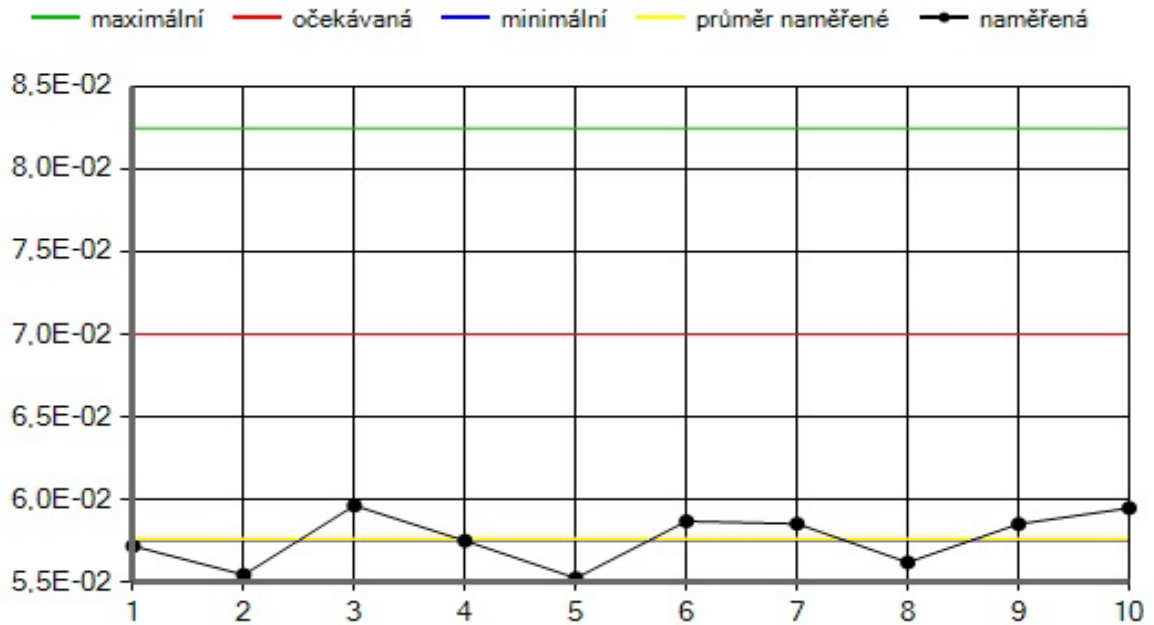
Obrázek 19 – Graf ve zkušebním bodě $700 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)

Hodnoty tohoto měření jsou nejbližší k očekávané měřené veličině. Jsou vyobrazeny na grafu (obrázek 20), kdy měření probíhalo ve vzdálenosti 2,85 m od ozařovače.



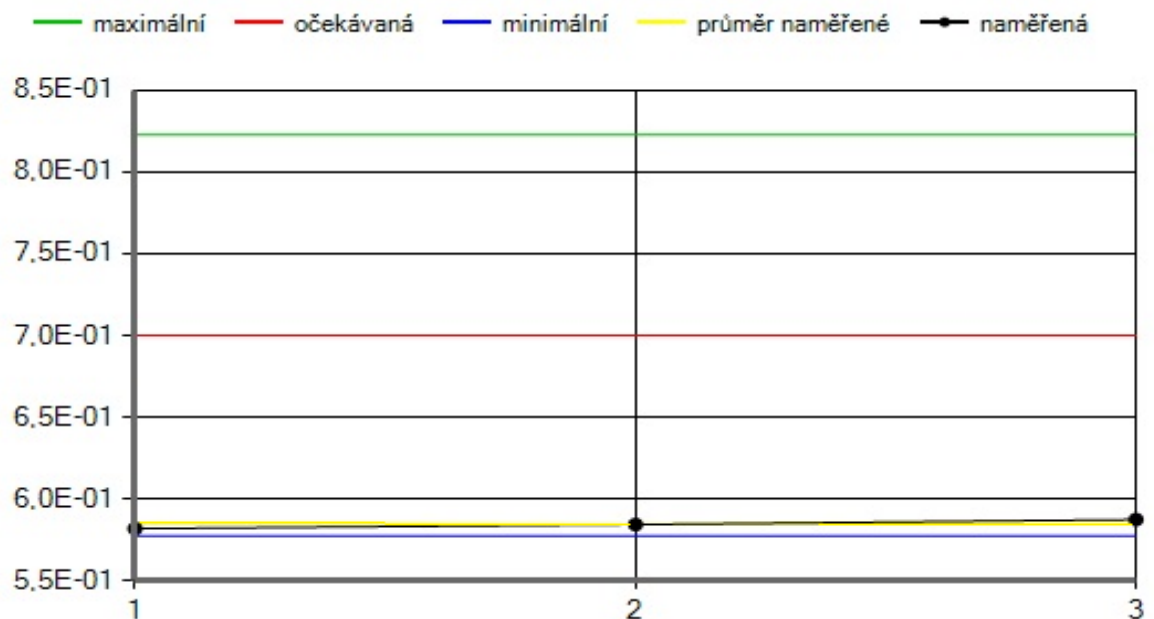
Obrázek 20 – Graf ve zkušebním bodě $7 \text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)

Graf znázorňuje hodnoty získané měřením ve vzdálenosti 2,04 m od ozařovače. Rozptyl hodnot získaných měřením je v tomto případě největší. Naměřený průměr opisuje přímo minimální interval, v němž může ležet pravá hodnota.



Obrázek 21 – Graf ve zkušebním bodě 70 mSv.h⁻¹. (autor)

Graf vyobrazuje pouze tři hodnoty získané měřením ve vzdálenosti 1,42 m od ozařovače, neboť bylo měření provedeno vysokými příkony ionizujícího záření. Naměřený průměr kopíruje linii dráhy minima.



Obrázek 22 – Graf ve zkušebním bodě 700 mSv.h⁻¹. (autor)

7.3 Měření č. 3

Měření dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu proběhlo na typu přístroje DC-3E-98, byl použit ozařovač OG-8, izotop ^{137}Cs pro měření gama záření a izotop $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ pro měření plošné aktivity za podmínek:

- teplota 17,8 °C,
- tlak 98,8 kPa,
- vlhkost 50,2 %.



Obrázek 24 – Uchycení sondy DC-3E-98 v měřicím vozíku. (foto autor)



Obrázek 23 – Umístění indikační jednotky DC-3E-98 v měřicím vozíku. (foto autor)

Na začátku byly odečteny podmínky měření: tlak, teplota a vlhkost. Pro měření záření gama byl na měřidle nastaven rozsah v různých úrovních, a to:

- $0,3 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ pro měření hodnoty přírodního pozadí,
- $1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, zkušební bod $0,7 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,
- $3 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, zkušební bod $2 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,
- $10 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, zkušební bod $8 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,
- $30 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, zkušební bod $20 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,
- $100 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$, zkušební bod $80 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$,
- $0,03 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$, zkušební bod $0,02 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$,
- $0,3 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$, zkušební bod $0,2 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$,

- 1 mGy.h⁻¹, zkušební bod 0,8 mGy.h⁻¹,
- 3 mGy.h⁻¹, zkušební bod 2 mGy.h⁻¹,
- 10 mGy.h⁻¹, zkušební bod 8 mGy.h⁻¹.

