

ČESKÁ ZEMEDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD



Česká zemědělská  
univerzita v Praze

**Zhodnocení vlivu radonu z odvalu šachty č.15 po těžbě uranové  
rudy na kvalitu životního prostředí okolních obcí na Příbramsku**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Ondřej Lagner, Ph.D.

Diplomant: Bc. Theodor Adam

2023

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Theodor Adam

Regionální environmentální správa

Název práce

**Zhodnocení vlivu radonu z odvalu šachty č.15 po těžbě uranové rudy na kvalitu životního prostředí okolních obcí na Příbramsku.**

Název anglicky

**Evaluation of the influence of radon from waste dump No.15 after uranium ore mining on the quality of the environment of the surrounding municipalities in the Příbram region.**

### Cíle práce

Cílem diplomové práce je vyhodnocení vlivu radonu z odvalu šachty č. 15 po ukončené těžbě v uranových dolech v okolí obcí Lešetice a Brod na Příbramsku.

1. Literární rešerše z dostupných zdrojů.
2. Popis radiační situace odvalu č. 15 pochůzkovým měřením, monitoringem pomocí dronu a vytvořením map rozložení příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama (PPDE).
3. Realizace odběrů vzorků vzdušiny a změření koncentrace radonu ve vnějším prostředí. Paralelně s monitorováním ve vnějším ovzduší u vytipovaných obytných objektů monitorovat objemovou aktivitu radonu ve vnitřním prostředí. Ze získaných naměřených dat vytvoření denní a roční variace vývoje koncentrace radonu.
4. Vizualizace výsledků měření v programovém prostředí QGIS a v dalších grafických výstupech.

### Metodika

Pro terénní průzkum bude použito vhodné technické certifikované vybavení k měření radiačních veličin. Osazení přístrojů pro kontinuální monitoring objemové aktivity radonu ve vnějším a vnitřním prostředí proběhne ve vytipovaných bodech v obcích v okolí odvalu. Po dobu celého výzkumného úkolu bude okolí odvalu monitorováno nainstalovanou meteostanicí pro zaznamenání teplotních a povětrnostních podmínek. Zaměření hot spotů na koruně odvalu termokamerou se uskuteční před samotným leteckým a pochůzkovým měřením příkonu prostorového dávkového ekvivalentu. Terénní měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu na koruně odvalu a na louce pod odvalem bude realizováno ve dvou fázích, a to v březnu a v září v roce 2022. Získaná data budou zpracována a vyhodnocena v programu QGIS a ve výsledných grafech.

**Doporučený rozsah práce**

60 stran

**Klíčová slova**

uran, radon, radiační ochrana, radioaktivita, těžba uranu, GIS

---

**Doporučené zdroje informací**

- Cinelli, G., De Cort, M. and Tollefsen, T., 2019: European Atlas of Natural Radiation, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 190 s.
- Cooper, J. R., Randle, K., Sokhi, R. S., 2003: Radioactive Releases in the Environment: Impact and Assessment, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 473 s.
- Cothorn, C. R. and Smith Jr., J. E. 1987: Environmental Radon, Springer, New York, 376 s.
- Gruppen, C., 2010: Introduction to Radiation Protection: Practical Knowledge for Handling Radioactive Sources (Graduate Texts in Physics). Nakladatelství Springer, Berlin, 417 s.
- Kafka, J. a kol., 2003: Rudné a uranové hornictví České republiky, Nakladatelství Anagram, Ostrava, 648 s.
- Klener, V. a kol., 2000: Principy a praxe radiační ochrany. AZIN CZ, Praha, 627 s.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2022/23 ZS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Ondřej Lagner, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra prostorových věd

---

Elektronicky schváleno dne 28. 2. 2023

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 1. 3. 2023

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 01. 03. 2023

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Zhodnocení vlivu radonu z odvalů po těžbě uranové rudy na kvalitu životního prostředí okolních obcí na Příbramsku vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Příbrami dne 1. 3. 2023

.....

Bc. Theodor Adam

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Lagnerovi, Ph.D. za odborné vedení, informace a ochotu, které mi při zpracování diplomové práce věnoval. Dále děkuji Mgr. Petrovi Otáhalovi, Ph.D. za odborné konzultace a rady, které byly nezbytné pro zpracování této práce. Děkuji také všem kolegům Odboru jaderné ochrany ve Státním ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. za trpělivost a spolupráci. V neposlední řadě také děkuji své celé rodině za jejich podporu a pochopení.

V Příbrami 1. 3. 2023

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vyhodnocením vlivu radonu po těžbě uranové rudy na kvalitu životního prostředí okolních obcí na Příbramsku a navazuje na dlouhodobé monitorování okolí odvalu šachty č. 15 pracovníky DIAMO s.p., O.z. SUL Příbram a Odboru jaderné ochrany SÚJCHBO, v.v.i. V první teoretické části práce jsou shrnuty základní poznatky o historickém vývoji těžby uranové rudy v okolí Příbrami. V další kapitole se práce zaměřuje na základní popis ionizujícího záření, jeho účinky a zdroje, kde se můžeme s ionizujícím zářením setkat. V praktické části práce byla na koruně vybraného odvalu pomocí dronu s termokamerou určena místa s předpokládaným intenzivnějším výronem radonu. Ve dvou letních a zimních po sobě jdoucích obdobích byly uskutečněny odběry a měření koncentrace radonu ve vnějším prostředí na vytipovaných místech na odvalu a na louce pod odvalem. Zároveň také probíhalo kontinuální měření aktivity radonu jak uvnitř, tak i vně zvolených obytných budov v obcích Lešetice, Brod a Konětopy. Meteorologická stanice umístěná na těžebním zařízení šachty č.15 po celou dobu průzkumu monitorovala klimatické parametry v dané oblasti. Ze získaných dat byly vytvořeny denní a roční variace dynamiky koncentrace radonu a mapové podklady v prostředí QGIS. Z výsledků vyplývá, že porovnáním opakovaných měření se potvrzuje vliv okolního prostředí jako je roční a denní období, teplota vzduchu, směr větru, letní a zimní proudění vzduchu uvnitř odvalu a mnoha dalších faktorů na šíření radonu v okolí zkoumaného úložného místa těžebního odpadu. Diplomová práce potvrdila, že odval významně přispívá k objemové aktivitě radonu v okolních obcích v závislosti na povětrnostních podmínkách.

**Klíčová slova:** uran, radon, radiační ochrana, radioaktivita, těžba uranu, QGIS, OAR, PPDE

## **Abstract**

The diploma thesis deals with the evaluation of the influence of radon after the mining of uranium ore on the quality of the environment of the surrounding municipalities in the Příbram region and follows on from the long-term monitoring of the waste dump of the shaft no. 15, based on the decision of the representatives of DIAMO s.p., O.z. SUL Příbram and employees of the Department of Nuclear Protection SÚJCHBO, v.v.i. In the first theoretical part of the thesis, basic knowledge concerning the historical development of uranium ore mining in the vicinity of Příbram is summarized. In the next chapter, the thesis focuses on the basic description of ionizing radiation, its effects, and sources where we can encounter ionizing radiation. In the practical part of the work, the places with the expected more intense radon emission were determined on the crown of the selected waste dump using a drone with a thermal camera. In two successive summer and winter periods, samples, and measurements of the radon concentration in the external environment were carried out at selected locations on the dump and in the meadow below the dump. At the same time, radon activity was continuously measured, both inside and outside selected buildings in the municipalities of Lešetice, Brod and Konětopy. The meteorological station located on the mining equipment of shaft No. 15 monitored the climatic parameters in the area throughout the survey. From the obtained data, daily and seasonal variations of the running of the radon concentration and base map were created in the QGIS environment. The results show that a comparison of repeated measurements confirms the influence of the surrounding environment, such as the season of year and the day period, air temperature, wind direction, summer and winter air flow inside the dump and many other factors on the spread of radon in the vicinity of the investigated mining waste dump. The diploma thesis confirmed that the waste dump significantly contributes to the radon activity concentration in the surrounding municipalities, depending on the weather conditions.

**Keywords:** uranium, radon, radiation protection, radioactivity, uranium mining, QGIS, OAR, PPDE

# Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	Cíle práce .....	11
3.	Literární rešerše .....	12
3.1	Uranové hornictví České republiky .....	12
3.2	Historie těžby uranové rudy na Příbramsku.....	15
3.3	Ionizující záření .....	16
3.4	Radon .....	24
4.	Charakteristika zájmového území .....	26
5.	Současný stav řešené problematiky .....	30
6.	Metodika .....	32
6.1	Technické vybavení .....	33
6.1.1	Dron DJI Matrice 300 RTK .....	33
6.1.2	Hybridní kamera Zenmuse H20T .....	34
6.1.3	Gamaspektrometr GT40 a D230A .....	34
6.1.4	Meteorologická stanice Vantage Pro2 .....	36
6.1.5	Monitor radonu RADIM 3 a 3AT .....	38
6.1.6	Monitor radonu Alpha E .....	39
6.1.7	LUK 4 – měření objemové aktivity radonu .....	40
6.2	Osazení přístrojů RADIM 3AT a meteostanice Vantage Pro2 .....	41
6.3	Zaměření hot spotů na koruně odvalu termokamerou.....	43
6.4	Letecké a pochůzkové měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu .....	44
6.5	Terénní měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu .....	45
6.5.1	Měření pozadí .....	45
6.5.2	Specifikace místa odběru .....	45
6.5.3	Postup při odběru .....	46
6.5.4	Měření objemové aktivity .....	46
6.5.5	Zpracování výsledků měření .....	46
6.6	Vyhodnocení naměřených hodnot .....	47
6.7	Vizualizace zpracovaných dat.....	48
7.	Výsledky .....	49
7.1	Měření PPDE – příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama ...	49
7.2	Zimní terénní měření okamžité objemové aktivity radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) v ovzduší.....	52
7.3	Letní terénní měření okamžité objemové aktivity radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) v ovzduší.....	57
7.4	Zimní kontinuální monitoring OAR .....	60
7.5	Letní kontinuální monitoring OAR.....	65
8.	Diskuse.....	71



9.	Závěr .....	73
10.	Přehled literatury a použitých zdrojů .....	75
10.1	Literární zdroje.....	75
10.2	Elektronické zdroje .....	77

# 1. Úvod

Lidé jsou každý den ozařováni ze zdrojů jako jsou přírodní atmosférické, pozemní a ionizující záření používané v lékařství. Valné shromáždění OSN v roce 1955 na základě obav veřejnosti ze zkoušek jaderných zbraní s možným vlivem atomového záření na ovzduší, vodu a potravu, ustavilo Vědecký výbor OSN o účincích atomového záření. Sekretariát UNSCEAR-United Nations Scientific Committee in the Effects of Atomic Radiation začal soustřeďovat a vyhodnocovat informace o úrovních ionizujícího záření a jejich účincích. Dnes výbor působí pod záštitou Programu OSN pro ochranu životního prostředí (United Nations Environment Programme-UNEP) a pomáhá jednotlivým zemím uplatňovat prakticky prospěšné přístupy k ochraně životního prostředí (UNEP, 2016).

Největší obavy a pozornost veřejnosti jsou v dnešní době soustředěny na umělé zdroje radioaktivního záření jako jsou např. jaderné elektrárny. Avšak největší ozáření obyvatelstva je způsobeno zdroji přírodními. Výzkum věnovaný ozáření způsobeném radonem v budovách a ve vnějších okolních prostorách začal být uskutečňován teprve až na přelomu 70. a 80. let dvacátého století. Organismy jsou přírodnímu ozáření vystaveny neustále a nevyhnutelně. Osoby na Zemi jsou záření vystaveny nerovnoměrně. Dávky v některých oblastech Země převyšují světový průměr až o dva řády deterministických účinků záření. Jedná se o místa s vysokými úrovněmi radonu v budovách. Umhausen v Rakousku a některé obce ve středočeském plutonu a třebíčském syenitovém masivu v České republice jsou vystaveny těmto vysokým úrovním koncentrace radonu v ovzduší. Takto exponované lokality existují v Německu, Skandinávii, USA. Vyšší úrovní zevního záření jsou charakteristická města Kerala v Indii, Guarapari v Brazílii, Ramsar v Iránu aj. (Hůlka, 2000).

V České republice byl zahájen přípravný proces na radonový program v roce 1978 Jáchymově. Jednalo se o unikátní světovou situaci způsobenou kontaminovaným podložím po historické těžbě stříbrné rudy s vyšším radonovým rizikem způsobeným obsahem uranové rudy (Hůlka, 2000).

Celková plocha způsobující ekologickou zátěž po uranovém průmyslu je 0,5 milionu hektarů na území České republiky (Lepka, 2003). Těžba, úprava a zpracování uranové

rudy významně ovlivnili dotčenou krajinu a řadí se mezi hlavní příčinu radioaktivního znečištění životního prostředí (Prach, 2009).

V šedesátých letech byl v Kamenné u Příbrami zřízen Ústav hygieny práce v uranovém průmyslu při těžbě a úpravě radioaktivních surovin, jako složka hygienické služby začleněná při Jáchymovských uranových dolech. V minulosti zde byla zpracována celá řada výzkumných prací na toto dnešní téma – Vliv odvalu po těžbě radioaktivního nerostu na životní prostředí. V současné době probíhá výzkum dané problematiky v navazující organizaci Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. – Odbor jaderné ochrany, který tento výzkumný úkol zpracovává pro Státní úřad jaderné bezpečnosti. Diplomová práce je zaměřena na vyhodnocení vlivu radonu v okolí odvalů po ukončené těžbě v obci Lešetice a Brod.

## **2. Cíle práce**

Cílem diplomové práce je vyhodnocení vlivu radonu z odvalu šachty č. 15 po ukončené těžbě v uranových dolech v okolí obcí Lešetice a Brod na Příbramsku. Popis radiační situace odvalu č. 15 pochůzkovým měřením, monitoringem pomocí dronu a vytvořením map rozložení příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama (PPDE). Zrealizovat odběry vzorků vzdušiny a změřit koncentraci radonu ve vnějším prostředí. Paralelně s monitorováním ve vnějším ovzduší u vytipovaných obytných objektů monitorovat objemovou aktivitu radonu ve vnitřním prostředí. Ze získaných naměřených dat vytvořit denní a roční variace vývoje koncentrace radonu. Vizualizace výsledků měření v programovém prostředí QGIS a dalších vhodně zvolených tabelovaných a grafických výstupů.

### 3. Literární rešerše

#### 3.1 Uranové hornictví České republiky

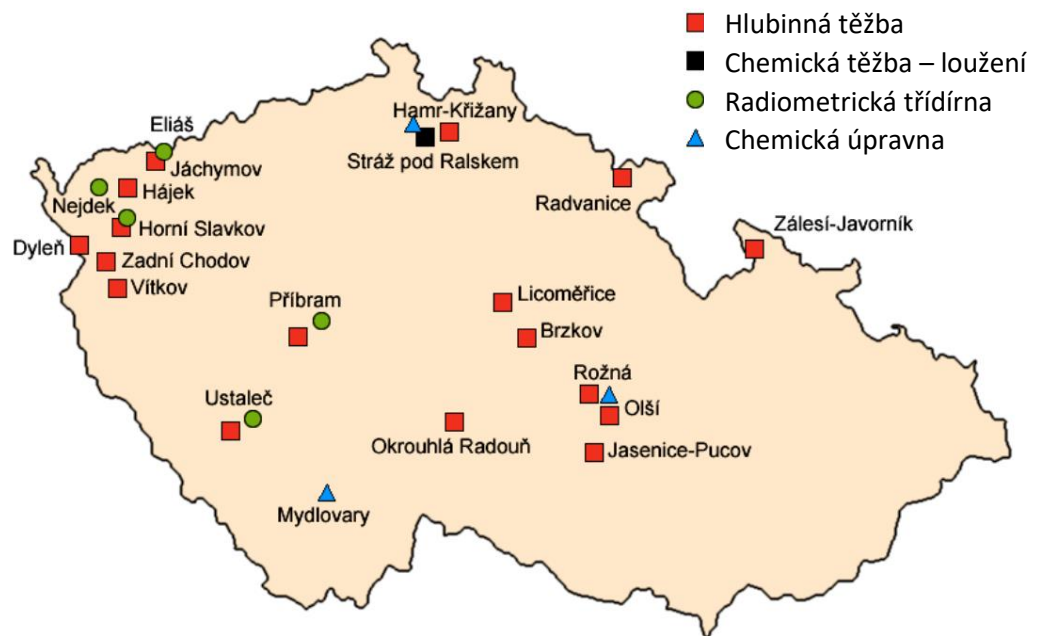
Po roce 1900 sloužily uranové rudy, kromě původního sklářského průmyslu, také k výrobě radia, které našlo uplatnění mimo jiné v lékařství, potravinářském průmyslu, kosmetice a v dalších průmyslových odvětvích. Těžba uranových rud v meziválečném Československu probíhala pouze v Jáchymově. Po svržení atomových bomb na města Hirošima a Nagasaki v roce 1945 šok z ničivé síly atomových zbraní narušil spojení protihitlerovské koalice a vzhledem k tomu, že Sovětský svaz nechtěl ztratit pozici supervelmoci, musel velmi rychle vyvinout stejně ničivou zbraň jako USA. K tomuto procesu výroby jaderné bomby potřeboval uranovou rudu. Známa ložiska se v té době nacházela v Krušných horách. 23.11.1945 byla podepsána „*Dohoda mezi vládou Svazu sovětských socialistických republik a vládou Československé republiky o rozšíření těžby rud a koncentrátů v Československu, obsahujících radium a jiné radioaktivní prvky, jakož i o jejich dodávkách Svazu Sovětských Socialistických Republik*“. Československo se zavázalo zřídit státní těžební podnik za účelem průzkumu a těžby radioaktivních surovin (Kučera & kol., 2019).

S vývojem mezinárodních vztahů a politickou situací v Československu po roce 1945 je úzce spjat rozvoj československého uranového hornictví. Uran se v této době stal strategickou vojenskou a energetickou surovinou (Kafka & kol., 2000).

Do dalších oblastí Čech a Moravy se těžba rozšířila po nátlaku Sovětského svazu. Nejvýznamnější oblasti, kde se v minulosti těžilo zejména stříbro, byly Příbram, Stráž pod Ralskem, Dolní Rožínka a ostatní ložiska v západních a jižních Čechách (Vašků, 2008).

V prvním období těžby uranových rud od roku 1946 do počátku padesátých let, byla zahájena těžba na třech důlních závodech v Jáchymově. Tato činnost byla doprovázena povrchovým radiometrickým průzkumem okolí známých ložisek. První kroky průzkumu jáchymovských ložisek vytvářejí důležitou etapu při budování budoucí surovinové základny československého uranového průmyslu. Byly zpracovány základy metodiky vyhledávání a průzkumu žilných uranových ložisek, výpočty zásob těchto ložisek, základy důlní geofyziky a geologie, které byly využity k úspěšnému nalezení, vyhodnocení a následnému otevření těžebních závodů v dalších

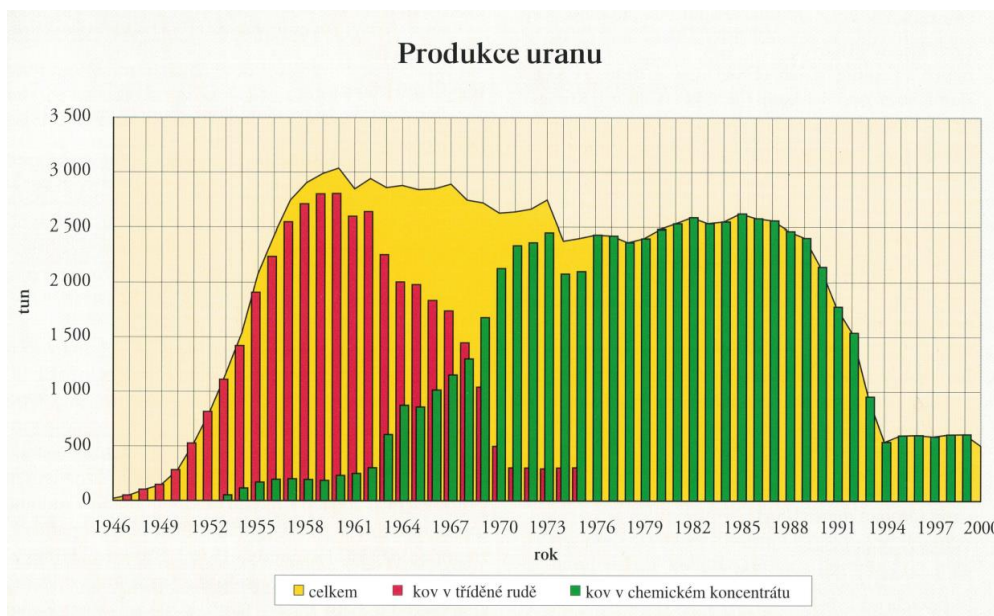
perspektivních oblastech. Ve druhém období, od padesátých do šedesátých let probíhá rychlý rozvoj průzkumu a těžebních prací převážně v komplexech hornin Českého masivu. Třetí období od poloviny šedesátých let do poloviny let osmdesátých je charakterizováno dalším zvýšením vědeckého a metodického řízení při vyhledávání, průzkumu a těžbě uranových ložisek. V tomto období začal výrazný přesun k těžbě na hydrogenních ložiscích v pískovcích severočeské křídly. Polovina osmdesátých let započala čtvrté období, které trvá do současnosti (Obr. 1). Vzhledem k politickým změnám v Československé republice po roce 1989 a rozsáhlé reorganizaci v těžebním průmyslu dochází také k zásadní změně v tomto odvětví (Kafka & kol., 2000).



Obr. 1: Uranové provozy v České republice

Zdroj: DIAMO, 1999

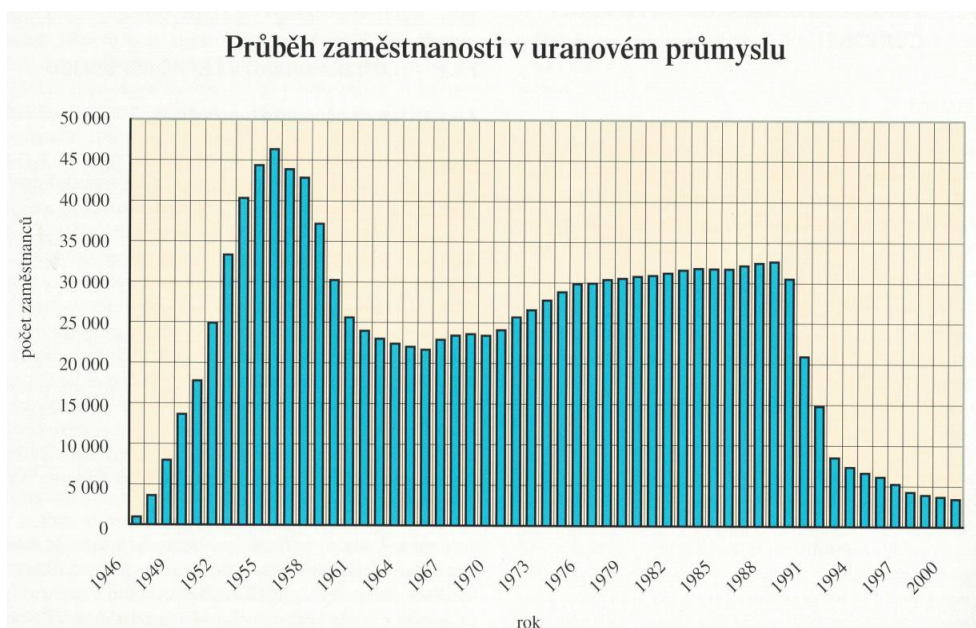
Nadprodukce uranu v letech 1970–1985 měla za následek destabilizaci trhu s uranem na světovém trhu. Celosvětové zpomalení dostaveb jaderných elektráren vyvolala snižování ceny uranu u dlouhodobých kontraktů, a proto ve světě začalo docházet k uzavírání neefektivních dolů (Obr. 2).



Obr. 2: Produkce uranu v České republice

Zdroj: DIAMO, 2010

Postupné utlumování těžby a uzavírání uranových dolů začalo v Československé republice počátkem devadesátých let (Obr. 3). Zastavení, omezení a konzervace je spojena s nákladnými procesy na ochranu životního prostředí (Kafka & kol., 2000).



