

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza a predikce uvolňování radonu z důlních odvalů

Autor: Bc. David Strnad
Vedoucí práce: Ing. Václav Štěpán, Ph.D.
Akademický rok: 2022/2023



Katedra: KDAIZ

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Bc. David Strnad

Studijní program: Jaderné inženýrství

Specializace: Aplikovaná fyzika ionizujícího záření

Název práce: Analýza a predikce uvolňování radonu z důlních odvalů
(česky)

Název práce: Analysis and prediction of radon release from waste rock dumps
(anglicky)

Pokyny pro vypracování:

1. Stručně popište aktuální stav poznatků k mechanismům proudění plynů v důlních odvalech a suťových polích.
2. Seznamte se základy geoprostorové analýzy a softwarovými nástroji QGIS a PostgreSQL (PostGIS).
3. Sjednoťte do společné databáze data o koncentracích radonu a meteorologických podmínkách na odvalu č. 15 z let 2021 a 2022.
4. Pomocí výše uvedených nástrojů a dat analyzujte a v rozumném rozsahu popište souvislosti mezi hodnotami z měřicích míst z hlediska umístění, vlastností terénu a meteorologických podmínek.
5. Dle časových možností a potřeby proveďte doplňující terénní měření.

Doporučená literatura:

- [1] FAHEY, Frederic H., Zachary R. ABRAMSON, Bonnie L. PADWA, Robert E. ZIMMERMANTOMS, Silas, Paul CRICKARD a Eric van REES, 2018. *Mastering Geospatial Analysis with Python: explore GIS processing and learn to work with GeoDjango, CARTOframes and MapboxGL-Jupyter*. Birmingham Mumbai: Packt Publishing. ISBN 978-1-78829-333-4.
- [2] NAZAROFF, W. W. a Anthony V. NERO, ed., 1988. *Radon and its decay products in indoor air*. New York: J. Wiley. Environmental science and technology. ISBN 978-0-471-62810-1.
- [3] CUTTS, Andrew a Anita GRASER, 2018. *Learn QGIS your step-by-step guide to the fundamental of QGIS 3.4*, 4th edition. ISBN 978-1-78899-742-3.
- [4] MIKIEWICZ, Dominik, Michal MACKIEWICZ a Tomasz NYCZ, 2017. *Mastering PostGIS: create, deliver, and consume spatial data using PostGIS*. ISBN 978-1-78439-544-5.

Jméno a pracoviště vedoucího diplomové práce:

Ing. Václav Štěpán, Ph.D.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Břehová 7
115 19 Praha 1

Jméno a pracoviště konzultanta diplomové práce:

Ing. Martin Kaschner
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Břehová 7
115 19 Praha 1


Datum zadání diplomové práce: 14. 10. 2022

Termín odevzdání diplomové práce: 3. 5. 2023

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.




.....
garant programu


.....
vedoucí katedry



.....
děkan

V Praze dne 14.10.2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze 3. 5. 2023


.....
Bc. David Strnad

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Václavu Štěpánovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu, trpělivost, vstřícnost a velké množství poskytnutých konzultací. Dále bych rád poděkoval konzultantovi práce Ing. Martinu Kaschnerovi za cenné rady, implementaci databáze a pomoc při vytváření skriptů. Za cenné připomínky děkuji také RNDr. Lence Thinové, Ph.D.

Mé poděkování patří rovněž několika institucím za zapůjčení přístrojů, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Za zapůjčení sond děkuji FJFI ČVUT v Praze a SÚRO, v.v.i., kterému děkuji rovněž za zapůjčení infrakamery a anemometru. SÚJCHBO, v.v.i děkuji za zapůjčení meteostanice a Ústavu jaderné fyziky AV ČR, v.v.i. děkuji za zapůjčení iontometrů.

Za umožnění přístupu do areálu odvalu š. č. 15 děkuji Ing. Zbyňku Skálovi z DIAMO, s.p. Dále bych rád poděkoval Mgr. Petru Otáhalovi ze SÚJCHBO, v.v.i za průběžné zasílání dat z meteostanice, Ing. Karlu Jílkovi ze SÚRO, v.v.i. za poskytnutí dat ze stanice Ramonis a Ing. Radku Bicanovi z DIAMO, s.p. za zaslání nejnovějších dat z detektorů ALGADE.

Měření byla podpořena z prostředků projektu Centrum pokročilých aplikovaných přírodních věd (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000778).

Bc. David Strnad

Název práce: **Analýza a predikce uvolňování radonu z důlních odvalů**

Autor: Bc. David Strnad

Obor: Jaderné inženýrství - Aplikovaná fyzika ionizujícího záření

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Václav Štěpán, Ph.D., KDAIZ FJFI ČVUT v Praze, Břehová 7, 115 19, Praha 1

Konzultant: Ing. Martin Kaschner, KDAIZ FJFI ČVUT v Praze, Břehová 7, 115 19, Praha 1

Abstrakt: Po hlubinné těžbě uranu vznikají po celém světě odvaly s nevyužitou hlušinou, ze kterých se do okolního vzduchu uvolňuje radon, který může mít negativní důsledky na zdraví obyvatel přilehlých obcí. Největším odvalem v České republice je odval š. č. 15 na Příbramsku, který je právě díky své velikosti a blízkosti k obcím Brod a Lešetice vhodným studijním místem. Na tomto odvalu bylo v letech 2021 a 2022 v rámci třech kampaní v několika měřicích bodech provedeno kontinuální monitorování objemové aktivity radonu (dále OAR) pomocí sond TSR4M/4S. Pro znalost meteorologických podmínek byla na těžní věži od února 2022 umístěna meteostanice. Sondy byly na základě rešerše literatury a již získaných poznatků ohledně proudění plynů v odvalech umístěny vždy převážně do předpokládaných míst výdechu plynu, tedy v letním období především k patě odvalu a v zimním období na korunu odvalu. Naměřená data byla pro další zpracování sjednocena do PostgreSQL databáze. Tato obsahuje data ze sond, meteostanice, informace o měřicích kampaních, typech použitých přístrojů, jednotlivých použitých přístrojích a lokacích. Data byla zpracována pomocí skriptů v jazyce Python. V získaných časových řadách koncentrací radonu byly hledány prostorové a časové korelace, dále byly zkoumány souvislosti mezi hodnotami OAR a různými meteorologickými parametry a také korelace mezi hodnotami OAR získanými ze sond a hodnotami OAR/EOAR získanými z detektorů Ramonis a ALGADE.

Klíčová slova: radon, odvaly, proudění plynu, databáze SQL, zpracování časových řad

***Title:* Analysis and prediction of radon release from waste rock dumps**

Author: Bc. David Strnad

Abstract: After the deep mining of uranium, waste rock dumps with unused tailings are created all over the world. Radon, which can have negative consequences for the health of the inhabitants of nearby municipalities, is released into the surrounding air. The largest waste rock dump in the Czech Republic is the dump No. 15 in the Příbram region, which, thanks to its size and proximity to the villages of Brod and Lešetice, is a suitable study site. In 2021 and 2022, continuous monitoring of volumetric radon activity (hereinafter RVA) was carried out using TSR4M/4S probes at several measuring points during three campaigns. In order to know the meteorological conditions, a weather station was placed on the tower from February 2022. On the basis of the literature search and already obtained knowledge about the flow of gases in the dumps, the probes were placed mainly in the expected places of gas exhalation, i.e. in the summer season mainly at the base of the dump and in the winter season at the top of the dump. The measured data were integrated into the PostgreSQL database for further processing. This contains data from probes, weather station, information about measurement campaigns, types of instruments used, individual instruments used and locations. The data was processed using Python scripts. Spatial and temporal correlations were sought in the obtained time series of radon concentrations, the connections between RVA values and various meteorological parameters were also investigated, as well as correlations between RVA values obtained from probes and radon concentrations obtained from Ramonis and ALGADE detectors.

Key words: radon, waste rock dumps, gas flow, SQL database, time series processing

Obsah

Úvod	10
1 Teoretický úvod	12
1.1 Problematika odvalů a radonu	12
1.1.1 Těžba uranu	12
1.1.2 Odvaly	14
1.1.3 Radon	18
1.2 Studie mechanismů proudění plynů v odvalech	20
1.2.1 Kanada	20
1.2.2 Německo	21
1.2.3 Austrálie	22
1.2.4 Česká republika – Příbramsko	22
1.2.5 Variace v koncentraci radonu na haldě bývalého uranového dolu	29
2 Materiály a metody	31
2.1 Použité přístroje	31
2.1.1 Sonda Tesla TERA	31
2.1.2 Meteostanice Davis Vantage Pro2 Aktiv	34
2.1.3 Další přístroje	35
2.2 Přehled měřicích kampaní	35
2.2.1 První měřicí kampaň – léto 2021	36
2.2.2 Druhá měřicí kampaň – zima a jaro 2022	39
2.2.3 Třetí měřicí kampaň – léto 2022	44
2.3 Softwarové nástroje	46
2.3.1 Python	46
2.3.2 PostgreSQL	47
2.3.3 QGIS	47
2.4 Struktura databáze	47
2.4.1 Campaign	47

2.4.2	Device_types	49
2.4.3	Devices	49
2.4.4	Locations	49
2.4.5	Meteo_station	49
2.4.6	Tsr_data	49
3	Výsledky a diskuze	50
3.1	Průměry, mediány a maxima OAR	50
3.1.1	Léto 2021 – 1. měřicí kampaň	50
3.1.2	Zima a jaro 2022 – 2. měřicí kampaň	51
3.1.3	Léto 2022 – 3. měřicí kampaň	52
3.2	Denní a sezónní variace OAR	52
3.2.1	Sezónní variace	52
3.2.2	Denní variace	57
3.3	Korelace a autokorelace v hodnotách OAR	58
3.3.1	Korelace mezi OAR na různých částech odvalu	58
3.3.2	Autokorelace OAR	62
3.4	Dekompozice časových řad OAR	64
3.5	Souvislost mezi OAR a meteorologickými podmínkami	66
3.5.1	Teplota a vlhkost	66
3.5.2	Tlak vzduchu	70
3.5.3	Srážky	70
3.5.4	Doba slunečního svitu	71
3.5.5	Rychlost a směr větru	72
3.6	Srovnání naměřených hodnot OAR s ostatními detektory	72
3.6.1	Ramonis	72
3.6.2	ALGADE	77
4	Závěr	79
	Literatura	82

Úvod

Diplomová práce z názvem Analýza a predikce uvolňování radonu z důlních odvalů přímo navazuje na mou bakalářskou práci [1] z roku 2021 a výzkumný úkol [2] z roku 2022. Název bakalářské práce je Posouzení dopadu výskytu ^{222}Rn v tělese odvalu a jeho blízkém okolí z hlediska radiační ochrany. Výzkumný úkol s názvem Třísezónní monitorování odvalu š. č. 15 poblíž Brodu u Příbrami na ni navázal z hlediska dlouhodobějšího měření. Diplomová práce tyto dvě předchozí práce doplňuje, v jejím rámci byla již dříve naměřená data sjednocena do společné databáze a získané časové řady byly podrobněji analyzovány. Za spolupráci a vstřícnost při měřeních děkuji několika institucím, jmenovitě DIAMO, s.p., SÚJCHBO, v.v.i., SÚRO, v.v.i. a ÚJF AV ČR v.v.i., kterým moc děkuji.

Po 2. světové válce se v souvislosti s rozvojem jaderné energetiky zvyšovala produkce uranu a v případě hlubinné těžby zůstaly po celém světě odvaly. V České republice se nejvíce odvalů nachází na Příbramsku, kde je situován také odval š. č. 15, který je díky své velikosti a blízkosti k okolním obcím potenciálně významný z hlediska radiační ochrany. Hlušina v odvalech obsahuje určitý podíl zbytkové uranové mineralizace, přičemž členem uranové přeměnové řady je radon. Ten se díky svému plynnému skupenství může z odvalů uvolňovat a mít negativní důsledky na zdraví obyvatel v přilehlých obcích. Právě informace o světové i domácí těžbě uranu, definice pojmu odval, informace o odvalech na Příbramsku a úvod do problematiky radonu jsou obsahem kapitoly Teoretický úvod 1.

V této kapitole rovněž najdeme shrnutí poznatků k mechanismům proudění plynů v důlních odvalech a suťových polích získané na základě rešerše literatury. Nejprve jsou zde popsány zahraniční studie provedené v Německu, Kanadě a Austrálii, jejichž cílem bylo především vytvoření modelu proudění plynů v odvalech. Ze závěru těchto studií vyplývá, že tok plynu odvalem je řízen především rozdílem teplot uvnitř a vně odvalu. V další části této kapitoly jsou popsány také dlouhodobé i krátkodobé studie provedené v České republice zejména na odvalu š. č. 15, v rámci kterých byly zjištěny zvýšené hodnoty objemové aktivity radonu (dále OAR) především u paty odvalu v letním období.

Kapitola Materiály a metody 2 obsahuje informace o použitých přístrojích, přičemž podrobněji jsou zde popsány technické parametry sond Tesla TERA a meteostanice Davis Vantage Pro2 Aktiv. V další části je uveden přehled tří měřicích kampaní, které proběhly v létě 2021, v zimě, na jaře 2022 a v létě 2022. V jejich rámci bylo vždy v příslušných krytech do předpokládaných míst výdechu plynu z odvalu umístěno několik sond TSR4M/4S. Pro znalost meteorologických podmínek byla v únoru 2022 na těžní věž umístěna meteostanice. Data ze sond a z meteostanice

byla následně sjednocena do společné relační databáze vytvořené v programovém balíku PostgreSQL [3] obsahující šest propojených tabulek. Konec této kapitoly patří použitým softwarovým nástrojům. V jazyku Python [4] byly zpracovány časové řady, přičemž použité skripty jsou dostupné na platformě GitHub. V systému PostgreSQL byla Ing. Martinem Kaschnerem implementována databáze, mapy byly vytvořeny v prostředí QGIS [5].

V kapitole Výsledky a diskuze 3 jsou všechny tabulky, grafy a mapy vytvořené z naměřených dat. Nejprve jsou zde uvedeny průměry, mediány a maxima naměřených hodnot OAR v jednotlivých měřicích bodech. V dalších částech jsou podrobněji analyzovány časové řady z hlediska korelace, autokorelace, parametrů sezónnost, trend, šum a také z hlediska sezónních a denních variací. Dále je v této kapitole zkoumána souvislost OAR a meteorologických parametrů jako jsou teplota, tlak, vlhkost, srážky, sluneční svit, rychlost a směr větru. Mezi OAR a teplotou je podrobněji rozebrána korelace. V úplném závěru kapitoly jsou srovnány hodnoty OAR naměřené pomocí sond na odvalu a hodnoty OAR/EOAR získané z monitorů Ramonis a ALGADE umístěných poblíž odvalu.

Závěr práce 4 přináší shrnutí předchozích kapitol a shrnuje nejdůležitější výsledky práce.

Kapitola 1

Teoretický úvod

Po hlubinné těžbě uranu vznikají po celém světě odvaly, z nichž se uvolňuje radon. Tento radioaktivní plyn zvyšuje riziko vzniku rakoviny plic. V úvodu této kapitoly jsou uvedeny základní informace o těžbě uranu ve světě i na našem území. Následují informace o odvalech, přičemž důraz je kladen na příbramské odvaly. Poté jsou zde zmíněny základní informace o radonu a jeho zdravotních účincích. Závěr kapitoly je věnován dosud známým poznatkům o mechanismech proudění plynů v odvalech.

1.1 Problematika odvalů a radonu

1.1.1 Těžba uranu

1.1.1.1 Historie

Psal se rok 1789, kdy německý profesor chemie Martin Heinrich Klaproth objevil uran v rudě zvané smolinec pocházející z dolu v Johanngeorgenstadtu poblíž Božího Daru. Klaprothovi se však tehdy nepodařilo uran separovat, to dokázal až Henri Becquerel roku 1896. Za zmínku stojí, že název smolinec či uraninit, německy *Pechblende*, pochází již z roku 1565, kdy se s ním horníci s nelibostí setkávali při těžbě stříbra, v té době pro něj však neměli žádné využití. Jako první se uran pravděpodobně začal cíleně těžit v 19. století v Jáchymově. Na přelomu 19. a 20. století izolovala Marie Curie z jáchymovského smolince radium [6, 7].

Vysoká poptávka po uranu vedoucí celosvětově ke zvyšování jeho těžby nastala v období druhé světové války v souvislosti s projektem Manhattan zaobírajícím se vývojem atomové bomby. V té době se uran nejvíce těžil na území dnešní České republiky, Německa, Kanady, Kazachstánu a také v oblastech střední Afriky a západní Ameriky. Právě ze střední Afriky, přesněji z Belgického Konga, pocházela většina uranu použitého na výrobu bomby „Little Boy“, kterou USA v roce 1945 svrhly na Hirošimu [6, 8].

Po 2. světové válce se v souvislosti se studenou válkou a rozvojem jaderné energetiky produkce uranu dále zvyšovala. V Tab. 1.1 je znázorněn procentuální podíl dnešních zemí či regionů světa na těžbě uranu v letech 1945–2007. Dnes je situace

poměrně odlišná a nejvíce uranu se těží v Kazachstánu. Pro porovnání je v Tab. 1.2 uveden procentuální podíl na těžbě uranu v roce 2021 [9, 10].

Tab. 1.1: Procentuální podíl na těžbě uranu v letech 1945–2007 [9]

pořadí	stát/oblast	podíl (%)
1.	Kanada	19
2.	USA	16
3.	Německo	10
4.	jižní Afrika	7
5.	Austrálie	7
6.	Rusko	6
7.	Kazachstán	5
8.	Uzbekistán	5
9.	Česká republika	5
10.	Kanada	5
11.	ostatní	15

Tab. 1.2: Procentuální podíl na těžbě uranu v roce 2021 [10]

pořadí	stát	podíl (%)
1.	Kazachstán	45
2.	Namibie	12
3.	Kanada	10
4.	Austrálie	9
5.	Uzbekistán	7
6.	Rusko	5
7.	Niger	5
8.	Čína	4
9.	Indie	1
10.	Ukrajina	1
11.	ostatní	1

1.1.1.2 Situace v Čechách

Jak je patrné již z Tab. 1.1, Československo a později i Česká republika patřily v minulosti k významným světovým producentům uranu. Na našem území probíhala těžba uranu hned na několika místech. Základní přehled těžebních oblastí s jednotlivými ložisky uranu je uveden v Tab. 1.3. Převážná část uranu byla vytěžena hlubinným způsobem, ve Stráži pod Ralskem se však uran těžil i chemickým loužením. Od roku 1945 bylo na českém území vytěženo cca 108 000 tun uranu. Nejvyšší produkce, až 3 000 tun uranu ročně, bylo dosaženo na přelomu 50. a 60. let minulého století. V dnešní době již v naší zemi těžba neprobíhá, jako poslední byla ukončena na ložisku Rožná v roce 2017 [9, 11].

Z Tab. 1.3 je patrné, že největší množství uranu bylo vytěženo na Příbramsku. Ložisko bylo objeveno v roce 1947 a mezi lety 1965–1975 produkce z tohoto ložiska

Tab. 1.3: Ložiska uranu v českých zemích [11]

těžební oblast	ložisko uranu	období	podíl (%)
Příbram	Příbram	1949–1992	37,2
severní Čechy	Hamr, Stráž pod Ralskem	1969–1996	25,6
Dolní Rožinka	Rožná, Olší, Zálesí-Javorník, ...	1957–2017	17,8
západní Čechy	Zadní Chodov, Vítkov, Dyleň, ...	1954–1992	9,2
Jáchymov	Jáchymov	1947–1962	6,4
Horní Slavkov	Horní Slavkov	1949–1963	2,3
geolog. průzkum	Jasenice, Brzkov, Licoměřice, ...	1955–1990	1,5

dominovala nad ostatními. Za zmínku stojí, že právě na tomto ložisku bylo dosaženo několika milníků. V roce 1956 byl na 6. patře šachty č. 6 dosažen v té době světový rekord v ražbě (1021,3 m). V roce 1975 pak bylo na šachtě č. 16 dosaženo v té době největší svislé hloubky v Evropě (1838,4 m) [12, 13].

První šachty byly vyhloubeny v roce 1948, na Příbramsku pak bylo vyhloubeno celkem 27 těžních a větracích jam, přičemž většina z nich mezi lety 1950–1965. Růst těžby byl úzce spjat s rozvojem samotného města. Pro potřeby ubytování horníků bylo postaveno několik sídlišť, dále byly v Příbrami vybudovány stavby občanské vybavenosti, jako např. školy, sportovní areál či plavecký bazén [14, 15].

Těžba na Příbramsku byla ukončena 30. 9. 1991 slavnostním vyvezením posledního vozu z dolu č. 4. Z ložiska bylo za celé období exploatace (44 let) vytěženo celkem 48,8 kilotun uranu a několik dalších kilotun ostatních kovů. K tomu bylo vyraženo celkem 2188 km horizontálních důlních děl [14].

1.1.2 Odvaly

Pro hlubinnou těžbu je typické velké množství odpadní horniny, která se často uskládá poblíž dolů. Vznikají tak útvary nazývané haldy či odvaly. Definice těchto pojmů jsou uvedeny např. ve výběrovém výkladovém hornickém slovníku, jež je přílohou knihy Návrh popisu a vyhodnocení historických hornických děl [16]. Termín halda je zde brán jako obecnější termín zahrnující termíny jako odval či výsypka, viz definice níže.

- „Halda je zemní stavba vytvořená ukládáním materiálu, který vzniká při vyhledávání, průzkumu, těžbě a zpracování nerostných surovin.“ [16]
- „Odval je konvexní tvar vzniklý ukládáním hlušiny nebo skrývky, vzniklé při prospekci, průzkumu a těžbě nerostných surovin v blízkosti ústí podzemního důlního díla. Plocha určená pro umístění odvalu se nazývá odvališť.“ [16]

Kromě zmíněných základních definic je ve slovníku ještě několik dalších definic termínu odval, z nichž tři jednodušší jsou níže uvedeny.

- „Odval je zemní stavba vytvořená systematickým ukládáním odvalové hlušiny (z podzemí dolu nebo z úpravny) na odvališti. Je součástí pásma pomocných provozů těžebního závodu nebo podniku.“ (ON 44 0001, 4231 [17])

- „*Odval je uměle vybudované povrchové zařízení na ukládání pevného odpadu.*“ (Směrnice EP, 2006/21/ES, čl. 3, odst. 10 [18])
- „*Odval je nasypaná hromada vytvořená jalovými horninami vytěženými z dolu nebo jalovými odpady z úpravny.*“ (Sochor 1961 [19])

Dále jsou ve slovníku uvedeny jednotlivé typy odvalů. Podle materiálu lze odvaly rozdělit na odvaly hrubého kamene a výpěrkové odvaly. Dle polohy rozeznáváme asanační, úrovnové, převýšené, vnitřní a vnější odvaly. Podle tvaru lze odvaly rozdělit na ploché, kuželové, kupovité, hřebenovité, tabulové a terasovité. Dle využití rozlišujeme opuštěné, těžené a redeponážní odvaly. Nakonec podle ukládací techniky rozlišujeme odvaly sypané, vršené a zpevněné [16].

V § 23 Zákona č. 157/2009 Sb., Zákona o nakládání s těžebním odpadem a o změně některých zákonů je uvedeno [20]: „Odvaly a odkaliště vzniklé při ložiskovém průzkumu, těžbě, úpravě nebo při skladování nerostů nebo při těžbě, úpravě nebo skladování rašeliny přede dnem nabytí účinnosti tohoto zákona se považují za úložná místa podle tohoto zákona, nejde-li o vytěžený prostor s uloženým těžebním odpadem.“

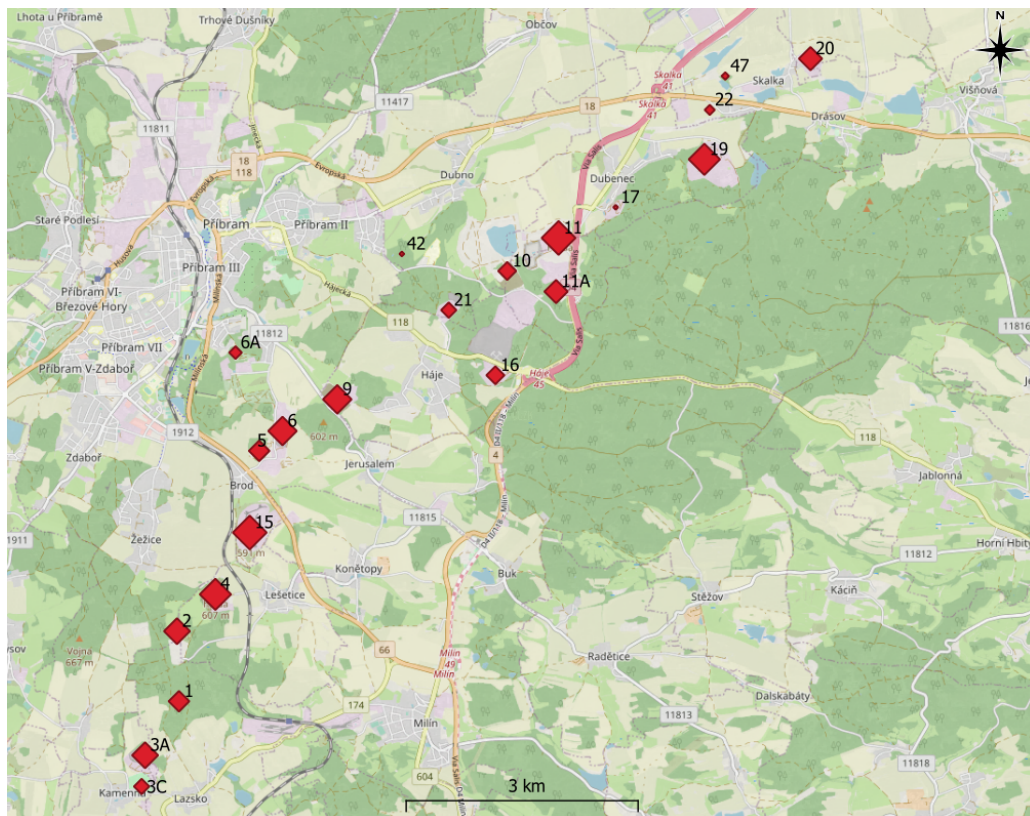
V České republice se nachází mnoho odvalů, přičemž velká část nerektivovaných odvalů je na Příbramsku. Tab. 1.4 shrnuje základní informace o příbramských odvalech, na mapě jsou tyto odvaly dle velikosti znázorněny na Obr. 1.1. V Tab. 1.5 jsou pak uvedeny informace o pěti největších odvalech v tomto regionu. Nejvýznamnějším z nich je odval š. č. 15, jehož východní část můžeme vidět na Obr. 1.2. Tento odval je největší a nachází se v těsné blízkosti obcí Brod a Lešetice. Konkrétně nejbližší dům v obci Brod je od odvalu vzdálen 180 m, v obci Lešetice pak 370 m, což je také znázorněno na Obr. 1.3 [21]. Právě proto na tomto odvalu probíhalo kontinuální monitorování, které je blíže popsáno v kapitole 2.

Podle prezentace [21] DIAMO, s.p. příbramské odvaly představují ekologickou zátěž a brání územnímu rozvoji. V odvalech se nachází mj. nevytěžené zbytky uranu spolu s produkty jeho radioaktivní přeměny. Tyto radioaktivní látky se mohou z odvalů uvolňovat, což může mít vliv na okolní životní prostředí. Jedná se především o radon a jeho dceřiné produkty, což je podrobněji rozebráno v textu níže.

Tab. 1.4: Parametry odvalů na Příbramsku [21]

počet odvalů	26
rozloha	52 km ²
objem vydobytých prostor	44,5 mil. m ³
objem uložené hlušiny	28 mil. m ³

V roce 2017 bylo předloženo několik variant týkajících se možné likvidace odvalů na Příbramsku. Hovoří se v nich o postupném odtěžování, rektivaci odvalů na místě, částečném odtěžení a navazující rektivaci na místě či transportu hlušiny z několika odvalů na centrální odval [21]. Nyní (k r. 2023) se kamenivo z odvalů š. č. 11 a 19 používá na dostavbu 32 kilometrů dálnice D4 mezi Příbramí a Novou Hospodou na Písecku. O odvaly se stará státní podnik DIAMO a jeho čtyři odštěpné závody, v případě Příbramska o. z. SUL Příbram [24].