Po nastavení do zkušebního bodu byla odečtena 10× hodnota pozadí a zapsána do tabulky zobrazené na monitoru. Mezi dalším odečtem bylo potřeba počkat cca 200 sekund. Dále byla nastavena další úroveň a takto se postupovalo až do maximálního možného rozsahu. Po ukončení měření gama záření muselo být měřidlo připraveno k měření na rozsazích plošné aktivity. Z toho důvodu bylo přeneseno z ozařovny na pracoviště operátora. Pro toto měření bylo potřeba připravit etalony plošné aktivity, povolit zajišťovací šroub a vysunout γ clonu detektoru. Na měřidle bylo zapotřebí nastavit rozsah 1 Bq.(cm²)⁻¹ × 1, odečíst 10× hodnotu pozadí a zapsat do tabulky na monitoru. Před dalším měřením bylo potřeba počkat cca 140 sekund. Poté se pokračovalo obdobně, jako při měření gama záření. Byly nastaveny různé rozsahy:

- 3 Bq.(cm²)⁻¹ × 1, sonda umístěna na etalon č. 1059038, odečtena 10× hodnota výchyly na měřidle, vždy počkat mezi jednotlivými odečty 90 sekund, hodnoty zapsat do tabulky monitoru,
- 10 Bq.(cm²)⁻¹ × 1, sonda umístěna na etalon č. 1059039,
- 30 Bq.(cm²)⁻¹ × 1, sonda umístěna na etalon č. 1059040,
- 100 Bq.(cm²)⁻¹ × 1, sonda umístěna na etalon č. 1059042,
- 1 Bq.(cm²)⁻¹ × 100, sonda umístěna na etalon č. 1059042,
- 300 Bq.(cm²)⁻¹ × 1, sonda umístěna na etalon č. 1059041,
- 3 Bq.(cm²)⁻¹ × 100, sonda umístěna na etalon č. 1059041.

V každém zkušebním bodě program ihned stanovil průměrnou hodnotu naměřené veličiny, relativní chybu, variační koeficient a hodnotu kombinované nejistoty.

Tabulka 9 – Výsledky měření DC-3E-98. (autor)

Etalon	Měřená veličina	Konvenčně pravá hodnota	Naměřená hodnota	Kalibrační faktor/koefficient
Nuklid		Nejistota	Nejistota	Nejistota
OG8-5 ¹³⁷ Cs	p Ka	7,00E⁻⁰⁷ Gy.h⁻¹ 2,46E ⁻⁰⁸ Gy.h ⁻¹	7,88E⁻⁰⁷ Gy.h⁻¹ 1,55E ⁻⁰⁸ Gy.h ⁻¹	8,89E⁻⁰¹ 3,57E ⁻⁰²
		3,5 %	2,0 %	4,0 %
OG8-5 ¹³⁷ Cs	p Ka	2,00E⁻⁰⁶ Gy.h⁻¹ 7,02E ⁻⁰⁸ Gy.h ⁻¹	2,15E⁻⁰⁶ Gy.h⁻¹ 6,68E ⁻⁰⁸ Gy.h ⁻¹	9,30E⁻⁰¹ 4,36E ⁻⁰²
		3,5 %	3,1 %	4,7 %
OG8-5 ¹³⁷ Cs	p Ka	8,00E⁻⁰⁶ Gy.h⁻¹ 2,81E ⁻⁰⁷ Gy.h ⁻¹	8,36E⁻⁰⁶ Gy.h⁻¹ 1,52E ⁻⁰⁷ Gy.h ⁻¹	9,56E⁻⁰¹ 3,78E ⁻⁰²
		3,5 %	1,8 %	4,0 %

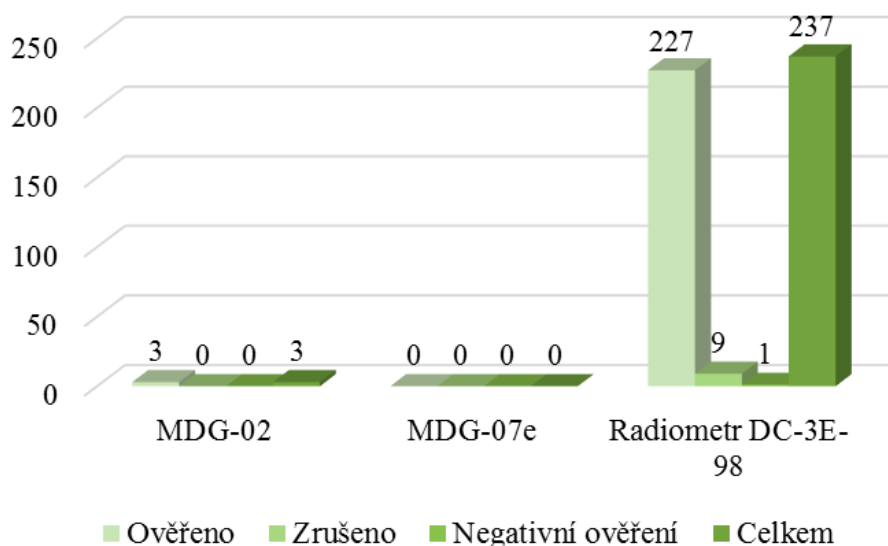
Tabulka 9 (pokračování tabulky) – Výsledky měření DC-3E-98. (autor)