Obr. 3: Průběh zaměstnanosti v uranovém průmyslu v České republice

Zdroj: DIAMO, 2010

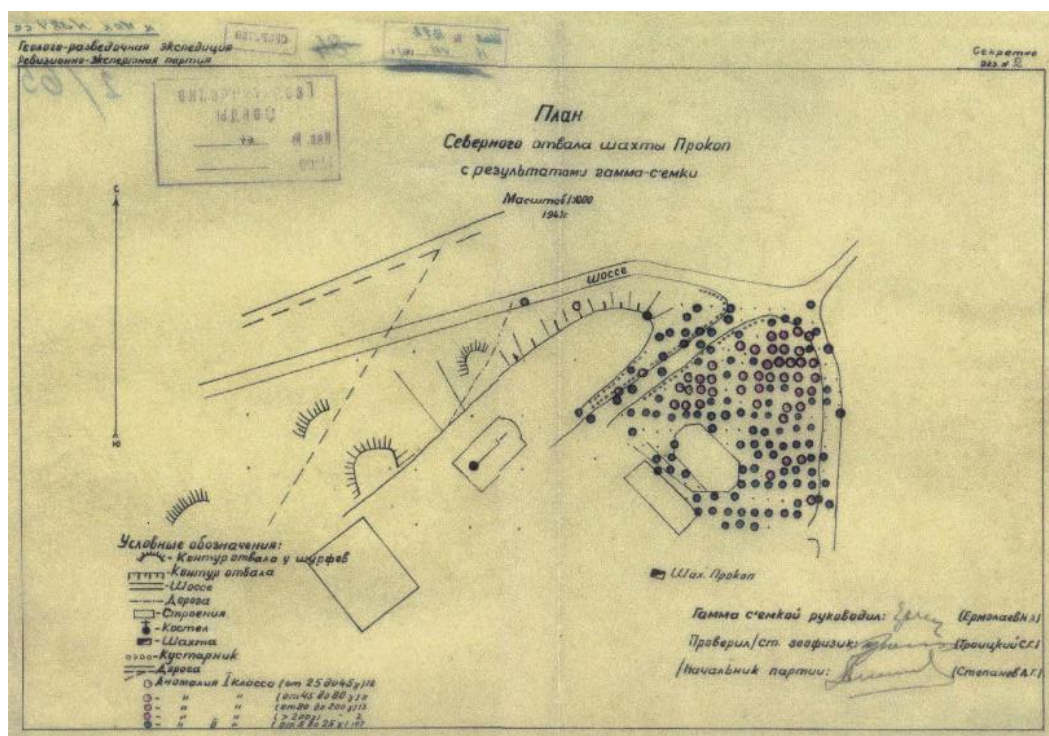
## 3.2 Historie těžby uranové rudy na Příbramsku

Těžba vzácných kovů sahá na Příbramsku až do středověku rýžováním v oblasti mezi Bohutínem a Trhovými Dušníky. Z naplavenin se zde získávalo zlato a z žil ústících na povrchu i stříbro. První dochované zprávy s hornickou činností v Příbrami a okolí se datují od roku 1311. Na Březových Horách v Příbrami se již od konce 13. století rozvíjí těžební činnost těžkých kovů olova a stříbra. Těžba v této době nebyla příliš významná (Velfl, 2003).

Největší rozvoj těžby na Příbramsku nastal v 18. a 19. století. Příbramsko se stalo nejvýznamnějším producentem stříbra v Evropě. Od roku 1870 se začaly používat pro těžbu parní stroje pro práci ve větších hloubkách a díky této nové technologii dokázaly postupně Březové Hory pokrýt spotřebu stříbra Rakouska-Uherska z 97 % a obstát ve světové konkurenci. Na dole Vojtěch v Příbrami se dosáhlo v roce 1875 světového prvenství s těžbou do hloubky jednoho kilometru. Ve 20. století docházelo k postupnému útlumu těžby, ale zároveň k průzkumům k dalšímu využití oblasti (Kuča, 1997).

Rychlé získání co největšího množství uranových rud v souvislosti s politickou poválečnou situací došlo v roce 1946 k rozsáhlému geologickému průzkumu v Československé republice. Příbramsko patřilo mezi vytipované oblasti, protože se zde zachovaly zprávy o výskytu smolince na některých žilách březohorského polymetalického ložiska z dob těžby stříbra a olova. Postupným prováděním průzkumných prací se zájmové oblasti rychle zvětšovaly. Radiometrické měření se provádělo ve znovuotevřených štolách a jámách. Do Příbrami byl v roce 1947 vyslán průzkumný tým v čele s geologem A. I. Zubovem, který pracoval pod patronací Rudných a tuhových dolů (Obr. 4). Svou činnost zaměřila jednotka na odvaly již těžných nebo uzavřených dolů. Celkem bylo prověřeno asi šedesát objektů. Výsledek předběžného průzkumu byla zpráva označující okolí Příbrami jako potenciálně průmyslově využitelný zdroj Fe-U zrudnění a vhodný k detailnějšímu průzkumu. Oblast kolem Příbrami byla rozšířena o 50 km směrem na jihozápad. Úkolem detailnějšího průzkumu skupiny K2 v roce 1948 bylo provést vyhledávací geologický průzkum uranového zrudnění na linii dlouhé 100 km na kontaktu středočeského plutonu s horninami paleozoika barrandienské oblasti. Linie se táhla od Říčan po Nepomuk s centrem oblasti v Příbrami. V okolí města Příbram tak bylo

postupně otevřeno 31 důlních děl a šurfů a svým plošným a hloubkovým rozsahem se zařadilo příbramské uran-polymerické ložisko k nejvýznamnějším a největším hydrotermálním ložiskům na světě. Za 45 let těžby se v příbramských uranových dolech vytěžilo 48,4 tisíc tun uranu (Kučera & kol., 2019).



Obr. 4: Plán části odvalu jámy Prokop na Březových Horách z roku 1947 s výsledky gama záření

Zdroj: DIAMO, 2022

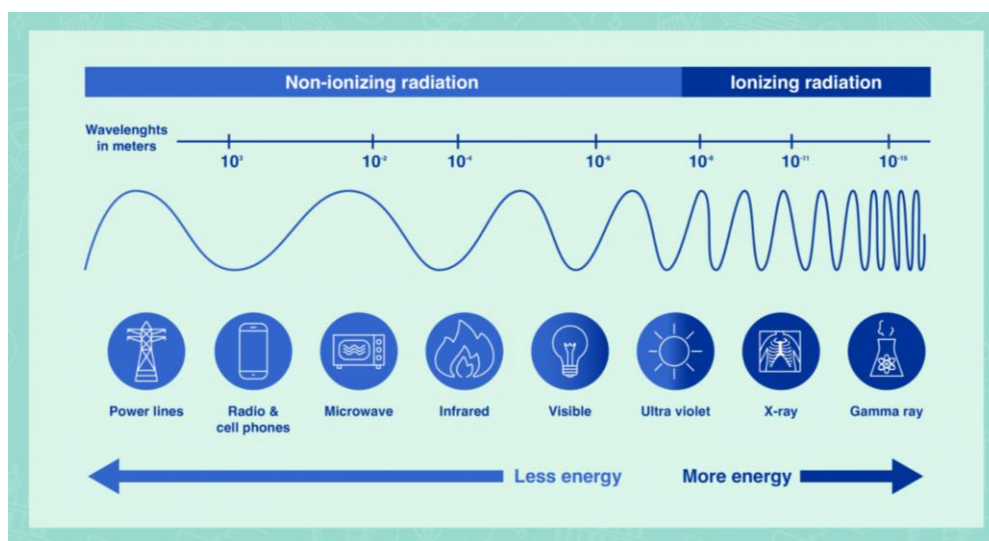
### 3.3 Ionizující záření

Historie poznávání zdrojů záření začala v prosinci roku 1895, kdy profesor univerzity ve Würzburgu Wilhlem Conrad Röntgen objevil záření X, které bylo první poznané ionizující záření a významně změnilo soudobou fyziku. Podstata rentgenového záření nebyla dokonale známa, ale i tak se stala rentgenka součástí vybavení mnoha laboratoří a ordinací. Ve zdokonalené formě z roku 1913 je dnes nejrozšířenějším zdrojem ionizujícího záření pro lékařské účely. V roce 1896 profesor Antoine Henri Becquerel zveřejnil svoji zprávu o soli uranu vysílající neznámé paprsky způsobující zčernání fotografické emulze a ionizaci vzduchu. Tento jev nazval



radioaktivitou, která se projevuje spontánním uvolňováním energie z atomu. Pierre a Marie Curieovi navázali na jeho výzkum. Pokračujícím výzkumem byly poznány přírodní radionuklidy jako další zdroje ionizujícího záření. Na přelomu 19. a 20. století intenzivní pozorování vedla ke zjištění, že nový jev neemituje jediný druh záření, ale tři druhy označené  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$  (Musílek, 2000).

Ionizující záření má dostatek energie schopné uvolňovat elektrony z atomů a nechává atomy elektricky nabitě. Neionizující záření, jako jsou rádiové vlny, ultrafialové záření nebo viditelné světlo takovou možnost nemá. Ionizující záření dělíme na přirozené a umělé. Přirozené ionizující záření zodpovídá za 80% expozice a umělé ionizující záření působí jen z 20 % z celkové expozice. Radionuklidy obsaženy v zemském jádru a v zemské kůře a kosmické záření jsou zařazeny mezi přírodní zdroje záření. Proto není možné se zcela vyhnout expozici z přírodních zdrojů (UNEP, 2016).



Obr. 5: Aplikace elektromagnetického záření

Zdroj: IAEA, 2022

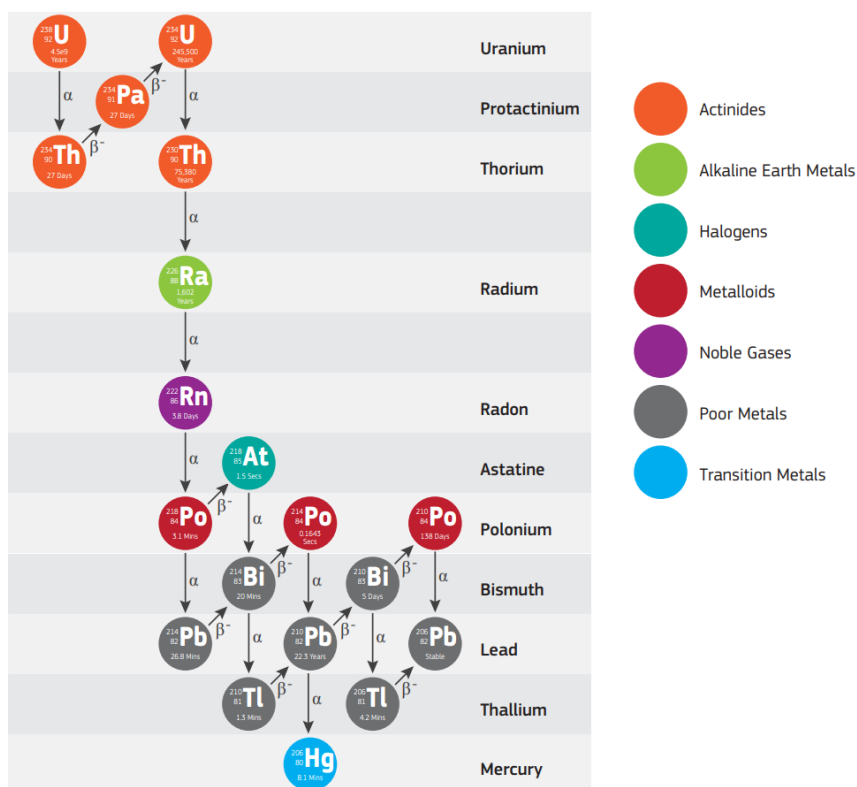
Radioaktivita je dnes měřena v jednotkách nazvaných po Henrim Becquerelovi becquerel (Bq). Manželé Curieovi objevili, že uran se přeměňuje na jiné prvky, které nazvali polonium a radium. Marie Curie, Pierre Curie a Henri Becquerel obdrželi v roce 1903 za tento objev Nobelovu cenu v oboru fyziky (UNEP, 2016).

Atom je nejmenší jednotka jakéhokoliv chemického prvku, skládající se z pozitivně nabitého jádra obklopeného negativně nabitými elektrony. Jádro se skládá ze shluku částic kladně nabitých protonů a neutrálních neutronů. Jádro svou velikostí představuje jen asi sto tisícinu celého atomu, ale svou hmotností odpovídá prakticky celé úhrnné hmotě atomu. Jádro je obklopeno mrakem záporně nabitých elektronů. V klidovém, nenabitém atomu je počet elektronů a protonů shodný a odpovídá atomovému číslu prvku. Prvky se shodným počtem protonů, ale rozličným počtem neutronů se nazývají izotopy. Např. uran-235 a uran-238 se liší o tři neutrony v jádře. Všechny izotopy daného prvku mají stejný počet protonů, ale různé počty neutronů v každém atomu. Některé atomy jsou přirozeně stabilní a jiné jsou nestabilní. Radionuklidy jsou atomy, které mají nestabilní jádro, spontánně se přeměňují a uvolňují energii v podobě záření. Ionizace a excitace působí na jiné atomy. Ionizace je proces, ve kterém atom získává kladný nebo záporný náboj v důsledku ztráty nebo získání elektronu. Energie ionizujícího záření nese takovou energii, že může odtrhnout elektrony z jejich oběžné dráhy a vytvářet nabité atomy nazvané ionty. Podstata přeměny alfa je vyzáření seskupení dvou protonů a dvou neutronů. Vyzáření elektronů nebo pozitronů je označeno jako přeměna beta. Nestabilní nuklid nese takové množství energie, že emise částic nestačí na jeho stabilizaci a vydává poté výstřel energie ve formě elektromagnetického vlnění (fotonů). Toto je podstata záření gama (Cinelli & kol., 2019).

Přírodní ozáření je způsobeno kosmickým zářením a přírodními radionuklidy. Kosmické záření dopadá na Zemi z vesmíru. Ozařuje člověka zejména externě a je závislé na nadmořské výšce a poloze na zemském povrchu. Kosmické paprsky z našeho Slunce a naší galaxie, pozemské záření ze zemské kůry i začlenění radioizotopů z biosféry představuje celotělové expozice. Další cestou je vdechování vzácného plynu radonu a jeho přeměnových produktů, který představuje zejména expozici pro plíce a průdušky. Kromě těchto přírodních zdrojů jsou možné další možné způsoby ozáření v důsledku vědeckých a lékařských zařízení vyvinutých moderní společností. Existence přírodních radioaktivních látek dokazuje, že radioaktivita a rozvoj života koexistují již od nejstarších dob (Grupen, 2010).

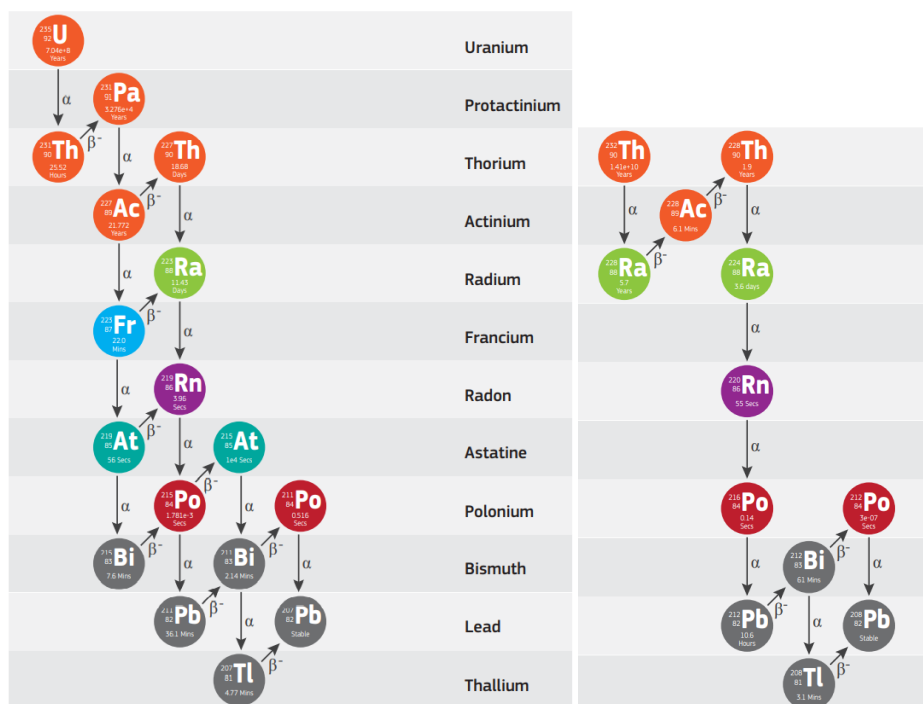
Přírodní radionuklidy vyskytující se v našem životním prostředí se rozdělují do tří hlavních skupin. Kosmogenní radionuklidy vznikající průběžně jadernými reakcemi interakcemi kosmického záření se stabilními prvky ve vnějším obalu země. Původní

primordiální radionuklidy vznikly v raných stádiích vesmíru. Vzhledem k dlouhému poločasu přeměny  $> 10^8$  roků se dosud nalézají na planetě Zemi ve značném množství. Jedná se hlavně o  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , atd. Poslední skupinou jsou radionuklidy vznikající sekundárně z původních primordiálních radionuklidů tvořících přeměnové řady. V přírodním prostředí se setkáváme s třemi přeměnovými řadami, a to s uran-radiovou, thoriovou a aktiniovou. Doba, za kterou se množství nestabilního prvku přemění na polovinu, se nazývá poločas přeměny. Aby se polovina původního množství uranu  $^{238}\text{U}$  přeměnila na svůj dceřiný produkt thorium  $^{234}\text{Th}$  je zapotřebí čtyři a půl miliardy let. Poločas přeměny radia  $^{226}\text{Ra}$  je 1602 roků, poločas přeměny radonu  $^{222}\text{Rn}$  je 3,8 dne atd. Takto se prvky postupně přeměňují v různých časech až do stabilního kovu olova  $^{206}\text{Pb}$  (Obr. 6), které se dále nerozpadá (SÚJB, 2022).



Obr. 6: Uran ( $^{238}\text{U}$ ) radiová rozpadová řada

Zdroj: UNSCEAR, 2000



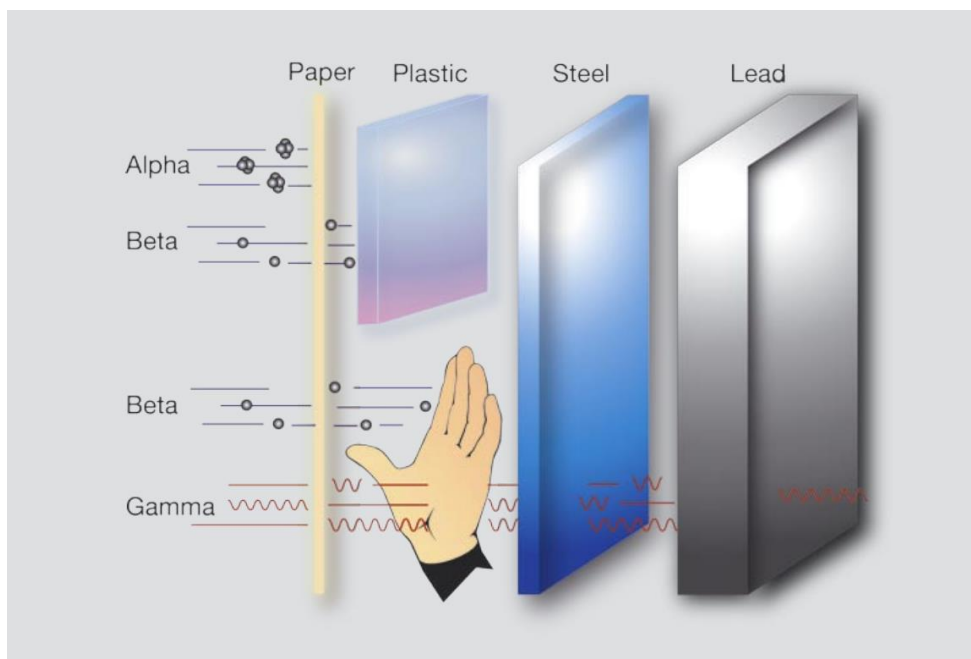
Obr. 7: Uran ( $^{235}\text{U}$ ) aktiniová a ( $^{238}\text{Th}$ ) thoriiová rozpadová řada

Zdroj: UNSCEAR, 2000

Energie záření může poškozovat živou tkáň. Množství energie předané živé hmotě se vyjadřuje ve veličině dávka. Dávkové veličiny jsou vyjadřovány různými způsoby v závislosti na ozáření jednotlivce nebo skupin osob, trvání expozice nebo v závislosti na tom, jaký objem těla a jeho části byly ozářeny. Absorbovaná dávka vyjádřená v jednotkách gray (Gy) vyjadřuje množství zářivé energie (odpovídající 1 J) pohlcené v jednom kilogramu živé váhy. Je pojmenovaná po anglickém fyzikovi Haroldovi Grayovi. Tato veličina nevyjadřuje přesnou a úplnou představu a význam ozáření. Totožná dávka záření alfa vyvolá větší poškození než stejná dávka od beta částic nebo gama záření. Ke srovnání významu absorbovaných dávek různých typů záření je potřeba dávku vážit vzhledem k potenciálu biologické škody. Vážená dávka se nazývá ekvivalentní dávka. Jednotky pro váženou dávku se uvádějí podle švédského vědce Rolfa Sieverta – sievert (Sv). Některé části těla jsou zranitelnější než druhé. Ekvivalentní dávky jsou váženy ve vztahu k rozdílným částem těla. Výsledkem vážení dle vnímavosti jednotlivých orgánů a tkání je veličina zvaná efektivní dávka, také vyjádřená v jednotkách sievert (Sv). Po sečtení všech individuálních dávek získáme kolektivní efektivní dávku uváděnou v man-sievertech (man Sv). Roční kolektivní

dávka populace z celého světa je více než 19 milionů man Sv. Roční průměrná dávka jednotlivce je 3 mSv (UNEP, 2016).

Různé druhy vysílané energie a typy částic mají různou pronikavost látkou a jiné účinky na živou hmotu. Alfa částice mají dva pozitivně nabitě protony a dva neutrony a jsou mezi částicemi nositeli největšího náboje. Tyto poměrně masivní částice mají krátký dosah ve vzduchu v závislosti na energii až cca osm cm a mohou být zcela absorbovány papírem. Alfa záření může být nebezpečné, pokud se dostane do těla vdechováním nebo požitím. Beta částice, které jsou tvořeny negativně nabitými elektrony, nesou menší náboj než alfa částice a mohou pronikat v živé tkáni do hloubky jednoho až dvou centimetrů. Beta záření může být absorbováno plastovými deskami, sklem a kovem. Normálně neproniká za horní vrstvu kůže. Vysokoenergetický zářič může způsobit popáleniny. Gama záření způsobuje ionizaci v atomech, když prochází hmotou primárně s interakcí s elektrony (Obr. 8). Může být velmi penetrační a pouze podstatná tloušťka hustých materiálů, jako je ocel nebo olovo mohou poskytnout dobré stínění. Gama záření tedy může dodávat významné dávky do vnitřních orgánů bez vdechnutí nebo požití. Rentgenové paprsky jsou vysokoenergetické fotony a vznikají uměle rychlým zpomalením elektronových paprsků. Rentgenové záření je na tom podobně s pronikavostí jako gama záření a při nestínění vhodnými materiály může dodat významné dávky do vnitřních orgánů. Kosmické záření přichází z hlubokého vesmíru. Je to směs mnoha různých typů záření, včetně protonů, alfa částic, elektronů a dalších exotických (vysokoenergetických) částic. Všechny tyto energetické částice interagují silně s atmosférou a výsledkem je kosmické záření na úrovni země obsahující především miony, neutrony, elektrony, pozitrony a fotony. Většina dávky na úrovni země pochází z mionů a elektronů (IAEA, 2014).

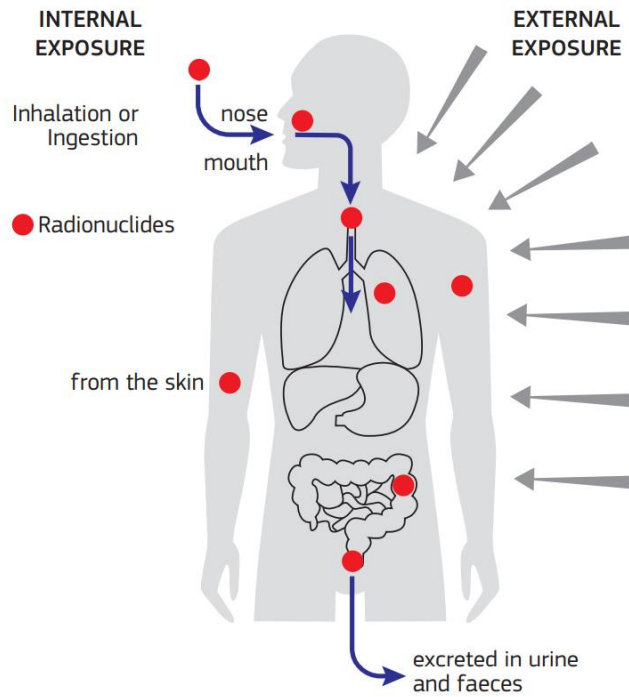


*Obr. 8: Pronikavost různých typů záření*

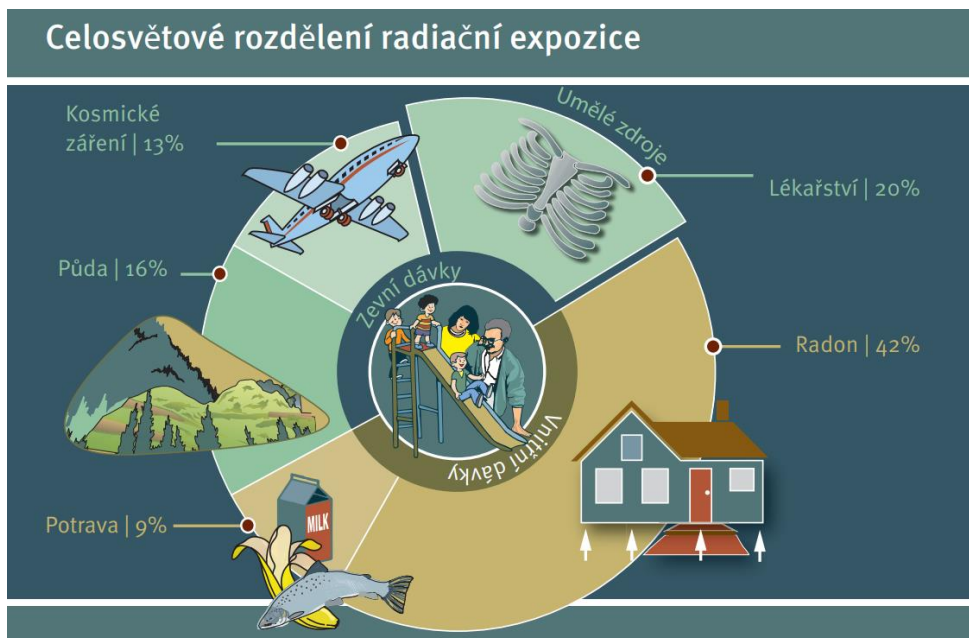
*Zdroj: IAEA, 2014*

Živé organismy jsou vystaveny záření z několika přírodních zdrojů a do značné míry je tato expozice nevyhnutelná. Přírozená radioaktivita pochází z mimozemských zdrojů a z radioaktivních prvků v zemské kůře. V přírodě bylo nalezeno asi 340 nuklidů, z toho asi 70 je radioaktivních. Všechny prvky s atomovým číslem vyšším než 80 mají radioaktivní izotopy (Eisenbud, 1997).