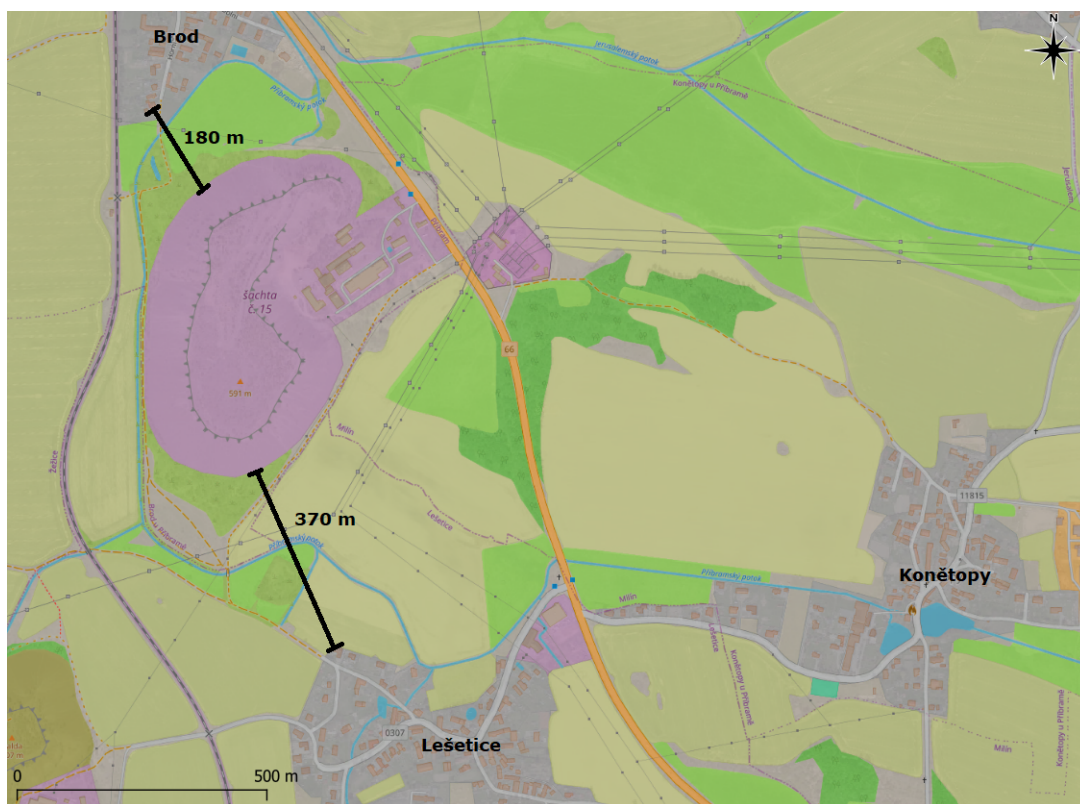
Obr. 1.1: Příbramské odvaly (velikost symbolu reprezentuje objem uložené hlušiny), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz, data převzata z [22]

Tab. 1.5: Pět největších odvalů na Příbramsku [21]

odval jámy č.	převažující horniny	kov	objem (m ³)
15	proterozoické břidlice	U	7 507 639
19	proterozoické břidlice, slepence, droby	U (Pb)	3 791 488
11 sever	kambrické břidlice, droby	U	2 561 727
4	proterozoické břidlice, prachovce, pískovce	U	2 456 199
9	proterozoické břidlice, kontaktní rohovce	U	2 252 655



Obr. 1.2: Východní část odvalu š. č. 15 (vlevo areál s těžní věží, v pozadí odval š. č. 4) [23]



Obr. 1.3: Vzdálenost odvalu š. č. 15 k přilehlým obcím Brod a Lešetice, mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

1.1.3 Radon

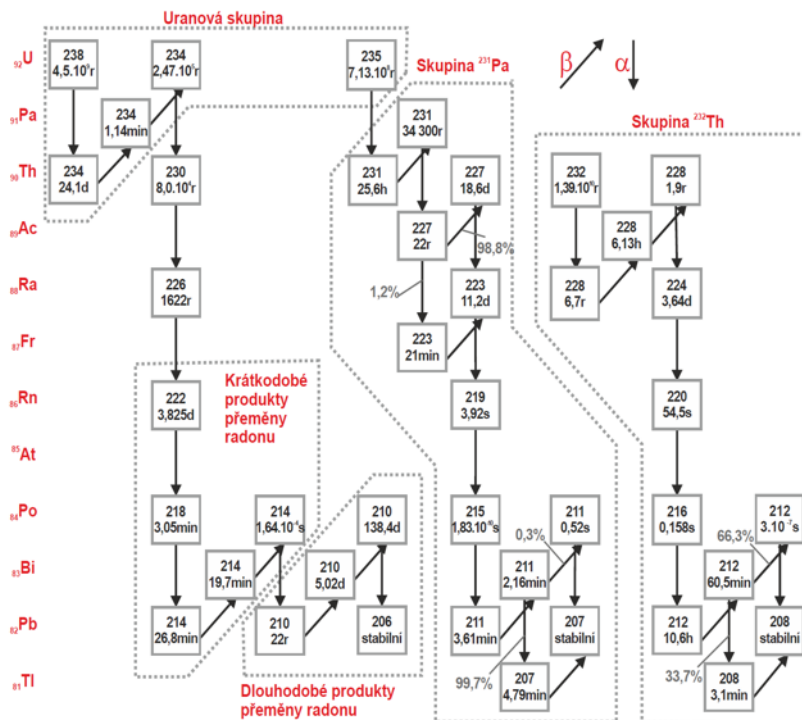
Jak je patrné z Obr. 1.4, jedním z členů uranové přeměnové řady je radionuklid ^{222}Rn . Jelikož je v odvalech v určitém množství uran přítomen, vzniká v nich mj. také právě radon, který se díky svému plynnému skupenství může uvolňovat do okolního prostředí [25].

Radon byl objeven v roce 1898 německým fyzikem Friedrichem Ernestem Dornem. Jedná se o všudypřítomný, neviditelný a vzácný plyn bez barvy, chuti a zápachu. Je známo 36 izotopů radonu (od ^{193}Rn do ^{228}Rn), přičemž 3 z nich se vyskytují v přírodních přeměnových řadách. Název, poločas přeměny a přeměnová řada každého z těchto tří radionuklidů jsou uvedeny v Tab. 1.6. Schéma uranové, aktiniové a thoriové přeměnové řady je pak na Obr. 1.4. Jak je ze schématu patrné, ^{219}Rn , ^{220}Rn i ^{222}Rn se přeměňují přeměnou alfa, při které je emitována těžká nabitá částice (jádro ^4He). Obecný vzorec této přeměny je následující [26, 27]:



Tab. 1.6: Izotopy radonu v přírodních přeměnových řadách [28]

radionuklid	název	přeměnová řada	poločas přeměny
^{219}Rn	aktinon	aktiniová	3,98 s
^{220}Rn	thoron	thoriová	55,83 s
^{222}Rn	radon	uranová	3,82 dne



Obr. 1.4: Přírodní přeměnové řady [29]

Ze zmíněných izotopů vyskytujících se v přírodních přeměnových řadách je nejvýznamnější ^{222}Rn , který má velký význam z hlediska radiační ochrany. Je to dáno především jeho, oproti jiným izotopům, dlouhým poločasem přeměny způsobujícím migraci i na větší vzdálenosti. V dalším textu bude pod pojmem „radon“ označen právě izotop ^{222}Rn [30].

1.1.3.1 Vlastnosti radonu

Radon lze charakterizovat jako nekovový prvek, jehož atom je chemicky velmi stabilní. Ze všech vzácných plynů má nejvyšší atomové číslo, nejnižší elektronegativitu a je nejlépe rozpustný [28].

Jeho hlavním zdrojem je obecně geologické podloží, z něhož se dostává pomocí difúze a konvekce. Zatímco difúze je způsobena mikrofyzikálními jevy probíhajícími na úrovni molekul nebo atomů, konvekce je způsobena vnějšími fyzikálními jevy, např. gradientem tlaku a teploty [31].

Radioaktivní přeměnou radonu postupně vznikají ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi a ^{214}Po . Tyto dceřiné radionuklidy (tzv. krátkodobé produkty přeměny radonu) jsou pevnými látkami a stejně jako jejich mateřský radionuklid jsou významné z hlediska radiační ochrany. Jejich volná a vázaná (na aerosolové částice) frakce se mohou deponovat v plicích, což zvyšuje riziko vzniku rakoviny plic [28, 30].

1.1.3.2 Zdravotní dopady radonu

Radon je v České republice příčinou až 50 % efektivní dávky přijímané z přírodních a umělých zdrojů záření. Pokud by se vzaly v úvahu pouze přírodní zdroje, radon by byl příčinou až 70 % efektivní dávky přijímané širokou veřejností [32].

Jediným prokázaným onemocněním, které radon může způsobovat, je rakovina plic. Jedná se však o druhou nejzávažnější příčinu tohoto onemocnění, tou první je kouření. Odhaduje se, že ze všech onemocnění rakovinou plic jich je 3–14 % způsobeno radonem [33]. Rakovina plic je stochastickým účinkem záření, což znamená, že i expozice nižším koncentracím radonu zvyšuje riziko vzniku rakoviny plic. Není tedy známa žádná prahová koncentrace, která by se dala označit za bezpečnou. Na druhou stranu, po expozici vyšším koncentracím radonu je riziko vzniku rakoviny plic vyšší než po expozici nižším koncentracím radonu [28]. V roce 1988 Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny (IARC) charakterizovala radon jako lidský karcinogen [34].

Ozáření radonem lze rozdělit na vnější a vnitřní. Vnější ozáření je méně významné, jelikož alfa částice vzniklé při přeměně radonu nebo jeho dceřiných produktů většinou nemají dostatečnou energii k proniknutí kůží či okem. K vnitřnímu ozáření dochází při inhalaci nebo ingesci plynu obsahujícího směs radonu a jeho dceřiných produktů. V případě inhalace se radon a jeho dceřiné produkty dostávají do plic přímo, v případě ingescie difundují stěnami střev do krevního oběhu, kterým se do plic dostávají [35].

V České republice je Státním ústavem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) již třetím desetiletím realizován tzv. radonový program. Jeho cílem je vzdělávání občanů

v oblasti radonové problematiky a také snižování koncentrací radonu v obytných prostorách. Od roku 2019 běží program s názvem RANAP [36].

1.1.3.3 Veličiny

Základními veličinami v oblasti radonové problematiky jsou [37]:

- **objemová aktivita radonu (OAR)** – podíl aktivity určité látky a objemu, v němž se látka nachází (jednotka: Bq/m³)
- **ekvivalentní objemová aktivita radonu (EOAR)** – vážený součet objemových aktivit dceřiných produktů radonu – odpovídá objemové aktivitě radonu v radioaktivní rovnováze s jeho krátkodobými dceřinými produkty (jednotka: Bq/m³)

Běžné hodnoty OAR ve venkovním prostředí jsou v řádu jednotek až desítek Bq/m³. V půdním vzduchu jsou tyto hodnoty vyšší a pohybují se řádově v kBq/m³ [32]. EOAR lze stanovit na základě znalosti objemových aktivit dceřiných produktů radonu, přičemž platí vztah [37]:

$$\text{EOAR} = 0,105 \cdot a_V(^{218}\text{Po}) + 0,515 \cdot a_V(^{214}\text{Pb}) + 0,380 \cdot a_V(^{214}\text{Bi}) \quad (1.2)$$

Přepočítání mezi OAR a EOAR je pak následující [37]:

$$\text{EOAR} = F \cdot \text{OAR} \quad (1.3)$$

kde F je tzv. faktor nerovnováhy nebo také rovnovážný faktor radonu. Jeho hodnota se většinou pohybuje v rozmezí 0 a 1. Při neznalosti hodnoty rovnovážného faktoru v daném prostředí je doporučeno brát $F = 0,6$ pro vnější prostředí a $F = 0,4$ pro vnitřní prostředí [38].

1.2 Studie mechanismů proudění plynů v odvalech

V oblasti týkající se problematiky proudění plynů v odvalech a suťových polích bylo v minulých letech vypracováno několik studií. V této části jsou stručně shrnuty dosud získané poznatky.

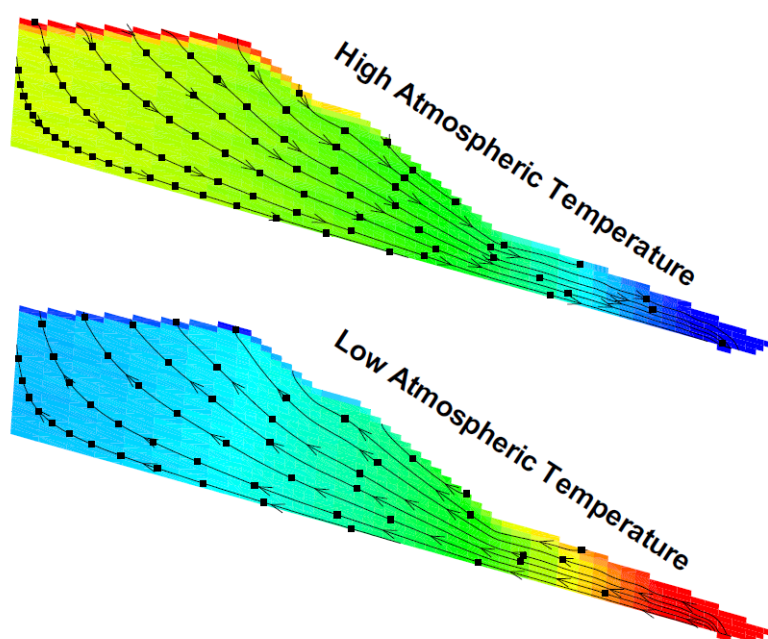
1.2.1 Kanada

Tato studie probíhala v roce 2008 na odvalu š. č. 1 poblíž dolu Sullivan. Zhotovitelem byly společnosti INRS (Institut national de la recherche scientifique) a Teck Cominco Limited [39].

Cílem bylo vytvoření numerického modelu pro zjištění fyzikálních mechanismů řídicích toků plynu v odvalu. K tomu byl použit simulátor Tough AMD, do odvalu

bylo provedeno 6 monitorovacích vrtů a byly na něm umístěny meteorologická stanice a další dvě stanice monitorující půdní vlhkost [39].

Bylo zjištěno, že největší vliv na tok plynu v odvalu má z meteorologických parametrů teplota. Vliv teploty byl zkoumán při teplotách 5 °C a 36 °C. Při nízké teplotě (5 °C) proudil plyn odvalem směrem nahoru – do odvalu vstupoval v jeho dolní části (pata odvalu) a vystupoval jeho horní částí (koruna odvalu). Rychlost plynu byla nejvyšší v jeho dolní části a postupně se snižovala. Naopak při vysoké teplotě (36 °C) byla situace opačná a plyn proudil odvalem směrem dolů a vystupoval u jeho paty. Popsaný vliv teploty na proudění plynu odvalem je znázorněn na Obr. 1.5. Když byla atmosférická teplota stejná jako teplota uvnitř odvalu, která se u tohoto odvalu pohybuje v rozmezí 10–12 °C, plyn odvalem neproudil [39].



Obr. 1.5: Vliv teploty na tok plynu odvalem (v horní části je znázorněno proudění při vysoké atmosférické teplotě, zatímco v dolní části při nízké atmosférické teplotě) [39]

Kromě teploty byl zkoumán také vliv dalších meteorologických i jiných parametrů. Výsledkem bylo, že tlak vzduchu ani složení odvalového plynu nemají na tok plynu odvalem významnější vliv. Bylo však zjištěno, že pokud je hornina hrubší a v odvalu jsou např. větší balvany, je tok plynu usnadněn [39].

1.2.2 Německo

Tato studie probíhala v letech 2011 a 2019 na odvalu 38neu v okolí města Bad Schlema v Německu. Zhotovitelem byly společnosti INRS a Wismut GmbH ve spolupráci s University of Saskatchewan [40].

V případě tohoto odvalu, který je po sanaci, bylo cílem kromě sledování výdechu plynu a vývoje samotného modelu pro tok plynu odvalem také navržení možností pro zmírnění uvolňování radonu [40].

V měřicích bodech soustředěných v jedné linii v různých výškách na stěně odvalu byly v půdních krytech měřeny diferenční tlaky, tzn. rozdíly mezi tlakem odvalového plynu a atmosférickým tlakem. Bylo prokázáno, že na hodnoty diferenčních tlaků má významný vliv rozdíl mezi relativně konstantní vnitřní teplotou v odvalu a proměnlivou teplotou okolní atmosféry. Při teplotě 9,5 °C, což je průměrná roční teplota v dané oblasti a zároveň předpokládaná vnitřní teplota odvalu, byly diferenční tlaky nulové. Dále bylo pozorováno, že hodnoty diferenčních tlaků lineárně klesají s nadmořskou výškou a že jsou v létě vyšší než v zimě, což je způsobeno vyšším rozdílem teplot uvnitř a vně odvalu v letním období [40].

Dále bylo zjištěno, že se postupem času díky vegetačnímu růstu a povětrnostním podmínkám zvyšuje propustnost půdního krytu, což má za následek vyšší tok plynu odvalem. V rámci studie byly nakonec představeny dva modely reprezentující tok plynu, jednodušší model počítá s jednosložkovou odpadní horninou, sofistikovanější model pak s vícesložkovou. Na základě výsledků z obou modelů byla navržena opatření pro snížení hodnot OAR v okolí odvalu. Ta zahrnovala např. přidání vertikálních bariér, zesílení půdního krytu, vyvrtání otvorů v půdním krytu či realizaci odvzdušňovacích vrtů [40, 41].

1.2.3 Austrálie

Tato studie probíhala v letech 2002–2003 v severní Austrálii v okolí uranového dolu Ranger. Zhotovitelem byly společnosti IAEA a ERISS ve spolupráci s Queensland University of Technology [42].

Cílem studie bylo získání vstupních parametrů pro numerický model simulující proudění radonu, získání časových řad koncentrací a hustot toku radonu a dále předpovězení výdechů plynu z odvalu po provedení sanace [42].

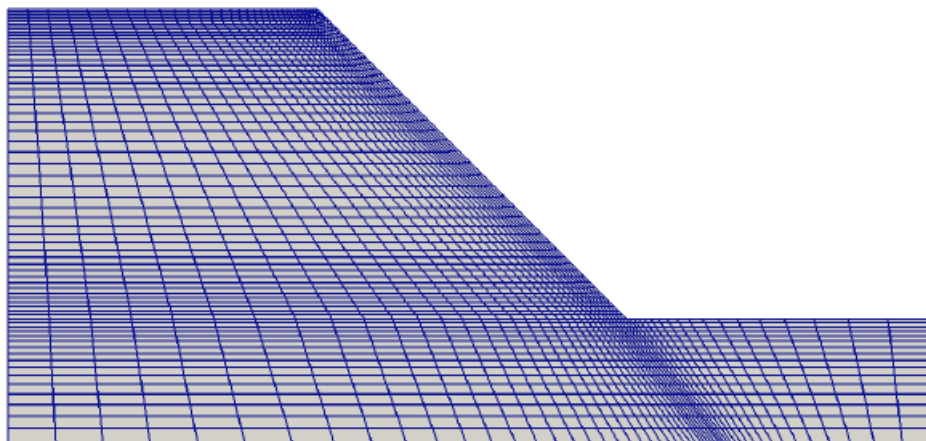
Nejvyšší hustota toku radonu byla naměřena v období sucha v místech s vyšší pórovitostí půdy. Bylo zjištěno, že aktivita ^{226}Ra v daném místě přímo souvisí s hustotou toku radonu. V rámci celého roku byly zjištěny významné rozdíly v hustotách toku radonu zapříčiněné střídáním období sucha a dešťů, kdy v období sucha je hustota toku největší, s počátkem období dešťů klesá a po jeho konci je velmi proměnlivá [42, 43].

1.2.4 Česká republika – Příbramsko

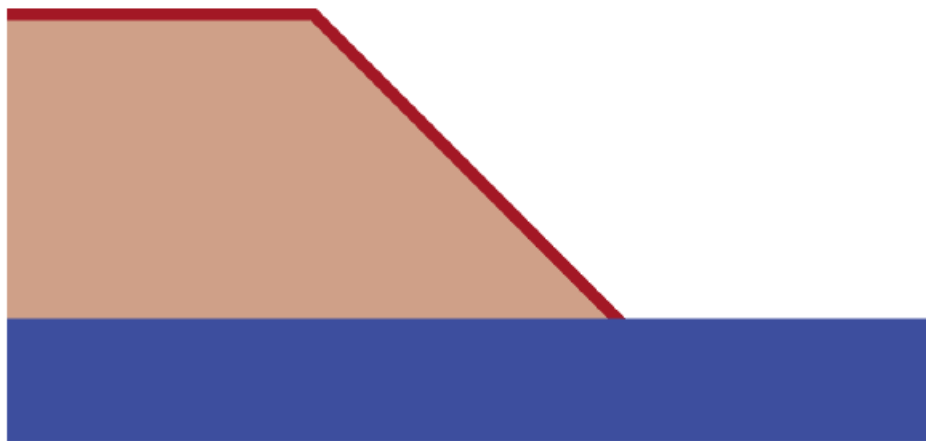
Také v České republice proběhlo především na odvalu š. č. 15 na Příbramsku několik studií ohledně proudění plynu v odvalu či měření OAR na odvalu a v jeho okolí. Níže je uveden jejich stručný přehled a nejdůležitější výsledky.

Studie proudění v idealizovaném modelu odvalu z uranového dolu na ložisku Příbram

Tato studie byla provedena v roce 2017 ve spolupráci MFF Univerzity Karlovy a státního podniku DIAMO. Pomocí výpočetní sítě byl vytvořen numerický model idealizovaného symetrického odvalu, na kterém bylo následně simulováno proudění plynu a přestup tepla. Byla vytvořena výpočetní síť s 2 566 buňkami znázorněná na Obr. 1.6. Model odvalu byl rozdělen na 3 zóny znázorněné na Obr. 1.7. Tmavě červená barva označuje okrajovou vrstvu o tloušťce 2 metry, světle červená vnitřek odvalu a modrá půdní podloží [44].



Obr. 1.6: Výpočetní síť s 2566 buňkami reprezentující odval [44]



Obr. 1.7: Model odvalu rozdělený do 3 zón – vnitřek odvalu, okrajová vrstva, půdní podloží [44]

Podobně jako v již zmíněných zahraničních studiích, i zde byl potvrzen vliv teploty na tok plynu odvalem. V letním období proudí plyn odvalem směrem dolů a v zimním období naopak. Bylo zjištěno, že teplota půdy reaguje na změnu venkovní teploty se zpožděním, které dle jednoho z Fourierových zákonů roste s hloubkou a činí 25 až 30 dní na metr hloubky. Vyšší tok plynu byl pozorován v místech s vyšší permeabilitou, zejména tedy v okrajové vrstvě [44].

Měření radonu v blízkosti odvalů v Brodu u Příbrami

V letech 2017–2018 bylo na odvalu š. č. 15 a v obci Brod provedeno rozsáhlé kontinuální monitorování OAR v celkem 16 měřicích bodech, které bylo realizováno ve spolupráci SÚRO, v.v.i., o.z. SUL, DIAMO s. p. a FJFI. K monitorování OAR byly použity sondy TSR a RADIM 3A, v obci Brod byla dále umístěna meteostanice zaznamenávající teplotu, tlak, vlhkost, směr a rychlost větru, teplotu půdy v různých hloubkách a intenzitu slunečního svitu. V měřicích bodech v obci Brod byly přístroje umístěny rovněž i uvnitř objektů. Rozmístění měřicích bodů na mapě je na Obr. 1.8 [45].



Obr. 1.8: Měřicí body na odvalu š. č. 15 a v jeho okolí při měření v letech 2017–2018 [45]

Nejvyšší hodnoty OAR byly naměřeny v měřicích bodech umístěných u paty odvalu (body č. 8, 9 a 10 na mapě) a bodu č. 1 umístěném v ohlubni šachty. Nejvyšší průměrné hodnoty OAR se zde pohybovaly okolo $3\,000\text{ Bq/m}^3$, maximální hodnoty OAR pak dosahovaly až $70\,000\text{ Bq/m}^3$. Nižší hodnoty OAR byly naměřeny v obci Lešetice (body č. 2, 3 a 4), kde většinou nebyla překročena hodnota $1\,000\text{ Bq/m}^3$. V průběhu měření docházelo ke střídání období s vyššími a nižšími hodnotami OAR. Vyšší hodnoty OAR byly naměřeny v letním období. Dále byly vyšší hodnoty OAR naměřeny při stabilních podmínkách atmosféry, což bylo nejčastěji v noci. V obci Brod byly vyšší hodnoty OAR naměřeny v době, kdy vanul JV vítr směrem od od-

valu. Byla také zjištěna korelace mezi hodnotami OAR v některých měřicích bodech, korelace OAR s teplotou však prokázána nebyla [45].

Společné měření na louce mezi odvalem a obcí Brod

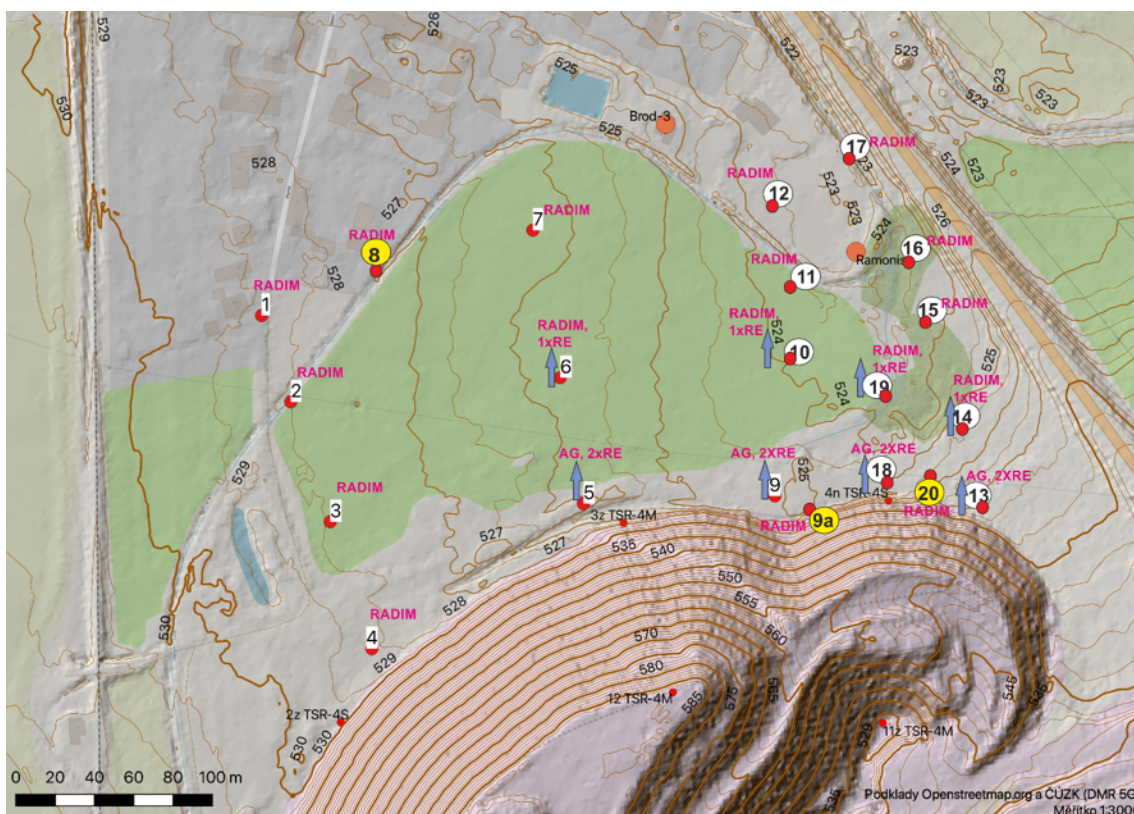
Toto dvoudenní měření proběhlo od dopoledne 9. 9. do odpoledne 10. 9. 2021. Bylo realizováno ve spolupráci čtyř institucí – SÚRO, v.v.i.; SÚJCHBO, v.v.i.; DIAMO, s.p., o.z. SUL a FJFI ČVUT v Praze. Cílem bylo změřeni hodnot OAR v průběhu 24 hodin na různých místech louky situované mezi odvalem a obcí Brod, pohled na tuto louku z koruny odvalu můžeme vidět na Obr. 1.9 [46].



Obr. 1.9: Pohled z koruny na louku mezi odvalem š. č. 15 a obcí Brod, v pozadí město Příbram (foto: Lenka Thinová)

Na louce bylo vytipováno celkem 21 bodů, ve kterých byly umístěny přístroje měřící OAR. Rozmístění měřicích bodů je znázorněno na Obr. 1.10. V některých bodech byly realizovány tzv. vertikální profily, kdy přístroje byly umístěny až ve 3 různých výškách (v základním patře ve výšce 70 cm, ve vyšším patře ve výšce 2 m a v nejvyšším patře ve výšce 4 m). K měření OAR bylo použito celkem 33 přístrojů, konkrétně 17 ks přístrojů Radim 3A(T), 12 ks přístrojů RadonEye a 4 ks přístrojů AlphaGUARD. Pro znalost meteorologických podmínek během měření byly u paty odvalu a na koruně odvalu umístěny meteostanice Davis. Mimo tohoto kontinuálního měření OAR byly na louce pomocí přístroje GT-40 změřeny koncentrace K, U, Th a také příkon prostorového dávkového ekvivalentu (PPDE) [46].

Naměřené hodnoty PPDE jsou barevně znázorněny na Obr. 1.11. Nejvyšší hodnoty OAR byly naměřeny v měřicích bodech blíže k odvalu, konkrétně v měřicích

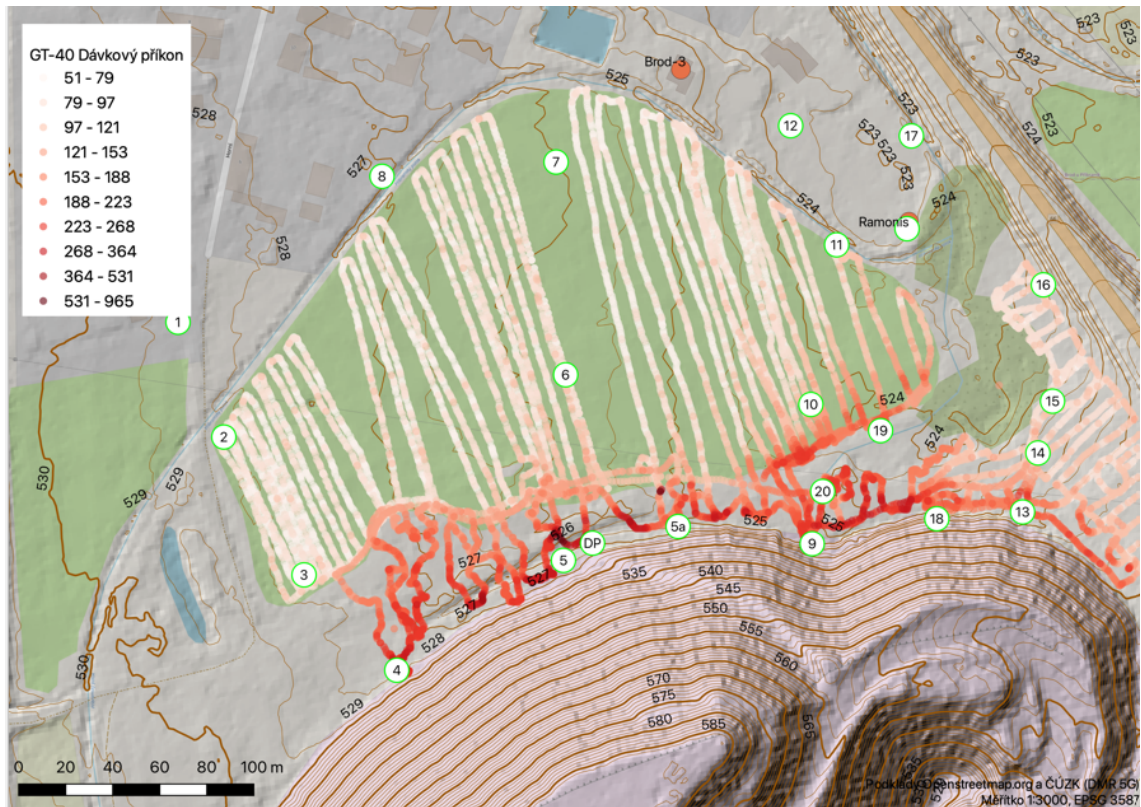


Obr. 1.10: Rozmístění měřicích bodů na louce mezi odvalem a obcí Brod [46]

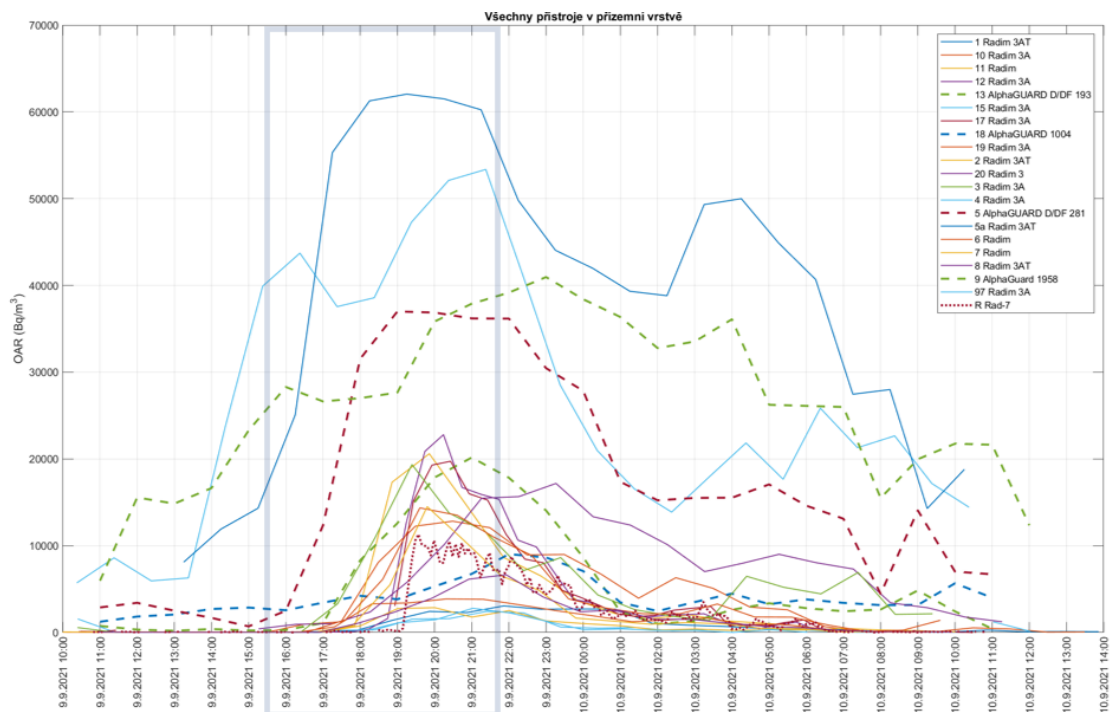
bodech 5, 9 a 13. Ve vertikálních profilech byly vyšší hodnoty OAR naměřeny zpravidla v přízemní vrstvě ve výšce 70 cm. Co se týče časové fluktuaace, tak nejvyšší hodnoty OAR byly dosaženy ve večerních hodinách okolo 21:00. Na Obr. 1.12 je znázorněn společný průběh hodnot OAR naměřených přístroji umístěnými v přízemní vrstvě, na Obr. 1.13 jsou pak vyneseny hodnoty OAR naměřené přístroji umístěnými ve skupině bodů, která byla nejbližší k odvalu (měřicí body 4, 5, 9, 13 a 18). Během měření byl stanoven také faktor nerovnováhy F , jehož hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1.7 [46].