Etalon Nuklid	Měřená veličina	Konvenčně pravá hodnota		Naměřená hodnota		Kalibrační faktor/koefficient	
		Nejistota		Nejistota		Nejistota	
OG8-3 ¹³⁷ Cs	p Ka	2,00E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 5,22E ⁻⁰⁷ Gy.h ⁻¹	2,6 %	2,09E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 6,33E ⁻⁰⁷ Gy.h ⁻¹	3,0 %	9,59E ⁻⁰¹ 3,84E ⁻⁰²	4,0 %
OG8-3 ¹³⁷ Cs	p Ka	8,00E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 2,09E ⁻⁰⁶ Gy.h ⁻¹	2,6 %	7,47E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 1,27E ⁻⁰⁶ Gy.h ⁻¹	1,7 %	1,07E ⁺⁰⁰ 3,34E ⁻⁰²	3,1 %
OG8-3 ¹³⁷ Cs	p Ka	2,00E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 5,22E ⁻⁰⁷ Gy.h ⁻¹	2,6 %	2,26E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 6,29E ⁻⁰⁷ Gy.h ⁻¹	2,8 %	8,85E ⁻⁰¹ 3,38E ⁻⁰²	3,8 %
OG8-3 ¹³⁷ Cs	p Ka	8,00E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 2,09E ⁻⁰⁶ Gy.h ⁻¹	2,6 %	9,09E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹ 1,25E ⁻⁰⁶ Gy.h ⁻¹	1,4 %	8,80E ⁻⁰¹ 2,60E ⁻⁰²	2,9 %
OG8-3 ¹³⁷ Cs	p Ka	2,00E ⁻⁰⁴ Gy.h ⁻¹ 5,23E ⁻⁰⁶ Gy.h ⁻¹	2,6 %	2,26E ⁻⁰⁴ Gy.h ⁻¹ 5,86E ⁻⁰⁶ Gy.h ⁻¹	2,6 %	8,87E ⁻⁰¹ 3,27E ⁻⁰²	3,7 %
OG8-8 ¹³⁷ Cs	p Ka	8,00E ⁻⁰⁴ Gy.h ⁻¹ 1,53E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹	1,9 %	8,96E ⁻⁰⁴ Gy.h ⁻¹ 1,20E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹	1,3 %	8,93E ⁻⁰¹ 2,09E ⁻⁰²	2,3 %
OG8-8 ¹³⁷ Cs	p Ka	2,00E ⁻⁰³ Gy.h ⁻¹ 3,83E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹	1,9 %	2,32E ⁻⁰³ Gy.h ⁻¹ 5,97E ⁻⁰⁵ Gy.h ⁻¹	2,6 %	8,64E ⁻⁰¹ 2,78E ⁻⁰²	3,2 %
OG8-2 ¹³⁷ Cs	p Ka	8,00E ⁻⁰³ Gy.h ⁻¹ 1,37E ⁻⁰⁴ Gy.h ⁻¹	1,7 %	8,60E ⁻⁰³ Gy.h ⁻¹ 1,15E ⁻⁰⁴ Gy.h ⁻¹	1,3 %	9,30E ⁻⁰¹ 2,03E ⁻⁰²	2,2 %
EZ1X 1059635 ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	PE 4 As	4,24E ⁺⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹ 2,72E ⁺⁰¹ Bq.(cm ²) ⁻¹	6,4 %	2,81E ⁺⁰⁰ Bq.(cm ²) ⁻¹ 5,77E ⁻⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹	2,1 %	1,51E ⁺⁰² 1,02E ⁺⁰¹	6,7 %
EZ1X 1604148 ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	PE 5 As	1,15E ⁺⁰³ Bq.(cm ²) ⁻¹ 7,35E ⁺⁰¹ Bq.(cm ²) ⁻¹	6,4 %	7,61E ⁺⁰⁰ Bq.(cm ²) ⁻¹ 1,19E ⁻⁰¹ Bq.(cm ²) ⁻¹	1,6 %	1,51E ⁺⁰² 9,94E ⁺⁰⁰	6,6 %
EZ1X 1604149 ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	PE 6 As	3,11E ⁺⁰³ Bq.(cm ²) ⁻¹ 1,99E ⁺⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹	6,4 %	1,90E ⁺⁰¹ Bq.(cm ²) ⁻¹ 5,96E ⁻⁰¹ Bq.(cm ²) ⁻¹	3,1 %	1,64E ⁺⁰² 1,17E ⁺⁰¹	7,1 %
EZ1X 1604150 ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	PE 7 As	1,37E ⁺⁰⁴ Bq.(cm ²) ⁻¹ 8,75E ⁺⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹	6,4 %	1,10E ⁺⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹ 1,19E ⁺⁰⁰ Bq.(cm ²) ⁻¹	1,1 %	1,24E ⁺⁰² 8,07E ⁺⁰⁰	6,5 %
EZ1X 1604150 ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	PE 7 As	1,37E ⁺⁰⁴ Bq.(cm ²) ⁻¹ 8,75E ⁺⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹	6,4 %	1,00E ⁺⁰³ Bq.(cm ²) ⁻¹ 1,19E ⁺⁰⁰ Bq.(cm ²) ⁻¹	1,2 %	1,37E ⁺⁰² 8,90E ⁺⁰⁰	6,5 %
EZ1X 1604152 ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	PE 8 As	4,67E ⁺⁰⁴ Bq.(cm ²) ⁻¹ 2,99E ⁺⁰³ Bq.(cm ²) ⁻¹	6,4 %	2,80E ⁺⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹ 5,96E ⁺⁰⁰ Bq.(cm ²) ⁻¹	2,1 %	1,67E ⁺⁰² 1,13E ⁺⁰¹	6,7 %
EZ1X 1604152 ⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	PE 8 As	4,67E ⁺⁰⁴ Bq.(cm ²) ⁻¹ 2,99E ⁺⁰³ Bq.(cm ²) ⁻¹	6,4 %	3,00E ⁺⁰² Bq.(cm ²) ⁻¹ 5,96E ⁺⁰⁰ Bq.(cm ²) ⁻¹	2,0 %	1,56E ⁺⁰² 1,04E ⁺⁰¹	6,7 %

7.4 Komparace výsledků

Kritériem úspěšnosti je relativní základní chyba všech naměřených údajů, která je $\leq 15\%$ plus nejistota konvenčně pravé hodnoty pro měření dávkového příkonu. Pokud jde o měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu, je relativní základní chyba všech naměřených údajů -15 až $+22\%$ plus nejistota konvenčně pravé hodnoty, pak splňuje kritérium úspěšnosti. Tato hodnocení jsou prováděna řídicím programem. Během měření přístroj i sondy ukazovaly měnící se hodnoty, ale v rámci povolené odchylky hodnot měření.

Vhodnost použití sond MDG-02 v systému monitorování ionizujícího záření závisí na několika faktorech. Patří mezi ně druh a energie přítomného záření, podmínky prostředí a konkrétní aplikace. Sondy MDG-02 jsou vhodné pro měření gama a rentgenového záření do 1,5 MeV a mohou pracovat v širokém rozsahu podmínek prostředí. Kromě toho jsou sondy MDG-02 navrženy tak, aby splňovaly mezinárodní normy, a byly kalibrovány tak, aby poskytovaly přesná měření. Je však důležité si uvědomit, že přesnost měření může být ovlivněna faktory, jako je teplota, tlak a vlhkost. Celkově lze říci, že použití sond MDG-02 v systému monitorování záření může poskytnout spolehlivá měření dávkového příkonu. Je však nezbytné zajistit, aby byly sondy řádně udržovány, měření byla správně interpretována a aby byla zajištěna bezpečnost pracovníků a obyvatelstva.



Obrázek 25 – Počty ověřených přístrojů v roce 2022 ve zvoleném etalonu. (dle Kebis, 2023 sestavil autor)

MDG-07e jsou sondy používané k měření příkonu dávkového ekvivalentu. I když mají podobnou konstrukci a funkci jako sondy MDG-02, liší se v několika klíčových aspektech.

Sondy MDG-02 mají rozsah měření od $0,1 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ do $100 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ a mohou měřit gama a rentgenové záření až do 5 MeV. Tyto sondy jsou kalibrovány tak, aby poskytovaly měření dávkového příkonu pro fotony, takže jsou vhodné pro použití v radiační ochraně a monitorování životního prostředí.