Radiační expozice jsou kategorizovány podle zdrojů a se zaměřením na ozáření obyvatelstva. Jiná kategorizace vychází ze způsobů, jakou cestou jsme ozařováni (Obr.9). Z vnějších zdrojů jsme ozařováni zevně (externě). Vnitřně (interně) jsme ozáření radioaktivními látkami požitými v potravě, v nápojích, můžeme je vstřebat kůží, anebo otevřenými poraněními. Dávky vnitřního a zevního ozáření jsou z celosvětového hlediska v přibližné rovnováze (UNEP, 2016).



Obr. 9: Externí a interní cesty expozice radioaktivního záření  
Zdroj: UNSCEAR, 2000



Obr. 10: Celosvětové rozdělení radiační expozice  
Zdroj: UNEP, 2016

Vystavení ionizujícímu záření může být pro lidský organismus nebezpečné. Deterministické neboli prahové a pozdní stochastické účinky nelze lehce definovat. Deterministické účinky jsou důsledkem poškození velkého počtu buněk a projevují se až po několika dnech a déle po expozici (Edwards, 1998).

Po překročení určité hodnoty v průběhu několika let způsobují stochastické účinky změny jedné nebo více buněk. Tyto účinky mohou vést ke genetickým změnám nebo například k rakovině orgánů. Vliv záření na organismus byl již pozorován a zaznamenán v roce 1895 a vědečtí pracovníci zkoumající radioaktivní zdroje trpěli dermatitidou označovanou jako popáleniny vyvolané rádiem. Později po svrnutí atomových bomb na města Hirošimu a Nagasaki došlo k intenzivnímu rozvoji radiobiologie (Vávrová, 2002).

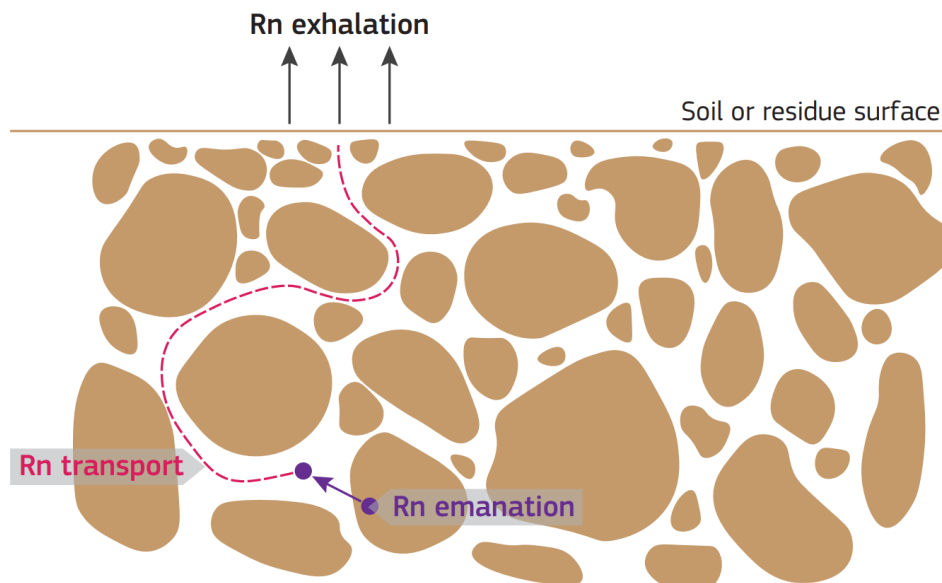
### 3.4 Radon

Radon je bezbarvý, bez zápachu, radioaktivní vzácný plyn, který se v přírodě vyskytuje ve třech izotopech:  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  a  $^{219}\text{Rn}$ . Izotopy radonu  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  jsou ušlechtilé, přirozeně se vyskytující radioaktivní plyny. Vznikají rozpadem alfa izotopů radia ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ), které se vyskytují ve většině materiálů v životním prostředí, tj. horniny, suroviny a stavební materiály. Jsou to dva izotopy radonu chemicky identické, ale mají velmi odlišné poločasy rozpadu: 3,82 dne pro radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) a 56 sekund pro thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ). Chovají se fyzikálně velmi odlišně v prostředí. Oba izotopy jsou alfa-zářiče a jejich produkty rozkladu jsou izotopy polonia, bizmutu a olova (Nazaroff & Nero, 1988).

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) je celosvětově dominantním zdrojem vystavení člověka ionizujícímu záření (Cooper & kol., 2003).

Atomy radonu vznikající v půdě nebo hornině mohou unikat do vzduchu (Obr. 11). Ve většině případů je hlavním dominantním přispěvatelem považován radon v půdním plynu (Cinelli, 2019).





*Obr. 11: Proces vedoucí k uvolnění radonu do atmosféry*

*Zdroj: Ishimori & kol, 2013*

Ve volné přírodě radon nepředstavuje problém, protože se rychle rozptýlí s poločasem přeměny 3,82 dne. Přeměnové prvky radonu jsou však v interiéru nevětraných budov intenzivně vdechovány, ulpívají na vdechovaných prachových a aerosolových částicích a zachycují se v různých částech plic. Po vdechnutí jsou některé krátkodobé rozpadové produkty radonu zejména polonium  $^{218}\text{Po}$  a polonium  $^{214}\text{Po}$  zachycovány v plicích a jimi uvolňované částice alfa ozařují buňky výstelky dýchacích cest. Radon je základní příčinou vzniku rakoviny plic u osob vystavených ve vyšší míře inhalaci radonu (Cothorn & Smith, 1987).

Koncentrace radonu může narůstat v obytných místnostech vzhledem k tomu, že radon je přítomen všude v atmosféře a může pronikat do budov jednak z podlaží stavby, tak i netěsnostmi v konstrukci budovy. Objemová aktivita je definovaná jako počet radioaktivních přeměn za jednotku času v jednotkovém objemu. Aktivní nasávání radonu z podlaží nastává zpravidla při vytápění domu a špatném systému větrání. Celosvětová průměrná koncentrace radonu v budovách (indoor radon) je asi  $50 \text{ Bq/m}^3$ . Tento průměr je ovšem variabilní od  $10 \text{ Bq/m}^3$  v Egyptě, na Kubě a Kypru až po  $100 \text{ Bq/m}^3$  v České republice, Finsku a Lucembursku (UNEP, 2016).

Typická celosvětová koncentrace radonu ve venkovním ovzduší (outdoor radon) je  $10 \text{ Bq/m}^3$  (UNSCEAR, 2000).

## 4. Charakteristika zájmového území

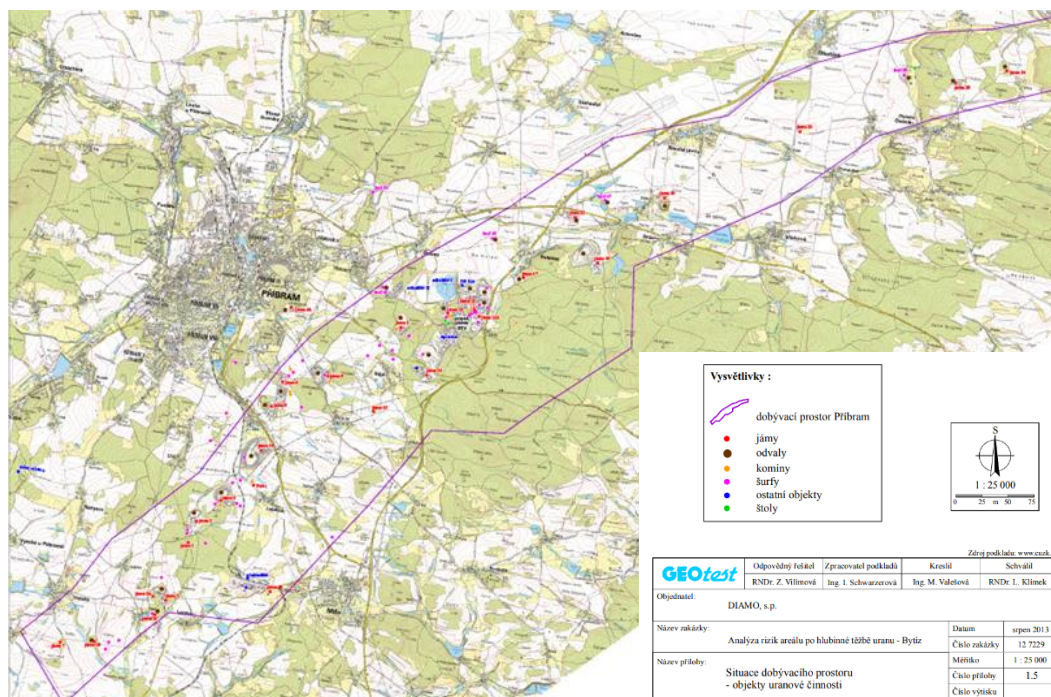
Český masiv a západní Karpaty jsou dvě základní geologické soustavy, do kterých spadá území České republiky. Karpatská soustava zasahuje území České republiky svojí západní částí a nemá velký význam z hlediska rudného a uranového hornictví. Český masiv zabírá většinu rozlohy Čech, Slezska, západní Moravy a zasahuje do oblastí v Německu, Polsku a Rakousku (Majer, 2004).

V geologické stavbě střední Evropy tvoří Český masiv tektonicky omezenou kruhově několikrát vyzvednutou nad své okolí a vystavenou hluboké denudaci. Typicky se zde vykytuje velké množství ložisek s navzájem rozdílným původem a látkovým složením. Tyto zásoby jednotlivých surovin jsou poměrně malé. Jinak tomu ale je u ložisek uranu v Českém masivu, která jsou ve srovnání s celým euroasijským kontinentem v této oblasti neobyčejně bohatá. Český masiv obsahuje uranové zrudnění jak s endogenními, tak i s exogenními ložisky (Tomíček, 2000).

Příbramský rudní rajon je situován po geologické stránce do středočeského plutonického komplexu. V této oblasti procházejí žíly útvary proterozoikem a kambriem. Břidlice, diabasy, tufy a lávy vytváří převážně proterozoické pásmo. Kambrické pásmo hornin nejbohatší na rudné žíly je tvořeno pískovci, slepenci a drobnými. Jílová rozsedlina odděluje oba útvary a tím reprezentuje vrásový přesmyk proterozoika před kambriem (Kafka & kol., 2000).

Příbramský rudný revír obsahoval významné zásoby uranové rudy. Akumulace uranu jsou vázány na středočeský pluton. Rudné pole v Příbrami představovalo nejrozsáhlejší uranové zrudnění žilného typu v Českém masivu. Uranové zrudnění v tomto regionu se táhne podél okraje Středočeského žulového plutonu v 1-2 km širokém pásu v délce 25 km. V zájmové lokalitě bylo celkem objeveno 35 rudních žil (Lepka, 2003).

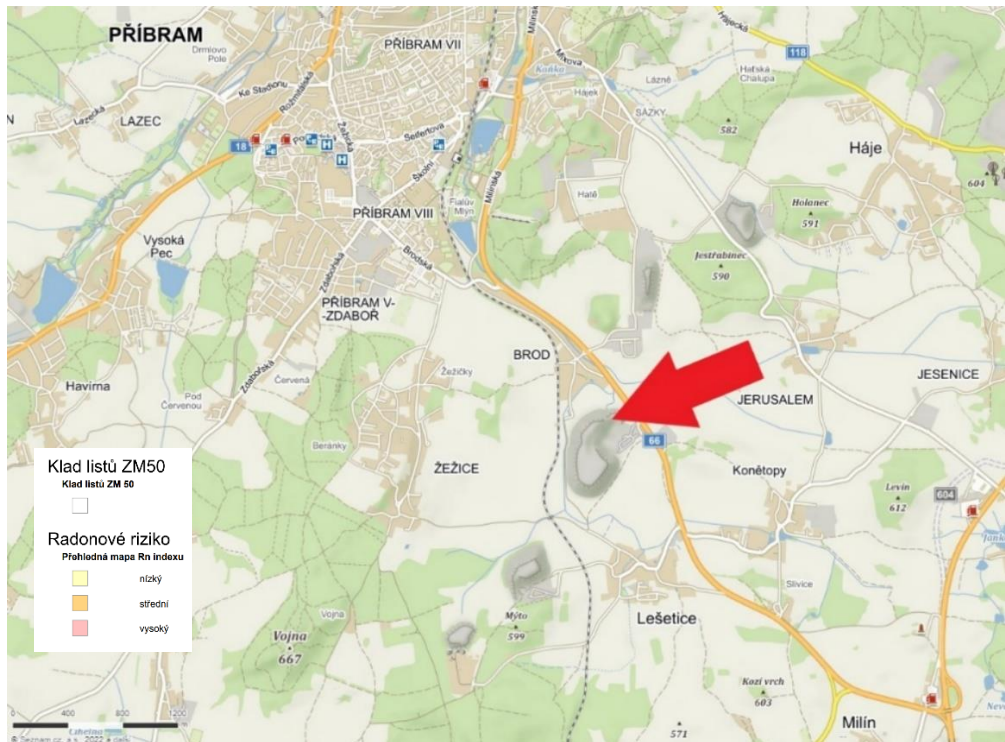
V oblasti podél Příbrami se nachází 31 odvalů bývalých uranových dolů. Lokalizace dobývacích prostorů se rozprostírá od jihu postupně severovýchodním směrem k obci Obořiště (Obr. 12).



Obr. 12: Mapa dobývacího prostoru Příbram

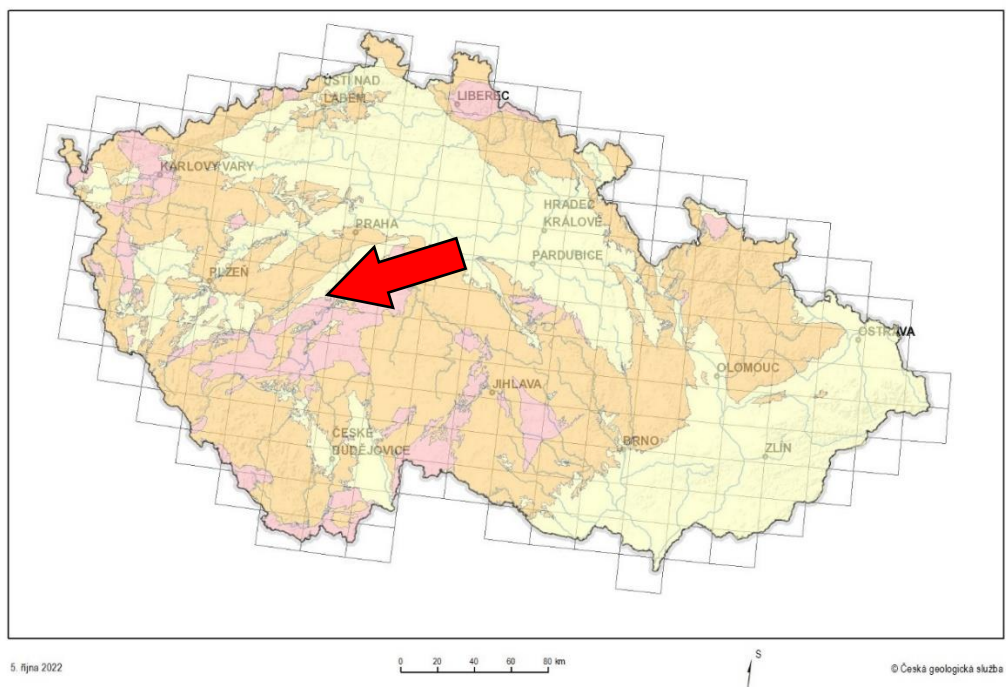
Zdroj: DIAMO, s.p., 2022

Vybraný odval šachty č. 15 se nalézá mezi obcemi Lešetice a Brod na jihovýchodním okraji okresního města Příbram ve Středočeském kraji na GPS pozici 49.6548075N, 14.0147717E (Obr. 13). V těsné blízkosti odvalu se nalézá silnice č. I/66 Příbram – Milín a monitorovaným územím protéká Příbramský potok. Podle mapy radonového indexu se odval č.15 nachází v oblasti nízkého radonového rizika z podloží (Obr. 14 a 15).



Obr. 13: Lokalizace zájmového území – Odval šachty č.15

Zdroj: Mapy.cz, 2022



Obr. 14: Mapa radonového indexu ČR

Zdroj: Česká geologická služba, 2022





## 5. Současný stav řešené problematiky

K mapování příkonu prostorového dávkového ekvivalentu se používají bezpilotní systémy různých kategorií. Bezprostředně po úniku radioaktivního materiálu do prostředí v případě havárií, nebo silného přírodního působení radioaktivních prvků je nutné rychle určit prostorové rozložení radioaktivity. V současnosti se provádí pomocí pilotovaných vrtulníků vybavených velkými systémy detekce záření (Connor & kol., 2020). I když jsou schopny rychle zmapovat velké oblasti, trpí nízkým prostorovým rozlišením kvůli provozní výšce letadla. Jejich nasazení je také drahé a jejich povaha s lidskou posádkou znamená, že operátoři jsou stále vystaveni riziku působení škodlivého ionizujícího záření. Předchozí studie (Bai Li & kol., 2018) identifikovaly proveditelnost využití bezpilotních vzdušných systémů (UAS) při monitorování záření v prostředí po katastrofě. Většina těchto systémů však trpí omezeným rozsahem nebo jsou příliš těžké na to, aby je bylo možné snadno začlenit do regulačních opatření, která existují při nasazení UAS po celém světě. Mapování UAS založené na lehkém bezpilotním letounu s pevnými křídly a jeho testování vhodnosti pro mapování radiace po katastrofě v uzavřené zóně Černobylu bylo zpracováno v dalších studiích (Newaz & kol., 2016). Systém je schopen nepřetržitého letu déle než jednu hodinu a dokáže rozlišit malé měřítko změny dávkového příkonu ve vysokém rozlišení (pod 20 m). Tyto systémy by mohly být využity k mapování velkých oblastí nebezpečné lokality, aniž by byl jediný operátor vystaven škodlivé dávce ionizujícího záření (Connor & kol., 2020).

Bai Li & kol. (2018) ve své studii popisují použití multirotorové helikoptéry (dron) k průzkumu menších oblastí. Popisuje platformu, která využívá levné bezpilotní vzdušné stroje UAV. Automaticky a efektivně vyhledávají nekontrolované radioaktivní zdroje i při nižší aktivitě. Hardware této platformy se skládá z více rotorového UAV, senzoru detekce záření, hlavního ovládání, modulu, gimbálu, kamery a pozemní řídicí stanice. V procesu hledání stanice a UAV komunikují bezdrátově v reálném čase. Platforma a algoritmy umožňují přesné a efektivní vyhledávání radioaktivní zdroje, které poskytují inovativní demonstraci budoucího hodnocení rizik pro životní prostředí.

Společně s analýzou topografických map popisuje Newaz & kol. (2016) detekci hotspotů ve zkoumané oblasti. K nalezení aktivního bodu se používá několik strategií

v neznámém radiačním poli. Tyto strategie se většinou dělí do dvou kategorií, a to bez modelové a založené na modelu. Konkrétně přístupy bez modelu zahrnují sledování stochastického gradientu intenzity radiačního pole. Tyto algoritmy mají tendenci konvergovat do sousedství místního maxima pole. V kontextu přístupu založeného na modelu, vyhledávání zdrojů lze provést buď pomocí vzájemné informace nebo gradientu a poté lze hotspot lokalizovat o předem definovanou prahovou hodnotu. Využíváme pro hledání zdroje algoritmus generování trajektorie UAV z libovolné intenzity zóny do zóny hotspotu.

V SÚJCHBO, v.v.i. (2016) byla vytvořena certifikovaná metodika Měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud. Cílem metodiky je poskytnout základní ucelený nástroj pro měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu (PPDE) v zadané oblasti s využitím bezpilotního leteckého prostředku, lokalizaci míst se zvýšeným příkonem prostorového dávkového ekvivalentu, identifikaci zdrojů a vytvoření mapy rozložení PPDE. Metodika je určena pro screeningové měření a rychlý průzkum rozsáhlých ploch v případě existujícího rizika zvýšeného zastoupení radioaktivních prvků důsledkem činnosti spojené s dobýváním a úpravou radioaktivních nerostů. Pro zhodnocení vlivu radonu z odvalu šachty č.15 po těžbě uranové rudy na kvalitu životního prostředí okolních obcí na Příbramsku byla výše uvedená certifikovaná metoda použita a pro bezpilotní průzkum vytvořena ve Státním ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. v Kamenné.

Je všeobecně známo, že koncentrace radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) ve venkovním vzduchu jsou nízké a nemají zásadní dopad na zdraví (WHO, 2009). Steck a Yassin (2001) tvrdí, že celosvětově průměrná radonová koncentrace ve venkovním vzduchu se pohybuje od 7 do 55 Bq/m<sup>3</sup>. Podle UNSCEAR (2000), typické venkovní koncentrace radonu jsou řádově 10 Bq/m<sup>3</sup>.

Vzhledem k neustále se přibližující výstavbě obytných domů v těsné blízkosti odvalů s potencionálním rizikem vlivu radioaktivních materiálů na své okolí byl v zájmové oblasti proveden kontinuální monitoring objemové aktivity radonu (OAR) ve vybraných obytných budovách v těsném okolí odvalu. Mehta & kol. (2016) používá pro měření radoonu a thoronu a jejich přeměnových prvků kontinuální metodu

pasivního odběru radonu a thoronu (PRTM – passive radon and thoron meters). Jako další možné metody uvádí Sethy & kol. (2014) ve své studii jednorázových odběrů vzorků vzduchu do scintilačních komůrek a následné vyhodnocení v detekčním přístroji LUK. Tento postup je možné porovnat a ověřit s přístroji AlfaGuard. Pro tuto diplomovou práci byl zvolen postup měření určené metodikou jednorázových a kontinuálních odběrů vzorků vzduchu Odboru jaderné ochrany Státního ústavu jaderné chemické a biologické ochrany, v.v.i. SÚJCHBO, v.v.i., (1991). vycházející z metod odběrů vzduchu Lucase (1957) a Thomase & kol., (2000), ve kterých se k měření ovzduší používají scintilační komůrky a vyhodnocovací přístroje LUK pro jednorázové odběry vzorků a kontinuální monitory radonu pro dlouhodobé monitorování.

## **6. Metodika**

Pro terénní průzkum bude použito vhodné technické certifikované vybavení k měření radiačních veličin. Osazení přístrojů pro kontinuální monitoring objemové aktivity radonu ve vnějším a vnitřním prostředí proběhne ve vytipovaných bodech v obcích v okolí odvalu. Po dobu celého výzkumného úkolu bude okolí odvalu monitorováno nainstalovanou meteostanicí pro zaznamenání teplotních a povětrnostních podmínek. Zaměření hot spotů na koruně odvalu termokamerou se uskuteční před samotným leteckým a pochůzkovým měřením příkonu prostorového dávkového ekvivalentu. Terénní měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu na koruně odvalu a na louce pod odvalem bude realizováno ve dvou fázích, a to v březnu a v září v roce 2022. Získaná data budou zpracována a vyhodnocena v programu QGIS a ve výsledných grafech



## 6.1 Technické vybavení

Použité zařízení lze rozdělit na přístroje určené pro letecké a pochůzkové monitorování PPDE, přístroje pro kontinuální monitorování OAR a jednorázové odběry vzorků vzdušiny a vyhodnocovací přístroje.

### 6.1.1 Dron DJI Matrice 300 RTK

V monitorovaném areálu odvalu šachty č.15 proběhlo letecké měření za použití dronu DJI Matrice 300RTK s připojenou hybridní kamerou. Pomocí termokamery umístěné na dronu byla určena místa s vyšší teplotou (Hot Spots) pro pozdější odběr vzorků vzduchu (Obr. 17).