Tab. 1.7: Faktor nerovnováhy F stanovený na louce mezi odvalem a obcí Brod [46]

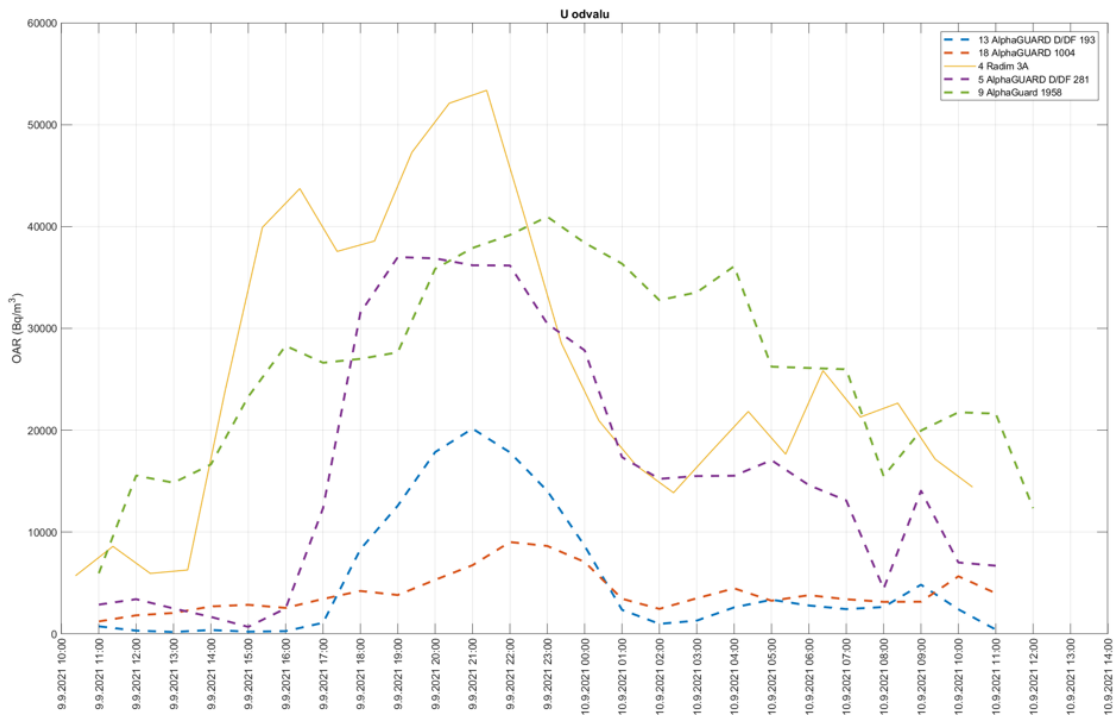
měřicí bod	průměrný F
5 (odval)	0,02
6 (střed louky)	0,20
7 (kraj obce)	0,42



Obr. 1.11: Naměřené dávkové přířiky na louce mezi odvalem a obcí Brod pomocí přístroje GT-40) [46]



Obr. 1.12: Hodnoty OAR naměřené ve všech měřících bodech přístroji umístěnými v přízemní vrstvě (výška 70 cm) [46]



Obr. 1.13: Hodnoty OAR naměřené přístroji umístěnými ve skupině měřicích bodů nejbližší k odvalu [46]

Program monitorování DIAMO

Státní podnik DIAMO provádí měření na řadě míst České republiky včetně Příbramska. Výsledky z těchto měření jsou každoročně publikovány ve Zprávě o vyhodnocení programu monitorování, veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany. Na Příbramsku probíhá měření v celkem 10 lokalitách – Brod u Příbrami: B-2; B-3; B-4; Dubenec; Kamenná; Příbram–Sázky; Lešetice; Háje; Bytíz a Narysov N-2 (pozaďový bod). V těchto místech je monitorován příkon fotonového dávkového ekvivalentu a pomocí detektorů ALGADE také EOAR a objemová aktivita směsi dlouhodobých radionuklidů uran-radiové řady emitujících záření alfa. Na základě těchto měření jsou vypočítávány [47]:

- efektivní dávka ze zevního ozáření zářením gama
- úvazek efektivní dávky z inhalace krátkodobých produktů přeměny radonu
- úvazek efektivní dávky z inhalace dlouhodobých radionuklidů uran-radiové řady emitujících záření alfa
- celková efektivní dávka (E) reprezentativní osoby a kolektivní efektivní dávka (E_{kol})

V Tab. 1.8 jsou pro názornost uvedeny roční průměrné hodnoty EOAR naměřené v 10 zmíněných lokalitách [48, 49, 47].

Tab. 1.8: Hodnoty EOAR (Bq/m^3) naměřené detektory ALGADE na Příbramsku [48, 49, 47]

rok	B-2	B-3	B-4	Dubenec	Kamenná	Sázky	Lešetice	Háje	Bytíz	N-2
2019	22,3	59,0	39,8	9,9	11,9	15,0	12,0	5,5	6,3	5,3
2020	20,2	45,3	33,5	9,1	11,8	12,8	12,0	5,1	6,1	5,2
2021	20,3	42,8	41,4	9,2	12,0	12,0	11,3	5,4	5,9	5,1

Stanice RAMONIS

Ve vzdálenosti zhruba 170 m od odvalu byla na okraji obce Brod na počátku roku 2016 umístěna stanice Ramonis spravovaná SÚRO, v.v.i. Ramonis od té doby kontinuálně měří koncentrace radonu, thoronu a jejich dceřiných produktů. Dále monitoruje také různé meteorologické parametry. Naměřená data potvrzují většinou již dříve získané poznatky, jako např. dosahování maximálních hodnot OAR v noci v letním období. Stanice Ramonis a již zmíněné detektory ALGADE jsou důležitými monitory v oblasti příbramských odvalů [50, 51].

Další měření

V minulosti proběhla na odvalu š. č. 15 a také na dalších příbramských odvalech řada dalších, většinou krátkodobějších měření. Za zmínku stojí např. měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu (dále PPDE) provedeného na konci roku 2016 na odvalech s. č. 15 a 19 pomocí přenosného spektrometru GT-40. Naměřené hodnoty PPDE se většinou pohybovaly v rozmezí 70–2800 nSv/h, průměrná hodnota PPDE na odvalu š. č. 15 byla 219 nSv/h, v případě odvalu š. č. 19 to bylo 214 nSv/h [51].

Na severozápadní stěně odvalu š. č. 15 bylo dále v 10 bodech provedeno měření koncentrací prvků K, U a Th. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1.9. Výsledky měření byly použity pro odhad příspěvku k roční efektivní dávce ve vzdálenosti 100 m od odvalu při osmihodinovém pobytu venku, který byl stanoven na $45 \mu\text{Sv}$ [51].

Tab. 1.9: Průměrné hodnoty aktivity K, U, Th (v Bq/kg) [52]

prvek	aktivita (Bq/kg)
K	855,00
U	480,04
Th	46,09

1.2.5 Variace v koncentraci radonu na haldě bývalého uranového dolu

V rámci této diplomové práce byly kromě jiného v oblasti Dolní Rožínky na odvalu poblíž uranového dolu Olší zkoumány variace v koncentracích radonu v půdním vzduchu. Byla zkoumána jejich souvislost s meteorologickými parametry, jako jsou teplota, tlak, vlhkost a rychlost větru. Zkoumaný odval byl založen ve spodní části

svahu a je tzv. údolního typu. Je po rekultivaci, která byla provedena překrytím odvalu navážkou zeminy a rybníčního bahna [53].

Na odvalu byla provedena gamaspektrometrická měření a na dvou místech odběry půdního vzduchu metodou ztraceného hrotu. Je potřeba zdůraznit, že bylo provedeno 6 měření, což je pro potvrzení vztahu mezi OAR a meteorologickými parametry poměrně málo. Odběry byly dále kvůli nemožnosti zaražení sondy hlouběji do země provedeny z hloubky 0,5 m místo předepsané hloubky 0,8 m. Naměřené hodnoty OAR v půdním vzduchu se měnily v čase, přičemž průměrné hodnoty činily 200 a 218 kBq/m³, ty nejvyšší pak 366 a 475 kBq/m³. Oproti průměrným hodnotám OAR v půdním vzduchu v České republice, které se pohybují v rozmezí 1–200 kBq/m³, se jedná o zvýšené hodnoty. Z analýzy dat vyšla velmi slabá korelace mezi hodnotami OAR a teplotou, přičemž hodnota korelačního koeficientu byla 0,1. Dále byla sledována antikorelace mezi OAR a rychlostí větru, kdy hodnoty korelačních koeficientů činily -0,5 a -0,2. Souvislost mezi hodnotami OAR a vlhkostí či tlakem vzduchu prokázána nebyla [53].

Kapitola 2

Materiály a metody

V úvodu této kapitoly najdeme informace o použitých přístrojích, přičemž podrobněji jsou zde popsány technické parametry sond Tesla TERA a meteostanice Davis Vantage Pro2 Aktiv. V další části je uveden přehled tří měřicích kampaní, které proběhly v létě 2021, v zimě, na jaře 2022 a v létě 2022. Dále jsou zde zmíněny použité softwarové nástroje, jakými jsou jazyk Python, systém PostgreSQL a prostředí QGIS. V závěru kapitoly je podrobněji popsána databáze vytvořená v PostgreSQL, do které byla nahrána naměřená data ze sond a meteostanice.

2.1 Použité přístroje

2.1.1 Sonda Tesla TERA

Sondy Tesla TERA jsou určeny pro kontinuální monitorování objemové aktivity radonu (dále OAR). Naměřené hodnoty jsou ukládány do vnitřní paměti monitoru, ze které je lze stáhnout do PC. V současné době existuje celkem 10 typů sond řady TSR (4, 4M, 4S, 4A, S, S2, E1, 4P, 3DN, 3DNM). Při praktickém měření na odvalu byly použity následující dva typy [54]:

- TSR 4M - Stahování dat přes kabel USB. Obsahuje větší paměť (29 999 985 záznamů oproti 5 000 záznamů u sondy TSR4) a dobíjecí akumulátor.
- TSR 4S - Stahování dat jak přes kabel USB, tak přes bezdrátovou síť IoT SIGFOX do databáze přístupné přes webovou aplikaci (systém Tesla MON-TES). Umožňuje tedy on-line dálkový a GPS monitoring. Kromě toho disponuje možností zaslání alarmů přes hovor, SMS nebo email. Obsahuje dobíjecí akumulátor.

Oba typy sond jsou určeny pro použití v uzavřených prostorách. Sonda TSR4S, která se na první pohled od sond TSR4M liší pouze přítomností antény, je na Obr. 2.1. Sondy obsahují komoru s polovodičovým fotodetektořem, do níž radon vstupuje difuzí přes filtr umístěný ve dně sondy. Hodnoty krátkodobé (hodinový klouzavý průměr) i dlouhodobé koncentrace radonu jsou počítány z měření prováděných ve dvouminutových intervalech. Do vnitřní paměti jsou pak v předem

nastavených intervalech ukládány hodnoty OAR, teploty, vlhkosti a také naměřená energetická spektra. Oba typy sond mají shodné technické parametry uvedené v Tab. 2.1, zároveň pro ně platí stejné provozní podmínky uvedené v Tab. 2.2 [55, 56].



Obr. 2.1: Sonda TSR4S s popisem základních částí [56]

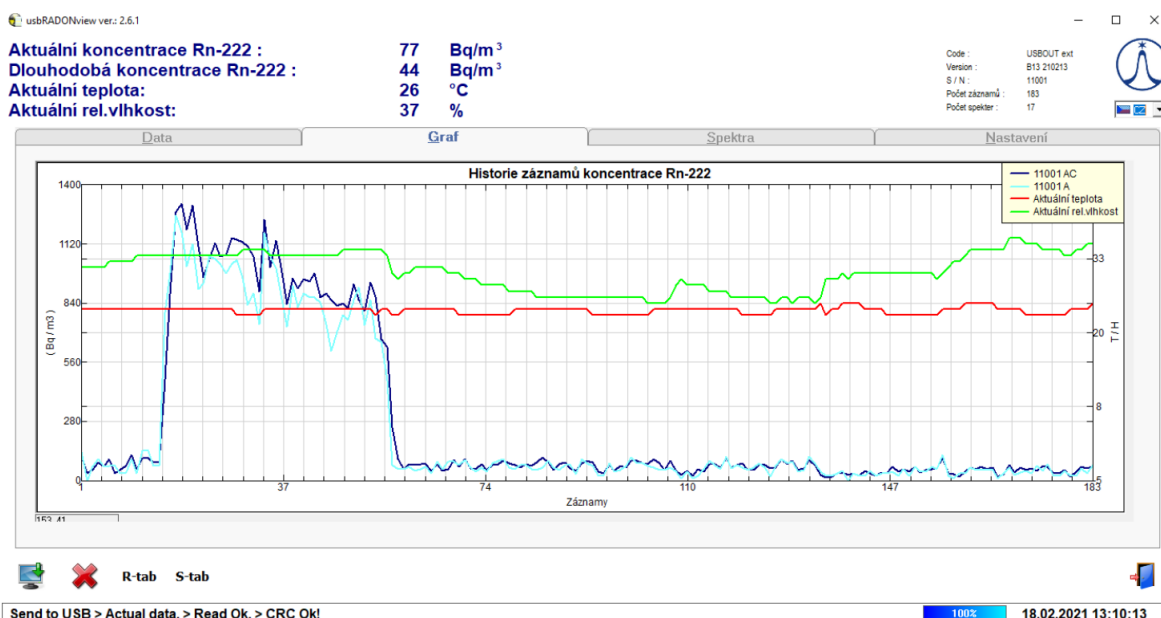
Stahování dat ze sond je možné přes volně dostupný program usbRADONview. Jednoduché a příjemné grafické rozhraní tohoto programu je pro ukázkou na Obr. 2.2. V programu je po načtení dat možné stáhnout dva typy souborů. Soubory RDN.tab obsahují časové řady OAR, teploty a vlhkosti. Soubory SPC.tab pak obsahují naměřená spektra. Jak už bylo zmíněno, u sond typu TSR4S je navíc možný online přenos dat přes bezdrátovou síť IoT SIGFOX. V takovém případě, jak je znázorněno na Obr. 2.3, je ve webovém rozhraní MONTES u příslušných sond možné živé sledování poloh těchto sond, stavu jejich baterie a také naměřených hodnot OAR, teploty a vlhkosti. Z webového rozhraní je dále možné také stažení CSV souborů s naměřenými daty.

Tab. 2.1: Technické parametry sond TSR4M/TSR4S [55, 56]

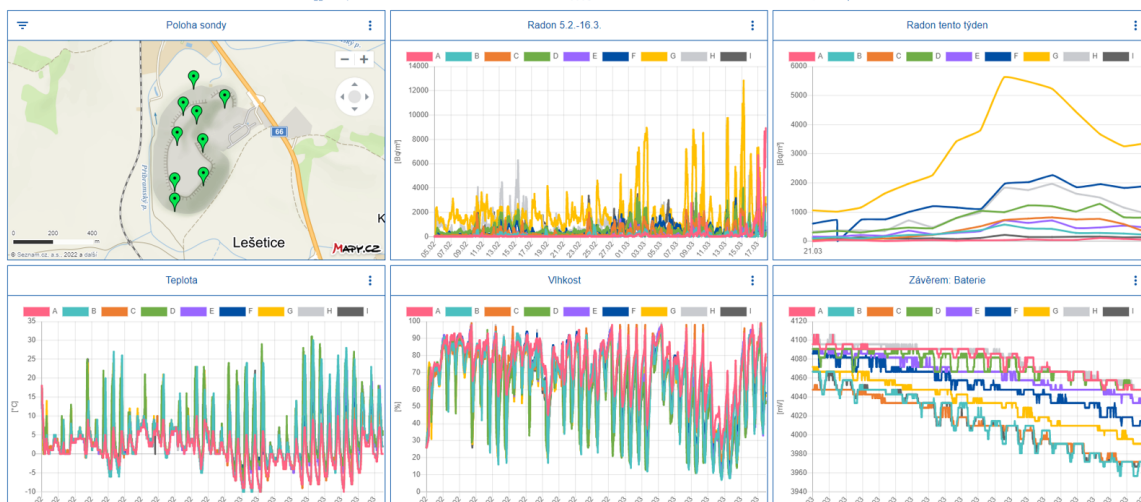
průměrná citlivost měření	$0,25 \text{ imp} \cdot (\text{hod} \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^3)^{-1}$
minimální detekovatelná aktivita	20 Bq/m^3 při 24hodinovém měření
maximální detekovatelná aktivita	$100\,000 \text{ Bq/m}^3$
nejistota měření	$< 3 \%$ při 300 Bq/m^3 a 24hodinovém měření
objem měřicí komory	$0,176 \text{ dm}^3$
rychlost odezvy	$< 30 \text{ min (RaA)}; < 3 \text{ hod (RaA + RaC)}$
měřicí algoritmus	rychlý a méně přesný, pomalý a více přesný
interval uložení výsledků v sondě	1–255 min/15–255 min (TSR4M/TSR4S)
kapacita paměti výsledků	29 999 985/5 000 záznamů (TSR4M/TSR4S)
předpokládaná doba provozu po nabití	$> 1 \text{ rok}$
indikace aktuální koncentrace radonu	krátkodobá, dlouhodobá
rozměry	$\varnothing 80 \times 175 \text{ mm}$
vodotěsné krytí	IP67 (pouze elektronická část)
radiová technologie	SIGFOX RC1 868 MHz (pouze TSR4S)

Tab. 2.2: Provozní podmínky sond TSR4M/TSR4S [55, 56]

teplota	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+40 \text{ }^\circ\text{C}$
doporučená relativní vlhkost	10% až 75%
maximální relativní vlhkost	0% až 99%
absolutní vlhkost	$5\text{--}20 \text{ g/m}^3$
životnost detektoru	při $\varnothing 1000 \text{ Bq/m}^3$ až 12 let



Obr. 2.2: Program usbRADONview sloužící pro stažení dat ze sond TSR4 přes USB kabel [57]



Obr. 2.3: Webové rozhraní MONTES umožňující živý přenos a stahování dat ze sond TSR4S

2.1.2 Meteostanice Davis Vantage Pro2 Aktiv

Tato bezdrátová meteostanice umožňuje monitorování mnoha meteorologických veličin. Data o počasí zaznamenává a zobrazuje v digitální i grafické podobě. Data jsou do počítače přenášena na specifické datové frekvenci, přičemž pro komunikaci počítače a meteostanice lze použít software a datalogger WeatherLink. K meteostanici lze připojit hned několik senzorů umístěných na různých místech, nejčastějším provedením je použití dvou senzorů, vnitřního a venkovního [58].

Meteostanice disponuje měřením řady meteorologických parametrů, jako je teplota (průměrná, nejvyšší a nejnižší), pocitová teplota, teplotní index, vlhkost, rosný bod, barometrický tlak, vývoj tlaku, rychlost větru (průměrná, nejvyšší, nejnižší), směr větru, UV záření, intenzita dešťových srážek, úhrn srážek (denní, měsíční, roční), bouřkové deště, sluneční záření a evaporace. V Tab. 2.3 jsou uvedeny technické parametry meteostanice, na Obr. 2.4 pak můžeme vidět meteostanici umístěnou na těžní věži odvalu š. č. 15 [58].

Tab. 2.3: Technické parametry meteostanice Davis Vantage Pro2 Aktiv [58]

provozní teplota	-10 °C až +60 °C
odběr proudu	∅ 0,9 mA
zdroj napájení	5 V DC, 900 mA
záložní baterie	3× knoflíkové baterie typu C
životnost baterie	bezdrátové provedení až 9 měsíců
modulární konektory	RJ-11
materiál krytu	ABS plast se stabilizátorem UV
rozměry s anténou	264 mm × 156 mm × 38 mm
hmotnost	850 g
frekvence přijímače	868,0–868,6 MHz
rozsah přenosu	až 120 m



Obr. 2.4: Meteostanice umístěná na těžní věži odvalu š. č. 15

Za zapůjčení meteostanice a poskytnutí dat děkujeme SÚJCHBO, v.v.i., za umožnění umístění meteostanice na těžní věž pak děkujeme DIAMO, s.p.

2.1.3 Další přístroje

Pro nalezení vhodných měřicích bodů v rámci první a druhé měřicí kampaně bylo použito hned několik přístrojů.

K nalezení studených výduchů v letním období u paty odvalu a naopak teplých výduchů v zimním období na koruně odvalu byly použity termokamera Wiris PRO od Workswell s.r.o. a infракamera ThermaCAM P25 od FLIR Systems.

Pro měření teploty a rychlosti proudění plynu v teplých i studených výduších byly použity anemometry Testo 405i a Testo 400. Za zapůjčení jednoho z anemometrů děkujeme SÚRO, v.v.i.

Pro změření koncentrace záporných iontů v různých částech odvalu byly použity dva iontometry COM 3200 PRO II. Za jejich zapůjčení děkujeme ÚJV AV ČR, v.v.i.

2.2 Přehled měřicích kampaní

Během let 2021 a 2022 probíhalo na odvalu š. č. 15 na Příbramsku dlouhodobé monitorování OAR pomocí sond TSR4M/4S. Toto měření lze rozdělit do celkem 3 kampaní. Doba trvání těchto kampaní, použité přístroje a další informace jsou uvedeny v následujících částech textu.

2.2.1 První měřicí kampaň – léto 2021

období: 29. 5. 2021 – 6. 8. 2021

typ sond: TSR4M

počet sond: 25 (17 sond SÚRO, v.v.i. a 8 sond FJFI)

rozmístění sond: David Strnad, Václav Štěpán, Lenka Thinová, Ondřej Kořistka, Jan Hradecký, Štěpán Froňka

Tato měřicí kampaň byla provedena v rámci mé bakalářské práce [1].

Za zapůjčení 17 ks sond TSR4M při této měřicí kampani děkujeme SÚRO, v.v.i.

Nejrozsáhlejší měřicí kampaň co se týče počtu sond proběhla v létě roku 2021. Na odval š. č. 15 bylo umístěno celkem 25 sond TSR4M v 16 měřicích bodech. Rozmístění sond na mapě je znázorněno na Obr. 2.5, měřicí body byly označeny čísly „1-16“. Sondy byly za pomoci pracovníků ze SÚRO, v.v.i. umístěny jednak na koruně odvalu (měřicí body č. „12-16“), jednak na stěně odvalu (měřicí body „5“, „8“ a „10“) a jednak u paty odvalu (měřicí body „1-11“). Vzhledem k letním měsícům a tedy předpokládanému proudění plynu odvalem směrem dolů a jeho výstupu u paty odvalu bylo více sond umístěno právě zde. Více sond bylo dále umístěno na straně odvalu přiléhající k sousední obci Brod. Ve všech měřicích bodech byly sondy umístěny v hlusině, přičemž v některých měřicích bodech u paty odvalu (konkrétně v bodech č. „1“, „2“, „3“, „4“, „6“, „7“ a „9“) byly tyto sondy doplněny sondami umístěnými ve výšce cca 1,5 m na stromě.

Sondy byly za účelem ochrany proti vlhkosti a slunečnímu záření opatřeny speciálními ochrannými kryty vyrobenými z polypropylenových trubek polepených stříbrnou fólií. Na vrchním uzávěru byl vylepen informační štítek. Pro názornost můžeme na Obr. 2.6 vidět sondu umístěnou na stromě u paty odvalu a na Obr. 2.7 jsou sondy umístěné v hlusině a na stěně odvalu.

Ačkoli bylo použito celkem 25 sond, data byla zpracována pouze ze 17 z nich. Dvě sondy byly totiž ukradeny a dalších 6 bylo poškozenou vodou. V ochranných krytech za teplého počasí kondenzovala voda, která neměla jak odtékat ven, postupně tedy zatékala do vnitřku sondy, což způsobilo korozi a poničení její elektroniky. Takto byla u celkem 8 sond ztracena většinou velká část dat a do příští měřicí kampaně bylo zapotřebí upravit kryty tak, aby v nich nedocházelo ke kondenzaci vody.



Obr. 2.5: Rozmístění měřících bodu na odvalu během 1. kampaně (zeleně – měřící body u paty odvalu, modře – měřící body na stěně odvalu, červeně – měřící body na koruně odvalu), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz



Obr. 2.6: Sonda v ochranném krytu umístěná na stromě u paty odvalu (foto: Jan Hradecký)



Obr. 2.7: Sondy v ochranných krytech umístěné v hlušině na stěně odvalu (vlevo) a v hlušině u paty odvalu (vpravo)

2.2.2 Druhá měřicí kampaň – zima a jaro 2022

období: 5. 2. 2022 – 26. 5. 2022

typ sond: TSR4S

počet sond: 9 (všechny majetkem FJFI)

rozmístění sond: David Strnad, Václav Štěpán, Lenka Thinová, Vladislav Semianikov, Radek Bican

Tato měřicí kampaň byla provedena v rámci mého výzkumného úkolu [2].

2.2.2.1 Úprava konstrukce a krytu sondy

Na základě negativní zkušenosti s pronikáním vody do vnitřku sondy z předchozí kampaně bylo nejprve zapotřebí upravit konstrukci sondy. Je nutné zmínit, že sondy jsou určené pro použití ve vnitřních prostorách, zmíněný nedostatek tedy není chybou výrobce. Zlepšení odolnosti proti pronikání vody do sondy bylo docíleno přidáním hned několika těsnících prvků. Částečně rozebraná a složená sonda jsou znázorněny na Obr. 2.8. Nad víčko sondy (1) bylo vloženo těsnění (2), nad které byla přidána šedivá čepička z polyethylenu (4). Tyto tři součásti byly přichyceny pomocí kroužku se závitem (3). Na čepičku z polyethylenu byl dále nasazen zaoblený ochranný kroužek z polyethylenu (5), po kterém by případná zkondenzovaná voda stékala dolů.