Naproti tomu sondy MDG-07e mají širší rozsah měření od $0,02 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ do $1 \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a mohou měřit příkon prostorového dávkového ekvivalentu, gama a rentgenové záření do 3 MeV.

Sondy MDG-07e jsou větší a těžší než sondy MDG-02, jsou vhodné pro stacionární použití v systémech monitorování záření. Měření prostorového dávkového ekvivalentu v jednotkách $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ má velkou výhodu v tom, že není potřeba přepočítávat hodnoty prostorového dávkového ekvivalentu na dávkový ekvivalent, což je dávka ozáření člověka, protože pro gama záření je přepočít 1:1. Kdežto při měření dávkového příkonu je třeba provést přepočít hodnot $\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ na $\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ v poměru 1:1,14, z čehož se dá odvodit dávka ozáření člověka. Přístroje měří příkon prostorového dávkového ekvivalentu a pro přepočít na osobní dávkový ekvivalent je potřeba další koeficient 1:1,2.

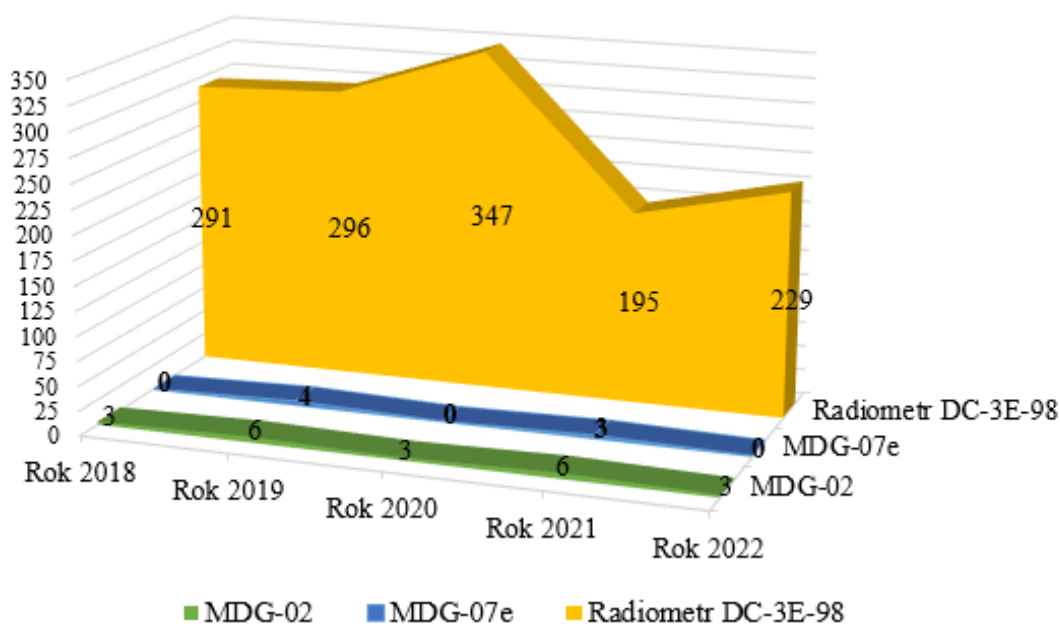
Radiometry DC-3E-98 mohou poskytovat oddělená měření dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu. Jsou schopny měřit záření gama v rozsahu od $0,01 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ do $10 \text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ a beta $0 \text{Bq}\cdot(\text{cm}^2)^{-1}$ do $30\,000 \text{Bq}\cdot(\text{cm}^2)^{-1}$. Ukládají naměřené údaje do paměti, upozorňují zvukovým signálem na zaznamenané ionizující záření a překročení stanovených hodnot. Radiometr DC-3E-98 může nahradit obě sondy, nezobrazují-li hodnoty, či jsou-li zaslány na ověření. V takovém případě je plnohodnotným přístrojem k použití jak v bezpečnostních systémech radiační kontroly, tak i v měřicích systémech technologických měření.

Volba mezi sondami MDG-02, MDG-07e a přístroji DC-3E-98 závisí na konkrétní aplikaci a požadavcích na měření. Pokud je například nutné měřit záření beta, je vhodnější volbou DC-3E-98. Pokud je důležitá přenosnost a snadné použití, byl by vhodnější opět DC-3E-98, neboť měří velmi přesně od hodnot přírodního pozadí a radiaci kosmického záření až do hodnot dávkového příkonu $10 \text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Výhodou je, že má zvukovou signalizaci, která odpovídá zvyšující se úrovni svým pípáním. V současnosti je nejvíce používaným přístrojem jednotkami HZS a mobilními skupinami HZS, neboť kompletně splňuje svůj účel a je finančně dostupný.

Závěrem lze říci, že sondy MDG-02 i MDG-07e a radiometr DC-3E-98 jsou spolehlivé přístroje pro měření dávkových příkonů ionizujícího záření a příkonu dávkového ekvivalentu. Volba mezi oběma sondami by měla vycházet ze specifických potřeb aplikace a z rozsahu měření a typu sledovaného záření. Za slabinu lze považovat signalizaci obou sond, neboť při zvýšení hodnot radiačního záření nejsou informace o této radiační události dále přenášeny a musí být pod stálým dohledem pracovníka obsluhy hlásiče radiace pro zajištění následných bezpečnostních úkonů. Aby splňovaly svou funkci na 100 %, musí být fyzicky sledovány. To jsou další vynaložené náklady, které by se daly použít k pořízení nového moderního monitorovacího systému.

8 DOPORUČENÍ OPATŘENÍ KE ZLEPŠENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Na základě vyhodnocených dat lze navrhnout opatření ke zlepšení současného stavu, neboť stále existuje prostor pro zlepšení. Zajištění investice do výzkumu a vývoje, provádění pravidelné údržby, kontrol a ověřování stávajících přístrojů a zajištění odpovídajícího financování mohou přispět ke zlepšení současné situace.



Obrázek 26 – Počty ověřených přístrojů v roce 2018–2022 ve zvoleném etalonu.
(dle Kebis, 2023 sestavil autor)

Stacionární hlásiče pro monitorování ionizujícího záření jsou zastaralé a i přes systematický servis a kalibrování, již technologicky neodpovídají dnešní moderní době. Na obrázcích 18, 21 a 22 jsou znatelné linie měření, kdy naměřený průměr je velmi blízký možnému minimu, aby sonda splňovala požadavky stanovené opatřením obecné povahy. Na obrázku 21 dokonce naměřený průměr kopíruje dráhu minima. GM detektory jsou letité v používání a již nedosahují potřebné citlivosti. Na základě zhodnocení těchto údajů lze konstatovat, že modernizace by měla být součástí koncepce, aby mohla být v blízké době provedena. Je zapotřebí vytvořit technologicky vyspělý a odolný systém monitorování ionizujícího záření.