Technický popis dronu:

Max. vzletová hmotnost: 9 kg  
Max. nosnost: 2,7 kg  
Až 3 různé snímače či kamery na gimbalech  
Max. výdrž: 55 min  
Dosah wifi 8 km v normě CE  
Odolnost větru do 15 m/s  
Odolnost proti vodě a prachu: IP 45  
Polohovací systém RTK  
Rozsah teplot -20 až +50 °C  
SW DJI Pilot  
Přenosový systém: OcuSync 2.0  
Polohovací systém: RTK



*Obr. 17: DJI Matrice 300 RTK*

*Zdroj: DJI Shenzhen, 2022*

### 6.1.2 Hybridní kamera Zenmuse H20T

Kamery se na dron připojují na gimbalech, který eliminuje otřesy a náklony. Výsledné video není roztřesené a nehoupe se horizont (Obr. 18).

Technický popis kamery:

Hmotnost: 828 g  
Optický zoom: 23x  
Zorné pole: 82.9°  
Rozlišení videa: 4k  
Rozlišení foto: 20 Mpx  
Laserový dálkoměr s rozsahem: 3–1200 m  
Termální kamera s rozlišením: 640x512 px  
Odolnost IP44  
Rozsah provozních teplot -20 až +50 °C



*Obr. 18: Zenmuse H20T*

*Zdroj: DJI Shenzhen, 2022*

### 6.1.3 Gamaspektrometr GT40 a D230A

Multifunkční digitální spektrometr záření gama GT - 40 od firmy GEORADIS, s.r.o. je možné mimo jiné využít pro pochůzkové měření k rychlému stanovení aktivit zářičů gama. Uplatnit jej lze v oborech kontaminace území, budov, předmětů, vody, potravin, v případech monitorování cizorodých látek a k identifikaci a detekci radioaktivních látek a jaderných materiálů. Měřené body jsou zaznamenávány v paměti přístroje včetně GPS pozice (Obr. 19).

Technický popis spektrometru GT-40:

Velmi citlivý 3" x 3" NaI (TI) detektor

Precizní DSP spektrometr

Automatická stabilizace využívající přírodní pozadí

Barevný, na slunci čitelný displej

Jednoduché ovládání více směrovým ovladačem

Bezdrátová komunikace přes Wi-Fi nebo Bluetooth

Výsledky v reálném čase doplněné souřadnicemi z integrované GPS a hlasovým záznamem



*Obr. 19: Georadis GT - 40*

*Zdroj: Georadis, 2022*

Model D230A je gama spektrometr navržený firmou Georadis, s.r.o. pro použití s dronem. Obsahuje dva scintilační detektory NaI(Tl) po 104cm<sup>3</sup>, spektrometr s 1024 kanály pro energie gama 25 keV-3000 keV a GPS přijímač (Obr. 20).



*Obr. 20: Georadis D230A*

*Zdroj: Georadis, 2022*

#### **6.1.4 Meteorologická stanice Vantage Pro2**

Meteorologická stanice Davis Instruments Vantage Pro2™ používá technologii bezdrátového přenosu FHSS. Data lze přijímat a odesílat až do vzdálenosti 300 m. Integrovaný senzor kombinuje srážkoměr, teploměr, vlhkoměr a anemometr v jednom zařízení. Snímače teploty mají přesnost  $\pm 0,5$  °C a přesnost ostatních čidel je  $\pm 3$  %. Skrze senzory nasává ventilátor vzduch, který po přesném vyhodnocení opět odvádí ven z přístroje. Meteorologické podmínky okolo stanice korespondují s okolním vzduchem, vzhledem k tomu, že vliv odraženého světla je minimální. Meteostanice přijímá data až z osmi různých senzorů (Obr. 21).

### Charakteristika meteostanice:

Solární napájení venkovního senzoru

Indikace v režimu 24 h

Datum

Východ a západ slunce

Nastavitelné proměnné počasí

Vývoj tlaku vzduchu

Srážky den/měsíc/rok

Max/min hodnoty pro den/měsíc/rok

100 údajů na displeji najednou

Ukazatele ve spojení s volitelnými snímači: evapotranspirace, vlhkost listí, půdní vlhkost, sluneční záření, UV záření, UV index, teplota půdy nebo vody, index tepla/vlhkosti/větru

Software Weather Link: denní rostoucí míra, a sluneční energie



*Obr. 21: Meteostanice Vantage Pro2*

*Zdroj: Davisinstruments, 2022*

### 6.1.5 Monitor radonu RADIM 3 a 3AT

Radim 3 a 3AT (Obr. 22) a (Obr. 23) od společnosti Tesla a.s. je přenosný přístroj pro kontinuální monitorování objemové aktivity radonu (OAR), teploty, vlhkosti a tlaku ve venkovních a v pobytových prostorech. Radon difunduje do detekční komory, která je překryta vrstvou filcu a zachycuje dceřiné produkty radonu, vytvářené ve vnějším vzduchu. Měřením aktivity alfa dceřiných produktů radonu sebraných na polovodičovém detektoru elektrickým polem vysoké intenzity je stanovena aktivita radonu. Odezva přístroje je  $(0,8 \text{ imp/h}) / (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$ . Aktivita je stanovena se statistickou chybou  $\pm 20 \%$ :  $30 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  při délce měření 1 hodina. Maximální aktivita je cca  $150 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$  při hodinovém měření. Do paměti lze uložit výsledky 670 dní měření při hodinové vzorkovací intervalu. Data jsou čtena standartním rozhraním RS 232 (Plch, 1999).



Obr. 22: Monitor radonu Radim 3

Zdroj: vlastní



Obr. 23: Monitor radonu Radim 3AT

Zdroj: Tesla a.s.

### 6.1.6 Monitor radonu Alpha E

Alpha E je malý kontinuální radonový monitor pro profesionální použití (Obr. 24). Díky nízké hmotnosti a malým rozměrům jej lze použít pro měření osobní radonové expozice a pro řízení osobních dávek. Křemíkový detektor umístěný v difúzní komoře má citlivost 3 cph při 100 Bq/m<sup>3</sup>. Lze tedy měřit i nízké hladiny radonu pod 100 Bq/m<sup>3</sup> podle nejnovějších doporučení WHO (12 % nejistota při 1 sigma / 24 hod.). Výpočet dávky je možný díky uživatelsky nastavitelnému rovnovážnému faktoru. Vývoj přístroje je založen na spolupráci mezi Saphymo GmbH a Helmholtz Zentrum, Mnichov. Rozsáhlá měření a testy na místě prováděné Helmholtz Zentrum dokazují platnost kalibrace a správný provoz i v aplikacích s vyšší vlhkostí, jako jsou vodní díla, doly atd. Výdrž baterie až 6 měsíců umožňuje dlouhodobé měření bez napájení ze sítě. Přes USB port je také možné napájet zařízení trvale ze sítě. AlphaE ukládá všechna naměřená data do interní flash paměti. Kromě měření radonu jsou zaznamenávána data z vestavěného detektoru manipulace/pohybu a teplotního senzoru a přesný čas měření. Komunikační software je k dispozici pro čtení a export do Excelu (Radon Shop.com, 2022).



*Obr. 24: Monitor radonu Alpha E*

*Zdroj: Radon Shop.com*

### 6.1.7 LUK 4 – měření objemové aktivity radonu

Přístroj LUK 4 je určen k měření objemové aktivity radonu  $^{222}\text{Rn}$  ve vzorku vzduchu, odebraného do scintilační komory (Obr. 25). Komory jsou obvykle v rozebíratelném kontejnerovém provedení MB145, do kterého se vkládají vložky V145. Měřená veličina je objemová aktivita  $^{222}\text{Rn}$ . Detektor přístroje tvoří Lukasova komora s objemem 145 ml. Kalibrační faktor je 2 imp/s pro 1 Bq  $^{222}\text{Rn}$  v rovnováze se vzniklými dceřinými produkty. Při nerovnovážném měření se automaticky provádí oprava na nárůst dceřiných produktů. Pozadí 0.05 imp/s je typické a pracovní napětí fotonásobiče je nastaveno na střed počítačí plošiny. Měření  $^{222}\text{Rn}$  probíhá automaticky se zadanou statistickou chybou a s opravou na nárůst dceřiných produktů  $^{222}\text{Rn}$ . Výsledky jsou znázorněny v Bq/m<sup>3</sup> a je vypočtena statistická chyba. V souladu s vyhláškou č.76 Sb. Z r. 1991 byla způsobilost přístroje ověřena ve Státním metrologickém středisku pro ověřování měřidel. Komora se vloží do měniče a ten se posune do měřicí polohy. Tlačítkem Start se spustí automatický měřicí proces podle zadaných výpočetních požadavků (SÚJCHBO, v.v.i., 1991).



Obr. 25: Lukasova komora a detektor radonu LUK4

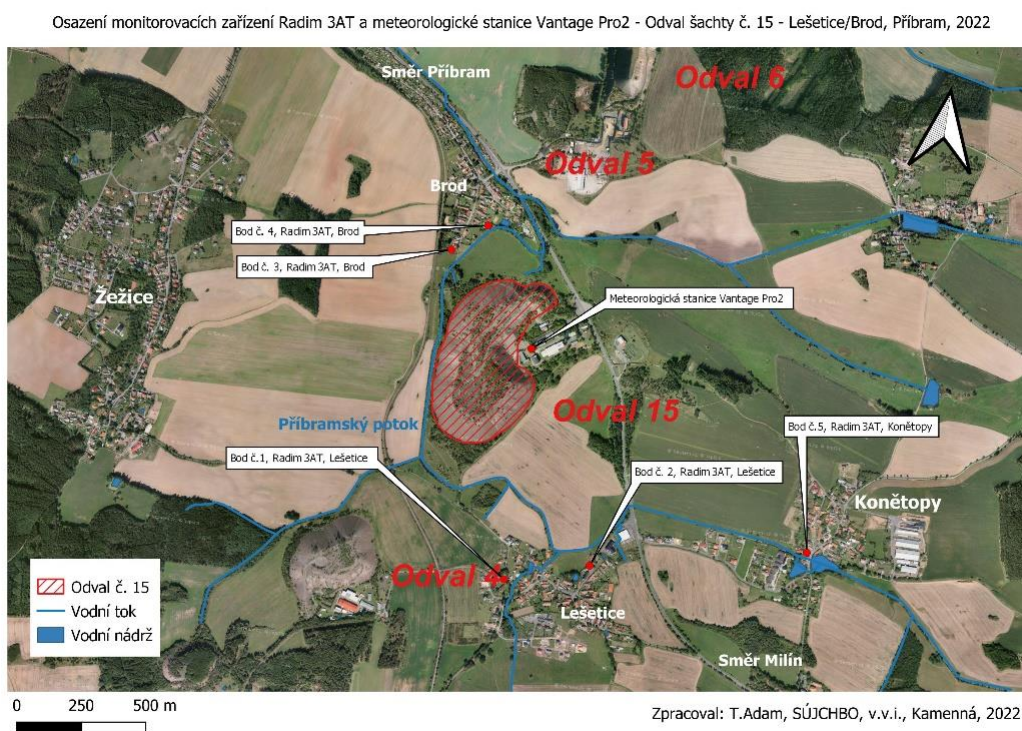
Zdroj: vlastní



## 6.2 Osazení přístrojů RADIM 3AT a meteostanice Vantage Pro2

V zájmové oblasti byly umístěny monitory radonu Radim 3 a 3AT pro dlouhodobé kontinuální měření objemové aktivity radonu. Měřicí přístroje byly umístěny v okolí odvalu v předem vytypovaných budovách a jejich venkovním okolí. Celkem bylo zapojeno devět měřících zařízení stanovujících objemovou aktivitu radonu (Obr. 26). Do vnitřních prostor obytné části domu a do vnějších prostor obydlí byl umístěn vždy jeden přístroj pro měření hodnot uvnitř (indoor), (Obr. 27) a druhý přístroj k zaznamenání hodnot naměřených vně budovy (outdoor), (Obr. 28). Tento stejný postup se opakuje na všech bodech měření: Bod č.1 Lešetice, bod č.2 Lešetice, bod č. 3 Brod, bod č.4 Brod. Jako příklad pozadových hodnot (outdoor) byl umístěn přístroj Radim 3AT v obci Konětopy bod č.5.

Meteostanice Vantage Pro2 byla nainstalována na těžební věži šachty č. 15 k dlouhodobému zaznamenávání meteorologických hodnot.



Obr. 26: Osazení monitorovacích zařízení Radim 3AT a meteostanice Vantage Pro2

Zdroj: SÚJCHBO, v.v.i., 2022



*Obr. 27: Osazení monitorovacího zařízení Radim 3AT ve vnitřním prostředí (indoor)*

*Zdroj: SÚJCHBO, v.v.i., 2022*

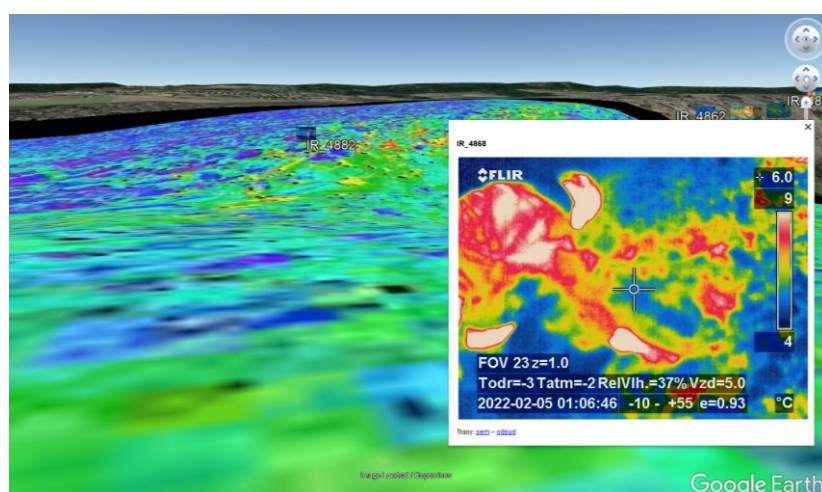


*Obr. 28: Osazení monitorovacího zařízení Radim 3AT ve vnějším prostředí (outdoor)*

*Zdroj: SÚJCHBO, v.v.i., 2022*

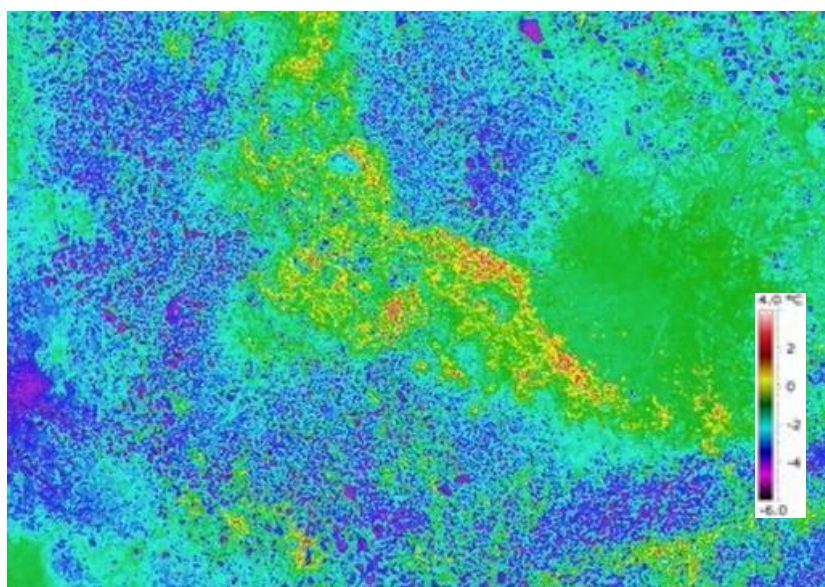
### 6.3 Zaměření hot spotů na koruně odvalu termokamerou

Dlouhodobým průzkumem odvalu jsou průběžně pořizovány a zaznamenávány snímky z termokamery. Leteckým snímkováním povrchu koruny odvalu č.15 za použití dronu DJI Matrice 300RTK s termokamerou Zenmuse H20T (Obr. 29) byla určena místa (Obr. 30) s předpokládaným intenzivnějším výronem radonu (hot spots). Získané snímky jsou průběžně pomocí souřadnic ve formátu .kml zaznamenány do prostorové 3D mapy v prostředí Google Earth Pro (Obr. 31).



Obr. 29: Zaměření hot spot bodů termokamerou

Zdroj: SÚJCHBO, v.v.i., 2022



Obr. 30: Zaměření hot spot bodů termokamerou

Zdroj: SÚJCHBO, v.v.i., 2022





Obr. 31: Zaměření hot spot bodů termokamerou v 3D prostředí Google Earth

Zdroj: FJFI, Google Earth Pro, 2022

## 6.4 Letecké a pochůzkové měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu

K leteckému průzkumu byl použit bezpilotní letoun DJI Matrice 300 RTK s gama spektrometrem D230A pro určení příkonu prostorového dávkového ekvivalentu. PPDE – *příkon prostorového dávkového ekvivalentu* (v literatuře též označováno jako  $\dot{H}^*(10)$ ), *příkon dávkového ekvivalentu vytvořený polem ionizujícího záření v hloubce  $d = 10 \text{ mm}$  v kouli ICRU (koule z tkáňově ekvivalentního materiálu - 30 cm v průměru, tkáň s hustotou  $1 \text{ g cm}^{-3}$  a hmotnostního složení: 76,2 % kyslík, 11,1 % uhlík, 10,1 % vodík, a 2,6 % dusík), Příkon ekvivalentní dávky  $H$  je definován jako podíl přírůstku ekvivalentní dávky  $dH$  v časovém intervalu  $dt$  a tohoto časového intervalu: Jednotkou příkonu dávkového ekvivalentu je sievert za sekundu [Sv/s], (SÚJCHBO, v.v.i., 2018).*

Zvolena byla Metodika měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud SÚJCHBO, v.v.i., (2016). Pro pochůzkové terénní měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu bylo zvolen gama spektrometr GT – 40 od firmy Georadis, s.r.o. Pro správné zpracování a interpretaci dat je nezbytné provést měření pozadových hodnot, obvyklých v daném místě, zejména je-li požadováno porovnání naměřených dat s hodnotou podle hodnotících kritérií.

## 6.5 Terénní měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu

Klasická metoda z přelomu 19. a 20. století k měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) v ovzduší spočívá v registraci scintilací daných dopady částic alfa na vnitřní stěnu scintilační komory pokryté scintilačním materiálem ZnS (Ag) sulfidem zinečnatým (Thomas & kol., 2000).

Lucas (1957) tento princip publikoval ve své vědecké práci v roce 1957. K určení objemové aktivity radonu je nutné znát objem vzorku např. pomocí odběrové stříkačky Janette a účinnost detekce.

### 6.5.1 Měření pozadí

Vyhodnocovacím zařízením odběru vzduchu jsou měřidla typu LUK4. Zjištění odezvy jednotlivé konkrétní scintilační komory typu Lucas je provedeno vždy před odběrem vzorku vzduchu. Měření je nejvhodnější uskutečnit stejným přístrojem, který se použije následně po odběru vzduchu. Doba měření je označena jako  $T_p$  a je provedeno nejméně po dobu 1000 s. Výsledek měření (odezva)  $N_p$  je dále pro další měření zapisována jako  $N_{p,i}$ ,  $i=1,2,3,\dots$ ). Účinnost detekce je stejná jak při měření pozadí, tak i měření po odběru vzorku. Pozadí je doporučeno měřit nejpozději den před následným odebíráním vzorků. Jedná se o scintilační komory, které byly použity den před měřením nebo dříve. Pokud nastane jiný případ, je potřeba měření pozadí opakovat v časovém rozmezí hodiny a zkontrolovat, zda se pozadí významně nemění. Výsledky jsou podrobeny statistickému testu a v případě dvou a více měření jsou prohlášeny za nesignifikantně se lišící, platí-li  $N_{p,1} - \sqrt{N_{p,1}} < N_{p,2} + \sqrt{N_{p,2}}$ . Při naměřeném pozadí vyšším než 50 impulzů za 1000 s se komora evakuuje, naplní dusíkem a nepoužívaná vyčká na pokles odezvy dané pozadím. Pokud pozadí trvale přesahuje uvedenou mez je potřeba vyměnit scintilátor (SÚJCHBO, v.v.i., 1991).

### 6.5.2 Specifikace místa odběru

Před samotným odebíráním vzorků vzduchu jsou v zájmovém území pomocí dronu s termokamerou určena místa s předpokládaných výskytem výronu radonu. Na zaměřených pozicích se začne s odběrem vzorků vzduchu.

### 6.5.3 Postup při odběru

Nejméně třikrát se vymění vzduch v e stříkačce Janette na místě určeném k odběru vzorku. Poté se do stříkačky odebere 150ml vzduchu. Stříkačka se napojí na scintilační komoru pomocí gumové hadičky. Pomocí otevření ventilu na evakuované komoře se vzorek převede pod tlakem do scintilační komory. Ve venkovním prostředí je do komory doplněn vzduch na atmosférický tlak. Kohouty se po každém převodu co nejrychleji uzavírají, aby nedošlo k difúzním ztrátám. V protokole o měření musí být uveden pracovník, který odběr provedl, datum, čas a místo měření.

### 6.5.4 Měření objemové aktivity

Scintilační komora je před zjištěním odezvy umístěna do přístroje typu LUK. V čase T je provedeno zjištění odezvy nejméně 15 a nejvíce 180 minut po provedení odběru nebo delším, ne však delším než osm hodin po odběru. Zjištění odezvy je uskutečněno při před programovaném čase měření  $\Delta$  nejméně 1000 sekund. Je nutné správně umístit scintilační komoru v přístroji LUK a řádně komoru zafixovat a zajistit tímto světlotěsnost. V reálném čase s přesností  $\pm 1$  minuta je určován čas stopkami. Čas zahájení měření T se zaznamená, pokud nebylo zjištěno více než 500 impulzů a provede se měření v čase nejméně 180 min po odběru. Jestliže je odezva při měření započatém 15 min po odběru větší než 500 impulzů, není nutné provádět měření v dalším intervale. V opačném případě se druhé měření provede v čase delším než 180 minut od provedení odběru. V komoře nesmí být žádné znatelné znečištění, nesmí být poškozena scintilační vrstva, a proto je minimálně jednou za měsíc vizuálně kontrolován stav scintilační komory. Použitý měřicí přístroj musí mít platný ověřovací list, a proto je každé dva roky dle výměru ÚNMZ podroben ověřovacímu procesu (SÚJCHBO, v.v.i., 1991).

### 6.5.5 Zpracování výsledků měření

Objemová aktivita radonu (OAR) se udává v jednotkách  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  a vypočítává se pomocí programu RADON01M. Do komunikativního programu, jehož autorem je Ing. I. Burian, se vkládá diference časů, objem vzorku a zjištěná odezva. Výsledkem měření je hodnota objemové aktivity radonu v daném čase a místě s relativní nejistotou

menší než 15 % (pro objemovou aktivitu vyšší než  $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Výstupem programu RADON01M je pouze část nejistoty daná statistickým charakterem záření. Korekční faktor  $f$  je pro scintilační komůrky V-135 je 0,77. Část nejistoty daná statistickým charakterem počtu impulzů je zjišťována při každém užití zpracujícího programu. Nejistota je složena z údaje výrobce odběrové stříkačky a subjektivního vlivu odečtu pozice pístu. Vliv nedokonalé filtrace je zcela zanedbatelný (Merta & Burian, 2018).

## 6.6 Vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřené hodnoty OAR z terénního průzkumu jsou vyhodnoceny pomocí sumarizací dat (Obr. 32) s lokalizací a GPS identifikací jednotlivých odběrných míst. Do programu pro měření OAR scintilačními komorami zadáme postupně čas měření pozadí, počet impulzů při měření pozadí, počáteční měření vzorku v minutách po převodu, dobu měření vzorku v sekundách, objem vzorku, korekční násobící faktor a počet impulsů při měření.