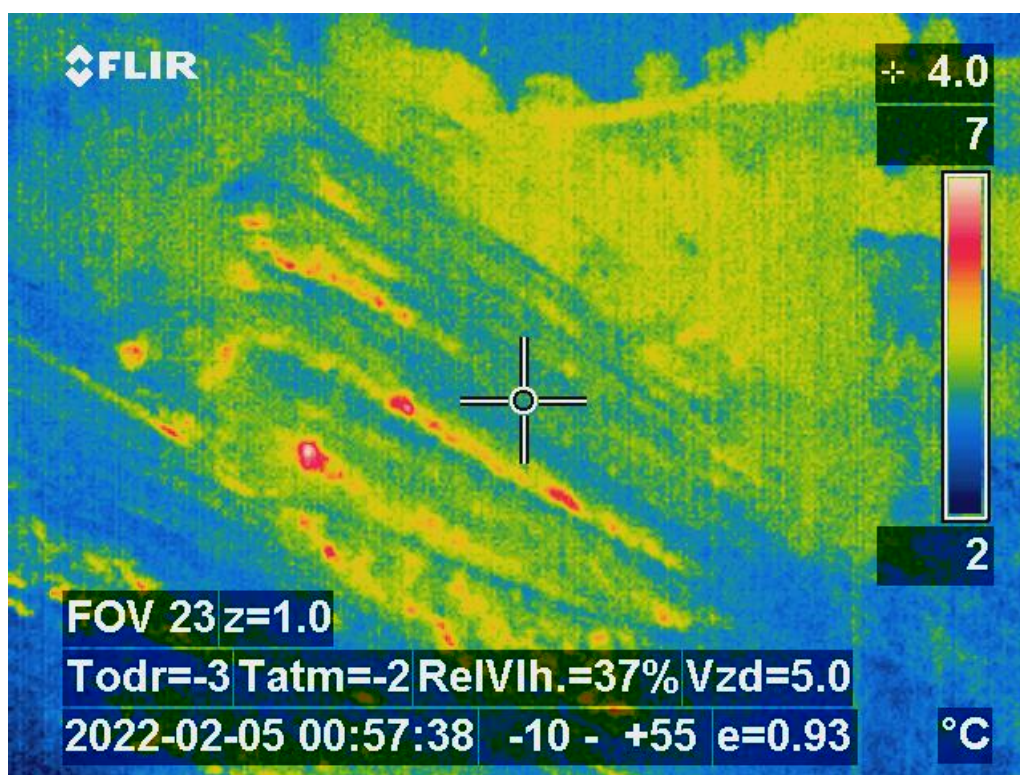
Obr. 2.8: Nová konstrukce sondy s těsnícími prvky (vlevo), složená sonda (vpravo)

Dále bylo zapotřebí vymyslet nový kryt, který by sondám poskytoval dostatečnou ochranu před povětrnostními vlivy a zároveň by v něm nedocházelo ke kondenzaci vody a následnému možnému poškození sond. Pro tento účel byl zvolen jednoduchý

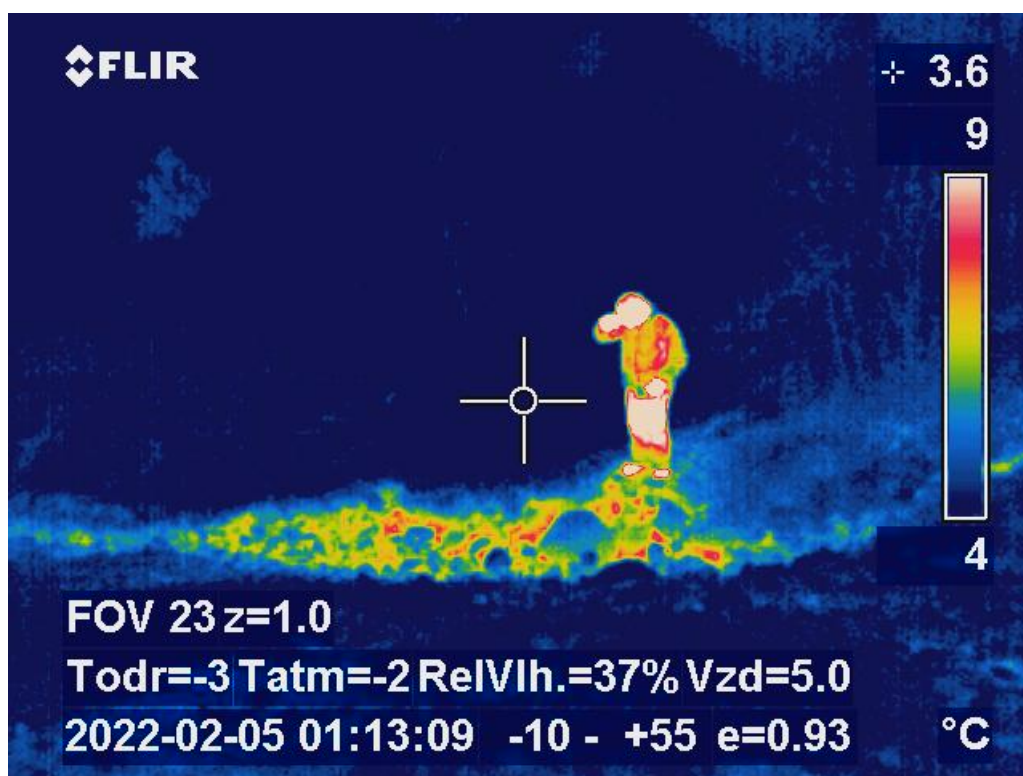
kryt z dvoulitrové PET lahve od vína, které bylo odříznuto dno, aby zkondenzovaná voda mohla volně odkapávat. Odříznutým dnem bylo možné do krytu vložit sondu a následně kryt spolu se sondou pomocí stahovacích pásek přichytit v požadované výšce. Tímto krytem bylo opatřeno celkem 6 sond, zbylé 3 sondy byly umístěny ve speciálním radiačním štítu od firmy TESLA, a.s.

2.2.2.2 Výběr vhodných měřicích bodů

Pro nalezení vhodných měřicích bodů bylo učiněno několik pochůzek po odvalu během nichž bylo provedeno měření iontometry, anemometry a infrakamerou. Cílem bylo nalézt místa s výdechem teplejšího plynu, jelikož bylo předpokládáno, že v zimních dnech je plyn vystupující z odvalu teplejší než okolní vzduch. Pomocí iontometrů byl tedy měřen počet záporných iontů, pomocí anemometru rychlost proudění plynu a teplota, pomocí infrakamery pak byly na odvalu hledány teplejší místa - tzv. hotspots. Průzkum infrakamerou za slunečného dne se ukázal jako málo účinný, a proto bylo rozhodnuto o provedení příští pochůzky po odvalu v nočních hodinách. Během této pochůzky bylo pomocí infrakamery nalezeno hned několik teplejších bodových i plošných výduchů plynu z odvalu, poblíž nichž byly následně umístěny sondy. Příklady takových výduchů zachycených infrakamerou můžeme vidět na Obr. 2.9 a Obr. 2.10.



Obr. 2.9: Východní stěna odvalu s teplými plošnými i bodovými výduchy (autor: Václav Štěpán)

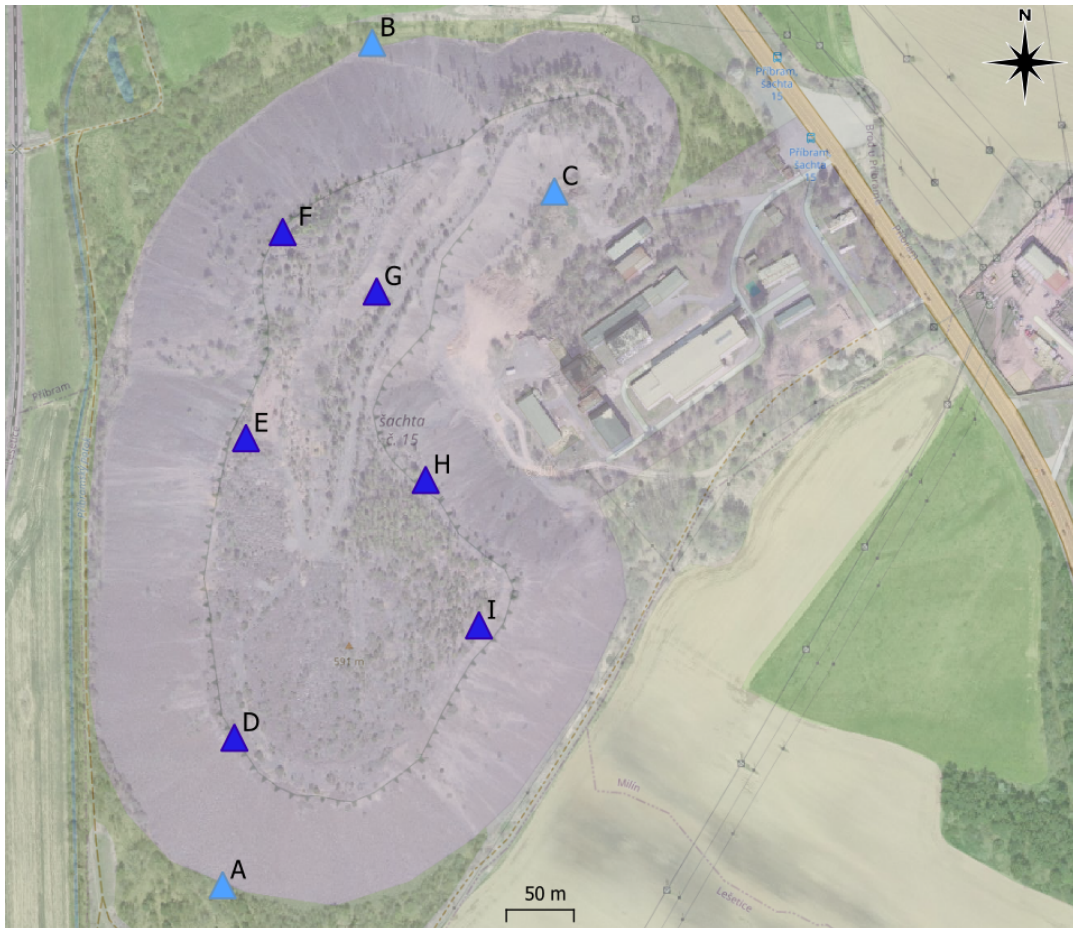


Obr. 2.10: Plošný výduch s řadou menších bodových výduchů na terase východní stěny odvalu (autor: Václav Štěpán)

2.2.2.3 Rozmístění sond

Z celkem 9 sond bylo 6 sond umístěno na korunu odvalu a 3 sondy k patě odvalu, měřicí body byly označeny písmeny „A–I“. Bylo totiž předpokládáno, že v zimních měsících, kdy je teplota uvnitř odvalu vyšší než teplota okolního vzduchu, nastává v odvalu komínový efekt, plyn proudí odvalem směrem nahoru, kde z něj vystupuje a způsobuje v těchto místech zvyšování hodnot OAR. U paty odvalu byly sondy umístěny do míst, kde byly v předchozí kampani naměřeny nejvyšší hodnoty OAR. Na koruně odvalu byly sondy umístěny do infrakamerou nalezených teplejších bodových či plošných výduchů. Rozmístění sond na mapě je znázorněno na Obr. 2.11. Měřicí body „A“ a „B“ odpovídají měřicím bodům „7“ a „3“ z 1. měřicí kampaně.

V této kampani nebyly sondy umístěny do hlušiny, ale pouze do výšky nad terénem. Ve všech měřicích bodech byly sondy v příslušných krytech (PET lahvích či radiačních štítech) pomocí stahovacích pásek přichyceny ve výšce cca 1,5 m na stromě či keři. Příklad takového umístění můžeme vidět na Obr. 2.12, kde je zachycena sonda v měřicím bodu „E“ na koruně odvalu. Kryty sond byly opatřeny nálepkou s nápisem „Měříme radon v přírodě“, názvem školy, emailem a telefonním kontaktem. Na počátku této kampaně byla rovněž na těžní věž do výšky cca 50 m nad terénem umístěna meteostanice.



Obr. 2.11: Rozmístění měřicích bodů na odvalu během 2. kampaně (světle modře – měřicí body u paty odvalu, tmavě modře – měřicí body na koruně odvalu), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz



Obr. 2.12: Sonda umístěná v měřicím bodu „E“ opatřená ochranným krytem vyrobeným z PET lahve (foto: Václav Štěpán)

2.2.3 Třetí měřicí kampaň – léto 2022

období: 26. 5. 2022 – 18. 10. 2022

typ sond: TSR4S/4M

počet sond: 8 (všechny majetkem FJFI)

rozmístění sond: David Strnad, Václav Štěpán, Lenka Thinová, Martin Kaschner

Tato měřicí kampaň byla provedena v rámci mého výzkumného úkolu [2].

S nástupem léta a zároveň vyšších teplot se projevil nedostatek u dosud používaných krytů z PET lahví. Při vyšších teplotách se v nich akumulovalo teplo, teplota uvnitř krytů při venkovních teplotách okolo 25 °C dosahovala 50 °C a hrozilo poškození sond. Ing. Václav Štěpán, Ph.D. proto navrhl nový kryt z PETG, který bylo možné tisknout na 3D tiskárně. Model tohoto krytu je znázorněn na Obr. 2.13. Jedná se v podstatě o válec poskytující sondě dostatečnou ochranu proti povětrnostním vlivům a zároveň disponující množstvím podélných otvorů umožňujících dobrou výměnu vzduchu. Nový kryt byl nejprve otestován a poté, co se i při vyšších teplotách osvědčil, byly stávající kryty z PET lahví vyměněny za tyto nové kryty z PETG.



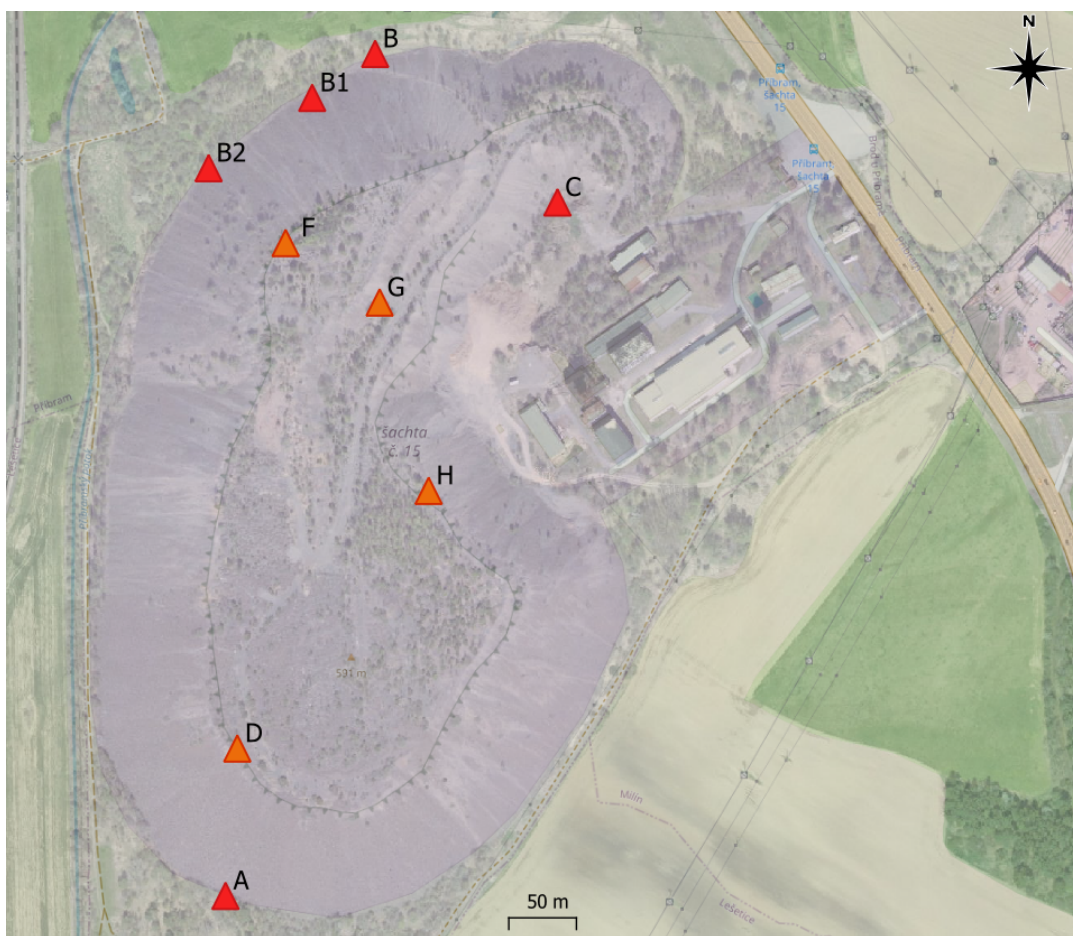
Obr. 2.13: Nový kryt z PETG s možností tisku na 3D tiskárně (autor: Václav Štěpán)

V letním období je teplota uvnitř odvalu nižší než teplota okolního vzduchu, plyn tedy proudí odvalem směrem dolů, vystupuje u jeho paty, čímž dochází právě v těchto místech ke zvyšování hodnot OAR. Z tohoto důvodu byly některé sondy přemístěny z koruny odvalu k patě odvalu, přičemž i zde byly umístěny ve výšce cca 1,5 m nad terénem. Během kampaně bylo za účelem kontroly, stažení dat a přemístění sond podniknuto několik cest na odval. Během kampaně tedy nebylo rozmístění sond stálé. Pro přehlednost jsou v Tab. 2.4 uvedeny měřicí body, které byly osazeny sondami v jednotlivých částech kampaně. Názvy měřicích bodů odpovídají měřicím bodům ve 2. kampani. Samotné rozmístění měřicích bodů na mapě je pak znázorněno

na Obr. 2.14. 22. 7. 2022 byly k severní patě odvalu přiléhající k obci Brod přidány dvě sondy do měřicích bodů „B1“ (odpovídá měřicímu bodu „2“ z 1. měřicí kampaně) a „B2“. Od této doby bylo tedy u paty odvalu umístěno 5 sond, zatímco na koruně odvalu 3 sondy.

Tab. 2.4: Osazení měřicích bodů sondami v jednotlivých částech kampaně (měřicí body jsou shodné s měřicími body ve 2. kampani)

datum	měřicí body osazené sondou
26. 5. 2022 - 30. 6. 2022	A, B, C, D, F, G, H, I
30. 6. 2022 - 22. 7. 2022	A, B, C, D, G, H, I
22. 7. 2022 - 18. 10. 2022	A, B, B1, B2, C, D, G, H



Obr. 2.14: Rozmístění měřicích bodů na odvalu během 3. kampaně (červeně - měřicí body u paty odvalu, oranžově - měřicí body na koruně odvalu), mapový podklad - Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

2.3 Softwarové nástroje

V této části jsou stručně popsány softwarové nástroje, které byly použity při zpracování dat, přičemž výsledky jsou obsahem kapitoly 3. V rámci zpracování dat bylo vytvořeno několik skriptů, některé jsou přístupné na GitHub [59] přes odkaz:

<https://github.com/DavidStr99/odval>

Na GitHub jsou v repozitáři *odval* přístupné následující skripty:

- *nahrani_dat_do_databaze.py* – nahrání dat ze sondy TSR4M/4S do příslušné tabulky v databázi
- *stazeni_tabulky_z_databaze.py* – stažení vybraných dat z příslušné tabulky v databázi
- *oar_meteo* – vykreslení vybraných dat ze sond a meteostanice do jednoho grafu
- *oar_korelace* – vytvoření heatmapy korelačních koeficientů mezi hodnotami OAR z vybraných měřicích bodů a libovolného časového období
- *autokorelace* – vytvoření autokorelačního grafu pro vybranou časovou řadu hodnot OAR v libovolném období

2.3.1 Python

Ke zpracování časových řad naměřených koncentrací radonu byl použit jazyk Python [4] a jeho příslušné knihovny. Mezi dobrou literaturu k tomu jazyku určitě patří kniha *Python for Data Analysis, 3E* [60], kde jsou do hloubky vysvětleny možnosti analýzy dat v Pythonu. Knihy *Mastering Geospatial Analysis with Python* [61] a *Geocomputation with Python* [62] se pak podrobně věnují geoprostorové analýze dat.

Různé metody zaobírající se analýzou časových řad jsou také popsány v následujících článcích:

- *A Guide to Time Series Analysis in Python* [63]
- *Time Series Analysis in Python – A Comprehensive Guide with Examples* [64]
- *ARIMA Model – Complete Guide to Time Series Forecasting in Python* [65]

Zde jsou mimo jiné popsány metody jako jsou korelace, autokorelace a dekompozice, které byly použity při analýze a diskuzi naměřených dat v kapitole 3. Posledně jmenovaný článek pojednává o tzv. ARIMA modelu, který slouží k předpovídání hodnot v časových řadách na základě hodnot minulých.

2.3.2 PostgreSQL

PostgreSQL [3] je pokročilý relační databázový systém s otevřeným zdrojovým kódem. Podporuje jak SQL (relační), tak JSON (nerelační) dotazování. Používá se pro tvorbu databází a práci s nimi, včetně geoprostorových databází (rozšíření PosGIS [66]). PostgreSQL podporuje nejpopulárnější programovací jazyky jakými jsou Python, Java, C/C+. Základní informace o PostgreSQL a různé návody jsou dostupné např. na stránce PostgreSQL Tutorial [3].

2.3.3 QGIS

Tento open source geografický informační systém (GIS) [5] umožňuje vizualizaci dat na různých mapových podkladech. Všechny mapy byly vytvořeny v tomto prostředí. QGIS má celou řadu funkcí, které mohou být rozšířeny pomocí zásuvných modulů, tzv. pluginů. Webová stránka *Školení QGIS pro začátečníky*[67] obsahuje česky psané návody pro práci s tímto systémem. Další a podrobnější informace lze pak dohledat v knihách:

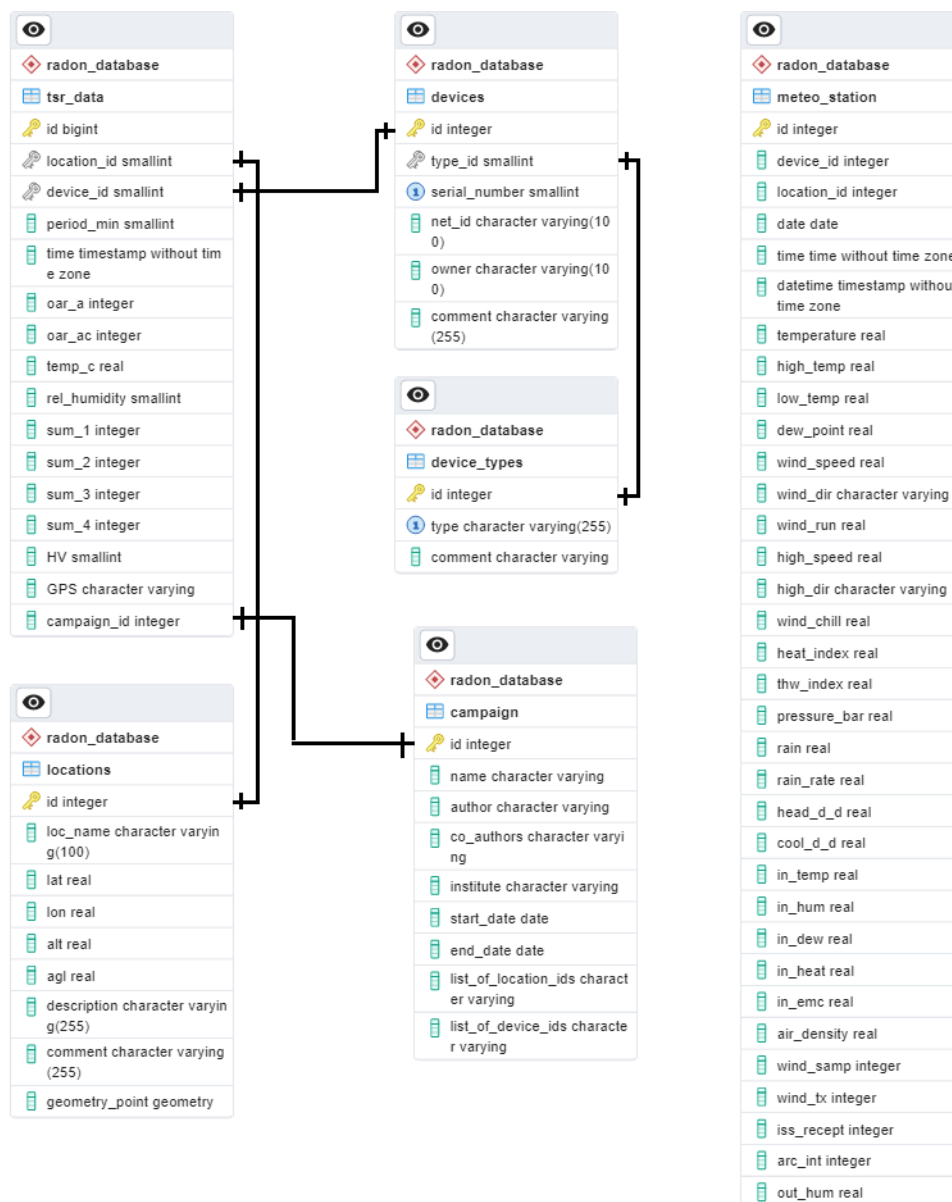
- *Learn QGIS : your step-by-step guide to the fundamental of QGIS 3.4* [68]
- *Mastering PostGIS: create, deliver, and consume spatial data using PostGIS* [69]

2.4 Struktura databáze

Při větším množství dat je vhodné jejich ukládání do databáze. Data získaná ze sond TSR4M/4S v průběhu zmíněných třech kampaní byla spolu s daty z meteostanice nahrána do databáze s názvem *radon_database*. Databáze byla implementována Ing. Martinem Kaschnerem pomocí databázového systému PostgreSQL 14 v jazyku SQL pod systémem GNU/Linux (Ubuntu 22.04.1 LTS). Jedná se o databázi relační, což znamená, že obsahuje několik tabulek se strukturovanými daty, mezi nimiž jsou určité vazby. Každá tabulka obsahuje několik sloupců (atributů) a řádků (záznamů). *Radon_database* obsahuje celkem 6 tabulek s názvy *campaign*, *device_types*, *devices*, *locations*, *meteo_station*, *tsr_data*. Na Obr. 2.15 je schéma databáze vytvořené v programu pgAdmin 4, ver. 6.19 [70], přičemž rovnými čarami jsou znázorněny vazby mezi jednotlivými tabulkami. Níže jsou tyto tabulky stručně popsány.

2.4.1 Campaign

Tato tabulka obsahuje informace o provedených měřicích kampaních. Obsahuje 3 řádky odpovídající měřicím kampaním léto 2021, zima 2022 a léto 2022. Dále obsahuje 9 sloupců s ID číslem kampaně, názvem kampaně, autory, spoluautory, názvy institucí, datem počátku kampaně, datem konce kampaně, ID čísla měřicích bodů a ID čísla použitých přístrojů. Pro ukázkou můžeme na Obr. 2.16 vidět část této tabulky zobrazené v programu pgAdmin 4.



Obr. 2.15: Schéma relační databáze obsahující 6 tabulek (rovnými čarami jsou znázorněny vazby mezi tabulkami)

	id [PK] integer	name character varying	author character varying	co_authors character varying	institute character varying	start_date date	end_date date	list_of charac
1	1	summer_2021	David Strnad	Vaclav Stepan, Martin Kaschner, Lenka Thinova	FJFI	2021-05-29	2021-08-06	17,18,
2	2	winter_2022	David Strnad	Vaclav Stepan, Martin Kaschner, Lenka Thinova	FJFI	2022-02-05	2022-05-26	2,7,8,
3	3	summer_2022	David Strnad	Vaclav Stepan, Martin Kaschner, Lenka Thinova	FJFI	2022-05-26	2022-10-18	7,8,9,

Obr. 2.16: Část tabulky *campaign* zobrazené v programu pgAdmin 4

2.4.2 Device_types

V této tabulce jsou shrnuty informace o typech použitých přístrojů. V rámci měřicích kampaní byly použity celkem 3 typy přístrojů - sondy TSR4M, TSR4S a meteostanice Davis Vantage Pro2 Aktiv. Tabulka tedy obsahuje 3 řádky. Dále obsahuje 3 sloupce s id číslem typu použitého přístroje, názvem přístroje a komentářem.

2.4.3 Devices

Tato tabulka obsahuje informace o konkrétních použitých přístrojích. Celkem bylo použito 34 sond a jedna meteostanice, tabulka tedy obsahuje 35 řádků. Dále obsahuje 6 sloupců s id číslem přístroje, id číslem typu přístroje, sériovým číslem, net číslem, vlastníkem přístroje a komentářem.

2.4.4 Locations

V této tabulce jsou obsaženy informace o všech místech, ve kterých byly umístěny přístroje. Sondy byly umístěny v celkem 36 měřicích bodech, v jednom dalším místě (na těžní věži) byla meteostanice, tabulka tedy obsahuje celkem 37 řádků. Ve sloupcích pak najdeme id číslo lokace, název lokace, zeměpisnou šířku a délku, nadmořskou výšku, výšku nad terénem, popis lokace, komentář a tzv. geometry point.

2.4.5 Meteo_station

Tato tabulka obsahuje hodinová data z meteostanice naměřená během 2. a 3. měřicí kampaně v období od 18. 2. 2022 do 18. 10. 2022, přičemž obsahuje data až do 22. 2. 2023, tedy i po ukončení měření hodnot OAR na odvalu. Data byla ukládána každou hodinu, tabulka obsahuje 7 705 záznamů. Celkem obsahuje 34 sloupců s kompletními daty naměřenými jak venkovním, tak vnitřním čidlem. Kromě sloupců s meteorologickými daty tabulka obsahuje sloupce s id číslem daného záznamu, id číslem meteostanice a id číslem lokace, ve které byla meteostanice umístěna.

2.4.6 Tsr_data

Tabulka tsr_data obsahuje 30minutové nebo hodinové záznamy ze všech sond naměřené během 3 měřicích kampaní. Je tedy největší tabulkou databáze a v současnosti obsahuje 117 754 záznamů a 16 sloupců. Kromě sloupce s naměřenými hodnotami OAR obsahuje také další sloupce, jako např. teplotu, vlhkost, id číslo záznamu, id číslo kampaně, id číslo lokace, id číslo přístroje a dobu periody.

Kapitola 3

Výsledky a diskuze

Tato kapitola obsahuje analýzu a diskuzi naměřených dat. V první části jsou uvedeny průměry, mediány a maxima naměřených hodnot OAR. Tyto hodnoty jsou dále diskutovány vzhledem k denním a sezónním variacím v hodnotách OAR, přičemž jsou sledovány rozdíly v OAR z hlediska umístění a daného ročního období. V další části je analyzována autokorelace i korelace v hodnotách OAR a jsou zkoumány parametry jako sezónnost, trend a šum. Dále jsou rozebrány souvislosti mezi OAR a různými meteorologickými veličinami. V poslední části jsou pak srovnány hodnoty OAR naměřené pomocí sond s hodnotami OAR a EOAR naměřenými detektory ALGADE a stanicí Ramonis.

3.1 Průměry, mediány a maxima OAR

V této části jsou uvedeny průměry, mediány a maxima hodnot OAR naměřených během 3 měřicích kampaní. Podrobnější diskuze těchto hodnot je pak obsahem další části textu, ve které jsou také popsány denní a sezónní variace v hodnotách OAR. Maximální hodnoty OAR je zapotřebí brát s jistou rezervou, jelikož některé z nich byly naměřeny při vysoké vlhkosti, při které sondy nemusí měřit přesně. Jedná se zejména o maxima z 1. měřicí kampaně, kdy byly sondy umístěny v krytech, ve kterých kondenzovala voda a tím se v nich udržovala vysoká vlhkost.