I přes rozsáhlé používání přístroje DC-3E-98 jednotkami HZS a mobilními skupinami HZS, které svědčí o jeho významu a spolehlivosti, by mohlo docházet k rychlejšímu nahrazování novějším typem ze stejné řady, a to přístrojem DC-3H-08. Už samotné ovládání radiometru DC-3E-98 jde v zásahových oblecích velmi těžce.

Zavedení přístroje DC-3H-08, který komunikuje přes bluetooth, upozorňuje na překročení radiace pomocí optické a akustické signalizace a přenos naměřených dat je přes USB však naznačuje, že v oblasti hasičského vybavení je vždy co zlepšovat.

Za slabiny systému lze považovat technické předpoklady v některých oblastech. I přes rozvoj v oblasti detekce ionizujícího záření, je nákup novějších zařízení limitován cenou a rozpočtovými omezeními v rezortu HZS. Navíc na každý nákup nových měřících přístrojů je potřeba v AMS zpracovat příslušné metodiky a postupy měření. Proto HZS řeší většinou nákup nových zařízení hromadným nákupem jednotného typu, aby neměl každý kraj jiný přístroj v malých počtech. Zařízení jsou mnohdy zastaralá. S rozvojem technologií se mohou objevit příležitosti k vytvoření účinnějších a efektivnějších přístrojů k měření ionizujícího záření. Investice do výzkumu a vývoje mohou také vést k objevení nových materiálů, které mohou být odolnější a spolehlivější.

9 PERSPEKTIVA ROZVOJE PŘÍSTROJŮ V ČESKÉ REPUBLICCE

Měření dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu má zásadní význam pro zajištění bezpečnosti pracovníků a obyvatelstva, kteří jsou vystaveni ionizujícímu záření. Významným mezníkem ve vývoji měření bylo založení Českého metrologického institutu v roce 1993. Tento ústav sehrál rozhodující roli při vývoji a udržování národních metrologických standardů pro měření ionizujícího záření.

S rozvojem technologií a rostoucí poptávkou po monitorování ionizujícího záření bude pravděpodobně pokračovat snaha o rozvoj a zdokonalování metod a přístrojů pro měření radiace. Jednou z oblastí, která může zaznamenat významný rozvoj zařízení pro monitorování záření je síť včasného zjištění radiační monitorovací sítě v ČR. Tato zařízení by mohla poskytovat měření radiační expozice v reálném čase pro pracovníky ve vysoce rizikových prostředích a umožnit tak v případě potřeby rychlé zásahy.

Roste také potřeba monitorování záření v lékařství, zejména při používání ionizujícího záření pro diagnostické a terapeutické účely. Vývoj pokročilých dozimetrických metod a přístrojového vybavení pro lékařské aplikace bude proto v budoucnu zásadní oblastí, na kterou je potřeba se zaměřit.

V dnešní digitální době, době umělé inteligence a nanotechnologií by stálo za zvážení využití nebo vývoj moderních technologií, na které není dostatek finančních prostředků. Další eventualita k monitorování ionizujícího záření je využití stávající infrastruktury s možností se připojit k jednotnému systému varování a vyrozumění. Předně bude zapotřebí zmapovat místa, kde jsou monitory instalované, vytipovat místa, kde chybí, nebo kde by mohly být potřebné pro monitorování radiační situace. Dalším krokem je vyvinout monitory/sondy, které by mohly být připojeny do jednotného systému varování a vyrozumění a za pomoci monitorovacího zařízení by se získávaly naměřené hodnoty. Monitorovací systém by při překročení stanovené hodnoty zasílal naměřené stavy na OPIS, který by v případě ohrožení zaktivoval sirény v ohroženém území s upřesňující informací o události. Tím by se při vzniku mimořádné události zajistilo celoplošné varování obyvatelstva.

Závěrem lze konstatovat, že rozvoj měření dávkového příkonu a dávkového ekvivalentu v České republice probíhá již řadu let a vyústil v zavedení novějších měřicích metod a přístrojového vybavení. Budoucnost měření záření v České republice je slibná a měla by se nadále zaměřovat na rozvoj technologií pro monitorování ionizujícího záření v různých oblastech.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá poznatky ze základů ochrany obyvatelstva, kde se více orientuje na vznik a následky mimořádných událostí. Mimořádné události jsou zaměřené na radiační události a havárie jaderných elektráren, které se staly z různých důvodů, ať již antropogenního původu, nebo byly zapříčiněny přírodními živly. V návaznosti na tato témata se zaměřuje na ionizující záření, kde se vyskytuje, jak vzniká, které jsou jeho umělé zdroje a dále informuje o druzích ionizujícího záření, účincích kosmického záření na člověka nebo účincích přírodních radionuklidů, které jsou v zemské kůře. V závěru teoretické části je pojednáno o síti termoluminiscenčních dozimetrů, jež jsou základní složkou radiační monitorovací sítě v České republice.

V praktické části práce poskytuje informace o dozimetrii, přístrojích a sondách měřící dávkový příkon a příkon dávkového ekvivalentu v systému radiačního monitorování. Ke splnění hlavního cíle, a to navrhnout případná opatření ke zlepšení současného stavu monitorování ionizujícího záření v systému monitorování radiační situace byly použity metody literární rešerše, rozhovor, měření, experiment a komparace.

Byl vypracován dílčí cíl na základě dostupných literárních zdrojů, a to teoretická část a teoretická východiska z řešené problematiky, byl posouzen současný stav monitorování ionizujícího záření v systému monitorování radiační situace. Dále bylo provedeno měření dávkového příkonu a příkonu dávkového ekvivalentu pomocí vybraných sond a vyhodnocena vhodnost použití přístrojů a sond v systému monitorování radiační situace. Pro komparaci byly zvoleny dvě sondy a jeden radiometr. Sonda MDG-02 monitorující dávkový příkon a sonda MDG-07e monitorující příkon dávkového ekvivalentu se od sebe liší rozsahem. Přístroj DC-3E-98 je nespektrometrické měřidlo aktivit a dávek.

Údaje byly získávány měřeními v hlavním etalonu AMS IZ. Výsledek komparace byl uváděn v procentech nejistoty měření, v intervalu, ve kterém leží pravá hodnota. V rámci srovnávání bylo zjištěno, že všechna měřidla splňovala stanovené požadavky. Jedna sonda vykazovala hraniční hodnoty. Naměřený průměr byl stejný s minimálním intervalem vymezeným pro měření. Na funkčnost to nemá vliv. Budou-li změřeny hodnoty, které přístroj vyhodnotí jako zvýšené, nebude záření pro člověka tak škodlivé, neboť tento přístroj měří ve vysoké citlivosti. Sondy jsou stále potřebné i přes svou zastaralou technologii a opotřebení, ovšem dosahují vyšších finančních nákladů na svou údržbu, servis a ověřování.

Doporučení ke zlepšení současného stavu bylo zaměřeno na zvolení jiného, nového přístroje. Nabízí se možnost vývoje nových přístrojů či technologií, nebo nákup již prověřených a moderních monitorů, nebo jiný systém monitorování. Konkrétně u HZS je systém DC-4D-84, který je na pokraji životnosti. Již nebude kalibrován, dochází k jeho ukončování a nebude ničím nahrazen. Bylo by prospěšné zvýšit počet monitorovacích stanic po celé zemi, aby bylo zajištěno komplexnější pokrytí.