Koruna odvalu 15/18.03.22										
ID	BACKGROUND	TIME 1	Latitude	Longitude	objem	TIME 2	LUK	OAR	odchylka+/-	
	imp/100s	h:min	°	°	ml	h:min	imp/100s	[Bq.m <sup>-3</sup> ]	[Bq.m <sup>-3</sup> ]	
49		6	5:35	49,692778	14,143889	120	8:50	9	107	139
62		1	5:37	49,696389	14,142778	110	8:54	36	1364	237
77		1	5:37	49,698333	14,141111	110	8:56	43	1640	259
20		5	5:42	49,701111	14,143056	110	9:00	31	1015	234
74		2	5:47	49,706667	14,139722	110	9:02	15	508	161
40		3	5:50	49,713056	14,141944	100	9:04	17	601	192
65		6	5:55	49,711944	14,146944	100	9:06	167	6902	564
42		3	5:58	49,712222	14,148333	100	9:08	84	3472	400
88		3	6:02	49,39242	14,00551	110	9:11	3	<100	
53		8	6:05	49,39216	14,00511	110	9:13	26	4677	1515
81		1	6:11	49,39141	14,00501	100	9:15	13	515	161
17		6	6:12	49,39127	14,00493	100	9:17	18	515	210
16		2	6:14	49,39113	14,00497	110	9:19	12	429	161
98		3	6:16	49,39103	14,00504	100	9:21	17	601	192
25		11	6:18	49,39108	14,00491	110	9:24	29	703	247
90		5	6:23	49,39098	14,00524	80	9:26	22	913	279
28		5	6:25	49,39117	14,00548	130	9:28	279	9052	557
78		6	6:28	49,39129	14,00543	130	9:30	9	<100	
30		3	6:29	49,39143	14,00539	120	9:32	23	716	182
73		6	6:31	49,39153	14,00533	120	9:33	13	251	156
76		3	6:42	49,39209	14,00522	130	9:35	18	496	151
92		9	6:50	49,39168	14,00523	100	9:35	643	27227	1097
13		3	6:52	49,698056	14,014444	120	9:37	64	2183	293

Obr. 32: Zápis terénního měření odběru vzorků vzduchu a výpočet OAR

Zdroj: vlastní, 2022

Software (Obr. 33) vyvinutý ve Státním ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i., vypočítá výslednou hodnotu OAR v jednotkách  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany  
> Příbram - Kamenná

**Program pro měření OAR scintilačními komorami**

**Vlož uvedené hodnoty**

Čas měření pozadí	100	[s]
Počet impulsů při měření pozadí	9	
Poč. měření vzorku v [min] po převodu	180	[min]
Doba měření vzorku v [s]	100	[s]
Objem vzorku	100	[ml]
Korekční násobící faktor	0,75	
N impulsů při měření	643	

**OAR** 27227 ± 1097 [ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Pozn. Pokud neměříš pozadí vlož 1imp./100s  
Pokud nemáš zjištěný korekční násobící faktor vlož 1

Obr. 33: Program pro měření OAR scintilačními komorami

Zdroj: SÚJCHBO, v.v.i., 2022

## 6.7 Vizualizace zpracovaných dat

Naměřená data příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama z pochůzkového nebo leteckého průzkumu jsou zaznamenána v přístrojích GT-40 pro pochůzkové měření a v gamaspektrometru D 230A umístěném na podvěsu dronu. Pomocí programu GeoView se nashromážděná data importují jako textový soubor .csv do pracovního PC k dalšímu zpracování. Získaná data z měření OAR jsou zaznamenána v protokolu a jsou uložena v excelové tabulce k exportu ve formátu. CVS. Importovaný soubor obsahuje v jednotlivých sloupcích kompletní údaje z jednotlivých měření. V programovém prostředí volně dostupného software QGIS 3.24 verze Tisler jsou vložená data vizualizována. Quantum Geographic Information System (GIS) je volná open-source platforma využívající mapové podklady a systém jednotlivých vrstev pro zobrazení, editování a analýzu datových souborů. Jako projekční koordinační referenční systém je použit S-JTSK Krovak East North ESRI:102067. Podkladová mapa mapy.cz-areial je vložena prostřednictvím zásuvného



modulu Quick Map Services. Data z terénního měření jsou na mapový podklad promítnuta pomocí vložením nové vrstvy s textem odděleným tabulátory. Pro přesné umístění jednotlivých bodů jsou použity GPS hodnoty Latitude a Longitude z importovaného souboru. Datové pole DoseRate nebo OAR určuje naměřené hodnoty. Importovaná data jsou promítnuta na podkladovou vrstvu a funkcí vlastností vrstvy upravena do graduující stupnice hodnot (Graduate) s inverzním zobrazením. Jako vizuální výstup je vytvořena nová vrstva pro tisk (New Print Layout). Vložením zpracované mapy, měřítka, názvu projektu, šipky vyznačující sever, legendy a autora vizualizace je získána mapa zobrazující výsledné naměřené hodnoty.

Analýza hodnot z kontinuálního měření objemové aktivity radonu je zpracována a vyhodnocena prostřednictvím excelovských grafů. Jednotlivé body měření jsou zobrazeny jako grafy s celkovými a průměrnými naměřenými hodnotami za daná jednotlivá období a jsou mezi sebou a s ostatními faktory jako je teplota porovnávány. K určení převládajícího směru větru v zájmové oblasti jsou data z meteostanice zpracována a zobrazena v paprskovém grafu se směrovými hodnotami.

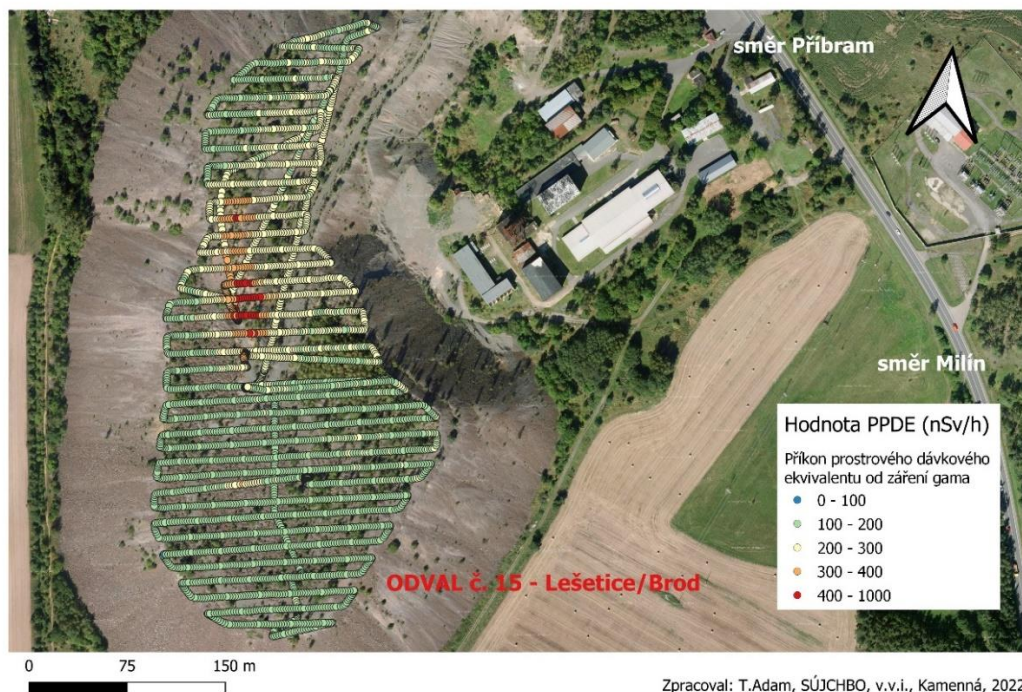
## **7. Výsledky**

### **7.1 Měření PPDE – příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama**

V monitorovaném areálu uranového odvalu č.15 proběhlo letecké a pochůzkové měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama (Obr. 34). Pro letecké měření byl použit dron DJI Matrice 300RTK s nainstalovaným měřicím přístrojem gama spektrometrem D230A od firmy Georadis. Byla zvolena výška 15 m nad korunou odvalu z důvodu přítomnosti stromů rostoucích na odvalu a přesný postup měření pomocí dronu probíhal podle certifikované metodiky – Měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud vydané Státním ústavem jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. v roce 2016. Leteckým průzkumem byly naměřeny zvýšené hodnoty ve střední a severní části koruny odvalu. V červené

oblasti na zpracované mapě dosahovaly naměřené hodnoty 400 nSv/h a výše. Tyto body byly určeny k následujícímu odběru vzduchu pro zjištění objemové aktivity radonu.

Letecké měření PPDE ve výšce 15 m nad korunou odvalu dronem DJI Matrice 300RTK - Odval šachty č.15



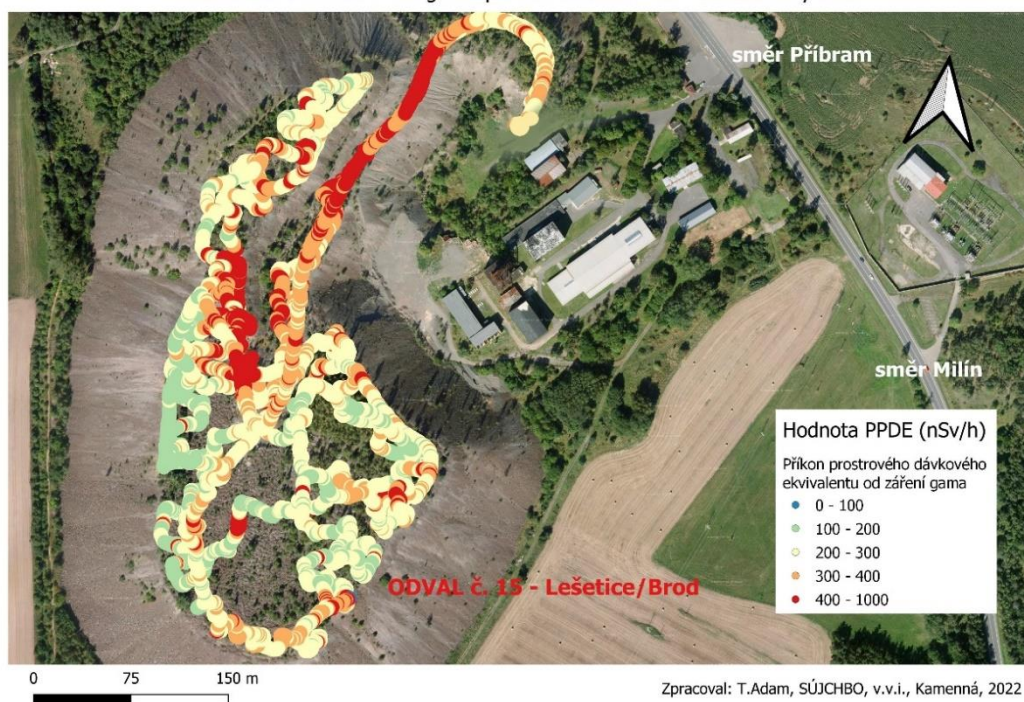
Obr. 34: Letecké měření PPDE – Odval šachty č. 15

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Pochůzkové terénní měření PPDE (příkon prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama) bylo provedeno certifikovaným přístrojem pro měření PPDE GT-40 od firmy Georadis (Obr. 35). Toto měření potvrdilo a upřesnilo lokalizaci zájmových bodů z předešlého měření dronem k dalšímu průzkumu. Hodnoty zaznamenané pochůzkovým měřením korelují s průměrnými hodnotami naměřenými leteckým průzkumem. Vzájemné nejvyšší a nejnižší hodnoty PPDE z leteckého a pochůzkového měření jsou odlišné vzhledem ke vzdálenosti měřícího přístroje od povrchu odvalu. Vizualizace naměřených dat je možné zobrazit pomocí interpolačních metod v programu QGIS (Obr. 36).



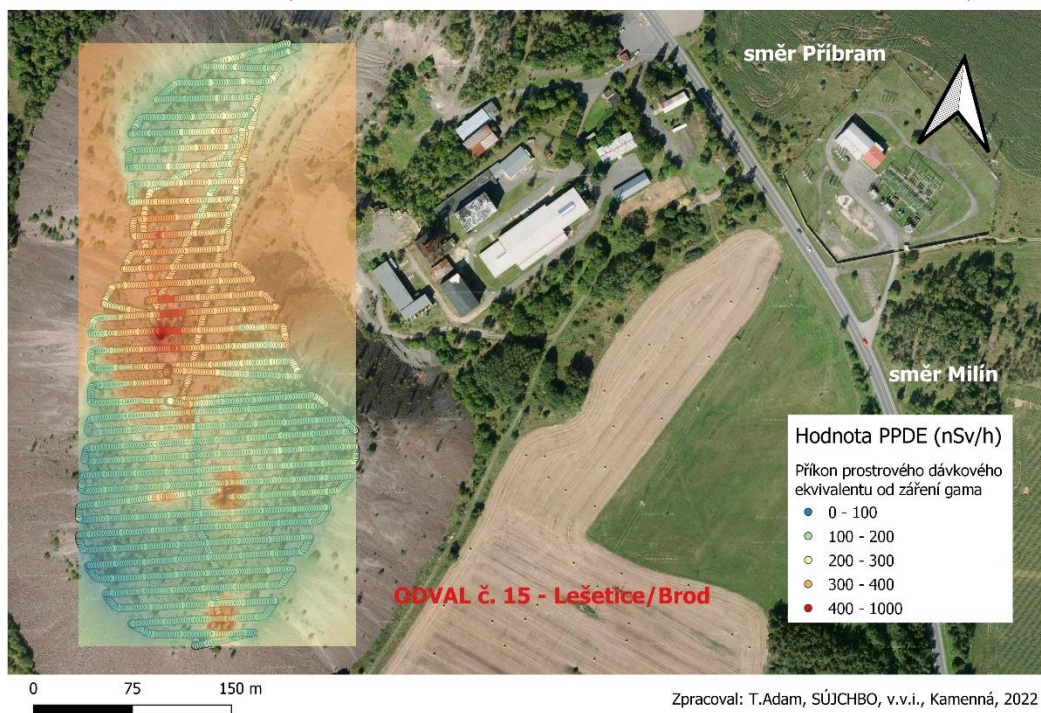
Pochůzkové měření PPDE gamaspektrometrem GT-40 - Odval šachty č.15



Obr. 35: Pochůzkové měření PPDE – Odval šachty č. 15

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Letecké měření PPDE va výšce 15 m nad korunou odvalu dronem DJI Matrice 300RTK - Odval šachty č.15



Obr. 36: Letecké měření PPDE – Odval šachty č. 15 - interpolace

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

## 7.2 Zimní terénní měření okamžité objemové aktivity radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) v ovzduší

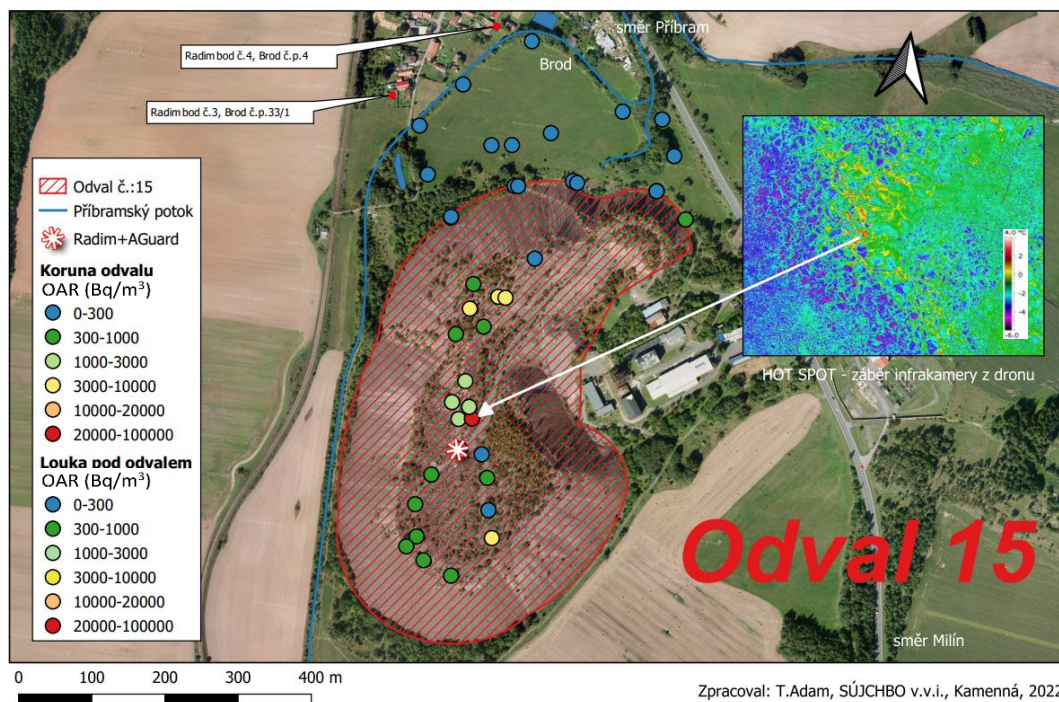
Ve dnech 18.3.2022 a 25.3.2022 proběhlo zimní terénní měření OAR (okamžitých hodnot objemové aktivity radonu)  $^{222}\text{Rn}$  v ovzduší v areálu odvalu šachty č.15 mezi obcemi Lešetice a Brod na Příbramsku. K uskutečnění monitorování radiačních veličin pro zkoumanou lokalitu bylo získáno povolení od majitelů dotčených nemovitostí samotného odvalu do podniku DIAMO státní podnik a okolních pozemků v užívání ZD Krásná Hora nad Vltavou a.s.

Měření č.1. (18.3.2022), (Obr. 37) a měření č.2. (25.3.2022) bylo zahájeno v 5:24 hod. Na koruně odvalu byl umístěn monitor radonu RADIM 3 a monitor radonu Alfa Guard E. Následně byla vytypována místa na koruně odvalu se zvýšenou teplotou pomocí dronu s termokamerou a na těchto bodech byl zahájen odběr vzduchu do scintilačních komor o objemu 135ml v 50 cm nad povrchem. K odběru vzorku vzduchu byla použita stříkačka Janette. V jednotlivých odběrných bodech bylo postupně zaznamenáno do protokolu z měření číslo scintilační komory, přesná GPS pozice odběru, čas, ve kterém byl odběr uskutečněn a množství odebraného vzduchu v ml. Celkem bylo dne 18.3.2022 získáno 22 vzorků vzduchu na koruně odvalu a 16 vzorků na louce pod odvalem směrem k obci Brod. Dne 25.3.2022 (Obr. 40) bylo odebráno 20 vzorků na koruně odvalu a 13 ks na louce pod odvalem ve stejné lokalitě jako při předešlém měření. Konec odběrů ovzduší nastal v 6:50 hod. Teplota vnějšího ovzduší 18.3.2022 byla  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a 25.3.2022 bylo naměřeno před zahájením průzkumu  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Odběr vzorků byl uskutečněn v obou dnech ve dvou skupinách pracovníků. Jedna skupina působila na koruně odvalu a druhá ve stejný čas na přilehlé louce pod odvalem.

Souběžně s terénním měřením na odvale šachty č.15 a v jeho nejbližším okolí probíhalo kontinuální měření objemové aktivity radonu pomocí monitorů radonu RADIM ve vnitřních a vnějších prostorách rodinných domů v obcích Lešetice a Brod. Zimní kontinuální měření probíhalo od 23.3.2022 do 21.4.2022 na dvou pozicích v obci Brod č.p. 1 a Brod č.p. 4 a na dvou pozicích v obci Lešetice č.p. 10 a Lešetice č.p. 15.



Zimní terénní měření č.1. (18.3.2022) OAR - okamžitých hodnot objemové aktivity radonu - Odval šachty č.15 - Lešetice/Brod, Příbram



Obr. 37: Zimní terénní měření OAR – Odval šachty č. 15 – 18.3.2022

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Na koruně odvalu šachty č.15 byly dne 18.3.2022 naměřeny tyto hodnoty OAR (Obr. 38):

Maximální naměřená hodnota OAR: **27227** Bq/m<sup>3</sup>

Minimální naměřená hodnota OAR: **107** Bq/m<sup>3</sup>

Průměrná naměřená hodnota OAR: **2908** Bq/m<sup>3</sup>

Koruna odvalu 15/18.03.22										
ID	BACKGROUND	TIME 1	Latitude	Longitude	objem	TIME 2	LUK	OAR	odchylka+/-	
	imp/100s	h:min	°	°	ml	h:min	imp/100s	[Bq.m <sup>-3</sup> ]	[Bq.m <sup>-3</sup> ]	
49		6	5:35	49,692778	14,143889	120	8:50	9	107	139
62		1	5:37	49,696389	14,142778	110	8:54	36	1364	237
77		1	5:37	49,698333	14,141111	110	8:56	43	1640	259
20		5	5:42	49,701111	14,143056	110	9:00	31	1015	234
74		2	5:47	49,706667	14,139722	110	9:02	15	508	161
40		3	5:50	49,713056	14,141944	100	9:04	17	601	192
65		6	5:55	49,711944	14,146944	100	9:06	167	6902	564
42		3	5:58	49,712222	14,148333	100	9:08	84	3472	400
88		3	6:02	49,39242	14,00551	110	9:11	3	<100	
53		8	6:05	49,39216	14,00511	110	9:13	26	4677	1515
81		1	6:11	49,39141	14,00501	100	9:15	13	515	161
17		6	6:12	49,39127	14,00493	100	9:17	18	515	210
16		2	6:14	49,39113	14,00497	110	9:19	12	429	161
98		3	6:16	49,39103	14,00504	100	9:21	17	601	192
25		11	6:18	49,39108	14,00491	110	9:24	29	703	247
90		5	6:23	49,39098	14,00524	80	9:26	22	913	279
28		5	6:25	49,39117	14,00548	130	9:28	279	9052	557
78		6	6:28	49,39129	14,00543	130	9:30	9	<100	
30		3	6:29	49,39143	14,00539	120	9:32	23	716	182
73		6	6:31	49,39153	14,00533	120	9:33	13	251	156
76		3	6:42	49,39209	14,00522	130	9:35	18	496	151
92		9	6:50	49,39168	14,00523	100	9:35	643	27227	1097
13		3	6:52	49,698056	14,014444	120	9:37	64	2183	293

Obr. 38: Výsledky zimního terénního měření OAR – koruna odvalu šachty č. 15 – 18.3.2022

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

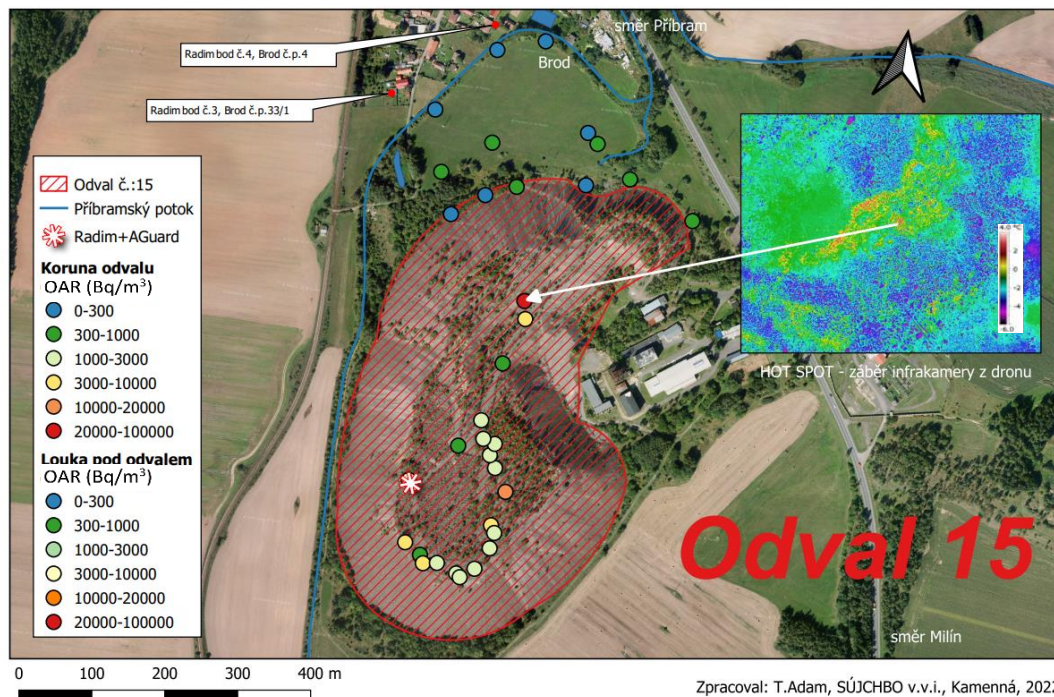
Na louce směrem k obci Brod u odvalu šachty č.15 byly dne 18.3.2022 naměřeny minimální detekované hodnoty OAR menší než 100 Bq/m<sup>3</sup>. Dle metodiky SÚJCHBO, v.v.i., LMR-2 Měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu je výsledek měření menší než 100 Bq/m<sup>3</sup> zaznamenán v protokole <100 Bq/m<sup>3</sup> (Obr. 39)

Louka pod odvalem č.15 / 18.3.2022										
ID	BACKGROUND	TIME 1	Latitude	Longitude	objem	TIME 2	LUK	OAR	odchylka+/-	
	imp/100s	h:min	°	°	ml	h:min	imp/100s	[Bq.m <sup>-3</sup> ]	[Bq.m <sup>-3</sup> ]	
19		2	5:24	49,394654	14,104279	100	8:49	4	<100	
36		2	5:28	49,394638	14,0947	130	8:52	2	<100	
44		1	5:32	49,394542	14,088228	130	8:54	5	<100	
71		8	5:36	49,394244	14,081568	125	8:59	2	<100	
91		4	5:39	49,394535	14,078278	130	9:01	6	<100	
101		3	5:42	49,394814	14,084967	120	9:03	7	<100	
80		3	5:48	49,395197	14,099186	125	9:08	2	<100	
106		8	5:45	49,394965	14,091455	70	9:06	9	<100	
95		13	5:53	49,395615	14,087839	80	9:10	4	<100	
47		4	6:02	49,395229	14,080801	110	9:12	2	<100	
33		9	6:04	49,394883	14,076567	120	9:14	7	<100	
26		6	6:11	49,394927	14,105692	130	9:17	1	<100	
68		5	6:13	49,395181	14,103752	120	9:18	1	<100	
61		8	6:19	49,394476	14,107992	125	9:21	17	<100	
29		2	6:29	49,394652	14,104267	125	9:23	2	<100	
59		2	6:32	49,394629	14,095215	130	9:25	3	<100	
52		1	6:35	49,394544	14,088617	130	9:27	1	<100	
18		5	6:38	49,394251	14,081573	130	9:29	5	<100	
89		6	6:42	49,394837	14,087273	130	9:31	1	<100	