3.1.1 Léto 2021 – 1. měřicí kampaň

Rozmístění měřicích bodů během této kampaně je na Obr. 2.5. Data byla zpracována z období od 29. 5. 2021 do 5. 8. 2021. Čtyři sondy z celkového počtu 25 obsahovaly kvůli poškození vlhkostí velmi krátký záznam, data z nich proto nebyla zpracována. V tabulkách jsou tedy uvedeny hodnoty pouze pro sondy, které měřily déle než týden. V Tab. 3.1 jsou uvedeny průměry, mediány a maxima (dále popisné statistiky) OAR pro sondy umístěné v hlušině u paty odvalu. Sondy v měřicích bodech „6“ a „7“ obsahovaly kratší záznam, v prvním případě do 11. 6. a ve druhém případě do 22. 7. V Tab. 3.2 jsou pak uvedeny popisné statistiky OAR pro sondy umístěné u paty odvalu ve výšce cca 1,5 m na stromě. Sonda v měřicím bodu „7“ obsahovala záznam pouze do 26. 6. Tab. 3.3 obsahuje popisné statistiky OAR pro sondy

umístěné v hlušině na koruně odvalu (měřicí body „13“, „14“, „15“ a „16“) a v hlušině na stěně odvalu (měřicí body „5“ a „8“). Sondy v měřicích bodech „16“ a „8“ obsahovaly kratší záznam, v obou případech do 15. 6. Část dat byla zveřejněna již v rámci bakalářské práce [1].

Tab. 3.1: Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m³) naměřené sondami umístěnými v hlušině u paty odvalu v období od 29. 5. do 5. 8. 2021

měřicí bod	1	2	3	4	5	6	7	10
průměr	12 626	31 140	32 198	20 126	3 630	35 966	7 164	1 123
medián	7 757	28 672	33 754	18 338	2 388	40 256	5 043	435
maximum	59 264	182 016	96 375	111 552	46 464	155 200	47 264	12 622

Tab. 3.2: Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m³) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m u paty odvalu v období od 29. 5. do 5. 8. 2021

měřicí bod	1	2	3	4	6	7	9
průměr	6 740	2 874	4 248	1 459	2 624	10 473	19 100
medián	5 003	1 167	1 749	1 101	1 519	3 693	16 731
maximum	33 440	57 824	30 166	8 500	21 439	74 752	80 502

Tab. 3.3: Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m³) naměřené sondami umístěnými v hlušině na koruně a stěně odvalu v období od 29. 5. do 5. 8. 2021 (měřicí body „13“, „14“, „15“, „16“ – koruna odvalu, „5“, „8“ – stěna odvalu)

měřicí bod	13	14	15	16	5	8
průměr	1 350	698	218	3 854	658	542
medián	93	220	110	872	407	319
maximum	183 111	39 865	7 442	91 232	5 899	4 399

3.1.2 Zima a jaro 2022 – 2. měřicí kampaň

Rozmístění měřicích bodů během této kampaně je na Obr. 2.11. Ve druhé kampani byly sondy v každém měřicím bodu na rozdíl od první kampaně umístěny vždy pouze ve výšce cca 1,5 m na stromě. Popisné statistiky jsou rozděleny do dvou tabulek zahrnujících zimní a jarní období. Během jarního období došlo ke změně proudění plynu v odvalu, což je podrobněji diskutováno v části 3.2.1.3. V Tab. 3.4 jsou tedy uvedeny popisné statistiky OAR pro všechny měřicí body pro období od 5. 2. do 8. 4. 2022. Tab. 3.5 pak obsahuje popisné statistiky pro všechny měřicí body pro období od 9. 4. 2022 do 26. 5. 2022. Měřicí body „A“, „B“ a „C“ se nacházely u paty odvalu, zatímco měřicí body „D“, „E“, „F“, „G“, „H“ a „I“ se nacházely na koruně odvalu.

Tab. 3.4: Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m³) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 5. 2. do 8. 4. 2022 (měřicí body „A“, „B“, „C“ – pata odvalu, „D“, „E“, „F“, „G“, „H“, „I“ – koruna odvalu)

měřicí bod	A	B	C	D	E	F	G	H	I
průměr	275	296	719	540	201	545	1 754	734	574
medián	35	27	148	393	111	377	1 305	477	293
maximum	14 806	16 099	31 421	3 980	2 076	3 883	13 364	6 286	7 855

Tab. 3.5: Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m³) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 9. 4. do 26. 5. 2022 (měřicí body „A“, „B“, „C“ – pata odvalu, „D“, „E“, „F“, „G“, „H“, „I“ – koruna odvalu)

měřicí bod	A	B	C	D	E	F	G	H	I
průměr	1 207	3 641	3 834	272	112	240	965	312	330
medián	697	467	1 088	35	42	56	109	68	42
maximum	14 879	35 616	90 208	5 150	2 448	2 980	28 381	10 273	6 161

3.1.3 Léto 2022 – 3. měřicí kampaň

Rozmístění měřicích bodů během této kampaně je na Obr. 2.14. I v této kampani byly sondy ve všech měřicích bodech umístěny pouze ve výšce 1,5 m na stromě. V Tab. 2.14 jsou uvedeny popisné statistiky OAR pro všechny měřicí body pro období od 27. 5. do 18. 10. 2022. Měřicí body „A“, „B“, „B1“ a „C“ se nacházely u paty odvalu, zatímco měřicí body „D“, „F“, „G“, „H“ a „I“ se nacházely na koruně odvalu.

Tab. 3.6: Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m³) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 27. 5. do 18. 10. 2022, (měřicí body „A“, „B“, „B1“, „C“ – pata odvalu, „D“, „F“, „G“, „H“, „I“ – koruna odvalu)

měřicí bod	A	B	B1	C	D	F	G	H	I
průměr	3 710	4 871	4 493	6 007	116	60	622	267	73
medián	1 224	1 095	2 172	2 032	46	35	71	60	41
maximum	42 208	81 632	46 224	65 408	3 777	1 855	15 169	8 725	3 311

3.2 Denní a sezónní variace OAR

3.2.1 Sezónní variace

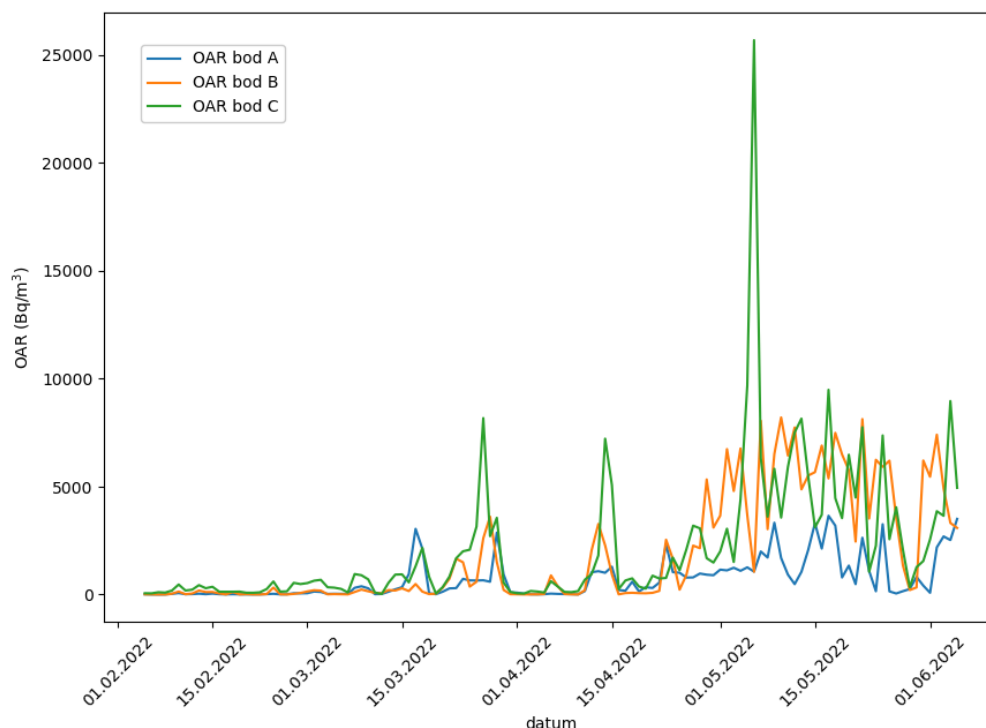
Na Obr. 3.1 a Obr. 3.2 jsou znázorněny průměrné denní hodnoty OAR v měřicích bodech u paty a na koruně odvalu, na Obr. 3.3 jsou pak průměrné denní hodnoty OAR ve všech měřicích bodech a také průměrné denní hodnoty teploty získané z meteostanice. Hodnoty OAR, ze kterých byly průměrné hodnoty vypočítány, byly naměřeny sondami umístěnými ve výšce 1,5 m na stromě. V následující části textu jsou tyto grafy a také tabulky uvedené na začátku kapitoly podrobněji popsány.

3.2.1.1 Hodnoty OAR u paty odvalu

Z Obr. 3.1 vyplývá, že hodnoty OAR jsou v zimním období u paty odvalu výrazně nižší než v letním období. V zimě se průměrné hodnoty OAR u paty odvalu pohybují v řádu nižších stovek Bq/m³. Naopak v letním období se zde vyskytují velmi vysoké hodnoty OAR, jejichž průměry dosahují až k několika tisícům Bq/m³. Pro srovnání to znamená, že v letním období se u paty odvalu vyskytují až 1 000× vyšší hodnoty OAR oproti běžným hodnotám v ovzduší.

Přesná čísla najdeme v Tab. 3.2 a Tab. 3.6, kde jsou mj. uvedeny průměrné hodnoty OAR naměřené v letních měsících během 1. a 3. měřicí kampaně v letech 2021 a 2022 v měřicích bodech u paty odvalu ve výšce cca 1,5 m na stromě. Z tabulek je zřejmé, že průměrné hodnoty OAR se v letním období u paty odvalu pohybují v řádech tisíců Bq/m³. V létě 2021 byla nejvyšší průměrná hodnota OAR naměřena v měřicím bodu „9“ na východní straně odvalu a činila 19 100 Bq/m³, v létě 2022 to bylo v měřicím bodu „C“ v prohlubni na východní straně odvalu, kde průměrná hodnota OAR činila 6 007 Bq/m³. Velmi vysoké hodnoty OAR se však vyskytovaly i v jiných místech u paty odvalu, např. v létě 2022 činily průměrné hodnoty OAR v bodech B a B1 na severní straně odvalu přilehlé k obci Brod 4 871 a 4 493 Bq/m³.

Za zmínku jistě stojí, že u paty odvalu byly vyšší hodnoty OAR naměřeny v měřicích bodech, ve kterých se nacházejí velké balvany. Konkrétně se jedná o měřicí body „1“, „3“, „7“ a „9“ z 1. měřicí kampaně a o měřicí body „A“, „B“ a „B1“ ze 2. měřicí kampaně. Je pravděpodobné, že v těchto bodech se nacházejí silnější výduchy plynu, přičemž průchod plynu je zde díky větším mezerám mezi balvany usnadněn.

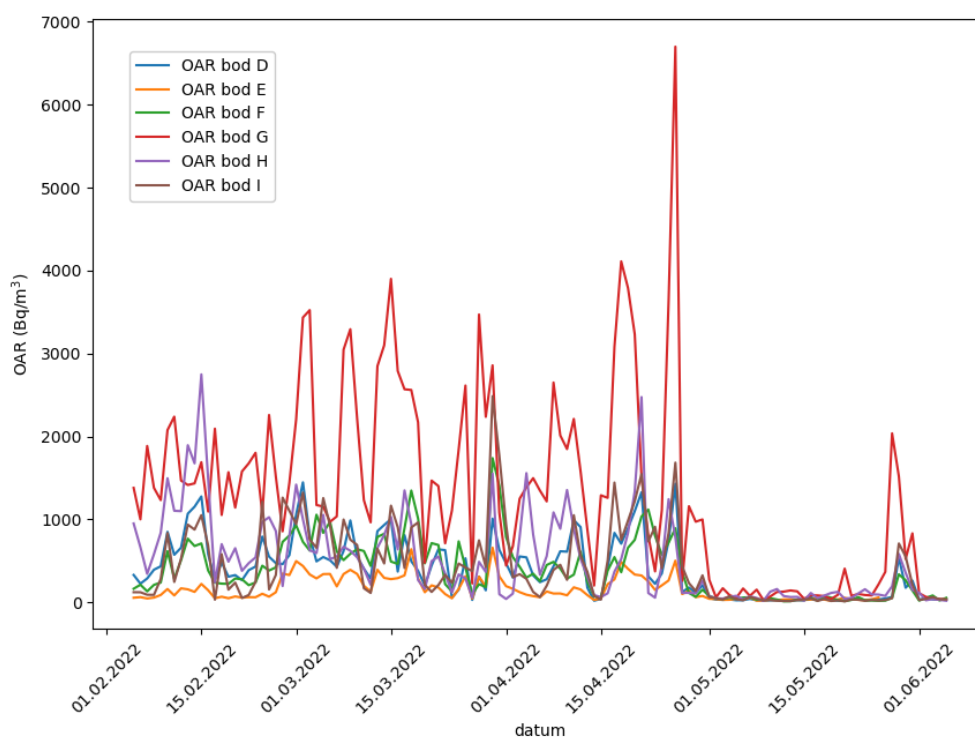


Obr. 3.1: Průměrné denní hodnoty OAR v měřicích bodech u paty odvalu v období od 5. 2. do 5. 6. 2022

3.2.1.2 Hodnoty OAR na koruně odvalu

Na koruně odvalu je situace odlišná a lze říci, že v podstatě inverzní oproti situaci u paty. Z Obr. 3.2 je patrné, že v zimním období, tedy přibližně do poloviny dubna, jsou hodnoty na koruně odvalu výrazně vyšší oproti letnímu období, přičemž v zimním období se pohybují v řádu nižších tisíců Bq/m³. Naopak v létě jsou hodnoty OAR na koruně odvalu výrazně nižší a jejich průměrné denní hodnoty se pohybují v řádu desítek až stovek Bq/m³.

Přesná čísla průměrných hodnot OAR jsou uvedena v Tab. 3.4, Tab. 3.5 a Tab. 3.6, ve kterých najdeme hodnoty pro 2. a 3. měřicí kampaň. Z nich je patrné, že nejvyšší průměrná hodnota OAR byla v zimním i letním období v měřicím bodu „G“. Tento bod se nacházel na terase východní stěny odvalu několik metrů pod úrovní koruny. Pravděpodobně díky vyšší ochraně před větrem způsobující lepší akumulaci aerosolu s radonem byly v tomto bodu naměřeny vyšší hodnoty OAR.



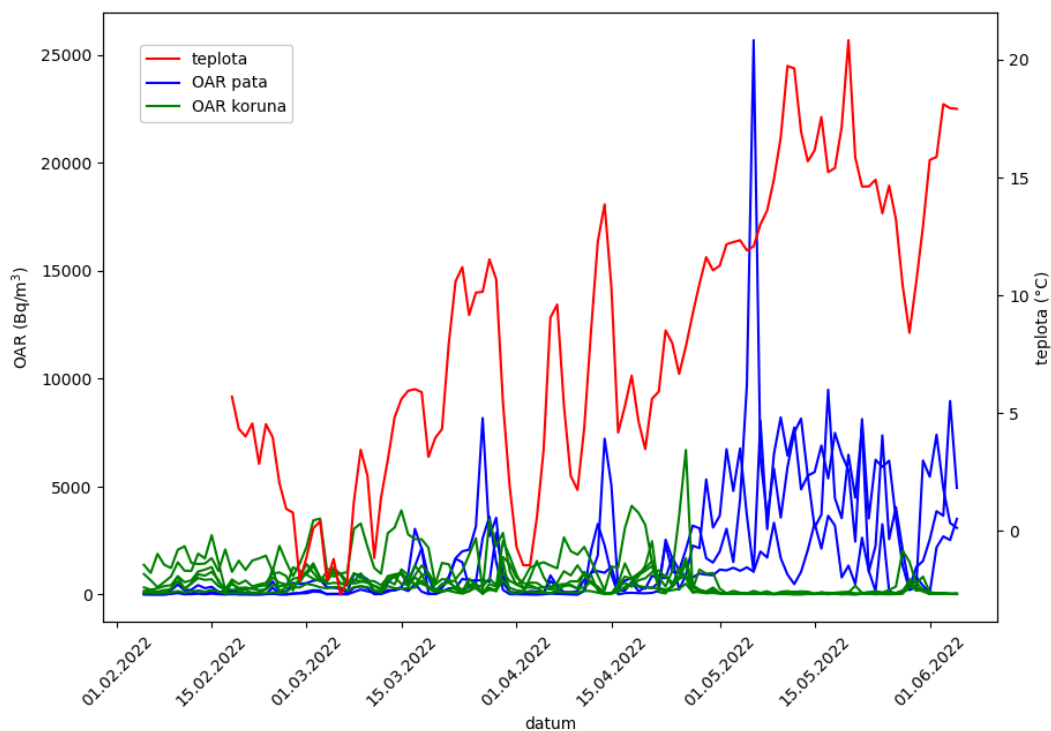
Obr. 3.2: Průměrné denní hodnoty OAR v měřicích bodech na koruně odvalu v období od 5. 2. do 5. 6. 2022

3.2.1.3 Obrat v proudění plynu odvalem

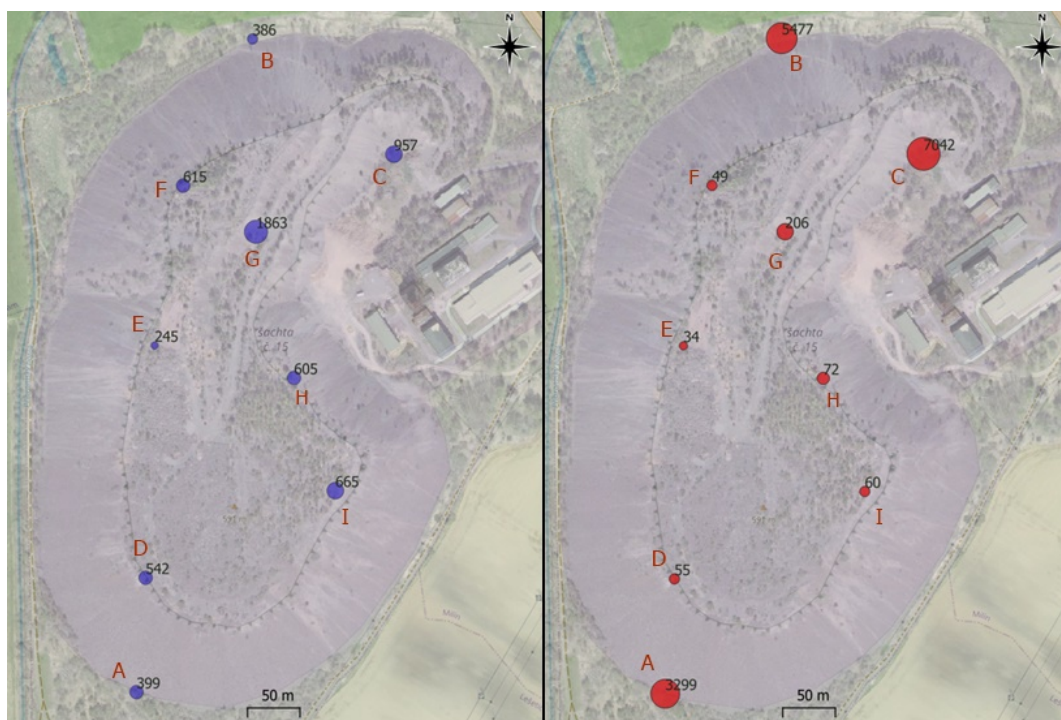
Na Obr. 3.3 jsou pro srovnání vyneseny průměrné denní hodnoty OAR ze všech měřicích bodů a také průměrné denní hodnoty teploty, přičemž pro lepší orientaci v grafu jsou hodnoty OAR u paty odvalu vykresleny stejnou barvou (modře) a hodnoty OAR na koruně odvalu také stejnou barvou (zeleně). Z tohoto grafu je dobře patrné, že ve druhé části dubna nastal obrat proudění plynu v odvalu, přičemž od této doby byly hodnoty OAR na koruně odvalu výrazně nižší, naopak u paty odvalu

výrazně vyšší. Obrat proudění plynu v odvalu pravděpodobně nastává každý rok v jinou dobu a souvisí s teplotou. Z grafu je patrné, že k finálnímu obratu v proudění došlo ve chvíli, kdy průměrná denní teplota dosáhla cca 10 °C, přičemž tato teplota je pravděpodobně svázána s vnitřní teplotou odvalu, o níž předpokládáme, že se jen málo mění v průběhu roku. Z tohoto grafu je dále patrné, že i např. v březnu dosahovala průměrná denní teplota 10 °C, což způsobilo krátkodobé zvýšení hodnot OAR u paty odvalu. Při následném snížení teploty však došlo i ke snížení hodnot OAR u paty odvalu a k finálnímu obratu v proudění plynu došlo, jak už bylo řečeno, v druhé polovině dubna. V březnových hodnot OAR naměřených v měřicích bodech u paty odvalu můžeme vidět menší píky, které však nastaly při teplotě menší než 10 °C. Je tedy pravděpodobné, že k obratu proudění plynu odvalem nedochází při dosažení jedné určité hodnoty teploty, avšak spíše při dosažení určitého intervalu teplot. Dále je možné, že v jednu dobu, kdy je venkovní teplota blízká teplotě, při které dochází k obratu proudění plynu odvalem, může plyn v jedné části odvalu proudit směrem nahoru a v jiné části pak směrem dolů. Toto je však již pouze spekulace, která neplyne z dat prezentovaných na Obr. 3.3.

Pro srovnání jsou na mapě na Obr. 3.4 znázorněny rozdíly v průměrných hodnotách OAR mezi zimou a létem, přičemž velikost bodů je úměrná OAR. Průměrné hodnoty OAR pro zimu byly vypočítány z období od 18. 2. do 1. 4. 2022, pro léto pak z období od 1. 5. do 31. 7. 2022. Mapa byla vytvořena již v rámci výzkumného úkolu [2].



Obr. 3.3: Průměrné denní hodnoty OAR ve všech měřicích bodech a průměrné denní hodnoty teploty v období od 5. 2. do 5. 6. 2022



Obr. 3.4: Průměrné hodnoty OAR na odvalu v zimním (vlevo) a letním (vpravo) období, poloměr bodů je úměrný OAR, mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz [2]

3.2.1.4 Srovnání hodnot OAR v hlušině a ve výšce 1,5 m

V Tab. 3.1 jsou uvedeny průměry, mediány a maxima OAR (Bq/m^3) naměřené sondami umístěnými v hlušině u paty odvalu během 1. měřicí kampaně v létě 2021, v Tab. 3.2 jsou pak uvedeny tyto hodnoty naměřené sondami umístěnými na stromě ve výšce 1,5 m u paty odvalu ve stejném období. Ze srovnání těchto hodnot mezi jednotlivými tabulkami je patrné, že ve stejných měřicích bodech byly vyšší hodnoty OAR naměřeny vždy sondou umístěnou v hlušině. Po vydechnutí aerosolových částic z odvalu dochází k jejich odnášení pryč a v určité vzdálenosti a výšce od povrchu odvalu jsou proto hodnoty OAR nižší.

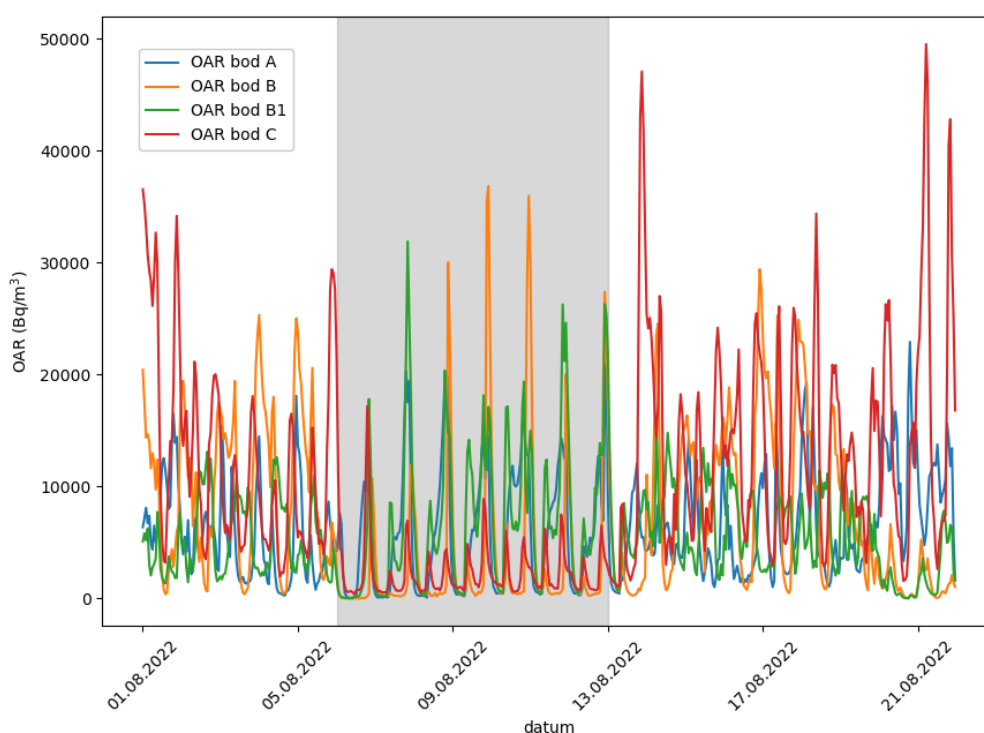
3.2.1.5 Souvislost mezi OAR a relativní výškou měřicích bodů

Souvislost mezi hodnotami OAR v jednotlivých měřicích bodech a relativní výškou mezi nimi byla zkoumána pro měřicí body „A“, „B“, „C“ u paty odvalu a měřicí body „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu ve dvou obdobích. Prvním bylo zimní období v termínu od 5. 2. do 5. 3. 2022, druhým pak letní období v termínu od 5. 7. do 5. 8. 2022. Bylo zjištěno, že v zimním období hodnoty OAR se zvyšující se relativní výškou rostou, naopak v letním období s ní klesají. Toto odpovídá již popsanému proudění plynu odvalem, kdy v zimním období proudí plyn odvalem směrem nahoru a vyšší hodnoty OAR se vyskytují na koruně odvalu. Naopak v letním období proudí plyn odvalem směrem dolů a vyšší hodnoty OAR se vyskytují u paty odvalu. Stěna odvalu není typickým místem výstupu plynu z odvalu, což potvrzují i nízké hodnoty

OAR naměřené během 1. měřicí kampaně ve 3 bodech na stěně odvalu uvedené v Tab. 3.3.

3.2.2 Denní variace

Kromě již zmíněných sezónních variací vykazují hodnoty OAR na odvalech také denní variace. Tento průběh je zapříčiněn zejména denními variacemi v teplotě. Na Obr. 3.5 jsou znázorněny hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „B1“ a „C“ ve výšce 1,5 m u paty odvalu v průběhu 3 týdnů od 1. 8. do 21. 8. 2022. Z tohoto jsou jasně patrné denní variace v hodnotách OAR, kdy můžeme vidět, že v některých částech dne jsou hodnoty OAR nízké a pohybují se v řádu stovek Bq/m^3 , zatímco v jiných částech dne jsou hodnoty OAR velmi vysoké a nabývají hodnot až $40\,000 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

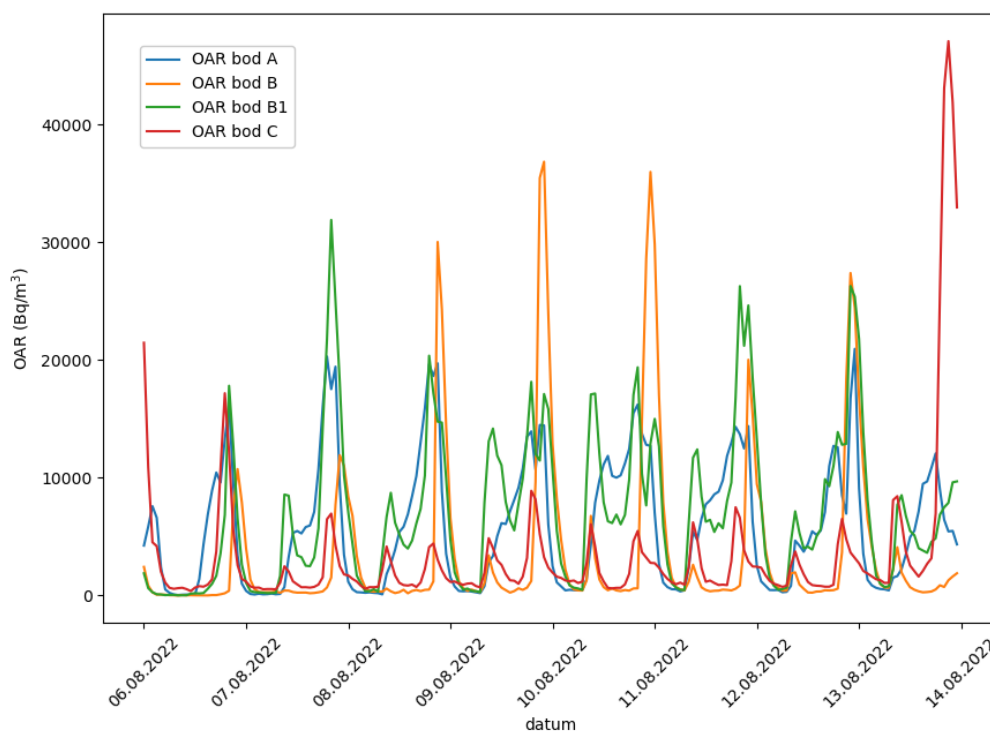


Obr. 3.5: Hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech u paty odvalu ve výšce 1,5 m nad terénem během srpna 2022 (šedou barvou zvýrazněn úsek s výrazným společným průběhem v hodnotách OAR)

Zpravidla platí, že v zimním období jsou maxima OAR dosahována na koruně odvalu v ranních hodinách, což je reakce na nízké teploty v noci. Naopak v letním období jsou dosahována u paty odvalu v pozdně večerních až nočních hodinách (okolo půlnoci) jako reakce na vysoké teploty odpoledne.

Z Obr. 3.5 je dále patrný společný průběh v hodnotách OAR, který je v některých dnech výraznější, v jiných méně. Výrazný společný průběh je patrný v období od 6. 8. do 13. 8. vyznačeném světle šedou barvou. OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „B1“ a „C“ v tomto období jsou zvláště vyneseny na Obr. 3.6. Zde je patrné, že nejvyšších hodnot OAR bylo dosahováno vždy před půlnocí. Již v rámci

bakalářské práce a výzkumného úkolu byl prokázán společný průběh v hodnotách OAR v určitých skupinách měřicích bodů, avšak takto hezký společný průběh jako tomu bylo v týdnu od 6. 8. do 13. 8. 2022 v měřicích bodech u paty odvalu, je vzácností. Za zmínku jistě stojí, že po tropických prvních srpnových dnech přešla přes Českou republiku 5. 8. studená fronta a od 6. 8. do 13. 8. panovalo velmi stálé slunečné počasí beze srážek s teplotami okolo 25 °C. Právě toto může být příčinou zmíněného společného průběhu v hodnotách OAR, kdy ve všech měřicích bodech u paty odvalu byla maxima dosahována před půlnocí.