Dalším opatřením by mohlo být upravení systému včasného varování rozšířením o monitorování radiační situace, který by využíval údaje v reálném čase k rychlému upozornění úřadů a veřejnosti na jakékoli abnormální úrovně radiace, a který by mohl pomoci zmírnit následky radiační havárie, snížit riziko poškození zdraví a ztrát na životě.

Lze využít nové technologie, které dokáží monitorovat ionizující záření ze vzduchu, a to použitím bezpilotních prostředků, které rychle a přesně lokalizují zdroj radioaktivního záření a identifikují jednotlivé typy přítomných radionuklidů. Jejich výhoda spočívá ve zmapování rozsáhlých území, efektivitě a operativní variabilitě. Nevýhodou je jejich drahý provoz.

Cíle práce byly naplněny v jednotlivých kapitolách bakalářské práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- AION CS, 2022. *Zákony pro lidi: Sbírka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění* [online]. AION CS, 2010–2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/>.
- ČESKO, 1993. *Ústavní zákon České národní rady č. 1 ze dne 16. prosince 1992, Ústava České republiky, ve znění pozdějších ústavních zákonů*. In: Sbírka zákonů České republiky. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, ročník 1993, částka 1, číslo 1, s. 3-16. ISSN 1211–1244.
- ČESKO, 2000a. *Zákon č. 239 ze dne 28. června 2000 o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů*. In: Sbírka zákonů České republiky. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, ročník 2000, částka 73, s. 3461-3474. ISSN 1211–1244.
- ČESKO, 2000b. *Zákon č. 240 ze dne 28. června 2000 o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon)*. In: Sbírka zákonů České republiky. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, ročník 2000, částka 73, s. 3475-3487. ISSN 1211–1244.
- ČESKO, 2001. *Vyhláška č. 328 ze dne 5. září 2001 o některých podrobnostech zabezpečení integrovaného záchranného systému*. [Zakonyprolidi.cz](https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-328?text=328%2F2001) [online]. 2010–2022 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-328?text=328%2F2001>.
- ČESKO, 2016a. *Zákon č. 263 ze dne 14. července 2016 atomový zákon*. In: Sbírka zákonů České republiky. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, ročník 2016, částka 102, číslo 263, s. 3938–4060. ISSN 1211–1244.
- ČESKO, 2016b. *Vyhláška č. 422 ze dne 14. prosince 2016 o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje*. [Zakonyprolidi.cz](https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-422) [online]. 2010–2022 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-422>.
- ČEZ, 2022a. *Encyklopedie Energie: Havárie jaderných elektráren*. [Cez.cz](https://www.cez.cz) [online]. 2022 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/havarie_7.html.
- ČEZ, 2022b. *Historie a současnost EDU*. [Cez.cz](https://www.cez.cz) [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu/historie-a-soucasnost>.
- ČEZ, 2022c. *Statistiky z jaderných elektráren*. [Cez.cz](https://www.cez.cz) [online]. 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/statistiky-z-jadernych-elektren>.
- ČSFR, 1990. *Zákon č. 505/1990 Sb. ze dne 16. listopadu 1990 o metrologii*. In: Sbírka zákonů. Praha: Federální Ministerstvo vnitra, ročník 1990, částka 83, číslo 505, s. 1882–1888.

DLUBALOVÁ, Klára, 2022. *Vláda schválila materiály Ministerstva vnitra týkající se bezpečnosti*. Mvcr.cz [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.mvcr.cz/fondyueu/clanek/vlada-schvalila-materialy-ministerstva-vnitra-tykajici-se-bezpecnosti.aspx>.

EBRAHIMI, Arian, 2019. *Černobyl nebyl jediný: 5 nejhorších jaderných havárií historie. Víte, že k jedné došlo i v Československu?* G.cz [online]. 2015–2022, 28. 5. 2019 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://g.cz/cernobyl-nebyl-jediny-5-nejhorsich-jadernych-havarii-historie-vite-ze-k-jedne-doslo-i-v-ceskoslovensku/>.

EUROPEAN COMMISSION, 2023. *Joint research centre: Radioactivity Environmental Monitoring*. In: EUROPEAN COMMISSION. Remap.jrc.ec.europa.eu [online]. 2023. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Advanced.aspx>.

GŘ–HZS ČR, 2017. *Metodické listy kapitoly N: 4. Nebezpečí ionizujícího záření*, 2017. Hzscr.cz [online]. 2022, 30. listopadu 2017 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/bojovy-rad-jednotek-pozarni-ochrany-v-dokumentech-491249.aspx>.

HANNA, Botros N. et al., 2020. *An Application of ASP in Nuclear Engineering: Explaining the Three Mile Island Nuclear Accident Scenario*. Theory and Practice of Logic Programming [online]. 20 (6), 926-941 [cit. 2023-03-17]. ISSN 1471-0684. Dostupné z: doi:10.1017/S1471068420000241.

HRADIL, Jaroslav, Otakar J. MIKA, Miroslav MUSIL, Bohuslav SVOBODA, Jakub RAK a Dušan VIČAR, 2018. Uherské Hradiště: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta logistiky a krizového řízení, 2018. ISBN 978-80-7454-774-4.

HZS PLZEŇSKÉHO KRAJE, 2017. *Skripta: Kurz Radiační ochrana – Z. Třemošná: HZS Plzeňského kraje*, 90 s.

KÁČER, Ján, 2015. *Ochrana obyvatelstva* [online]. Praha, 2022. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://is.vske.cz/el/vske/leto2019/UB_B017K/um/OchranaObyvatelstva_Kacer_opora.pdf.

KEBIS, Jozef, 2023. Metrolog autorizovaného metrologického střediska ionizujícího záření [rozhovor]. Olomouc, 2. 2. 2023.

KERMISCH, Céline a Pierre-Etienne LABEAU, 2013. *Communicating about nuclear events: Some suggestions to improve INES*. Reliability Engineering & System Safety, 119: 165–171. [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832013001518>).

KOLEKTIV AUTORŮ, 2015a. *Bezpečnostní strategie České republiky 2015* [online]. In: Praha: Ministerstvo zahraničních věcí České republiky, s. 24, 2022. [cit. 2022-12-04]. ISSN 978-80-7441-005-5. Dostupné z: <https://www.vlada.cz/assets/ppov/brs/dokumenty/bezpecnostni-strategie-2015.pdf>.

KOLEKTIV AUTORŮ, 2015b. *Ochrana obyvatelstva a krizové řízení: skripta*. Praha: MV - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 328 s. ISBN 978-80-86466-62-0.