Obr. 39: Výsledků zimního terénního měření OAR – louka pod odvalem č. 15 – 18.3.2022

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Zimní terénní měření č.2. (25.3.2022) OAR - okamžitých hodnot objemové aktivity radonu - Odval šachty č.15 - Lešetice/Brod, Příbram



Obr. 40: Zimní terénní měření OAR – Odval šachty č. 15 – 25.3.2022

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Na koruně odvalu šachty č.15 byly dne 25.3.2022 naměřeny tyto hodnoty OAR (Obr.41):

Maximální naměřená hodnota OAR: **25080 Bq/m<sup>3</sup>**

Minimální naměřená hodnota OAR: **345 Bq/m<sup>3</sup>**

Průměrná naměřená hodnota OAR: **4245 Bq/m<sup>3</sup>**

Koruna odvalu č.15 / 25.3.2022									
ID	BACKGROUND	TIME 1	Latitude	Longitude	objem	TIME 2	LUK	OAR	odchylka+/-
	imp/100s	h:min	°	°	ml	h:min	imp/100s	(Bq.m <sup>-3</sup> )	(Bq.m <sup>-3</sup> )
92	1	5:29	49,653775	14,013536	120	11:10	77	2731	317
61	6	5:35	49,653008	14,013635	130	11:31	208	6700	485
30	5	5:37	49,652881	14,013947	125	11:27	15	345	154
74	4	5:43	49,652782	14,014025	120	11:28	161	5642	462
73	4	5:46	49,652811	14,014288	125	11:13	44	1380	239
52	3	5:48	49,652716	14,014678	130	11:08	53	1659	248
62	1	5:51	49,652677	14,014755	130	11:19	34	1095	196
44	3	5:53	49,652806	14,015009	125	11:20	64	2104	282
66	2	5:55	49,653082	14,01524	125	11:12	65	2173	282
56	4	5:57	49,653366	14,015203	120	11:14	245	8660	567
47	1	6:01	49,653276	14,015284	110	11:07	45	1725	266
25	8	6:04	49,653798	14,015385	120	11:24	423	14913	746
16	1	6:07	49,65407	14,015126	125	11:13	45	1518	234
29	2	6:09	49,654218	14,014994	130	11:12	36	1128	204
26	3	6:11	49,654364	14,015056	120	11:04	71	2444	309
20	2	6:14	49,654406	14,014827	120	11:26	32	1078	210
96	3	6:15	49,654629	14,014738	130	11:09	55	1725	253
46	2	6:23	49,656159	14,015228	125	11:18	729	25080	933
68	4	6:25	49,65594	14,015294	90	11:30	132	6133	559
28	1	6:29	49,655359	14,014988	130	11:25	16	498	137
53	7	6:34	49,654279	14,014373	130	11:23	21	434	176

Obr. 41: Výsledky zimního terénního měření OAR – koruna odvalu šachty č. 15 – 25.3.2022

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Na louce směrem k obci Brod u odvalu šachty č.15 byly dne 25.3.2022 naměřeny tyto hodnoty OAR (Obr. 42):

Maximální naměřená hodnota OAR: **547 Bq/m<sup>3</sup>**

Minimální naměřená hodnota OAR: **144 Bq/m<sup>3</sup>**

Průměrná naměřená hodnota OAR: **341 Bq/m<sup>3</sup>**

Louka pod odvalem č.15 / 25.3.2022									
ID	BACKGROUND	TIME 1	Latitude	Longitude	objem	TIME 2	LUK	OAR	odchylka+/-
	imp/100s	h:min	°	°	ml	h:min	imp/100s	(Bq.m <sup>-3</sup> )	(Bq.m <sup>-3</sup> )
38	4	5:14	49,392478	14,110142	120	10:48	15	395	157
95	3	5:18	49,392764	14,057869	90	10:51	9	287	166
57	3	5:22	49,392714	14,053195	130	10:53	15	398	141
76	4	5:25	49,392658	14,051153	130	10:55	13	299	137
41	3	5:30	49,392553	14,049011	120	10:58	7	144	114
39	1	5:33	49,392732	14,047946	120	11:00	12	395	130
63	2	5:37	49,392892	14,051115	125	11:02	12	345	129
17	2	5:41	49,392995	14,057508	120	11:04	9	252	119
98	5	5:44	49,393371	14,053757	125	11:06	8	<100	
80	1	5:48	49,393303	14,050561	125	11:08	3	<100	
65	1	5:51	49,393002	14,046938	120	11:10	8	<100	
23	3	6:01	49,393103	14,11915	120	11:12	13	359	144
106	7	6:04	49,392953	14,13426	60	11:14	16	547	345

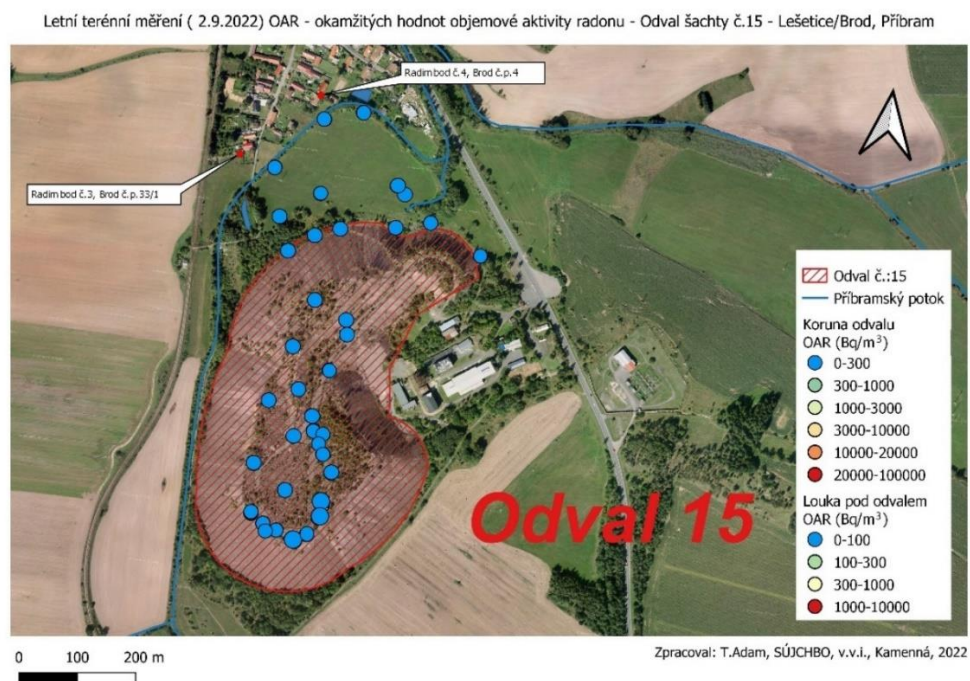
Obr. 42: Výsledky zimního terénního měření OAR – koruna odvalu šachty č. 15 – 25.3.2022

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022



### 7.3 Letní terénní měření okamžité objemové aktivity radonu ( $^{222}\text{Rn}$ ) v ovzduší

Dne 2.9.2022 bylo provedeno letní terénní měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu na koruně odvalu šachty č.15 a na louce pod odvalem směrem k obci Brod (Obr. 43). Terénní měření započalo v 5:23 hod a probíhalo do 6:30 hod. Venkovní teplota byla naměřena 7,8°C. Celkem bylo odebráno 26 vzorků vzduchu do Lukasových komůrek na koruně odvalu a 15 vzorků vzduchu na louce pod odvalem. Podle metodiky odběru byly do protokolu zaznamenány GPS pozice odběru, datum, čas získání vzorku, množství odebraného vzduchu a jméno, kdo terénní měření prováděl.



Obr. 43: Letní terénní měření OAR – Odval šachty č. 15

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Na koruně odvalu a na louce směrem k obci Brod u odvalu šachty č.15 byly dne 2.9.2022 naměřeny minimální detekované hodnoty OAR menší než 100 Bq/m<sup>3</sup>. Dle metodiky SÚJCHBO, v.v.i., LMR-2 Měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu je výsledek měření menší než 100 Bq/m<sup>3</sup> zaznamenán v protokole <100 Bq/m<sup>3</sup> (Obr. 44 a 45).

Koruna odvalu č.15 / 2.9.2022									
ID	BACKGROUND	TIME 1	Latitude	Longitude	objem	TIME 2	LUK	OAR	odchylka+/-
	imp/100s	h:min	°	°	ml	h:min	imp/100s	(Bq.m <sup>-3</sup> )	(Bq.m <sup>-3</sup> )
29	5	5:33	49,6535549	14,01358861	120	11:08	8	<100	
26	6	5:35	49,6531008	14,0136348	125	11:12	13	<100	
20	8	5:37	49,6528822	14,0139774	130	11:16	16	<100	
96	1	5:39	49,6527855	14,0140247	130	11:20	12	<100	
46	3	5:41	49,6528107	14,0145579	125	11:24	15	<100	
68	1	5:43	49,6527164	14,0146781	130	11:28	9	<100	
28	3	5:45	49,6526478	14,0147546	130	11:32	15	<100	
53	6	5:47	49,6528099	14,0150094	120	11:36	13	<100	
92	5	5:49	49,6530816	14,01552397	130	11:40	7	<100	
61	4	5:51	49,6533655	14,015201	125	11:44	12	<100	
30	4	5:53	49,6532478	14,0152843	120	11:48	12	<100	
44	3	5:55	49,6537977	14,0153854	125	11:52	9	<100	
66	1	5:57	49,6540699	14,0151258	130	11:56	8	<100	
56	2	5:59	49,6542177	14,0148835	130	12:00	3	<100	
47	3	6:01	49,6543364	14,0155555	120	12:04	8	<100	
96	1	6:03	49,6555057	14,0148266	120	12:08	13	<100	
46	6	6:05	49,6546288	14,0188379	130	12:12	16	<100	
68	5	6:07	49,6561759	14,0157781	125	12:16	8	<100	
65	4	6:09	49,6559399	14,015884	120	12:20	13	<100	
23	4	6:11	49,6554493	14,0149782	125	12:24	16	<100	
106	3	6:13	49,6547785	14,0143458	130	12:28	12	<100	

Obr. 44: Výsledky letního terénního měření OAR – koruna odvalu šachty č. 15 – 2.9.2022

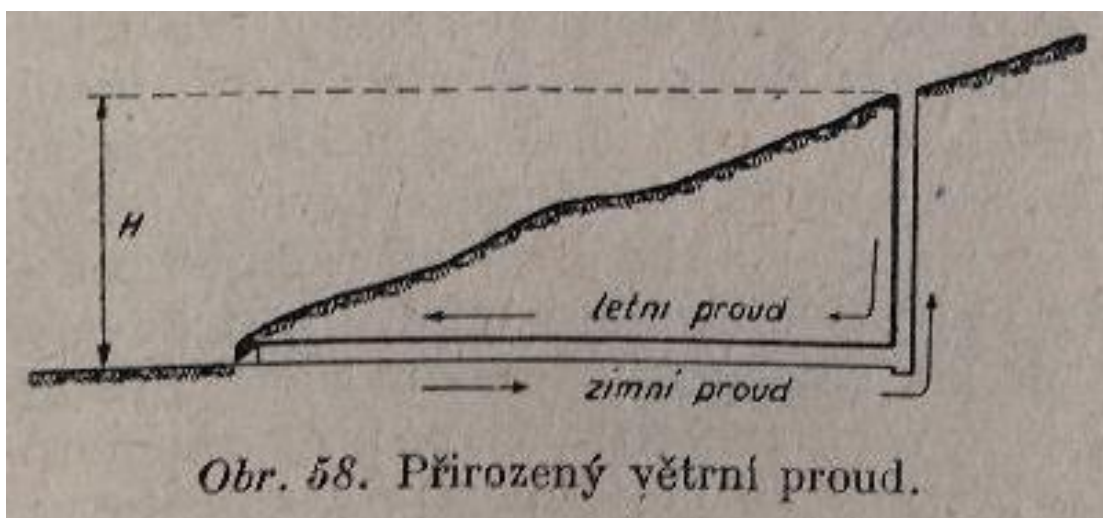
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

Louka pod odvalem č.15 / 2.9.2022									
ID	BACKGROUND	TIME 1	Latitude	Longitude	objem	TIME 2	LUK	OAR	odchylka+/-
	imp/100s	h:min	°	°	ml	h:min	imp/100s	(Bq.m <sup>-3</sup> )	(Bq.m <sup>-3</sup> )
56	3	5:11	49,3924555	14,110133	130	10:50	9	<100	
47	2	5:15	49,3927641	14,057999	125	10:53	8	<100	
25	2	5:18	49,392825	14,053195	125	10:55	3	<100	
16	4	5:21	49,3926578	14,051154	120	10:57	8	<100	
39	1	5:26	49,3925528	14,049221	110	10:59	13	<100	
63	1	5:31	49,3927333	14,047946	120	11:01	16	<100	
17	5	5:34	49,3928924	14,050015	125	11:03	12	<100	
98	2	5:39	49,3929949	14,057578	130	11:06	9	<100	
16	3	5:42	49,393371	14,053758	120	11:07	8	<100	
29	2	5:45	49,3933022	14,050561	120	11:09	8	<100	
26	1	5:49	49,3930122	14,046944	125	11:12	3	<100	
20	7	6:06	49,3935527	14,119445	125	11:14	8	<100	
96	6	6:12	49,3929529	14,13486	125	11:16	11	<100	

Obr. 45: Výsledky letního terénního měření OAR – koruna odvalu šachty č. 15 – 2.9.2022

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, v.v.i., 2022

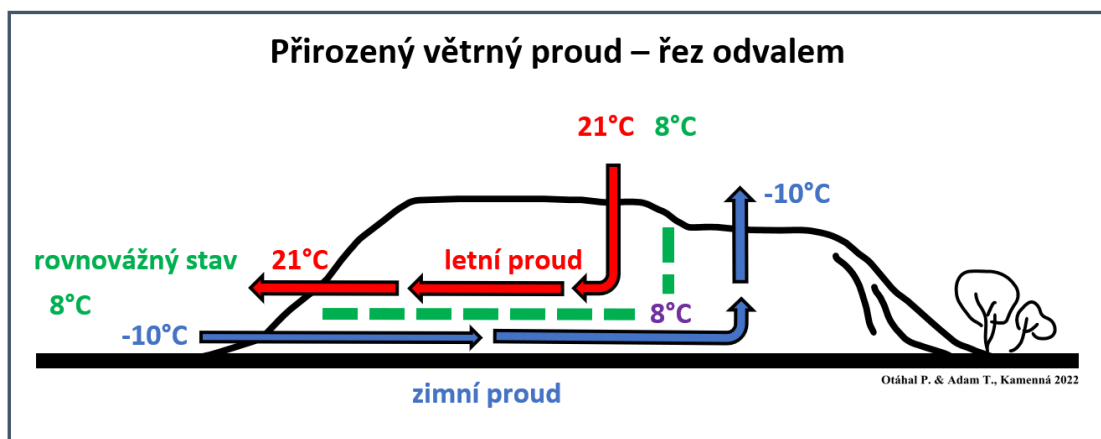
Přirozený větrný proud je způsoben rozdílnou teplotou, t.j. zahřátím nebo ochlazením důlních větrů, pojmáním vodních par, nárazem vodních kapek apod. Proudění nemůže nastat ve vodorovných štolách nebo chodbách, kde mají obě ústí v jedné rovině. Naopak proudění vzniká při výškových rozdílech ústí, kdy při nepravidelném zahřátí vzdušin nastane pohyb větrů mezi teplým vzduchem na povrchu a studeným v dole anebo obráceně v důsledku porušení teplotní rovnováhy. Při předpokladu, že má štola v nejhlubším místě teplotu  $9^{\circ}\text{C}$  v hloubce  $H=25\text{m}$ , v letním období je venkovní atmosféra teplejší než ve štole, tak vzduch, který tam padá šachticí, se ochlazuje a způsobuje přirozené proudění k nižšímu ústí štoly. V zimě se větry v dole zahřívají a vystupují šachticí vzhůru ven, protože okolní atmosféra je studenější než důlní. Dvakrát během roku nastává zvrát ve směru proudění větrů v jarních a podzimních měsících. Přirozený tah větrů je lepší v zimě vzhledem ke stálejšímu rozdílu teplot mezi dnem a nocí než v letním období. V létě při nižších venkovních teplotách může nastat stagnace větrného proudu i během dne (Obr. 46).



Obr. 46: Přirozený větrný proud

Zdroj: Příručka důlního větrání, Říman, 1953

Během terénního měření OAR dne 2.9.2022 byl zaznamenán rovnovážný stav odvalu a stagnace větrných proudů uvnitř odvalu šachty č.15 (Obr. 47). K rovnovážnému stavu přirozeného proudění vzduchu uvnitř důlního díla dochází v případě, že je teplota ovzduší ve venkovním prostředí stejná jako uvnitř objektu. V tomto případě byla zaznamenána vnější teplota ovzduší 7,8°C.

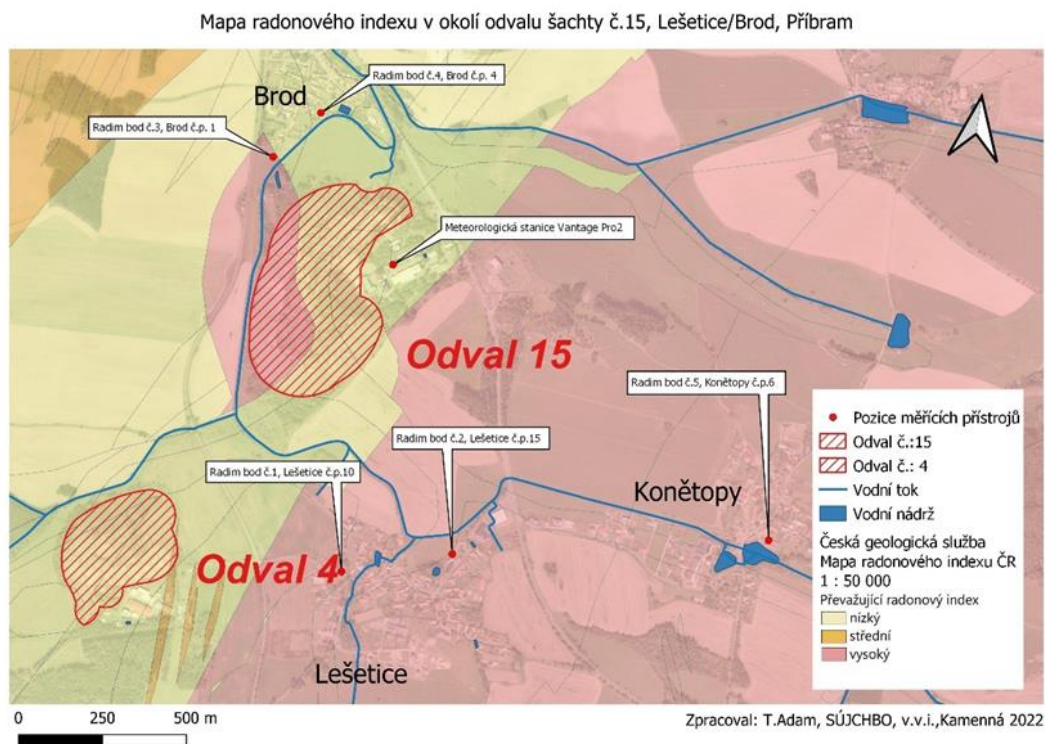


Obr. 47: Přirozený větrný proud s rovnovážným stavem proudění

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

## 7.4 Zimní kontinuální monitoring OAR

Zimní kontinuální měření objemové aktivity (OAR)  $^{222}\text{Rn}$  proběhlo ve dnech 23.3.2022 až 21.4.2022 v obci Lešetice a Brod a jejím výsledkem jsou průměrné naměřené hodnoty denní variace OAR za zaznamenané časové období a maximální naměřené hodnoty OAR v rozmezí 0-24 hod. V zájmové oblasti v okolí odvalu šachty š.15 byla data zaznamenána ve vnějším venkovním prostředí (outdoor) ve vesnické zástavbě a ve vnitřním (indoor) prostoru vybraných obytných budov. Celkem bylo použito 8 přístrojů Radim 3 a 3AT. Jako pozadřová lokalita byla zvolena obec Konětopy s umístěným přístrojem Radim 3AT pro naměření hodnot ve vnějším (outdoor) prostředí (Obr. 48). Výsledné hodnoty jsou naměřeny v jednotkách  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

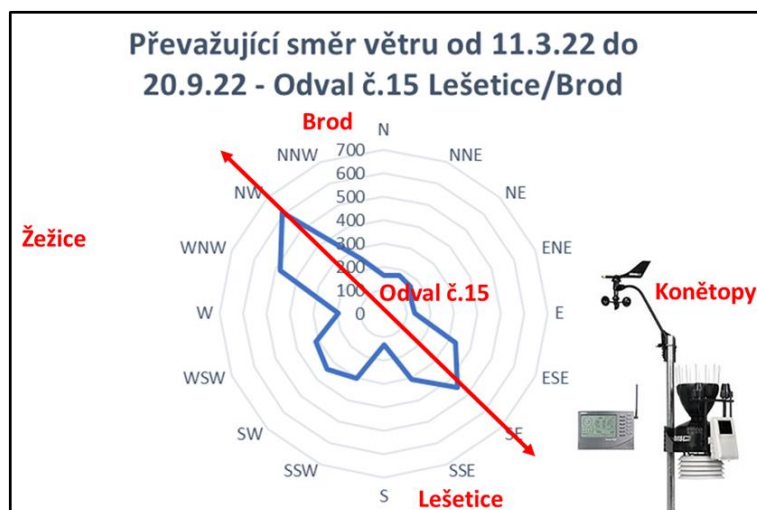


Obr. 48: Osazení monitorů radonu na mapě radonového indexu

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

V dané lokalitě byla zaznamenána data o směru a intenzitě větru za období od 11.3.2022 do 20.9.2022 naměřená meteostanicí Vantage Pro 2 umístěnou na těžební věži šachty č.15. V tomto časovém úseku převažuje směr větru od obce Brod (NW – north west) severozápadním směrem k obci Lešetice. V některých zaznamenaných intervalech se vítr otáčí opačným směrem z obce Lešetice (SE – south east) jihovýchodním prouděním (Obr. 49). Byl prokázán vliv na hodnoty OAR vzhledem k rychlosti větru. Při maximálních naměřených hodnotách OAR ve venkovním prostředí byla zaznamenána nejnižší hodnota rychlosti větru.