Obr. 3.6: Společný průběh v hodnotách OAR v měřicích bodech umístěných ve výšce 1,5 m u paty odvalu

3.3 Korelace a autokorelace v hodnotách OAR

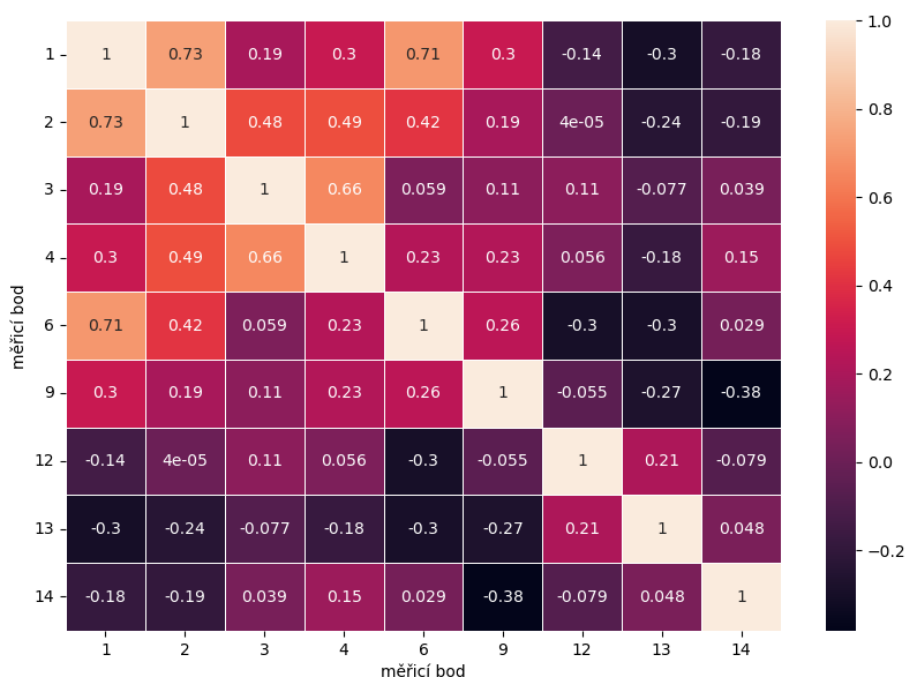
3.3.1 Korelace mezi OAR na různých částech odvalu

Po popsání společných průběhů v hodnotách OAR vyvstává otázka, zda mezi sebou hodnoty OAR naměřené na různých částech odvalu korelují. Míru či sílu korelace vyjadřuje korelační koeficient, který nabývá hodnot od -1 do +1. Korelační koeficient o hodnotě +1 značí přímou závislost, hodnota -1 značí nepřímou závislost (tzv. antikorelaci) a pokud nabývá hodnoty 0, znamená to, že mezi danými hodnotami není žádná zjištělná lineární závislost. Ve statistice se často používá tzv. Pearsonův či Spearmanův korelační koeficient. Pro výpočet korelace mezi hodnotami OAR na různých částech odvalu byl použit Spearmanův korelační koeficient, jež je rezistentní vůči odlehlým hodnotám [71].

Je zapotřebí zdůraznit, že pokud není vztah mezi dvěma veličinami dostatečně lineární, neznamenají hodnoty korelačních koeficientů blízké +1 či -1 silnou korelaci či antikorelaci.

Pro co největší objektivitu byla analýza provedena vždy pro všechny či alespoň většinu měřicích bodů a dále pro různé dlouhé časové úseky v odlišných ročních obdobích.

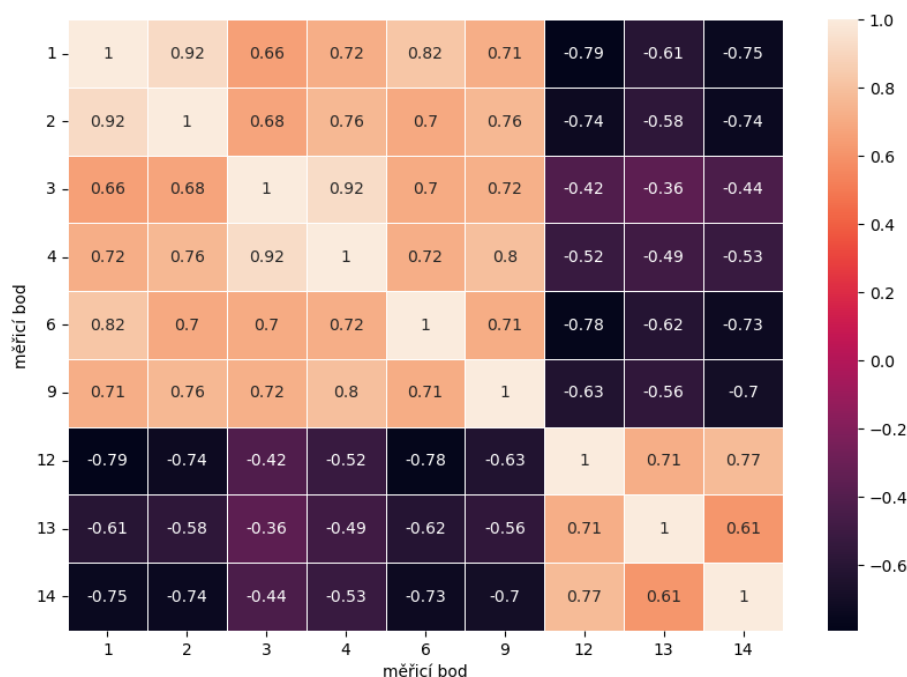
Na Obr. 3.7 jsou znázorněny korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR naměřenými sondami na koruně i u paty odvalu během jednoho měsíce od 1. 7. do 1. 8. 2021. Ze schématu je patrná silnější korelace mezi hodnotami OAR naměřenými v některých bodech u paty odvalu, např. mezi hodnotami OAR naměřenými v bodech „1“ a „2“ činí korelační koeficient 0,73.



Obr. 3.7: Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („1“, „2“, „3“, „4“, „6“ a „9“) a na koruně odvalu („12“, „13“ a „14“) vypočtené pro měsíční období od 1. 7. do 1. 8. 2021

Silnější korelace mezi hodnotami OAR v jednotlivých měřicích bodech byla prokázána v kratších časových úsecích. Na Obr. 3.8 jsou znázorněny korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR ve stejných bodech jako na předchozím schématu, zde však pouze pro týdenní období od 29. 5. do 6. 6. 2021. Ze schématu je patrná silná kladná korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty odvalu i na koruně odvalu. Např. mezi hodnotami OAR z měřicích bodů „1“ a „2“, které jsou od sebe vzdáleny pouze několik desítek metrů, činí korelační koeficient 0,92. To může být zapříčiněno např. tím, že díky malé vzdálenosti jsou tyto body napříč odvalem propojeny.

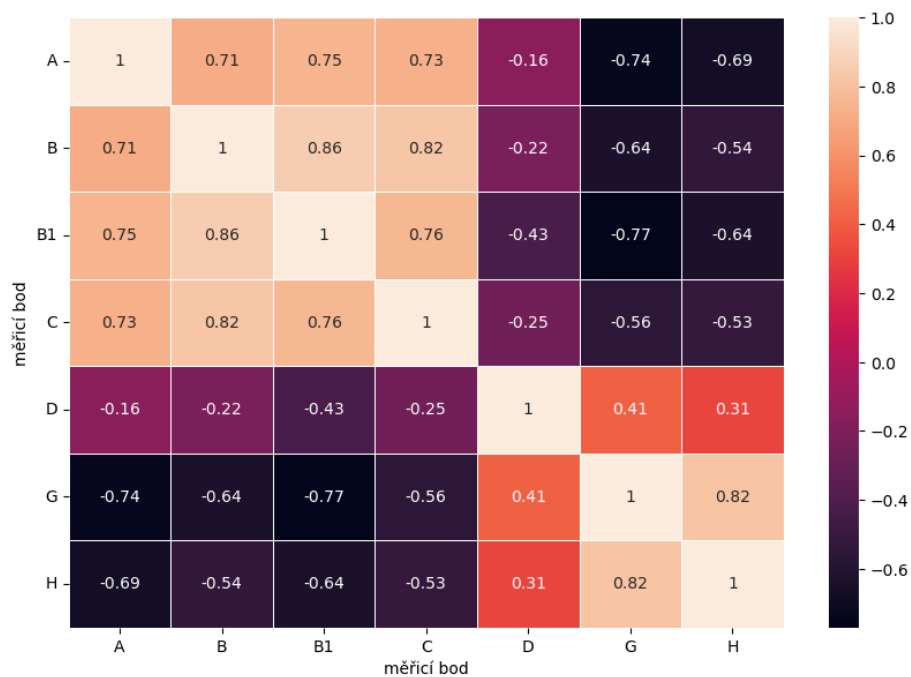
Silnější korelace mezi hodnotami OAR v jednotlivých bodech však byla prokázána i v delších časových úsecích. Na Obr. 3.9 jsou znázorněny korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR naměřenými sondami na koruně i u paty



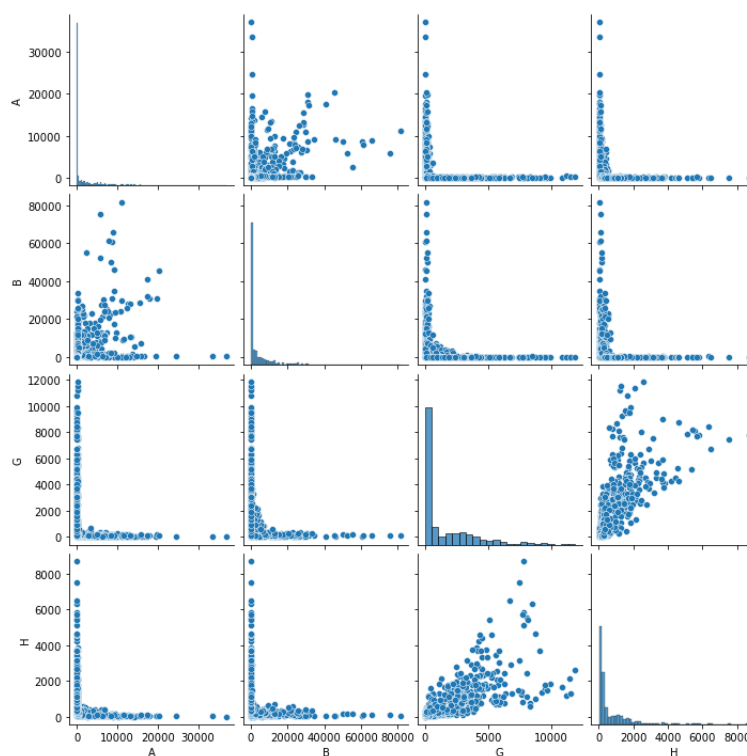
Obr. 3.8: Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („1“, „2“, „3“, „4“, „6“ a „9“) a na koruně odvalu („12“, „13“ a „14“) vypočtené pro týdenní období od 29. 5. do 6. 6. 2021

odvalu během jednoho měsíce od 1. 9. do 1. 10. 2022. V tomto případě, i přes dlouhý časový interval, byla zjištěna silná kladná korelace jak mezi hodnotami OAR u paty odvalu, tak mezi hodnotami OAR na koruně odvalu. Ze schématu jsou dále patrné záporné hodnoty korelačních koeficientů mezi OAR u paty odvalu a na koruně odvalu. Ty však nevypovídají o silné antikorelaci mezi těmito hodnotami, jelikož vztah mezi nimi není lineární. To je patrné např. z Obr. 3.10, kde jsou proti sobě vynešeny hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“ a „B“ u paty a v bodech „G“ a „H“ na koruně odvalu. Můžeme vidět, že mezi hodnotami OAR u paty odvalu a na koruně odvalu rozhodně neplatí lineární závislost. Z Obr. 3.10 je pouze patrná korelace hodnot OAR naměřených v bodech „A“ a „B“ a také v bodech „G“ a „H“.

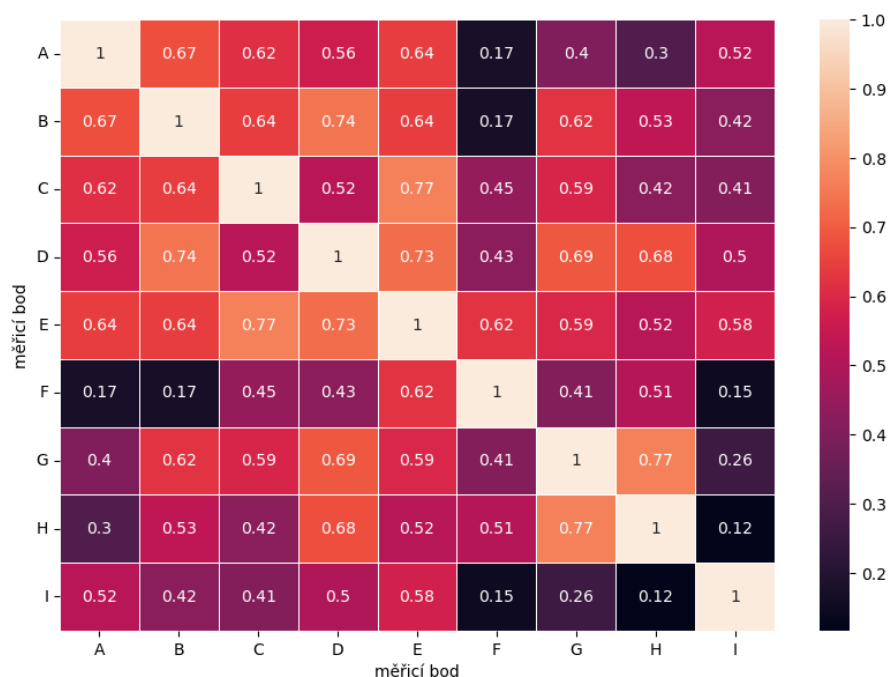
Silnější korelace mezi hodnotami OAR v některých měřicích bodech byly zjištěny také v zimním období, jak je znázorněno na Obr. 3.11. Zajímavé je, že v tomto případě byla silná kladná korelace prokázána i mezi hodnotami OAR u paty odvalu a na koruně odvalu. Např. korelační koeficient vyjadřující korelaci v OAR mezi bodem „C“ u paty odvalu a bodem „E“ na koruně odvalu činí 0,77. Ze schématu je dále patrné, že mezi hodnotami OAR v jednotlivých bodech nebyla prokázána záporná korelace, což je velký rozdíl oproti výše diskutovaným situacím z letního období.



Obr. 3.9: Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („A“, „B“, „B1“ a „C“) a na koruně odvalu („D“, „G“ a „H“) vypočtené pro měsíční období od 1. 9. do 1. 10. 2022



Obr. 3.10: Hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech u paty („A“ a „B“) a na koruně odvalu („G“ a „H“) v období od 1. 9. do 1. 10. 2022



Obr. 3.11: Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („A“, „B“ a „C“) a na koruně odvalu („D“, „E“, „F“, „G“, „H“ a „I“) vypočtené pro týdenní období od 27. 2. do 6. 3. 2022

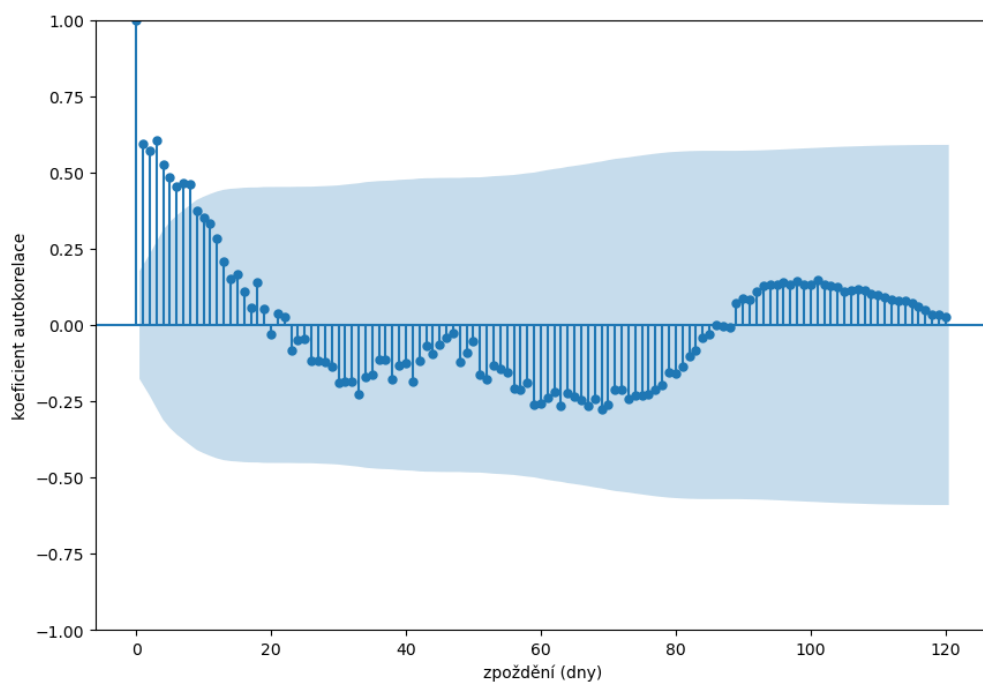
3.3.2 Autokorelace OAR

Autokorelace v časové řadě je korelace počítaná mezi časovou řadou a její zpožděnou kopií. Míru či sílu autokorelace vyjadřuje autokorelační koeficient, který nabývá hodnot od -1 do $+1$. V případě nulového zpoždění je autokorelační koeficient roven jedné, jelikož je v takovém případě počítána korelace mezi dvěma naprosto stejnými časovými řadami [71].

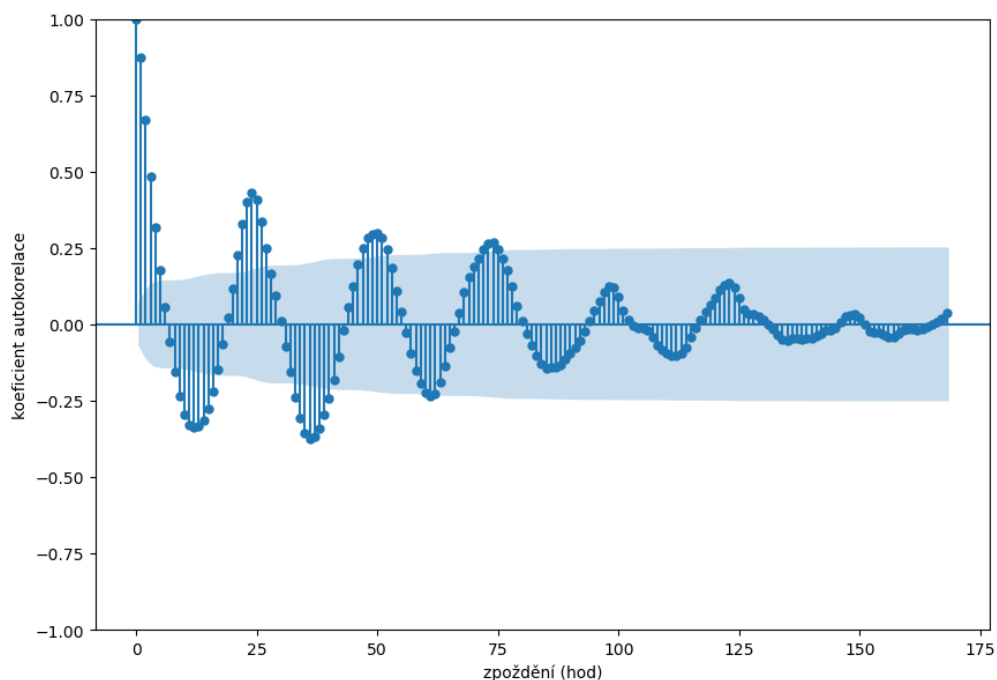
Na Obr. 3.12 je znázorněna autokorelace průměrných denních hodnot OAR naměřených v měřicím bodu „A“ ve výšce 1,5 m v průběhu 4 měsíců od 1. 6. do 1. 10. 2022 vypočítaná pro zpoždění v řádu dnů. Z grafu je patrná silnější autokorelace v hodnotách OAR při zpoždění do 10 dnů. Při větším zpoždění je již autokorelace slabá a hodnota autokorelačního koeficientu se většinou pohybuje v rozmezí od $-0,25$ do $+0,25$. Je to dáno tím, že s větším časovým odstupem je pravděpodobnější určitá změna v chování hodnot OAR zapříčiněná např. změnou počasí.

Z Obr. 3.12 je patrné, že autokorelace v hodnotách OAR by měla být silnější při menším zpoždění, např. v řádu hodin. Pro potvrzení této úvahy je na Obr. 3.13 znázorněna autokorelace hodnot OAR naměřených v měřicím bodu „A“ ve výšce 1,5 m v průběhu 1 týdne od 6. 8. do 13. 8. 2022 vypočítaná pro zpoždění v řádu hodin. V tomto týdnu byly mj. naměřeny společné průběhy v hodnotách OAR ve skupině měřicích bodu u paty odvalu, které jsou znázorněny na Obr. 3.6. Z Obr. 3.13 je patrná zejména silná kladná autokorelace, která nastává se zpožděním v intervalu 24 hodin. Ta je zapříčiněna denními průběhy v hodnotách OAR. V intervalu 12 hodin nastává záporná autokorelace, která je však slabší než zmíněná kladná autokorelace.

Se zvětšujícím se zpožděním jsou pak autokorelace slabší. Je zapotřebí zdůraznit, že takto silná autokorelace v hodnotách OAR není pravidlem, při analýze byly vybrány rovněž jiné časové úseky v jiných měřicích bodech, kde byla autokorelace většinou slabší.



Obr. 3.12: Autokorelace hodnot OAR naměřených v měřicím bodu „A“ ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 1. 6. do 1. 10. 2022 vypočítaná pro zpoždění v řádu dnů



Obr. 3.13: Autokorelace hodnot OAR naměřených v měřicím bodu „A“ ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 6. 8. do 13. 8. 2022 vypočítaná pro zpoždění v řádu hodin

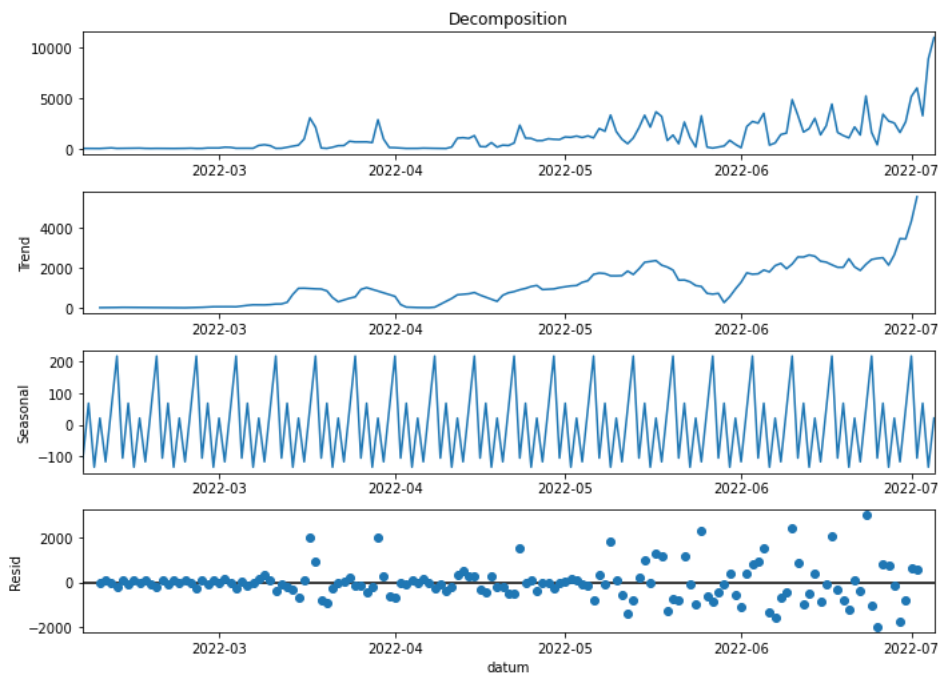
3.4 Dekompozice časových řad OAR

Provedením dekompozice lze časové řady rozdělit na několik složek, mezi nejčastější patří [72]:

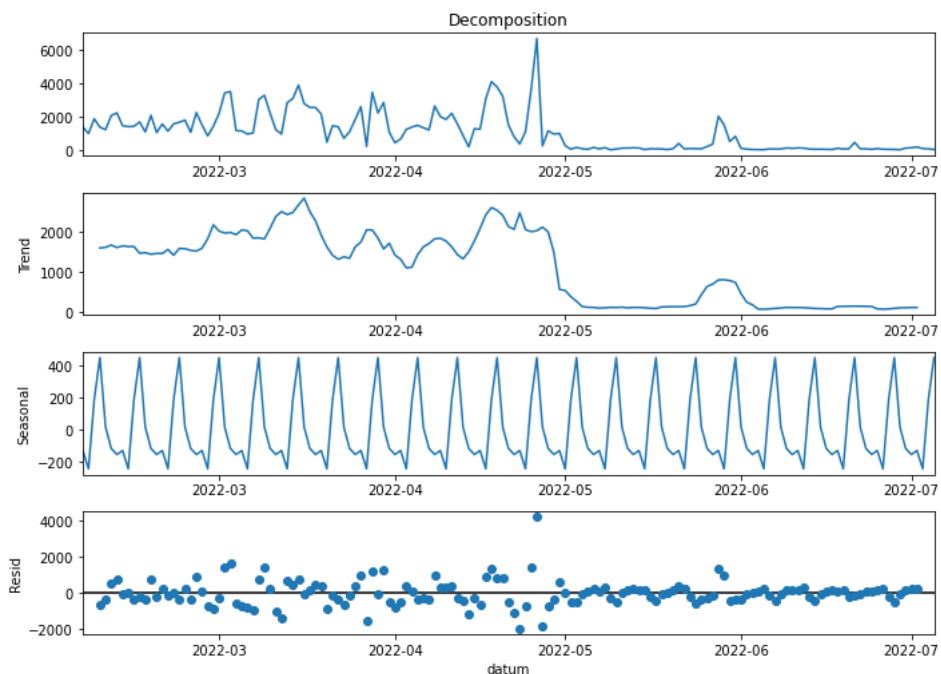
- sezónnost (seasonality) – popisuje periodický signál v časové řadě
- trend – popisuje, zda je časová řada klesající, konstantní nebo rostoucí v čase
- šum (noise) – popisuje, co v časové řadě zůstává po oddělení sezónnosti a trendu

Na Obr. 3.14 a Obr. 3.15 jsou znázorněny dekompozice časových řad OAR naměřených v měřicích bodech „A“ u paty odvalu a „G“ na koruně odvalu v období od 5. 2. do 5. 7. 2022.

V prvním případě, u časové řady OAR získané v měřicím bodu „A“ u paty odvalu, je zřetelný rostoucí trend v hodnotách OAR, což odpovídá již diskutovaným sezónním variacím, kdy v zimním období jsou hodnoty OAR u paty odvalu nižší než v letním období. Naopak v časové řadě OAR získané v měřicím bodu „G“ na koruně odvalu je patrný klesající trend. V obou časových řadách je dále patrná periodicitu zapříčiněná denními variacemi v hodnotách OAR.



Obr. 3.14: Dekompozice časové řady OAR naměřených v měřicím bodu „A“ u paty odvalu v období od 5. 2. do 5. 7. 2022

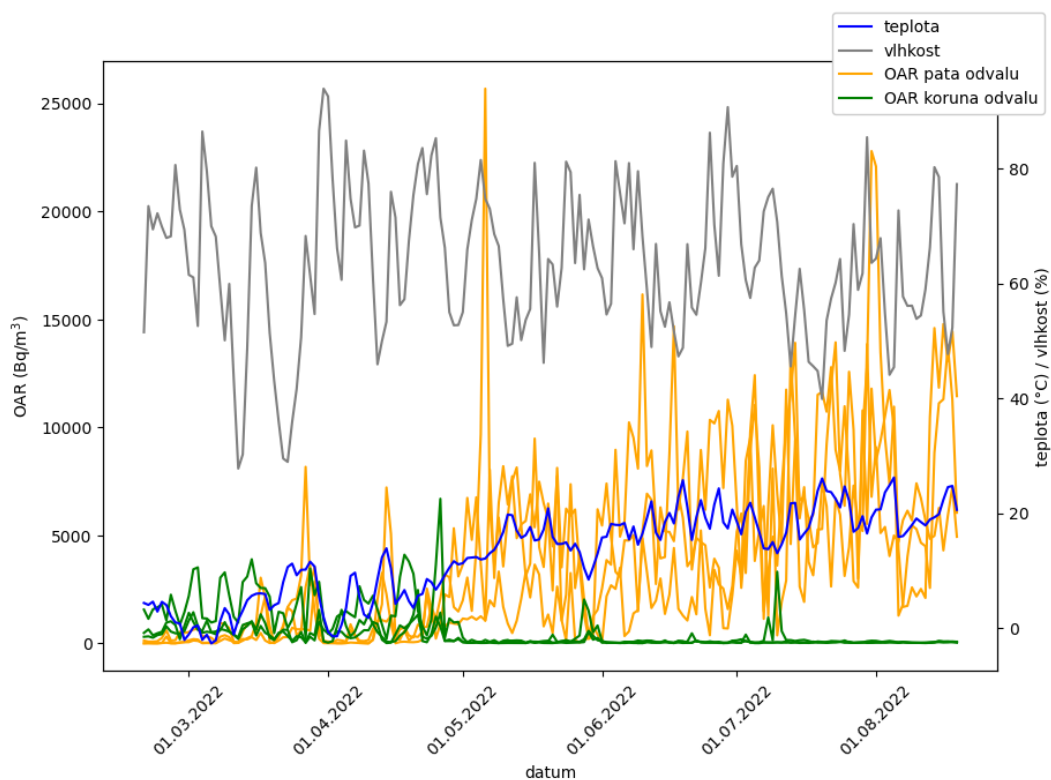


Obr. 3.15: Dekompozice časové řady OAR naměřených v měřicím bodu „G“ na koruně odvalu v období od 5. 2. do 5. 7. 2022

3.5 Souvislost mezi OAR a meteorologickými podmínkami

3.5.1 Teplota a vlhkost

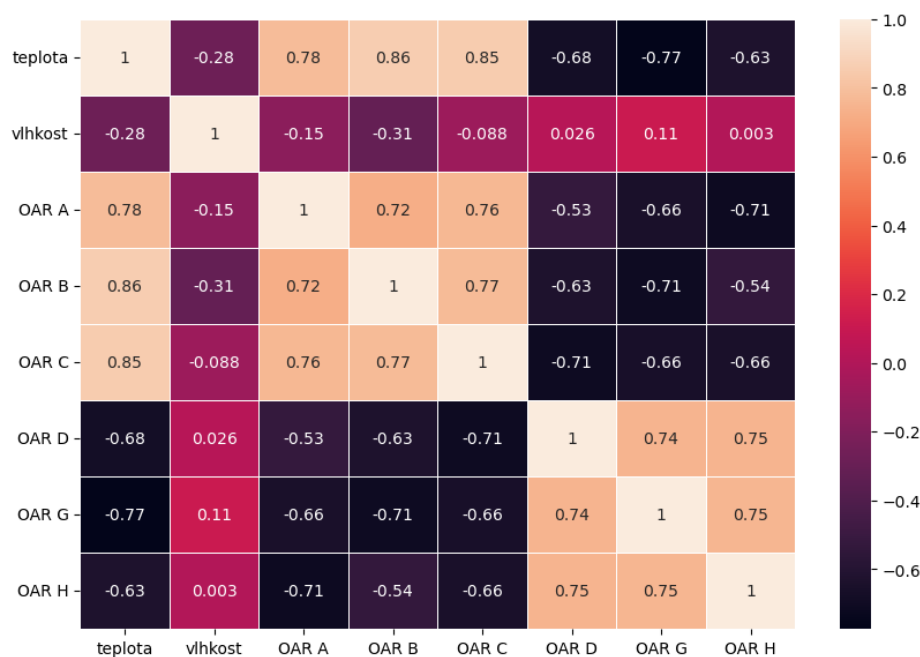
Souvislost naměřených hodnot OAR a teploty byla již částečně prokázána v jedné z předchozích částí, kde byly diskutovány denní a sezónní variace v hodnotách OAR. Na Obr. 3.16 jsou znázorněny průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a průměrné denní hodnoty teploty a vlhkosti naměřené meteostanicí v půlročním období od 19. 2. do 19. 8. 2022. Jak již bylo řečeno, po zvýšení průměrné denní teploty nad cca 10 °C ve druhé polovině dubna došlo k obratu proudění plynu odvalem. Od této doby se snížily průměrné denní hodnoty OAR na koruně odvalu, naopak u paty odvalu se zvýšily a dosahovaly až k několika desítkám tisíc Bq/m³.