KOLEKTIV AUTORŮ, 2019. *MODUL – J: ochrana obyvatelstva a krizové řízení pro pedagogické pracovníky*. Hzscr.cz [online]. Praha, 2022. [cit. 2022-12-10]. ISBN 978-80-7616-048-4. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/moduly-dle-platne-koncepce-vzdavani-v-oblasti-ochrany-obyvatelstva-a-krizoveho-rizeni-2017.aspx>.

KOLEKTIV AUTORŮ, 2021. *Krizové řízení při nevojenských krizových situacích, ochrana obyvatelstva, kritická infrastruktura: modul A; C; I*. Praha: Ministerstvo vnitra. ISBN 978-80-7616-097-2.

KRÁLOVÁ, Magda, 2007. *Jaderné zbraně*. Edu.techmania.cz [online]. Plzeň, 2007 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/stepeni-jader/jaderne-zbrane>.

MAREŠ, Jaroslav, 2022. *Jaslovské Bohunice: Přísně tajné úniky radiace [foto]*. Badatele.net [online]. 2022 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://badatele.net/jaslovske-bohunice-prisne-tajne-uniky-radiace/>.

MARTÍNEK, Bohumír, Petr LINHART a KOLEKTIV PRACOVNÍKŮ IOO Lázně Bohdaneč, 2022. *Ochrana obyvatelstva: MODUL E*. Hzscr.cz [online]. Praha: MV GŘ HZS ČR, 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/moduly-studijni-texty-k-problematice-bezpecnosti.aspx>.

MERTOVÁ, Markéta a Jitka SLANÁ REISSMANNOVÁ, 2021. *Ochrana člověka za mimořádných událostí: metodický materiál pro učitele ZŠ*. Praha: Ministerstvo vnitra. ISBN 978-80-7616-091-0.

MIKAMI, Satoshi, Hiroyuki TANAKA, Hideo MATSUDA, et al., 2019. *The deposition densities of radiocesium and the air dose rates in undisturbed fields around the Fukushima Daiichi nuclear power plant; their temporal changes for five years after the accident*. Journal of Environmental Radioactivity [online]. 210 [cit. 2023-01-04]. ISSN 0265931X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvrad.2019.03.017.

MILÉŘ, Tomáš, 2022. *Jaderná bezpečnost: Ochrana člověka za mimořádných událostí*. Slideplayer.cz [online]. 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/13066541/>.

Ministerstvo obrany ČR. *Katalog chemického vojska č. 51: Radiometr DC-3E-98*. In: Praha: Ministerstvo obrany České republiky – Agentura vojenských informací a služeb.

MIRION TECHNOLOGIES, 2022. *Introduction to radiation detectors*. Mirion Technologies [online]. 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.mirion.com/learning-center/radiation-detector-types/introduction-to-radiation-detectors>.

MV ČR, 2016. *Terminologický slovník pojmů z oblasti krizového řízení, ochrany obyvatelstva, environmentální bezpečnosti a plánování obrany státu*. Mvcr.cz [online]. Praha, 2022, 7. června 2016 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.mvcr.cz/clanek/terminologicky-slovník-krizove-rizeni-a-planovani-obrany-statu.aspx>.

MV-GŘ HZS ČR, 2022. *Zpráva o stavu ochrany obyvatelstva v České republice 2018*. Hzscr.cz: Ochrana obyvatelstva v České republice [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/ochrana-obyvatelstva-v-ceske-republice.aspx>.

NOVINKY.CZ, 2007. *V Temelíně unikla další mírně radioaktivní voda*. BORGIS. Novinky.cz [online]. 2019–2022, 7. března 2007 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/domaci-v-temeline-unikla-dalsi-mirne-radioaktivni-voda-40152201>.

PODZIMEK, František, 2021a. *Radiologická fyzika: Aplikace ionizujícího záření*. V Praze: České vysoké učení technické, 300 s. ISBN 978-80-01-06829-8.

PODZIMEK, František, 2021b. *Radiologická fyzika: Fyzika ionizujícího záření*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 336 s. ISBN 978-80-01-06900-4.

PODZIMEK, František, 2022. *Radiologická fyzika: Ochrana před ionizujícím zářením*. V Praze: České vysoké učení technické, 394 s. ISBN 978-80-01-06971-4.

PRINC, Ivan a Dušan VIČAR, 2023. *Individuální a kolektivní ochrana*. Digilib.k.utb.cz [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2023, 19. 1. 2023 [cit. 2023-01-22]. DOI: 10.7441/978-80-7678-147-4. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/52418>.

RIEKE, Jan, 2022. [foto] *Oblast radioaktivního spadu po výbuchu v Majaku (EURT)*. Vtm.zive.cz [online]. 2022, 8. června 2019 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: https://vtm.zive.cz/Client.Gallery/show.aspx?id_file=485445982&article=198798.

SÚJB, 2013. *Aktuálně: Únik chladiva z nízkotlakého systému havarijního chlazení primárního okruhu do kontejnmentu JE Temelín nepředstavuje zvýšené radiační riziko*. Sujb.cz [online]. 2022, 5. 8. 2013 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/unik-chladiva-z-nizkotlakeho-systemu-havarijního-chlazení-primárního-okruhu-do-kontejnmentu-je-temelin-nepredstavuje-zvysene-radiacni-riziko>.

SÚJB, 2018. *Národní program monitorování: Monitorování radiační situace na území České republiky*. Sujb.cz [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/NPM/010119/NPM_text.pdf.

SÚJB, 2020. *Národní radiační havarijní plán schválen*. Sujb.cz [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/narodni-radiacni-havarijni-plan-schvalen>.

SÚJB, 2021. *Zpráva o výsledcích činnosti státního úřadu pro jadernou bezpečnost a o monitorování radiační situace na území České republiky za rok 2021*. Sujb.cz [online]. 2021 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní_zpravy/ceske/2021/cast-I.pdf.

SÚJB, 2022a. *Atomové právo*. SÚJB: Státní úřad pro jadernou bezpečnost [online]. 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/legislativa/atomove-pravo>.

SÚJB, 2022b. *Monitorování radiační situace*. Sujb.cz [online]. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/monitorovani-radiacni-situace#c1606>.

SÚJB, 2022c. *Typový plán: Radiační havárie*. Sujb.cz [online]. 2022, 1. července 2022 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/typovy-plan-radiacni-havarie>.

SÚJB, 2022d. *Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou: za rok 2021*, 2022. In: Iaea.org [online]. [cit. 2023-03-08]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/53/072/53072439.pdf.

SÚRO, 2022a. *Radiační monitorovací síť: Informace o funkci a organizaci RMS*. Suro.cz [online]. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/rms>.

SÚRO, 2022b. *Radiační monitorovací síť: Monitorování radionuklidů v ovzduší*. Suro.cz [online]. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/rms/ovzdusi>.