Obr. 49: Růžicový graf převažujícího směru větru – Odval šachty š.15

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

Mezinárodní zkratky větrné růžice:		
<b>N</b>	<b>north</b>	<b>sever</b>
<b>NNE</b>	<b>north north east</b>	<b>severo severovýchod</b>
<b>NE</b>	<b>north east</b>	<b>severovýchod</b>
<b>ENE</b>	<b>east north east</b>	<b>východo severovýchod</b>
<b>E</b>	<b>east</b>	<b>východ</b>
<b>ESE</b>	<b>east south east</b>	<b>východo jihovýchod</b>
<b>SE</b>	<b>south east</b>	<b>jihovýchod</b>
<b>SSE</b>	<b>south south east</b>	<b>jiho jihovýchod</b>
<b>S</b>	<b>south</b>	<b>jih</b>
<b>SSW</b>	<b>south south west</b>	<b>jiho jihozápad</b>
<b>SW</b>	<b>south west</b>	<b>jihozápad</b>
<b>WSW</b>	<b>west south west</b>	<b>západo jihozápad</b>
<b>W</b>	<b>west</b>	<b>západ</b>
<b>WNW</b>	<b>west north west</b>	<b>západo severozápad</b>
<b>NW</b>	<b>north west</b>	<b>severozápad</b>
<b>NNW</b>	<b>north north west</b>	<b>severo severozápad</b>

Obr. 50: Mezinárodní zkratky větrné růžice

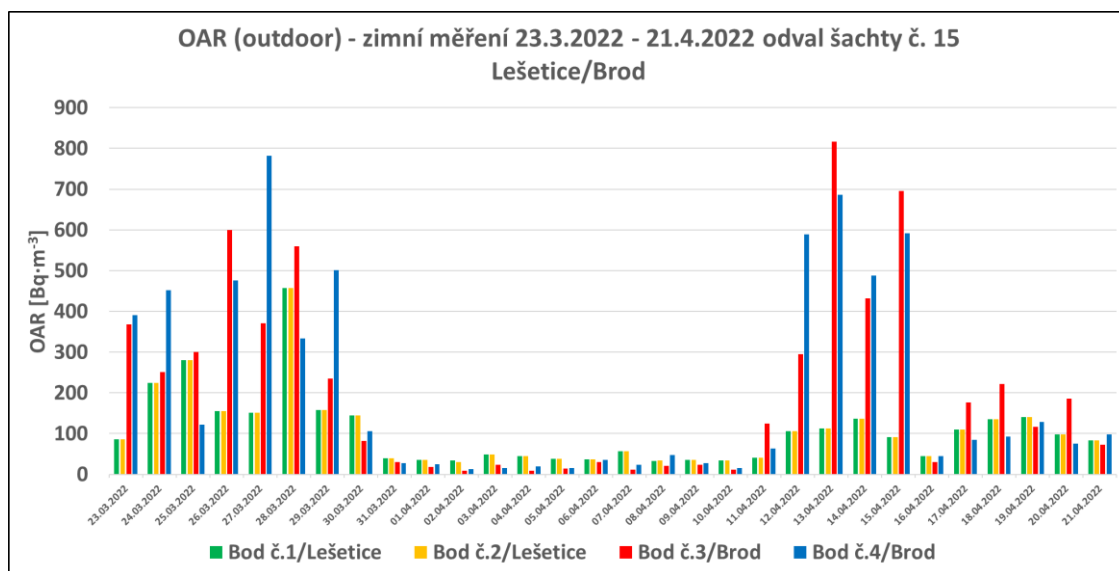
Zdroj: SÚJCHBO, 2022

Beaufortova stupnice rychlosti větru:			
stupeň	označení		rychlost větru
<b>0.</b>	bezvětří		0 - 0.29 m/s
<b>1.</b>	vánek		0.3 - 1.5 m/s
<b>2.</b>	slabý vítr		1.6 - 3.3 m/s
<b>3.</b>	mírný vítr		3.4 - 5.4 m/s
<b>4.</b>	dosti čerstvý vítr		5.5 - 7.9 m/s
<b>5.</b>	čerstvý vítr		8 - 10.7 m/s
<b>6.</b>	silný vítr		10.8 - 13.8 m/s
<b>7.</b>	prudký vítr		13.9 - 17.1 m/s
<b>8.</b>	bouřlivý vítr		17.2 - 20.7 m/s
<b>9.</b>	vichřice		20.8 - 24.4 m/s

Obr. 51: Beaufortova stupnice rychlosti větru

Zdroj: SÚJCHBO, 2022

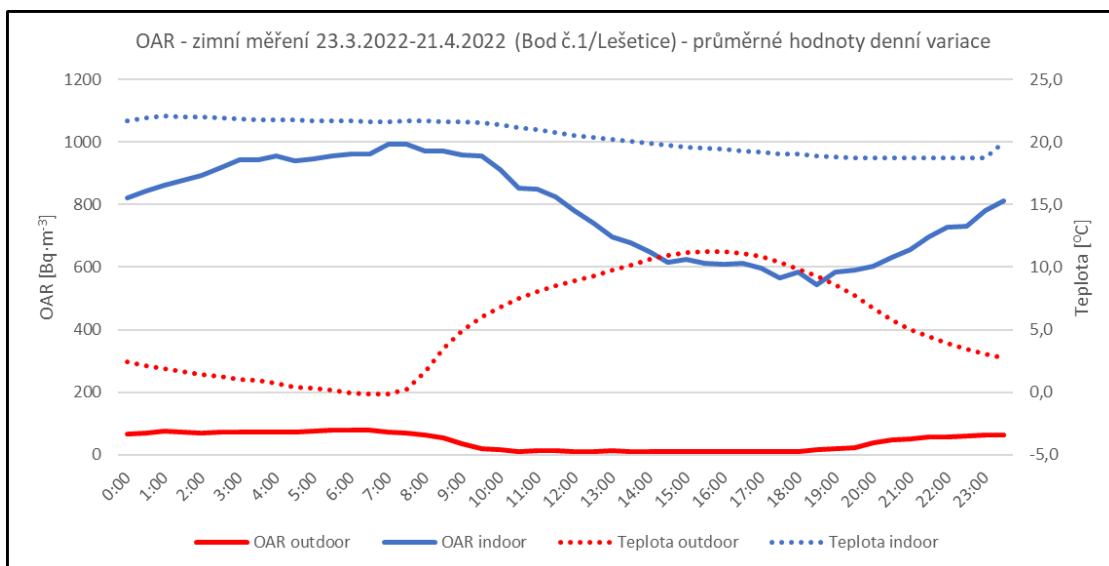
Výsledné maximální hodnoty OAR ve vnějším ovzduší během zimního období zobrazují nejvyšší hodnoty u bodů měření umístěných v bližších oblastech od odvalu, v nočních hodinách a za nízké intenzity větrného proudění. V zimním období byla naměřena maxima OAR ve vnějším ovzduší v obci Brod a to 600 – 810 Bq.m<sup>-3</sup>. Při intenzivním větru se naměřené hodnoty výrazně snižují (Obr. 52).



Obr. 52: Zimní kontinuální měření OAR v obci Lešetice a Brod – maximální naměřené hodnoty 0-24 hod – outdoor

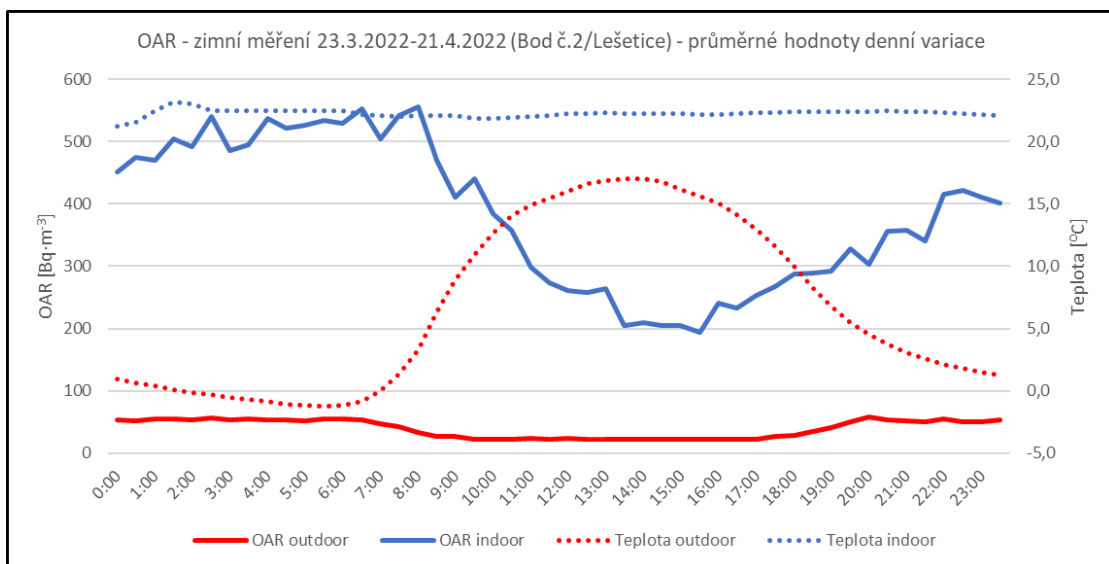
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

Grafické znázornění průměrných hodnot denních variací OAR v zimním období ve venkovním a vnitřním prostředí v závislosti na denním a nočním průběhu trendu OAR, a také v závislosti na denní a noční teplotě vzduchu za zaznamenané období v jednotlivých bodech v obcích Lešetice a Brod. Průměrné vnitřní (indoor) hodnoty OAR jsou vzhledem k nevětraným místnostem a konstrukcím jednotlivých domů výrazně vyšší než hodnoty OAR ve venkovním ovzduší. V nočních hodinách jsou indoor hodnoty OAR vyšší než v denních hodinách a spolu se slunečním zářením a zvyšující se teplotou naměřené hodnoty indoor OAR klesají. Ve večerních hodinách okolo 18:00 se snižující se teplotou venkovního prostředí hodnoty indoor OAR opět ve všech případech narůstají. Venkovní (outdoor) hodnoty OAR jsou po celé zimní měřicí období na nízkých úrovních se stejným průběhem denní variace (Obr. 53), (Obr. 54), (Obr. 55) a (Obr. 56).



Obr. 53: Zimní měření OAR bod č.1 – průměrné hodnoty denní variace

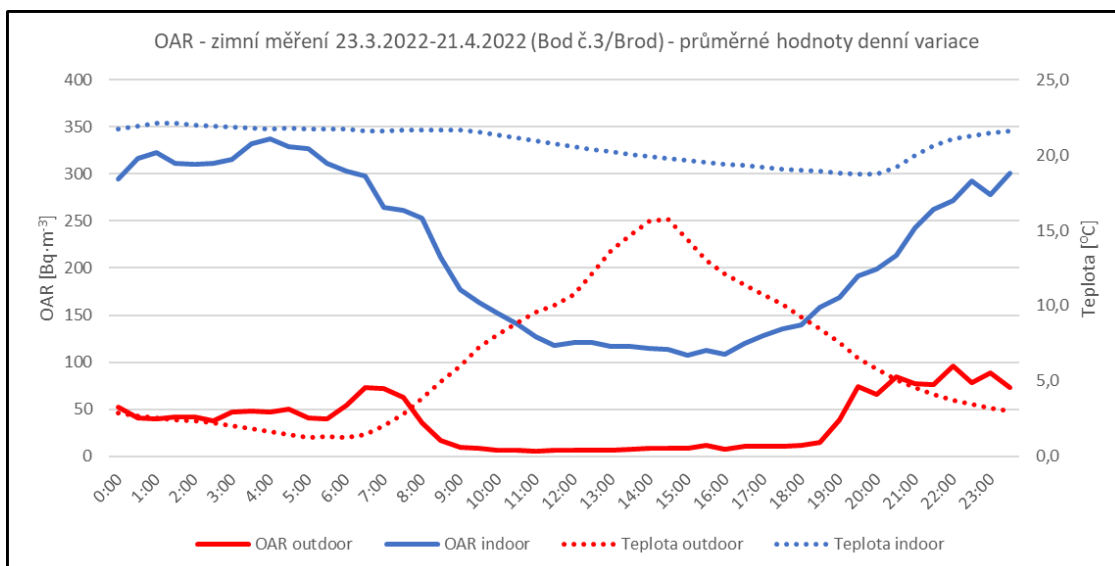
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022



Obr. 54: Zimní měření OAR bod č.2 – průměrné hodnoty denní variace

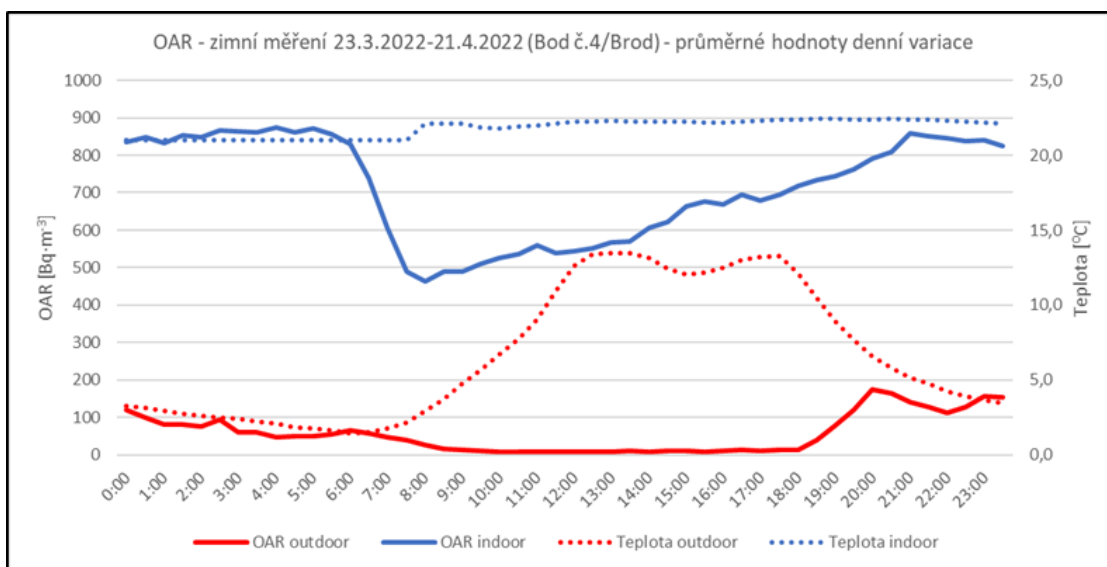
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022





Obr. 55: Zimní měření OAR bod č.3 – průměrné hodnoty denní variace

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022



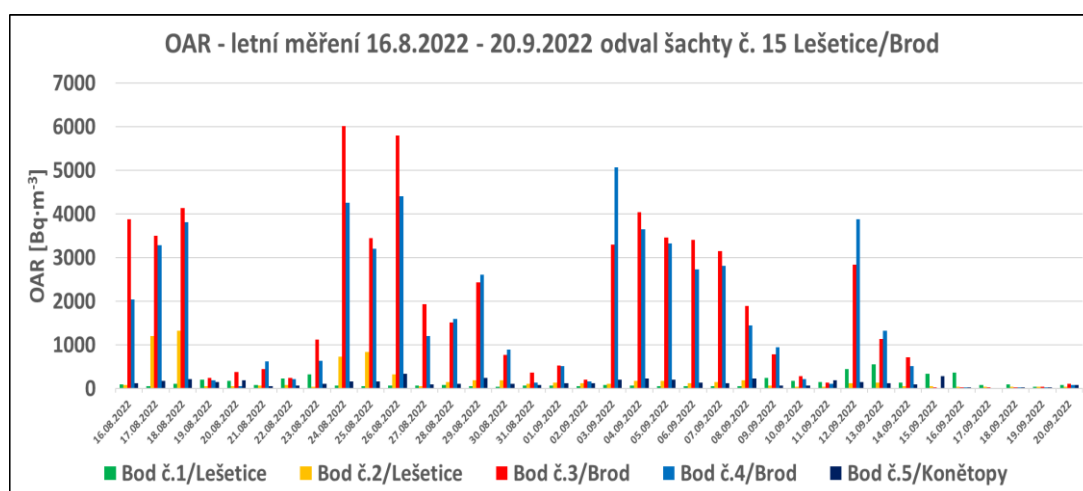
Obr. 56: Zimní měření OAR bod č.4 – průměrné hodnoty denní variace

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

## 7.5 Letní kontinuální monitoring OAR

Graf (Obr. 57) zobrazuje maximální hodnoty OAR ve vnějším ovzduší během letního období znázorňují nejvyšší hodnoty u bodů měření umístěných v bližších oblastech od odvalu. Přestože pozad'ová lokalita v obci Konětopy leží podle mapy

radonového indexu v území s vysokým radonovým indexem, tak dlouhodobé naměřené maximální hodnoty jsou na úrovni do  $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Obec Lešetice v tomto období vykazuje hodnoty venkovního ovzduší OAR při nízké rychlosti vzduchu v některém období dle obr.č.50 přes  $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . V obci Brod na obou zájmových bodech byly naměřeny zvýšené koncentrace OAR ve vnějším ovzduší dosahující  $2000\text{--}6000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  v maximech v noci a za nízkého proudění vzduchu.

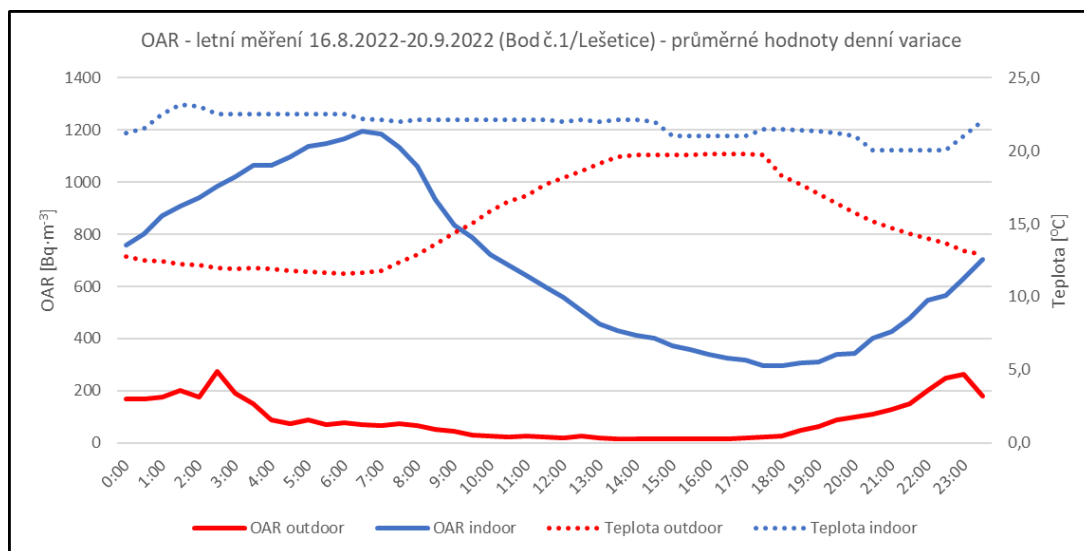


*Obr. 57: Letní kontinuální měření OAR v obci Lešetice a Brod – maximální naměřené hodnoty 0-24 hod – outdoor*

*Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022*

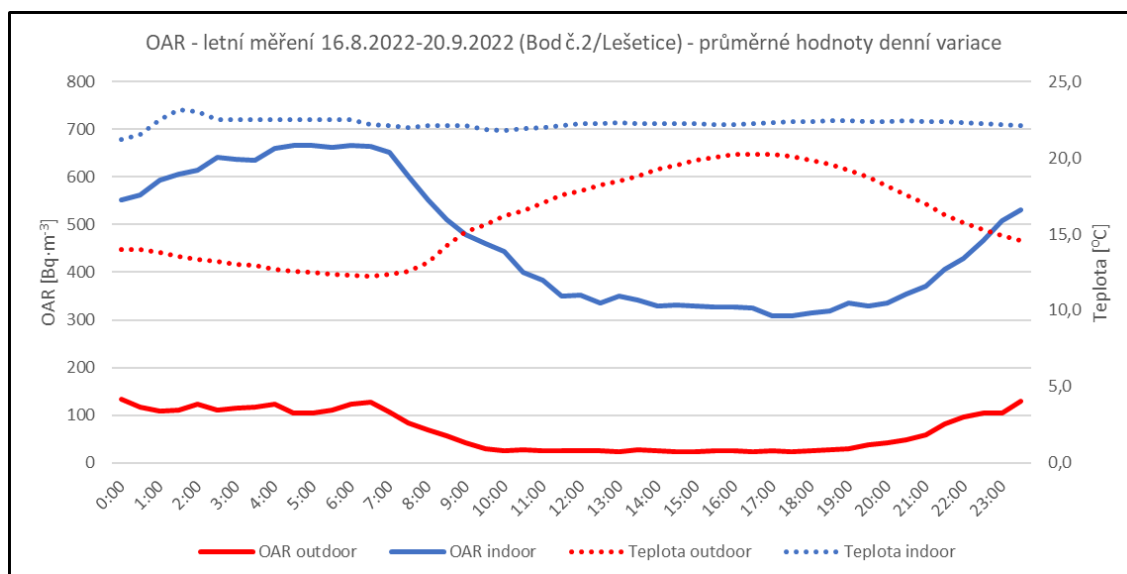
Znázornění průměrných hodnot denních variací OAR v letním období ve venkovním a vnitřním prostředí v závislosti na denním a nočním průběhu trendu OAR, a také v závislosti na denní a noční teplotě vzduchu za zaznamenané období v jednotlivých bodech v obcích Lešetice a Brod.

V obci Lešetice (Obr. 58) a (Obr. 59) jsou jak indoor i outdoor hodnoty OAR výrazně vyšší než v zimním období. Ve vnitřním prostředí v průměru denní variace dosahují při tomto období ve větraných místnostech až  $1200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .



Obr. 58: Letní měření OAR bod č.1 – průměrné hodnoty denní variace

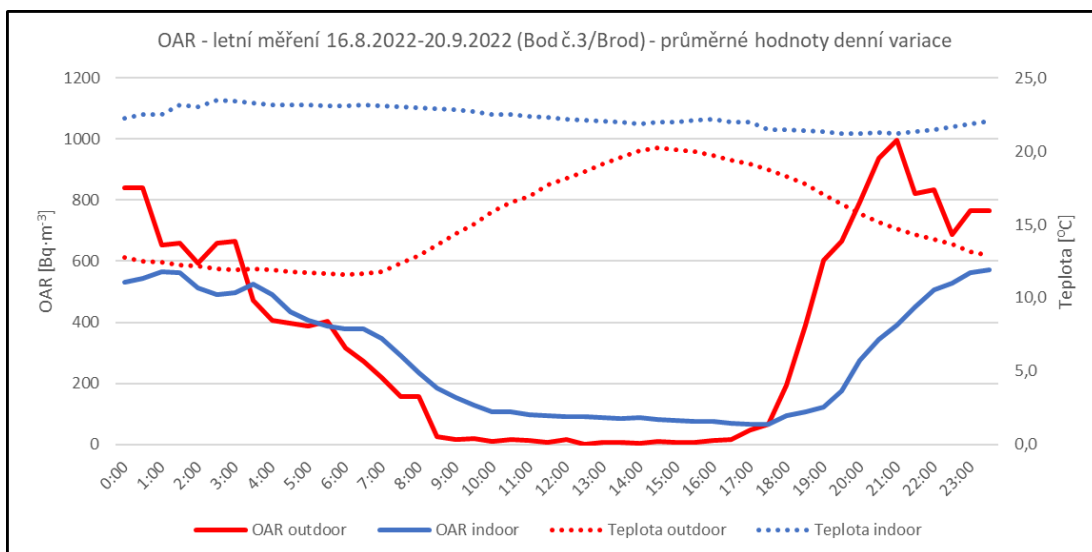
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022



Obr. 59: Letní měření OAR bod č.2 – průměrné hodnoty denní variace

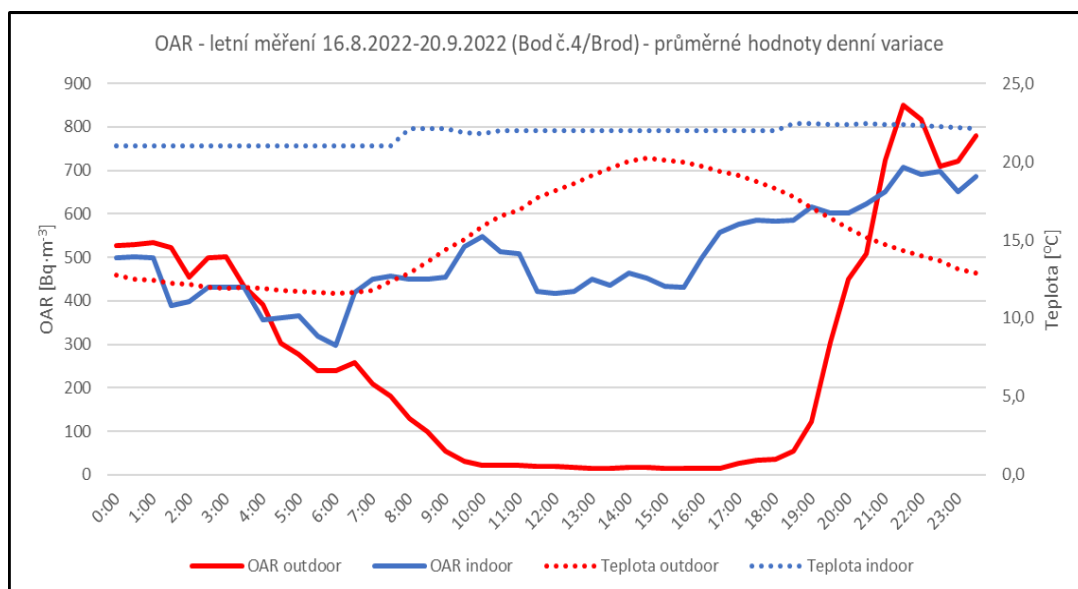
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

Na měřených bodech v obci Brod (Obr. 60) a (Obr. 61) vzhledem k intenzivnějšímu vlivu a blízkosti odvalu byla ve venkovním ovzduší naměřena průměrná objemová aktivita radonu až  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$ . Při větraných místnostech v tomto období se z venkovního ovzduší dostává vzduch do vnitřních prostorů obytných objektů a způsobuje nárůst hodnot OAR v obývaných prostorech dosahujících v průměru také  $1000 \text{ Bq.m}^{-3}$ .