Obr. 3.16: Průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a průměrné denní hodnoty teploty a vlhkosti naměřené meteostanicí v půlročním období od 19. 2. do 19. 8. 2022

Z uvedeného vyplývá možná korelace hodnot OAR a teploty. Na Obr. 3.19 jsou proto pro stejné měřicí body a stejná období uvedeny korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi OAR, teplotou a vlhkostí. Ze schématu je patrná silná korelace mezi hodnotami OAR naměřenými u paty odvalu a teplotou, např. v případě měřicího bodu „B“ činí korelační koeficient 0,86. Dále zde můžeme vidět silnější antikorelaci mezi hodnotami OAR naměřenými na koruně odvalu a teplotou. Toto odpovídá

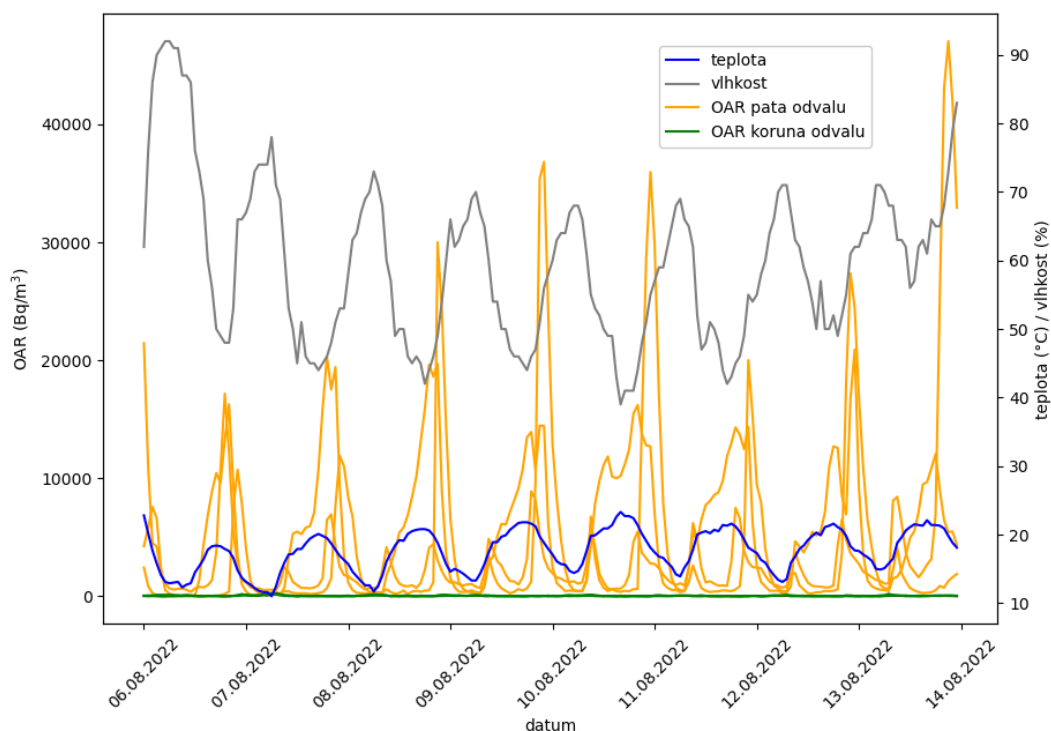
Obr. 3.16, kde je patrné, že se po zvýšení teploty hodnoty OAR u paty odvalu zvýšily a naopak hodnoty OAR na koruně odvalu se snížily. Co se týče korelace mezi hodnotami OAR a vlhkostí, tak ta nebyla pro delší časové období prokázána.



Obr. 3.17: Korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi průměrnými denními hodnotami OAR naměřenými v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a průměrnými denními hodnotami teploty a vlhkosti naměřenými meteostanicí v půlročním období od 19. 2. do 19. 8. 2022

Po analýze korelace mezi hodnotami OAR, teploty a vlhkosti v delším časovém období (6 měsíců) se nabízí otázka, zda bude situace obdobná i pro kratší období. Pro takové srovnání byl vybrán týden do 6. 8. do 13. 8. 2022, ve kterém byly naměřeny společné průběhy v hodnotách OAR v měřicích bodech u paty odvalu. Na Obr. 3.18 jsou znázorněny hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a hodnoty teploty a vlhkosti naměřené meteostanicí v tomto týdnu. Z grafu je patrné, že maxima OAR u paty odvalu byla dosahována těsně po dosažení maximální teploty a minimální relativní vlhkosti. Dále můžeme pozorovat jistou antikorelaci mezi teplotou a vlhkostí, která je přímým důsledkem vztahu mezi absolutní vlhkostí, teplotou a relativní vlhkostí.

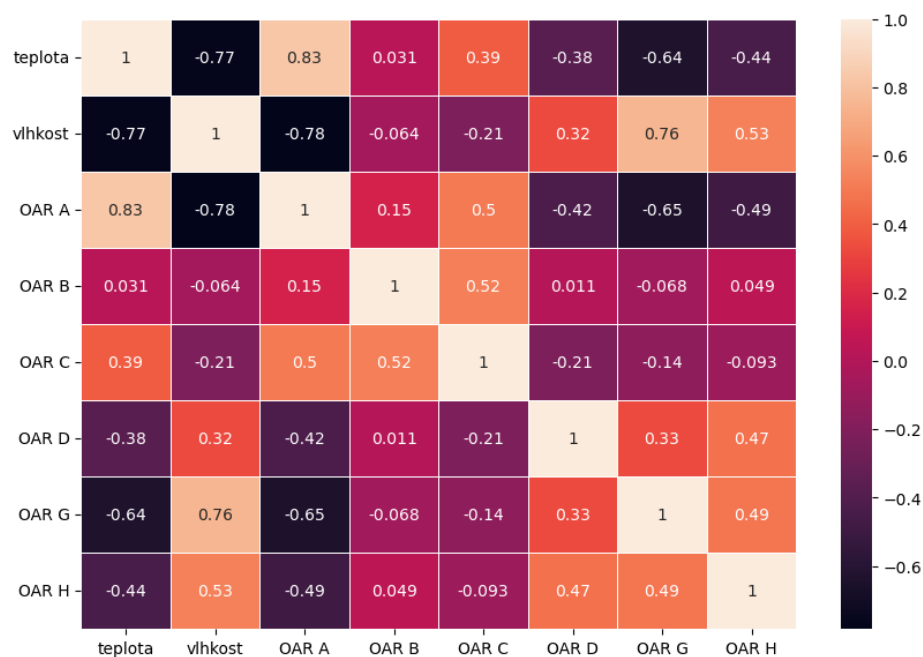
To potvrzuje i hodnota korelačního koeficientu mezi teplotou a vlhkostí na Obr. 3.19, která činí $-0,77$. Na tomto schématu jsou znázorněny korelační koeficienty mezi OAR, teplotou a vlhkostí pro stejné měřicí body v uvedeném srpnovém týdnu. Zde je situace odlišná oproti půlročnímu období a není pravidlem, že hodnoty OAR u paty odvalu s teplotou korelují a hodnoty OAR na koruně odvalu s ní antikorelují. Např. korelační koeficient mezi teplotou a OAR v měřicím bodu „A“ činí $0,83$, kdežto v případě měřicího bodu „B“ je to pouze $0,031$. Celkově platí, že korelace mezi hodnotami OAR u paty odvalu a teplotou a antikorelace mezi hodnotami OAR na koruně odvalu a teplotou jsou zpravidla slabší oproti delšímu časovému období. V tomto případě je také patrná antikorelace mezi OAR u paty odvalu a vlhkostí či



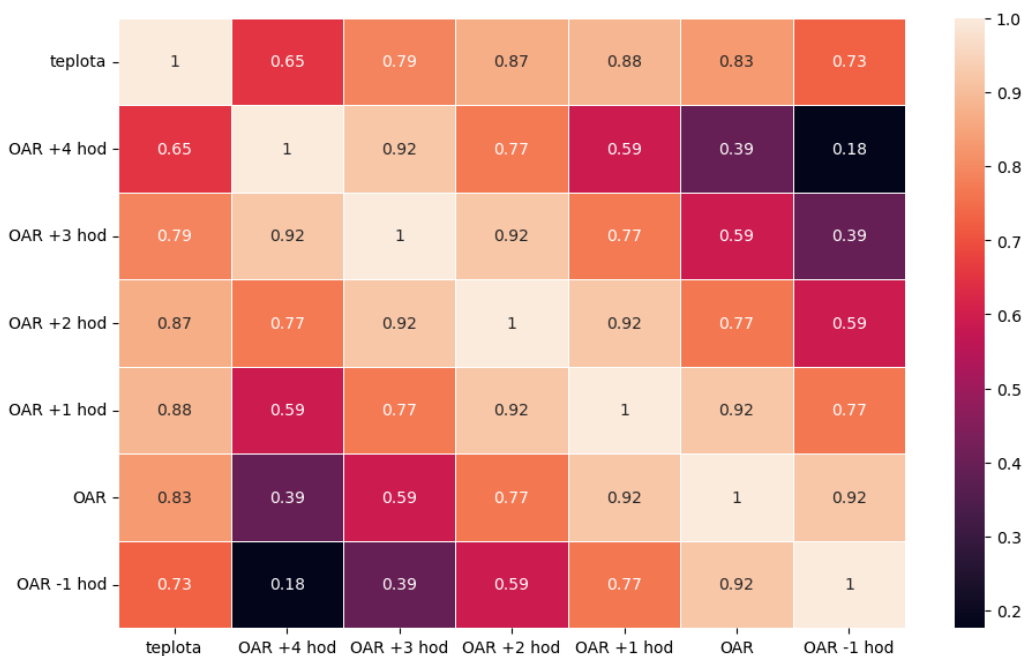
Obr. 3.18: Hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a hodnoty teploty a vlhkosti naměřené meteostanicí v týdnu od 6. 8. do 13. 8. 2022

korelace mezi OAR na koruně odvalu a vlhkostí, což však spolu s předchozí větou potvrzuje již zmíněnou antikorelaci mezi teplotou a vlhkostí.

Silnější korelace mezi OAR u paty odvalu a teplotou během týdenního období byla prokázána v měřicím bodu „B“, kde, jak již bylo řečeno, činí hodnota korelačního koeficientu 0,83. Dále je zapotřebí zjistit, zda hodnoty OAR nereagují na teplotu s určitým zpožděním a zda nebude v takovém případě korelace silnější. Na Obr. 3.20 jsou znázorněny korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi různě zpožděnými hodnotami OAR naměřenými v tomto bodu během stejného týdne. Ze schématu je patrné, že nejvíce s teplotou korelují hodnoty OAR naměřené o hodinu později, hodnota korelačního koeficientu je však v takovém případě vyšší pouze o 0,05. Jedná se však o potvrzení, že hodnoty OAR reagují na změnu teploty se zpožděním, které činí přibližně 1 hodinu. V případě ostatních měřicích bodů je situace podobná.



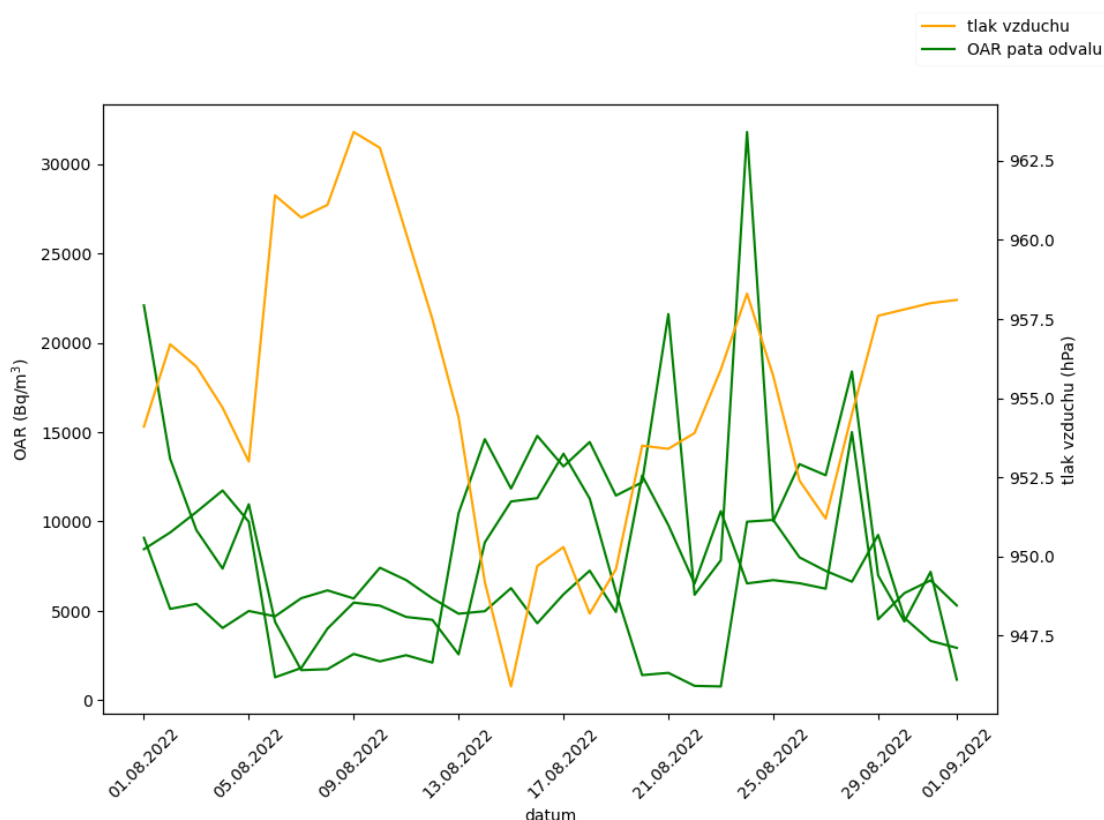
Obr. 3.19: Korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi hodnotami OAR naměřenými v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a hodnotami teploty a vlhkosti naměřenými meteostanicí v týdnu od 6. 8. do 13. 8. 2022



Obr. 3.20: Korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi různě zpožděnými hodnotami OAR naměřenými v měřicím bodu „B“ a teplotou naměřenou meteostanicí v týdnu od 6. 8. do 13. 8. 2022

3.5.2 Tlak vzduchu

Souvislost mezi tlakem vzduchu a hodnotami OAR byla zkoumána pro různě dlouhá časová období a různé měřicí body. Na Obr. 3.21 jsou znázorněny průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“ a „C“ u paty odvalu a průměrné denní hodnoty tlaku vzduchu naměřené během srpna 2022. Z hodnot naměřených v prvních 14 dnech pozorovaného období je patrné, že při zvýšení tlaku vzduchu docházelo ke snížení OAR, přičemž na konci tohoto období tato závislost není zcela zřejmá. Možnou antikorelaci však potvrzují hodnoty korelačních koeficientů, které ve stejném období činí $-0,42$ pro měřicí bod „B“ a $-0,68$ pro měřicí bod „C“. V případě delších časových období byla však antikorelace slabší a hodnoty korelačních koeficientů byly většinou v rozmezí od $-0,2$ do 0 .

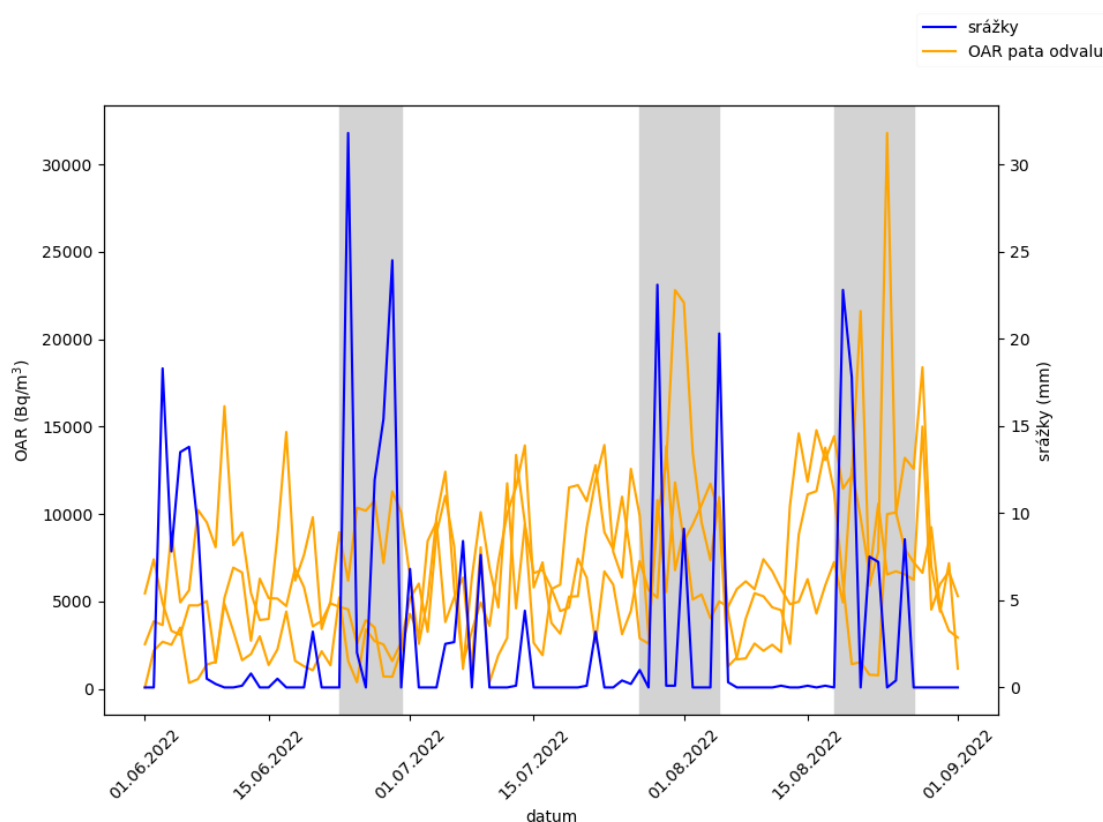


Obr. 3.21: Průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“ a „C“ u paty odvalu a průměrné denní hodnoty tlaku vzduchu, naměřené během srpna 2022

3.5.3 Srážky

Na Obr. 3.22 jsou znázorněny průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“ a „C“ u paty odvalu a hodnoty denních srážek v období od 1. 6. do 1. 9. 2022, přičemž šedou barvou jsou zvýrazněna období s vyššími srážkami. Na první pohled není patrný žádný vliv vyšších srážek na hodnoty OAR, což potvrzují i hodnoty korelačních koeficientů mezi denním úhrnem srážek a průměrnými den-

ními hodnotami OAR, jejichž hodnoty se pohybují v intervalu od $-0,3$ do $+0,2$. Souvislost mezi množstvím srážek a OAR nebyla dále prokázána ani při srovnání hodinových a týdenních dat.



Obr. 3.22: Průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“ a „C“ u paty odvalu a hodnoty denních srážek v období od 1. 6. do 1. 9. 2022 (šedou barvou zvýrazněna období s vyššími srážkami)

3.5.4 Doba slunečního svitu

Jelikož meteostanice umístěná na těžní věži nezaznamenávala dobu slunečního svitu, tak byla tato data převzata z meteostanice ČHMÚ v Příbrami (P1PRIB01) [73]. Souvislost mezi denní dobou slunečního svitu a průměrnými denními hodnotami OAR byla zkoumána pro různě dlouhá časová období během roku 2022 a pro různé měřicí body. Souvislost však nebyla prokázána. Pouze slabší korelace byla sledována mezi denní dobou svitu a průměrnými denními hodnotami OAR v některých měřicích bodech u paty odvalu v kratších časových úsecích v letním období. Ta však může souviset s vyššími teplotami, které jsou v letním období měřeny zpravidla při slunných dnech a za uvedenou slabou korelací mezi OAR a dobou slunečního svitu může být skryta již popsaná korelace mezi OAR a teplotou.

3.5.5 Rychlost a směr větru

Souvislost mezi rychlostí či směrem větru a hodnotami OAR byla podrobněji zkoumána již v rámci výzkumného úkolu [2]. Bylo zjištěno, že při určitém směru větru se vyšší hodnoty OAR vyskytují v měřicích bodech, které jsou proti tomuto směru větru chráněny buď samotným odvalem nebo např. keřovým porostem. V takovém případě panuje v daném měřicím bodu bezvětří, popř. zde vane pouze slabý vítr, vydechnutý aerosol z odvalu není větrem odnášen pryč a dochází zde k jisté akumulaci radonu.

V měřicích bodech, které nejsou nijak chráněny proti větru, tedy především v měřicích bodech na koruně odvalu, byla prokázána souvislost mezi OAR a rychlostí větru. Bylo zjištěno, že v takových místech průměrné hodnoty OAR klesají se zvyšující se rychlostí větru. Tato závislost je nejvýraznější v zimním a jarním období v měřicích bodech na koruně odvalu, kdy jsou hodnoty OAR na koruně vyšší, naopak v létě již tato závislost díky nižším hodnotám OAR není patrná. Závislost dále není tak výrazná v měřicích bodech u paty odvalu, které jsou proti větru chráněny stromy či samotným odvalem.

3.6 Srovnání naměřených hodnot OAR s ostatními detektory

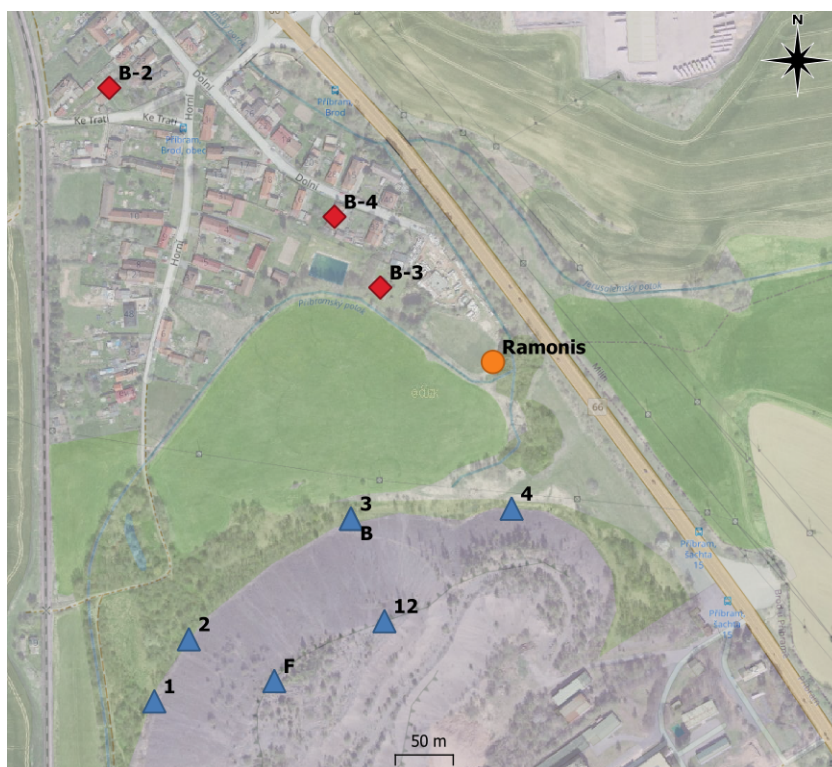
V okolí příbramských odvalů se nachází několik profesionálních měřicích stanic či detektorů, které monitorují hodnoty OAR nebo EOAR. V okolí odvalu š. č. 15 to jsou stanice Ramonis spravovaná SÚRO, v.v.i. a také čtyři detektory ALGADE v lokalitách Brod B-2, B-3, B-4 a Lešetice spravované DIAMO, s.p. Tato část přináší srovnání hodnot OAR naměřených sondami na odvalu a hodnot OAR/EOAR naměřených zmíněnými detektory. Na Obr. 3.23 jsou znázorněna umístění vybraných sond na odvalu a detektorů v okolí odvalu, mezi jejichž naměřenými hodnotami bylo provedeno porovnání.

3.6.1 Ramonis

Za poskytnutí dat ze stanice děkujeme Ing. Karlu Jílkovi ze SÚRO, v.v.i. Srovnání naměřených dat sondami na odvalu a stanicí Ramonis umístěné na JV okraji obce Brod bylo provedeno pro 11–15 dnů v každé měřicí kampani, konkrétně pro období:

- 22. 7. – 1. 8. 2021 v 1. měřicí kampani
- 1. 3. – 15. 3. 2022 ve 2. měřicí kampani
- 22. 7. – 1. 8. 2022 ve 3. měřicí kampani

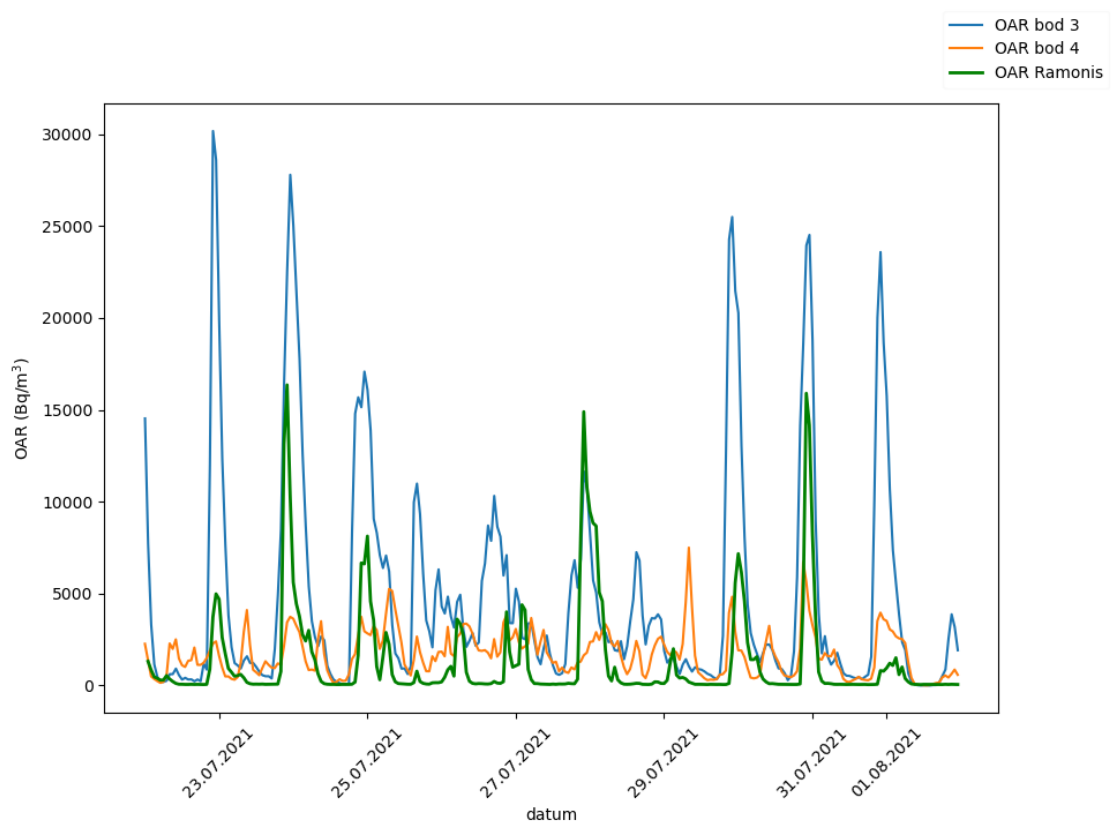
Na Obr. 3.24 jsou znázorněny hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a sondami umístěnými v měřicích bodech „3“ a „4“ ve výšce 1,5 m u paty odvalu v letním období od 23. 7. do 1. 8. 2021. Z grafu je patrný společný průběh v hodnotách OAR,



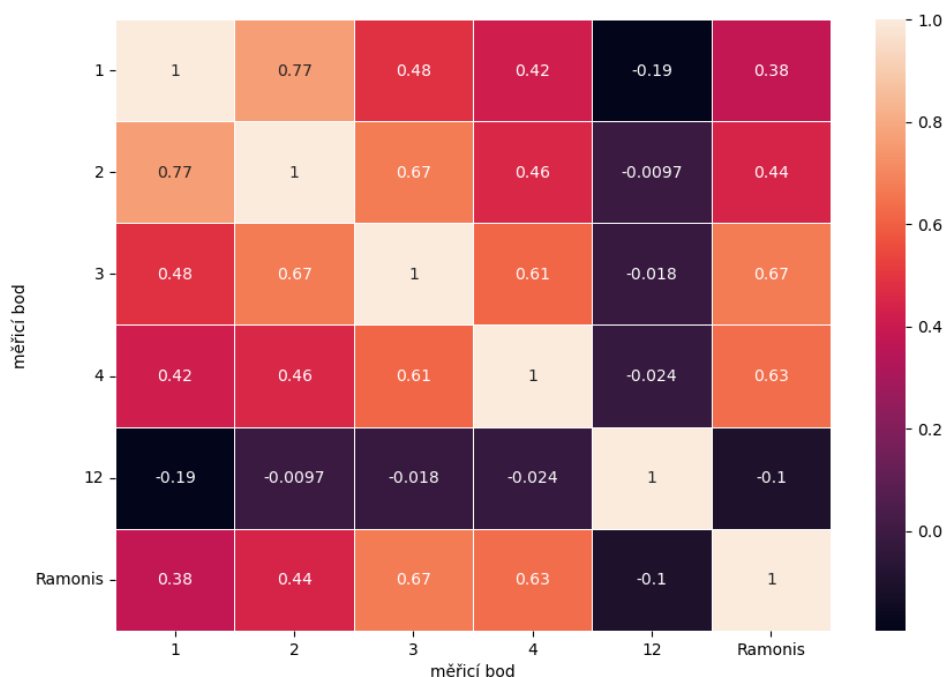
Obr. 3.23: Umístění detektorů ALGADE (červeně), stanice Ramonis (oranžově) a vybraných sond na odvalu (modře), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

příčměž na odvalu byly hodnoty OAR zpravidla vyšší než u stanice Ramonis. Dále je z grafu patrné, že u stanice Ramonis klesly hodnoty OAR v určitých částech dne až k nulovým hodnotám, příčměž na odvalu tomu tak nebylo. Ačkoli byly hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis nižší než hodnoty OAR na odvalu, tak v maximech, která v letním období nastávají v nočních hodinách, dosahovaly až $15\,000\text{ Bq/m}^3$. Na Obr. 3.25 jsou znázorněny korelační koeficienty vyjadřující korelaci mezi hodnotami OAR naměřenými stanicí Ramonis a hodnotami OAR naměřenými sondami v měřicích bodech „1“, „2“, „3“, „4“ ve výšce 1,5 m u paty odvalu a měřicím bodu „12“ v hlusině na koruně odvalu. Z korelačních koeficientů je v uvedeném období patrná silnější korelace mezi OAR u paty odvalu a OAR naměřenou stanicí Ramonis, naopak korelace mezi OAR na koruně odvalu a OAR naměřenou stanicí je téměř nulová, hodnota korelačního koeficientu je $-0,1$. Ze sond na odvalu se stanicí Ramonis nejvíce korelovaly hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „3“ a „4“, což je velmi pravděpodobně způsobeno tím, že tyto body byly stanicí nejbližší, jak je patrné z již zmíněné mapy na Obr. 3.23. Korelační koeficienty v tomto případě činily 0,67 a 0,63. Naopak hodnoty OAR naměřené v měřicím bodu „1“, který se nachází ve větší vzdálenosti od stanice Ramonis, s ní korelovaly méně, příčměž korelační koeficient činil 0,38.