- SÚRO, 2022c. *Radiační monitorovací síť: Síť termoluminiscenčních dozimetrů (TLD-síť)*. Suro.cz [online]. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/rms/tld>.
- ŠTĚTINA, Jiří, 2014. *Zdravotnictví a integrovaný záchranný systém při hromadných neštěstích a katastrofách*. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-4578-7.
- ŠVEC, Jiří, 2018. *Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření: Detekce ionizujícího záření*. Ostrava-Mariánské hory: DTO CZ, 283 s. ISBN 978-80-02-02797-3.
- ULLMANN, Vojtěch, 2022. *Jaderná a radiační fyzika: Radionuklidy*. Astronuklfyzika.cz [online]. 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>.
- UNEP, 2016a. *Ionizující záření: Účinky a zdroje*. Sujb.cz [online]. 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/dokumenty/Radiation-InsidePart-Czech-Feb_2017-1.pdf. ISBN: 978-92-807-3600-7.
- UNEP, 2016b. *Příklady různých aplikací elektromagnetického záření [foto]*. Sujb.cz [online]. 2022, [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/dokumenty/Radiation-InsidePart-Czech-Feb_2017-1.pdf. ISBN: 978-92-807-3600-7.
- ÚŘAD VLÁDY ČESKÉ REPUBLIKY, 2022. *Zvlády jednání: Jednání vlády v roce 2021*. ODOK-portál [online]. Úřad vlády České republiky, 2022 [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://odok.cz/portal/zvlady/jednani/2021/>.
- VF, 2009a. *Katalogový list: Monitor dávkového příkonu MDG-02*. In: Černá Hora: VF, ročník 2009.
- VF, 2009b. *Katalogový list: Monitor dávkového příkonu MDG-07*. In: Černá Hora: VF, ročník 2009.
- VF, 2022. *DARS: Systém řízení metrologické laboratoře*. Vfnuclear.com [online]. 2022 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.vfnuclear.com/produkty/108/system-rizeni-metrologicke-laboratore>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AMS	autorizované metrologické středisko
ČEZ	České energetické závody
ČMI	Český metrologický institut
ČR	Česká republika
ČSN EN	Česká technická norma
DNA	deoxyribonukleová kyselina
EES	existující expoziční situace
EURDEP	Síť evropské platformy pro výměnu radiologických dat (z angl. European Radiological Data Exchange Platform)
GM	Geiger-Müllerův
HZS ČR	Hasičský záchranný sbor České republiky
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (z angl. International Atomic Energy Agency)
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise (z angl. International Electrotechnical Commission)
INES	Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí (z angl. The International Nuclear Event Scale)
IZ	ionizující záření
IZS	integrovaný záchranný systém
JE	jaderná elektrárna
MŠMT	Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy
MU	mimořádná událost
MV GŘ HZS ČR	Ministerstvo vnitra Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky
MV	Ministerstvo vnitra
NES	nehodová expoziční situace

NKÚ	Nejvyšší kontrolní úřad
OOB	ochrana obyvatelstva
OPIS	Operační a informační středisko
PES	plánovaná expoziční situace
RMU	radiační mimořádná událost
RTG	rentgen
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
TLD	termoluminiscenční dozimetr
USA	Spojené státy americké (z angl. United States of America)
USB	univerzální sériová sběrnice (z angl. Universal Serial Bus)
WANO	Světová asociace provozovatelů jaderných zařízení (z angl. World Association of Nuclear Operators)
WNA	Světová jaderná asociace (z angl. World Nuclear Association)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Koncepce ochrany obyvatelstva. (MV-GŘ HZS ČR, 2022).....	12
Obrázek 2 – Mezinárodní stupnice jaderných událostí INES. (Milěř, 2022)	21
Obrázek 3 – Charakteristika členění nehodové expoziční situace z hlediska řízení neodkladných a následných ochranných opatření pro obyvatelstvo. (SÚJB, 2022c).....	23
Obrázek 4 – Oblast radioaktivního spadu po výbuchu v Majaku. (Rieke, 2019).....	24
Obrázek 5 – Horní část přepáleného článku po vytažení z aktivní zóny. (Mareš, 2023)	26
Obrázek 6 – Příklady různých aplikací elektromagnetického záření. (UNEP, 2016b)	27
Obrázek 7 – MonRaS: Síť včasného zjištění. (SÚJB, 2022b).....	35
Obrázek 8 – Časová osa monitorování 3.–10. 2. 2023 v Olomouci a Červené u Libavé. (European Commission, 2023)	37
Obrázek 9 – Umístění sondy ve volném prostranství. (foto autor).....	38
Obrázek 10 – Struktura a počet míst sítě. (dle SÚRO sestavil autor).....	39
Obrázek 11 – Postupy pro monitorování radiační situace. (dle SÚJB, 2018 sestavil autor)	40
Obrázek 12 – Ozařovač OG-8 v autorizovaném metrologickém středisku. (foto autor).....	48
Obrázek 13 – Pohled na zařízení měřicího vozíku. (foto autor).....	49
Obrázek 14 – Výstup z měření, software DaRS. (foto autor).....	50
Obrázek 15 – Panel hlavního etalonu při prováděném měření. (foto autor).....	54
Obrázek 16 – Graf ve zkušebním bodě $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)	54
Obrázek 17 – Graf ve zkušebním bodě $7 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)	55
Obrázek 18 – Graf ve zkušebním bodě $70 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)	55
Obrázek 19 – Graf ve zkušebním bodě $700 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor)	56
Obrázek 20 – Graf ve zkušebním bodě $7 \text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor).....	56
Obrázek 21 – Graf ve zkušebním bodě $70 \text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor).....	57
Obrázek 22 – Graf ve zkušebním bodě $700 \text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. (autor).....	57
Obrázek 23 – Umístění indikační jednotky DC-3E-98 v měřicím vozíku. (foto autor)	58
Obrázek 24 – Uchycení sondy DC-3E-98 v měřicím vozíku. (foto autor).....	58
Obrázek 25 – Počty ověřených přístrojů v roce 2022 ve zvoleném etalonu. (dle Kebis, 2023 sestavil autor).....	61
Obrázek 26 – Počty ověřených přístrojů v roce 2018–2022 ve zvoleném etalonu. (dle Kebis, 2023 sestavil autor)	63

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Základní limity ozáření. (dle Česko, 2016b a dle HZS Plzeňského kraje, 2017, s. 33 sestavil autor)</i>	33
<i>Tabulka 2 – Popis MDG-02. (dle VF, 2009a vypracoval autor, foto autor)</i>	45
<i>Tabulka 3 – Přehledové konstrukční uspořádání MDG-07e. (VF, 2009b)</i>	45
<i>Tabulka 4 – Popis MDG-07e. (dle VF, 2009b vypracoval autor, foto autor)</i>	46
<i>Tabulka 5 – Popis DC-3E-98. (dle Ministerstvo obrany ČR vypracoval autor, foto autor)</i>	46
<i>Tabulka 6 – Technické parametry. (dle VF, 2009a; VF, 2009b; Ministerstvo obrany ČR vypracoval autor)</i>	47
<i>Tabulka 7 – Výsledky měření MDG-02. (autor)</i>	52
<i>Tabulka 8 – Výsledky měření MDG-07e. (autor)</i>	53
<i>Tabulka 9 – Výsledky měření DC-3E-98. (autor)</i>	59