Obr. 60: Letní měření OAR bod č.3 – průměrné hodnoty denní variace

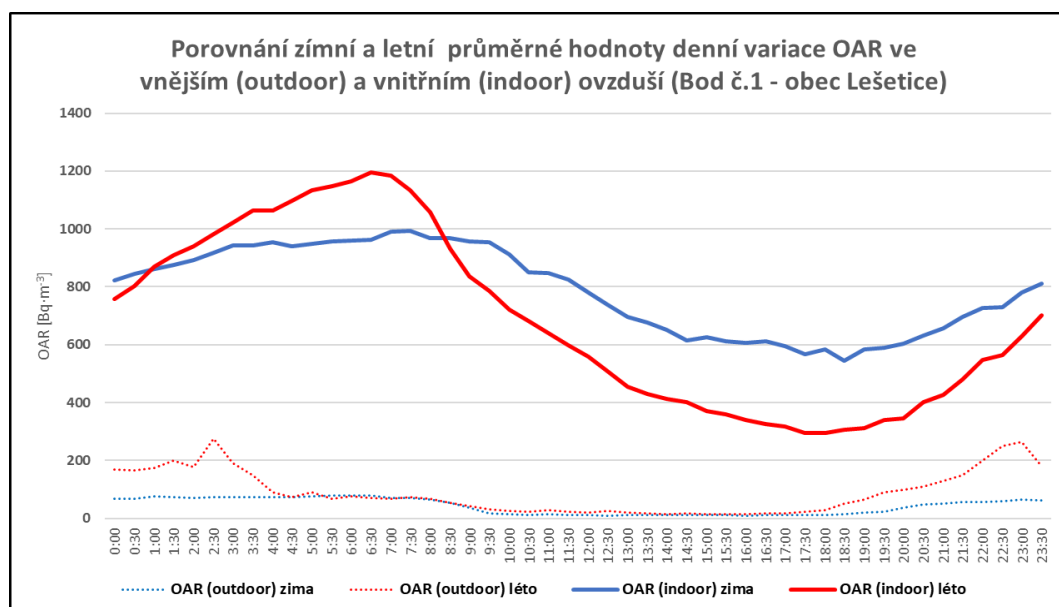
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022



Obr. 61: Letní měření OAR bod č.4 – průměrné hodnoty denní variace

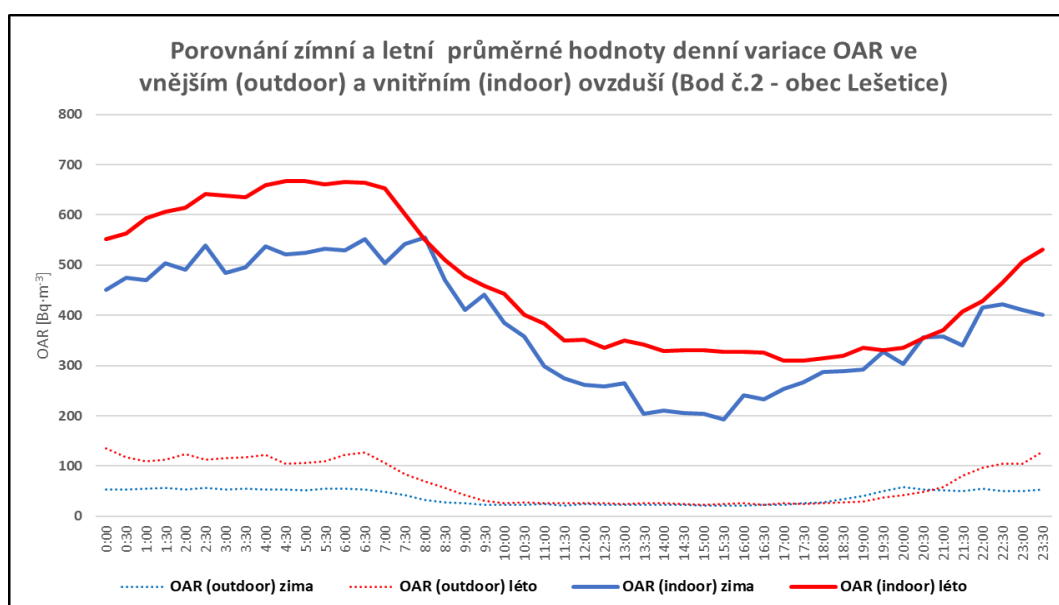
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

Výsledné porovnání zimních a letních průměrných hodnot denní variace OAR ve vnějším (outdoor) a vnitřním (indoor) ovzduší (Obr. 62) a (Obr. 63). Ve všech zkoumaných lokalitách dosahují letní naměřené hodnoty OAR indoor i přes větrané místnosti v nočních hodinách vyšší koncentrace radonu než v zimním období.



Obr. 62: Porovnání zimní a letní průměrné hodnoty denní variace OAR ve vnějším a vnitřním ovzduší bod č.1

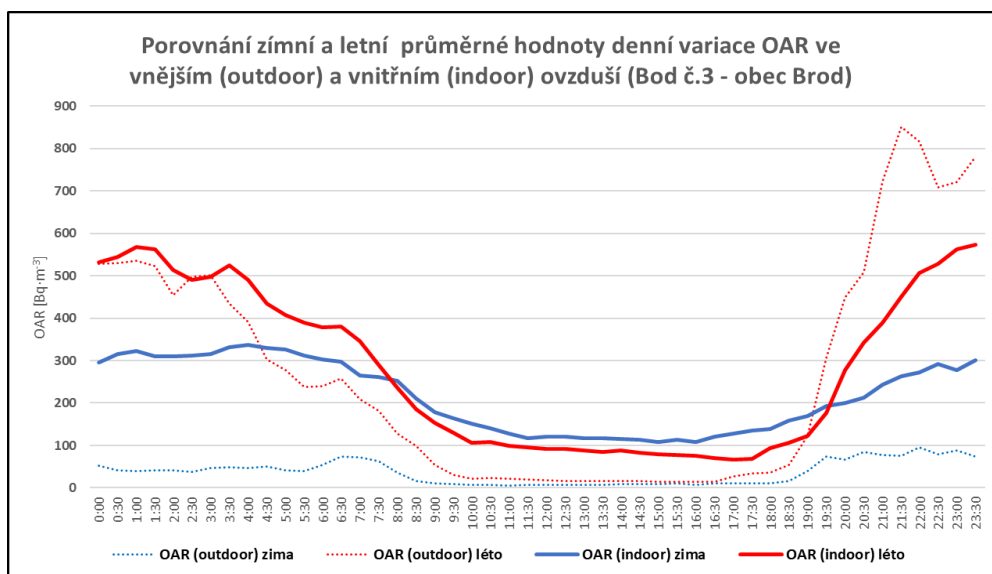
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022



Obr. 63: Porovnání zimní a letní průměrné hodnoty denní variace OAR ve vnějším a vnitřním ovzduší bod č.2

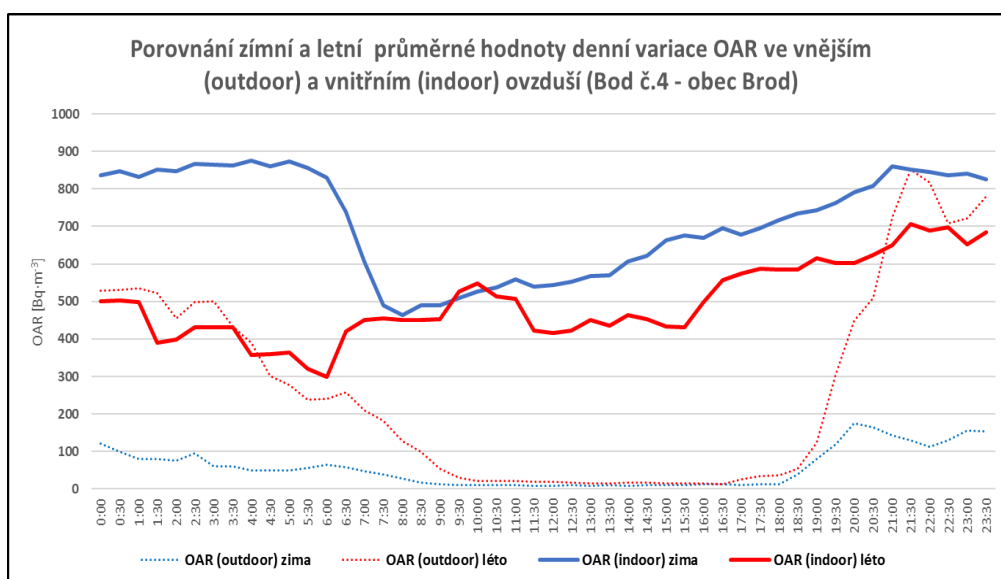
Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

Porovnání kontinuálního měření v obci Brod na dvou lokalizovaných bodech zobrazuje na grafech (Obr. 64) a (Obr. 65) vliv odvalu na své okolí, a to výrazně převyšujícími naměřenými hodnotami OAR ve venkovním ovzduší v nočních hodinách při nutnosti větrání obytných místností v letním období. Průměrné hodnoty OAR indoor i outdoor denní variace se pohybují od 18:00 do 8:00 v rozpětí  $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  až  $900 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  v maximech až  $6320 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .



Obr. 64: Porovnání zimní a letní průměrné hodnoty denní variace OAR ve vnějším a vnitřním ovzduší bod č.3

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022



Obr. 65: Porovnání zimní a letní průměrné hodnoty denní variace OAR ve vnějším a vnitřním ovzduší bod č.4

Zdroj: T. Adam, SÚJCHBO, 2022

## 8. Diskuse

Dopady hornické činnosti jsou na první pohled v okolí města Příbram viditelné a významně tvoří krajinný ráz oblasti. Podle Kučery & kol. (1999) a DIAMO s.p. (2017) se na Příbramsku vyskytuje 31 odvalů a šurfů zanechaných z bývalých uranových dolů, které vytváří dominanty zdejší krajiny. S tímto tvrzením se ztotožňuji a souhlasím s ním po lokalizaci a zakreslení všech odvalů v zájmové lokalitě do programového prostředí GIS. Po získání dostatečného množství informací z historie a současnosti uvedených k dané problematice v této diplomové práci, naměřených a zanalyzovaných datových podkladů, je nutné zhodnotit vliv možné kontaminace životního prostředí v oblasti Příbramska.

Hladká & Hemer (1990) vysvětlují ovlivnění obyvatelstva odvaly uranového průmyslu. Rozvoj uranového průmyslu vedl k uvolnění velkého množství radioaktivních prvků, které byly dosud pod povrchem a zásadně tak ovlivnily životní prostředí v okolí odvalů. Odvaly po uranové těžbě představují riziko potencionálního ozáření dvěma cestami. Uvolňováním radionuklidů z hlušiny dešťovou vodou a tajícím sněhem a prosakováním této vody do vodotečí a kontaminací sedimentů. Druhá cesta k možnému ozáření vede expozicí obyvatel vyplývající z úniku radonu a jeho prvků přeměny z odvalů do atmosféry. Burian (2018) toto tvrzení potvrzuje svými výsledky měření objemových aktivit dceřiných produktů radonu ve venkovním vzduchu, na kterých pracuje již od šedesátých let dvacátého století, kdy byl v Kamenné u Příbrami zřízen Ústav hygieny práce v uranovém průmyslu při těžbě a úpravě radioaktivních surovin. Tato diplomová práce navazuje na výzkumné práce při posuzování vlivu odvalů na životní prostředí za použití nejmodernějších měřících metod, zařízení k monitorování a programovému vybavení ke zpracování výsledných výstupů.

UNSCEAR (2000) zveřejňuje ve své publikaci Sources and effects of ionizing radiation, že radon ve venkovním ovzduší obecně nepředstavuje pro běžnou populaci významné zdravotní riziko. Radon uvolňovaný ze země se ve vzduchu rychle ředí na nízké koncentrace. Steck a Yassin (2001) uvádí typické venkovní koncentrace radonu mezi 1 a 100 Bq·m<sup>-3</sup>, s odhadovaným ročním průměrem kolem 10 Bq·m<sup>-3</sup>, zatímco vnitřní koncentrace od několika Bq·m<sup>-3</sup> do více než 70 kBq·m<sup>-3</sup> s průměrem kolem 40 Bq·m<sup>-3</sup>. Podle metodiky měření OAR SÚJCHBO (2016) jsou venkovní

hodnoty do  $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  v podstatě neměřitelné a jsou udávány jako minimální detekované hodnoty.

Metody bezpilotního průzkumu oblastí zasažených radioaktivitou v Černobylu popisuje Connor & kol. (2020) jako vhodné pro detekování a zaznamenání radiačních veličin bez ohrožení obsluhy monitorovacího zařízení. Pro využití UAV letounu na velké ploše používá dron s pevným křídlem VTol s kolmým startem. Tento dron dokáže pomocí gama spektrometru obsáhnout za krátký čas rozlehlou oblast ve vysokých výškách letu. Naopak Bai Li & kol. (2018) používá multirotorovou helikoptéru pro pomalejší a přesnější detekci radiačních veličin v nižších letových výškách. Jaderný odbor SÚJCHBO v.v.i. vytvořil v roce 2016 certifikovanou metodiku použití nízkoletících bezpilotních dronů vhodnou pro oblasti zasažené hornickou činností a tato metoda byla použita v této diplomové práci.

Po přípravném měření a vyhledání horkých míst na koruně odvalu pomocí dronu a vyznačení vhodných míst k jednorázovému odběru vzorku vzduchu byla zvolena technika za použití Lukasových scintilačních komůrek podle Sathy & kol. (2014), která vychází z výzkumu Lucase (1957) a Thomase & kol., (2000). Jako nejvhodnější postup byl určen metodikou jednorázových a kontinuálních odběrů vzorků vzduchu SÚJCHBO (1991). Naopak nevhodné řešení pro tento výzkumný úkol se ukázalo měření radonu a thoronu a jejich přeměnových prvků metodou pasivního odběru radonu a thoronu (PRTM) podle Mehty & kol. (2016). Pro dlouhodobý kontinuální monitoring OAR byly použity monitory radonu Radim.

Přirozený větrný proud probíhá v každém důlním díle, jeskyni či odvalu. Proudění vzniká při rozdílných teplotách uvnitř a vně objektu v důsledku porušení teplotní rovnováhy a výškových rozdílech ústí. Říman (1953) zaznamenává a popisuje letní a zimní proudění uvnitř důlního díla a zmiňuje se i o stagnaci větrného proudu uvnitř díla při chladných letních teplotách ovzduší. Tento rovnovážní stav se podařilo zaznamenat a popsat v letním terénním průzkumu při jednorázovém odběru vzduchu, jehož výsledky jsou zpracovány v kapitole Letní terénní měření OAR na odvale šachty č.15. Z naměřených celkových výsledků a po jejich analýze lze konstatovat, že vliv přirozených větrných proudů z těla odvalu významně ovlivňuje své okolí a způsobuje zvýšení hodnot objemové aktivity radonu nad referenční hodnoty.



## 9. Závěr

Ve spolupráci s pracovníky DIAMO s. p., o. z. SUL Příbram, Státního ústavu radiační ochrany, v. v. i., Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT, Státního úřadu pro jadernou bezpečnost a pracovníky Odboru jaderné ochrany SÚJCHBO, v.v.i. byl v roce 2022 proveden monitoring okolí odvalu šachty č. 15. Celý projekt probíhal v průběhu roku v několika fázích. Během počáteční fáze projektu v přilehlých obcích Brod a Lešetice byly ve vybraných obytných budovách a v jejich blízkém venkovním okolí umístěny přístroje pro kontinuální měření radonu Radim 3 a Radim 3AT. Jako pozadřová oblast byla zvolena obec Konětopy, kde byl umístěn jeden z přístrojů pro monitoring radonu Radim 3AT. Přímo na těžební věži v areálu šachty č. 15 byla instalována meteostanice Vantage Pro2 pro zaznamenávání klimatických podmínek v průběhu celého projektu. Po přípravném terénním průzkumu leteckou a pochůzkovou metodou měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu od záření gama PPDE k vytipování horkých míst na koruně odvalu šachty č. 15 bylo provedeno letní a zimní měření okamžité objemové aktivity radonu OAR na koruně odvalu a přilehlé louce sousedící s odvalem směrem k osídlené oblasti.

Z naměřených a zpracovaných hodnot byl prokázán vliv materiálu odvalu na objemovou aktivitu radonu OAR ve vnější atmosféře, potvrzen vliv teploty na „dýchání“ odvalu a dokázán vliv odvalu na vnitřní atmosféru obydlí v dané lokalitě. Na základě realizovaných terénních měření lze opětovně potvrdit, že hodnoty v blízkém okolí studovaného odvalu významně překračují koncentrace radonu v atmosféře publikované UNSCEAR 2000. Vysoké hodnoty OAR lze naměřit v nočních hodinách. Pro průměrné hodnoty OAR ve venkovním ovzduší uvádí UNSCEAR 2000  $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . V obci Brod dosahují letní průměrné venkovní hodnoty OAR  $1050 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , přičemž maximální hodnoty byly naměřeny až  $6320 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Během projektu byl také vyvrácen zásadní vliv podloží na naměřené hodnoty v jednotlivých bodech měření. Obec Brod, kde jsou zaznamenány nejvyšší naměřené hodnoty, se nachází dle mapy Radonového indexu ČR v oblasti s nízkým radonovým indexem 1. Lešetice a Konětopy, kde byly naměřené nižší hodnoty OAR se naopak nacházejí v oblasti vysokého radonového indexu 3. Zpracované výsledky potvrzují, že získané hodnoty OAR jsou u bližších bodů odběru k odvalu vyšší než vzdálenější místa realizace odběru vzorků vzduchu. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny

v bezprostřední blízkosti odvalu. Dále byly opětovně potvrzeny narůstající hodnoty OAR v podvečerních hodinách a v průběhu noci. Měření byla realizována metrologicky ověřenými přístroji.

V budoucnu plánuje Odbor jaderné ochrany pokračovat v monitoringu uranových odvalů v okolí Příbrami pomocí dronu i pochůzkových měření, ve vývoji a publikaci měřících postupů využívajících dronů a ve sdílení získaných dat se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Vzhledem k tomu, že se v okolí Příbrami vyskytuje celkem 31 uranových odvalů a šurfů a zástavba v jejich okolí se neustále přibližuje k jejich bezprostřední blízkosti, je nutné v budoucnosti monitorovat a posoudit vliv na své okolí i u ostatních odvalů v zájmové oblasti. Za cíl v dalších fázích dlouhodobého projektu si Odbor jaderné ochrany určuje posoudit vliv ostatních odvalů na okolí, stanovit příspěvek k efektivní dávce na obyvatele a zanalyzovat rizika vlivu vzdálenosti odvalu od nové výstavby.

## 10. Přehled literatury a použitých zdrojů

### 10.1 Literární zdroje

**Bai Li, Zhu Y., Wang Z., Chao Li., Peng Zhong-Ren, Lixin Ge, 2018:** Use of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles for Radioactive Source Search, Remote Sensing, 13 s.

**Beneš J., Kyplová J., Vitek F., 2015:** Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory pro studium i praxi. Grada Publishing, a.s., 236 s. ISBN: 802474712X, 9788024747125.

**Cinelli G., De Cort M. & Tollefsen T. [eds.], 2019:** European Atlas of Natural Radiation. Publication Office of the European Union, Luxembourg, 190 s.

**Connor D. T., Wood K., Martin P.G., Goren S., Megson-Smith D., Verbelen Y., Chyzhevskiy I., Kirieiev S., Smith N.T., Richardson T., Scott T.B., 2020:** Radiological Mapping of Post-Disaster Nuclear Environments Using Fixed-Wing Unmanned Aerial Systems: A Study From Chernobyl, Front. Robot. AI, 16 s.

**Cooper J. R., Randle K., Sokhi, R. S., 2003:** Radioactive Releases in the Environment: Impact and Assessment, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 473 s.

**Cothorn, C. R. & Smith Jr., J. E. 1987:** Environmental Radon, Springer, New York, 376 s.

**Edwards A. & Lloyd D.C., 1998:** Risks from ionising radiation: Deterministic effects. Journal of Radiological Protection, 18(3), 175-183 s.

**Eisenbud M. & Gesell T., 1997:** Environmental Radioactivity. From Natural, Industrial, and Military Sources, 4th edition (Academic Press)

**Gruppen, C. [ed.], 2010:** Introduction to Radiation Protection: Practical Knowledge for Handling Radioactive Sources (Graduate Texts in Physics). Nakladatelství Springer, Berlin, 417 s.

**Hladká E. & Hemer M., 1990:** Ovlivnění obyvatelstva odvaly uranového průmyslu, Rádioaktivita a životné prostredie 13, č.1, pp. 33-38

**Hůlka J., 2000:** Přírodní radioaktivita a problematika radonu. Azin CZ, Praha, 56 s.

**Ishimori Y. & kol., 2013:** Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. IAEA, Vídeň, 103 s.

**International Atomic Energy Agency, 2014:** Radiation, People and the Environment. IAEA, Vídeň, 85 s.

**Kafka J. [ed.] & kol., 2003:** Rudné a uranové hornictví České republiky. Anagram a Diamo státní podnik, Ostrava, 646 s.

**Klener V. & kol., 2000:** Principy a praxe radiační ochrany. AZIN CZ, Praha, 627 s.

**Kuča K., 1997:** Města a městečka v Čechách, na Moravě a ve Slezsku 2. díl. Libri, Praha, 938 s.

- Kučera R. & kol., 2019:** Sedmdesát let od zahájení těžby uranu na Příbramsku. DIAMO, státní podnik, Příbram, GRASPO CZ, a.s., Zlín, 213 s.
- Lepka F., 2003:** Český uran, 1945-2002. Knihy 555, Liberec, 101 s.
- Lucas H.F., 1957:** An Improved gas level alpha scintillation counter for radon. Review of Scientific Instruments 28, 680 s.
- Mehta V. & kol., 2016:** Measurement of Radon, Thoron and Their Progeny in Indoor Environment of Mohali, Punjab, Northern India, Using Pinhole Dosimeters, Nuclear Technology & Radiation Protection, Vol. 31, pp. 299-305
- Majer J., 2004:** Rudné hornictví v Čechách, na Moravě a ve Slezsku. Obrazy z dějin těžby a zpracování. Libri, Praha, 255 s.
- Merta J. & Burian I., 2018:** Měření okamžitých hodnot objemové aktivity radonu LMR-2. SÚJCHBO, v.v.i. – Laboratoř pro měření radonu, Kamenná, 10 s.
- MPCA Minnesota Pollution Control Agency, 1996:** Draft Guidelines Risk Based Site Characterization and Sampling Guidance, St. Paul, 96 s.
- Musílek L., 2000:** Zdroje ionizujícího záření. Azin CZ, Praha, 68 s.
- Nazaroff W.W. & Nero A.V., 1988:** Soil as a source of indoor radon: generation, migration and entry. In: Radon and its decay products in indoor air. (Nazaroff, W.W. & Nero, V., eds). Wiley, New York, US., pp. 57-112
- Newaz A., Jeong S., Lee H., Ryu H., Chong N.Y., 2016:** UAV-based multiple source localization and contour mapping of radiation fields, School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, Ishikawa, Japan, 14 s.
- Plch J., 1999:** Monitor radonu Radim 3AT. Tesla a.s., Praha, 34 s.
- Prach K. & kol., 2009:** Ekologie obnovy narušených míst II. Místa narušená těžbou surovin. ŽIVA, Praha, č. 2. S. 68–72.
- Říman A., 1953:** Příručka důlního větrání. Brněnské knihtiskárny, Brno, 344 s.
- Sethy N.K., Jha V.N., Ravi P.M., Tripathi R.M., 2014:** A simple method for calibration of Lucas scintillation cell counting system for measurement of <sup>226</sup>Ra and <sup>222</sup>Rn, Bhabha Atomic Research Centre, Jaduguda, India, 6 s.
- SÚJCHBO, v.v.i., 1991:** LUK 4 Návod k použití. Řízený dokument. Kamenná, 23 s.
- SÚJCHBO, v.v.i., 2016:** Metodika měření radiačních veličin s užitím nízkoletící multikoptéry (dronu) v oblastech zasažených hornickou činností spojenou s dobýváním a úpravou uranových rud. Kamenná, 25 s.
- SÚJCHBO, v.v.i., 2018:** Postup provedení porovnávacího měření přístrojů pro stanovení příkonu prostorového dávkového ekvivalentu pro přírodní ozáření uvnitř budov s obytnou nebo pobytovou místností. Kamenná, 17 s.
- Thomas J., Hůlka J. & Burian I., 2000:** Radon v budovách. Principy a praxe radiační ochrany. Azin CZ, Praha, 618 s.
- Tomíček R., 2000:** Těžba uranu v Horním Slavkově. Okresní muzeum Sokolov, Sokolov, 294 s.

**UNEP, 2016:** Radiation: effects and sources, United Nations Environment Programme, Vienna, 55 s.

**UNSCEAR, 2000:** Sources and effects of ionizing radiation-Report Vol.1, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 659 s.

**Vašků V., 2008:** Historie těžby uranu v Čechách. Uran, bude se u nás těžit znovu? Sdružení Calla, České Budějovice, 36 s.

**Vávrová J., 2002:** Radiosenzitivita hematopoetického systému. Galén, Praha, 99 s. ISBN: 80-7262-200-5.

**Velfl J., 2003:** Příbram v průběhu staletí. MÚ Příbram, 166 s.

## 10.2 Elektronické zdroje

**Česká geologická služba, ©2022:** Komplexní radonová informace (online). Praha: [cit. 2022.10.05], dostupné z < <https://mapy.geology.cz/radon/#>>.

**Davis Instruments Corporation, ©2022:** Davis Weather Stations (online) [cit.2022.08.30], dostupné z < <https://www.davisinstruments.com/pages/vantage-pro2>>.

**DJI Shenzhen, ©2022:** DJI Drones (online) [cit.2022.08.22], dostupné z < <https://www.dji.com/cz/matrice-300>>.

**DJI Shenzhen, ©2022:** DJI Camera Drones (online) [cit.2022.08.30], dostupné z < <https://www.dji.com/cz/zenmuse-h20-series>>.

**Georadis s.r.o., ©2022:** Georadis GT - 40 (online) [cit.2022.08.30], dostupné z < <http://www.georadis.com/en/products/gt-40.html>>.

**Georadis s.r.o., ©2022:** Georadis D230A (online) [cit.2022.08.30], dostupné z < <http://www.georadis.com/en/products/d230a.html>>.

**IAEA, ©2022:** International Atomic Energy Agency (online) [cit.2022.10.10], dostupné z < <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radiation >>.

**RadonTec, GmbH, ©2022:** Radonshop.com (online) [cit.2022.08.30], dostupné z < <https://www.radonshop.com/bertin-alphaE-professional-radon-gas-detector>>.

**SÚJB, Státní úřad pro jadernou bezpečnost, ©2022:** ozáření z přírodních zdrojů záření (online) [cit.2022.10.10], dostupné z < <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/prirodni-zdroje-ionizujiciho-zareni/ozareni-z-prirodnich-zdroju-zareni>>.