Na Obr. 3.26 jsou znázorněny hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a sondami umístěnými ve výšce 1,5 v měřicích bodech „B“ u paty odvalu a „F“ na koruně odvalu v zimním období od 1. 3. do 15. 3. 2022. Již bylo řečeno, že v zimním období jsou hodnoty OAR u paty odvalu nižší než na koruně odvalu, což tento graf potvr-



Obr. 3.24: Hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a přilehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „3“ a „4“ ve výšce 1,5 m v období od 22. 7. do 1. 8. 2021

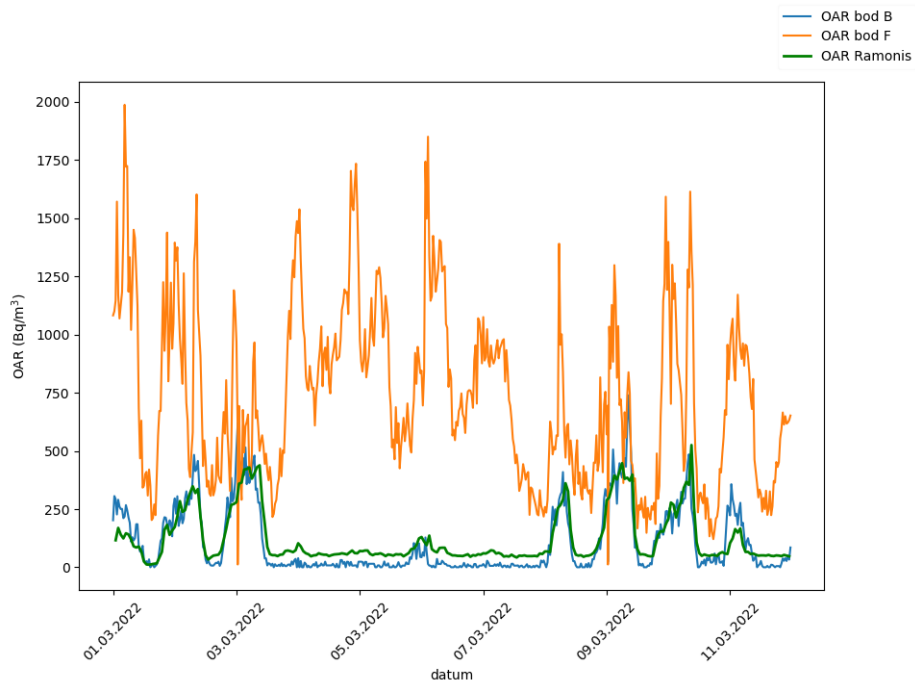


Obr. 3.25: Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR naměřenými stanicí Ramonis a přilehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „1“, „2“, „3“, „4“ (pata odvalu) a „12“ (koruna odvalu) v období od 22. 7. do 1. 8. 2021

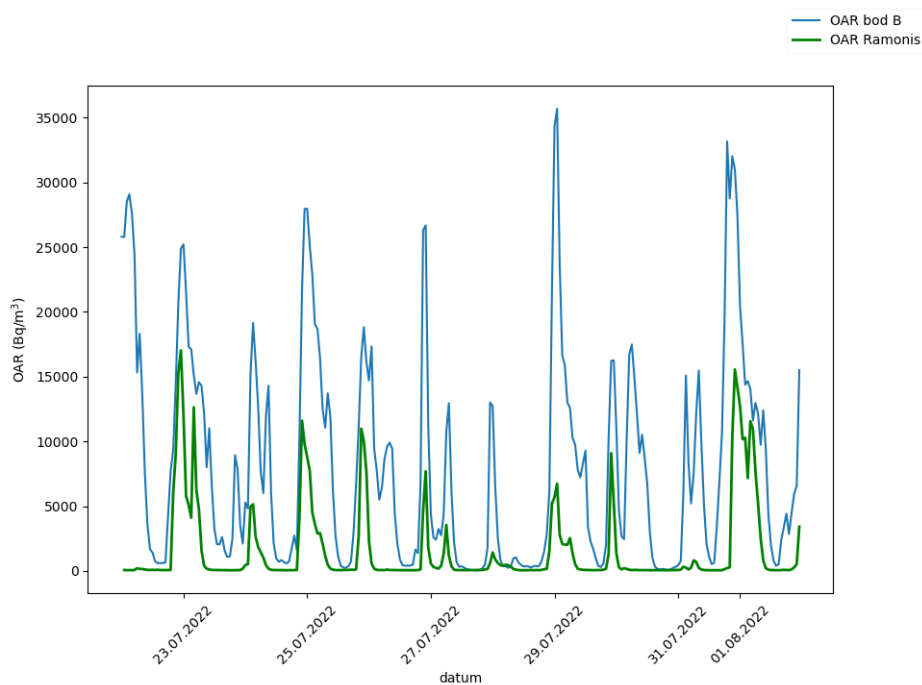
zuje. Můžeme na něm opět vidět společný průběh v hodnotách OAR naměřených stanicí Ramonis a sondou umístěnou v bodu „B“ u paty odvalu. V tomto období byly stanicí Ramonis naměřeny vyšší hodnoty OAR než sondou u paty odvalu, nejvyšší hodnoty OAR přitom byly naměřeny sondou na koruně odvalu. Hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis byly zároveň výrazně nižší než v letním období a většinou nepřekročily hodnotu 500 Bq/m³.

Na Obr. 3.26 jsou znázorněny hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a sondou umístěnou ve výšce 1,5 v měřicím bodu „B“ u paty odvalu v letním období od 22. 7. do 1. 8. 2022. V tomto případě je situace podobná jako s již diskutovaným obdobím z léta 2021. I zde je patrný společný průběh v hodnotách OAR, přičemž sondou na odvalu byly naměřeny vyšší hodnoty OAR, stanice Ramonis naměřila nižší hodnoty OAR, které v určitých částech dne klesaly téměř k nulovým hodnotám. I v tomto období však byly zejména v nočních hodinách stanicí Ramonis naměřeny velmi vysoké hodnoty OAR dosahující až 15 000 Bq/m³.

Lze tedy říci, že hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis mají společný průběh a dobře korelují s hodnotami OAR naměřenými sondami umístěnými u severní paty odvalu ve výšce 1,5 m nad terénem, přičemž korelace je silnější u sond umístěných blíže ke stanici Ramonis. Zároveň platí, že hodnoty OAR naměřené na odvalu jsou vyšší než hodnoty naměřené stanicí Ramonis. V diskutovaných obdobích, konkrétně v létě v nočních hodinách, byly stanicí Ramonis naměřeny vysoké hodnoty OAR dosahující až 15 000 Bq/m³. Průměrné hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis činily v pozorovaných obdobích v 1. měřicí kampani (léto 2021) 1 324 Bq/m³, ve



Obr. 3.26: Hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a přilehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „B“ a „F“ ve výšce 1,5 m v období od 1. 3. do 15. 3. 2022



Obr. 3.27: Hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a přilehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „B“ a „B1“ ve výšce 1,5 m v období od 22. 7. do 1. 8. 2022

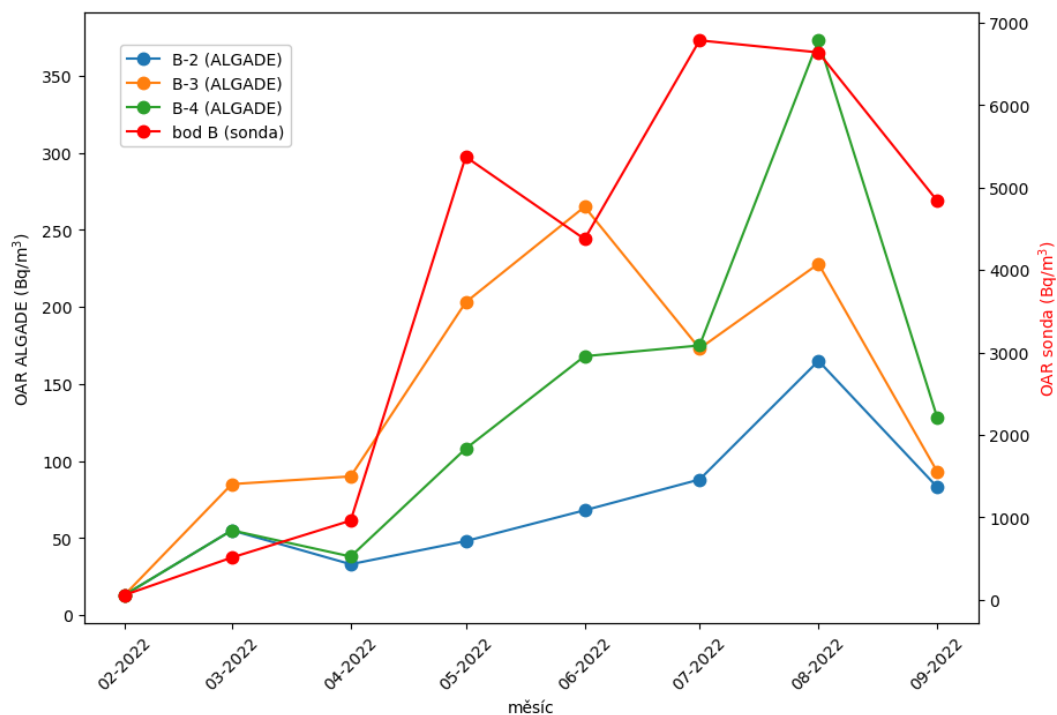
2. měřicí kampani (zima 2022) 127 Bq/m^3 a ve 3. měřicí kampani (léto 2022) to bylo $1\,630 \text{ Bq/m}^3$.

3.6.2 ALGADE

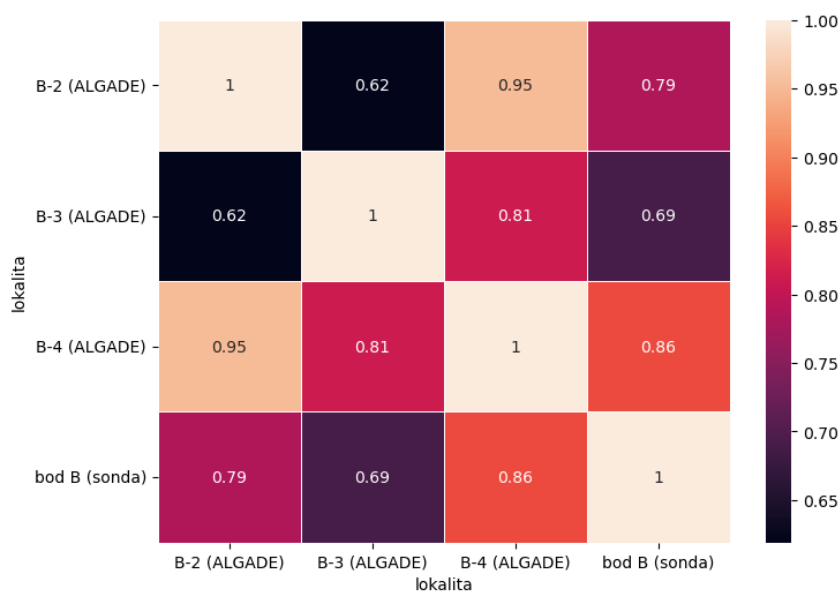
Za poskytnutí nejnovějších dat z detektorů ALGADE děkujeme Ing. Radku Bicanovi z DIAMO, s.p. [74] Pro srovnání naměřených dat z detektorů ALGADE a ze sond na odvalu bylo vybráno souvislé období od února do září 2022. Srovnání bylo provedeno pro sondu umístěnou v měřicím bodu „B“ ve výšce 1,5 m u severní paty odvalu přilehlé k obci Brod a pro tři detektory ALGADE umístěné v obci Brod v lokalitách B-2, B-3 a B-4, jejichž pozice jsou znázorněny na mapě na Obr. 3.23. Jelikož přístroje ALGADE měří EOAR, bylo zapotřebí tyto hodnoty přepočítat na OAR, k čemuž byl použit vztah 1.3 Bylo počítáno s hodnotou faktoru nerovnováhy $F = 0,4$, přičemž tato hodnota byla získána během společného měření na louce mezi odvalem a obcí Brod popsaném v kapitole 1.

Na Obr. 3.28 jsou znázorněny průměrné měsíční hodnoty OAR naměřené sondou v měřicím bodu „B“ ve výšce 1,5 m u paty odvalu a hodnoty OAR vypočtené z měsíčních hodnot EOAR naměřených detektory ALGADE v lokalitách Brod B-2, B-3 a B-4. Pro lepší čitelnost grafu jsou hodnoty OAR vypočítané z dat z detektorů ALGADE vyneseny na levé svislé ose a hodnoty OAR naměřené sondou na odvalu na pravé svislé ose. Také z tohoto grafu je patrný společný průběh v hodnotách OAR. Je zřejmé, že v zimních měsících byly hodnoty OAR v obci i na odvalu nižší než v letních měsících. Na odvalu dosahovaly průměrné měsíční hodnoty OAR až $7\,000 \text{ Bq/m}^3$, v obci Brod se většinou pohybovaly do 300 Bq/m^3 . Z třech stanic ALGADE v Brodu byly nejvyšší hodnoty OAR naměřeny v lokalitě B-4.

Zmíněné společné průběhy v hodnotách OAR potvrzují také korelační koeficienty na Obr. 3.29. Mezi hodnotami OAR naměřenými sondou na odvalu a hodnotami OAR stanovenými z hodnot EOAR získaných z detektorů ALGADE byla vypočtena významná korelace, korelační koeficienty nabývají hodnot 0,79, 0,69 a 0,86. Lze tedy říci, že hodnoty OAR na odvalu souvisí s hodnotami OAR v obci, přičemž se zvětšující se vzdáleností od odvalu hodnoty OAR klesají. Velmi silná korelace byla také vypočtena mezi detektory ALGADE umístěnými v lokalitách B-2 a B-4, korelační koeficient v tomto případě činil 0,95.



Obr. 3.28: Měsíční hodnoty OAR vypočtené z měsíčních hodnot EOAR naměřených detektory ALGADE v lokalitách B-2, B-3, B-4 [74] a průměrné měsíční hodnoty OAR naměřené u paty odvalu v měřícím bodu „B“ ve výšce 1,5 m



Obr. 3.29: Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR vypočtenými z měsíčních hodnot EOAR naměřených detektory ALGADE v lokalitách B-2, B-3, B-4 a průměrnými měsíčními hodnotami OAR naměřenými na odvalu v měřícím bodu „B“ ve výšce 1,5 m

Kapitola 4

Závěr

Tato diplomová práce svým tématem navazuje na bakalářskou práci Posouzení dopadu výskytu ^{222}Rn v tělese odvalu a jeho blízkém okolí z hlediska radiační ochrany z roku 2021 a výzkumný úkol Třísezónní monitorování odvalu š. č. 15 poblíž Brodu u Příbrami z roku 2022. Naměřená data získaná během let 2021–2022 byla v rámci diplomové práce sjednocena do společné databáze a získané časové řady byly podrobněji analyzovány.

Praktické měření probíhalo na odvalu š. č. 15 na Příbramsku, který je největším uranovým odvalem v České republice. Během 3 měřicích kampaní, které se uskutečnily v létě 2021, v zimě a na jaře 2022 a v létě 2022, zde bylo provedeno kontinuální monitorování OAR. K tomu byly použity sondy Tesla TERA TSR 4M/4S, které byly vždy v různém počtu umístěny převážně do předpokládaných míst výdechu plynu z odvalu. Těmi jsou v letním období, kdy proudí plyn odvalem směrem dolů, pata odvalu a v zimním období, kdy proudí plyn odvalem směrem nahoru, koruna odvalu. V první měřicí kampani byly sondy umístěny v hlušině nebo ve výšce 1,5 m nad terénem, od druhé měřicí kampaně pak byly umístěny pouze ve výšce. V roce 2022 byla k dispozici také data z meteostanice umístěné na těžní věži. Naměřená data ze sond a meteostanice byla sjednocena do společné databáze vytvořené v PostgreSQL, obsahující celkem 6 tabulek. Následně byla zpracována pomocí jazyka Python a jeho příslušných knihoven, přičemž mapy byly vytvořeny v prostředí QGIS.

V letním období v letech 2021 a 2022 byly u paty odvalu naměřeny vysoké hodnoty OAR. Průměrné hodnoty naměřené ve výšce 1,5 m nad terénem se v těchto místech pohybovaly v řádu tisíců Bq/m^3 , maximální hodnoty OAR pak dosahovaly několika desítek tisíc Bq/m^3 . Např. v létě 2022 byla nejvyšší průměrná hodnota OAR ve výšce 1,5 m nad terénem naměřena v měřicím bodu „C“ u východní paty odvalu a činila $6\,007 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Pokud vezmeme v úvahu běžnou hodnotu OAR ve venkovním prostředí, která činí $5 \text{ Bq}/\text{m}^3$, je uvedená hodnota naměřená u paty odvalu více než $1\,000\times$ vyšší. Zde je však zapotřebí zdůraznit, že vysoké hodnoty OAR byly naměřeny v místech s předpokládanými výdouchy a nevyskytují se po celém obvodu paty odvalu. Zároveň je potřeba zmínit, že odvaly jsou veřejnosti nepřístupné, nemělo by tedy docházet k expozici veřejnosti takto vysokým hodnotám OAR.

V naměřených hodnotách OAR byly zjištěny sezónní i denní variace. Sezónní variace spočívají ve velkých rozdílech mezi zimním a letním období. V zimním ob-

dobí, kdy proudí plyn odvalem směrem nahoru a vystupuje na jeho koruně, se vyšší hodnoty OAR vyskytují právě v těchto místech. Průměrné hodnoty se zde pohybují většinou v řádu vyšších stovek Bq/m³, u paty odvalu jsou pak hodnoty nižší a pohybují se v řádu nižších stovek Bq/m³. V jarním období, kdy se zvyšuje teplota, dochází zároveň k obratu proudění plynu odvalem. Tento obrat může být postupný, přičemž k překlápění v proudění plynu dochází při teplotě okolo 10 °C, která je pravděpodobně svázána s vnitřní teplotou odvalu, o níž předpokládáme, že se jen málo mění v průběhu roku. V letním období, kdy proudí plyn odvalem směrem dolů, se u paty odvalu vyskytují velmi vysoké hodnoty OAR, naopak na koruně odvalu jsou hodnoty OAR výrazně nižší. Jak již bylo řečeno, hodnoty OAR na odvalu vykazují i denní variace a během jednoho dne se mohou výrazně měnit, i v tomto případě jsou zapříčiněny změnami teploty. Zpravidla platí, že v zimním období jsou maxima OAR dosahována na koruně odvalu v ranních hodinách, zatímco v letním období jsou dosahována u paty odvalu v pozdně večerních až nočních hodinách (okolo půlnoci).

Byla potvrzena korelace mezi hodnotami OAR naměřenými ve skupinách měřicích bodů umístěných u paty odvalu a na koruně odvalu. Tato korelace byla většinou silnější v kratších časových úsecích a v letním období. Uveďme jako příklad týdenní období na přelomu května a června 2021, ve kterém činila průměrná hodnota korelačního koeficientu znázorňující korelaci mezi měřicími body u paty odvalu 0,75, v případě měřicích bodů na koruně odvalu to bylo 0,70. V hodinových hodnotách OAR byla zjištěna také autokorelace, což je korelace počítaná mezi časovou řadou a její zpožděnou kopií. Tato autokorelace nastává se zpožděním v intervalu 24 hodin, což je zapříčiněno denními průběhy v hodnotách OAR.

Velká část práce je také věnována souvislostem mezi OAR a meteorologickými parametry. V letním období byla prokázána silná korelace mezi hodnotami OAR u paty odvalu a teplotou, v případě hodnot OAR na koruně odvalu byla prokázána silná antikorelace. Silnější korelace a antikorelace byly prokázány pro delší časové úseky. Např. pro půlroční období od 19. 2. do 19. 8. 2022 činila průměrná hodnota korelačních koeficientů mezi OAR u paty odvalu a teplotou 0,83, mezi OAR na koruně odvalu a teplotou to bylo -0,69. Bylo také pozorováno, že nejvíce s teplotou korelují hodnoty OAR naměřené o hodinu později. V některých kratších časových obdobích byla zjištěna antikorelace mezi OAR a tlakem vzduchu, která však neplatí vždy. Co se týče směru větru, tak vyšší hodnoty OAR byly zpravidla detekovány v místech, která jsou proti danému směru větru chráněna, dále byly vyšší hodnoty OAR detekovány při nižších rychlostech větru. Významnější korelace mezi OAR a dalšími meteorologickými parametry, jakými jsou vlhkost, množství srážek a doba slunečního svitu, prokázána nebyla.

Závěr práce je věnován srovnání hodnot OAR naměřených sondami na odvalu a hodnot OAR/EOAR naměřených detektory Ramonis a ALGADE umístěných v obci Brod severně od odvalu. Se stanicí Ramonis bylo srovnání provedeno pro 11–15 dnů v každé měřicí kampani. Byl zjištěn společný průběh v hodnotách OAR mezi stanicí Ramonis a sondami umístěnými u severní paty odvalu ve výšce 1,5 m nad terénem, přičemž maxima v hodnotách OAR byla dosahována přibližně ve stejný čas. Tento společný průběh potvrdily i hodnoty korelačních koeficientů, např. mezi stanicí Ramonis a měřicím bodem „3“ byla zjištěna silná korelace s hodnotou korelačního koeficientu 0,67. Průměrné hodnoty OAR zaznamenané stanicí Ramo-

nis byly nižší než průměrné hodnoty OAR na odvalu, avšak i stanicí Ramonis byla naměřena maxima OAR dosahující k 15 000 Bq/m³. Korelace byla také potvrzena mezi průměrnými měsíčními hodnotami OAR naměřenými sondou v měřicím bodu „B“ umístěnou ve výšce 1,5 m nad terénem u severní paty odvalu a průměrnými měsíčními hodnotami EOAR naměřenými detektory ALGADE v lokalitách B-2, B-3 a B-4 v obci Brod. Průměrná hodnota korelačního koeficientu v tomto případě činila 0,78. Hodnoty OAR vypočítané z průměrných měsíčních hodnot EOAR naměřených v obci Brod byly výrazně nižší než na odvalu a nepřesáhly hodnotu 400 Bq/m³.

Bibliografie

1. STRNAD, David. *Posouzení dopadu výskytu Rn-222 v tělese odvalu a jeho blízkém okolí z hlediska radiační ochrany*. Praha, 2021. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10467/97590>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (cit. na s. 10, 36, 51).
2. STRNAD, David. *Třísezónní monitorování odvalu č. 15 poblíž Brodu u Příbrami*. Praha, 2022. Výzkumný úkol. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (cit. na s. 10, 39, 44, 55, 56, 72).
3. *PostgreSQL Tutorial* [online]. 2022. [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: <https://www.postgresqltutorial.com/> (cit. na s. 11, 47).
4. *Python* [online]. 2023. [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.python.org/> (cit. na s. 11, 46).
5. *A Free and Open Source Geographic Information System [QGIS]* [online]. 2023. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.qgis.org/en/site/> (cit. na s. 11, 47).
6. VELFL, Josef. *Uranová Příbram*. První vydání. Praha: Dokořán, 2022. ISBN 978-80-7675-067-8. OCLC: 1362869530 (cit. na str. 12).
7. BRUGGE, Doug; GOBLE, Rob. The History of Uranium Mining and the Navajo People. *American journal of public health (1971)*. 2002, **92**(9), 1410–1419. ISSN 0090-0036. Dostupné z DOI: 10.2105/AJPH.92.9.1410. Place: Washington, DC Publisher: Am Public Health Assoc (cit. na str. 12).
8. *Uranium Mining* [Atomic Heritage Foundation] [online]. 2018. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://ahf.nuclearmuseum.org/ahf/history/uranium-mining/> (cit. na str. 12).
9. MAJLING, Eduard. *Historie a současnost těžby uranu v ČR* [Onergetice.cz] [online]. 2017. [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://onergetice.cz/ostatni/historie-a-soucasnost-tezby-uranu-v-cr> (cit. na str. 13).
10. *World Uranium Mining Production* [World Nuclear Association] [online]. 2022-07. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx> (cit. na str. 13).
11. *Uranové hornictví v České republice* [ZDAŘ BŮH.CZ] [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.zdarbuh.cz/reviry/ud-pribram/uranove-hornictvi-v-ceske-republice/> (cit. na s. 13, 14).

12. BROŽEK, Vlastimil; DUŠEK, Bohuslav; NOVÁK, Miroslav; TRANTINA, Václav. *Příspěvek k historii těžby a zpracování českého uranu*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [b.r.] (cit. na str. 14).
13. RYCHTAŘÍK, Tomáš. 70 let uranového průmyslu v ČR. *DIAMO, občasník*. 2016, **XXI**. 6. Dostupné také z: <https://www.diamo.cz/storage/app/media/obcasnik/2016-05-zvlastni-cislo.pdf> (cit. na str. 14).
14. *Historie bývalých Uranových dolů Příbram (I. část)* [ZDAŘ BŮH.CZ] [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.zdaruh.cz/reviry/ud-pribram/historie-byvalych-uranovych-dolu-pribram/> (cit. na str. 14).
15. *Historie bývalých Uranových dolů Příbram (II. část)* [ZDAŘ BŮH.CZ] [online]. [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://www.zdaruh.cz/reviry/ud-pribram/historie-byvalych-uranovych-dolu-pribram-ii-cast/> (cit. na str. 14).
16. VEČEŘA, Josef; JÍRŮ, Roman; NEUNEROVÁ, Věra; PECINA, Vratislav; PEŠLOVÁ, Gabriela; PLATOVÁ, Klára; PŘIBIL, Martin; ŠARIČ, Radko. *Návrh popisu a vyhodnocení historických hornických děl*. Praha: Česká geologická služba, 2021. ISBN 9788070759301 (cit. na s. 14, 15).
17. *Hornické názvosloví a značky*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1976. ON 44 0001 (cit. na str. 14).
18. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/21/ES o nakládání s odpady z těžebního průmyslu a o změně směrnice 2004/35/ES* [EUR-Lex.europa.eu] [online]. 2006-03-15. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006L0021-20090807&from=EN> (cit. na str. 15).
19. SOCHOR, Karel. *Hornický slovník terminologický*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961 (cit. na str. 15).
20. *Zákon č. 157/2009 Sb.* [Zákony pro lidi] [online]. 2021-01-01. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-157> (cit. na str. 15).
21. RYCHTAŘÍK, Tomáš; PAŠEK, Ladislav. *Nová koncepce likvidace odvalů po těžbě uranu na Příbramsku*. Most, 2017 (cit. na s. 15, 16).
22. *Inventarizace úložných míst těžebního odpadu* [Česká geologická služba] [online]. 2023. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/inventarizace_uloznych_mist/ (cit. na str. 16).
23. ČT24. *Obří uranové haldy u Příbrami mají zmizet. Likvidace potrvá desítky let* [Česká televize] [online]. 2017. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/2118987-obri-uranove-haldy-u-pribrami-maji-zmizet-likvidace-potrva-desitky-let> (cit. na str. 17).
24. *Při dostavbě D4 bude využito kamenivo z uranových hald u Příbrami* [EnviWeb] [online]. 2022. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/121851> (cit. na str. 15).
25. COTHERN, C. Richard; SMITH, James E. (ed.). *Environmental Radon* [online]. Boston, MA: Springer US, 1987 [cit. 2022-01-11]. ISBN 978-1-4899-0475-1. Dostupné z DOI: 10.1007/978-1-4899-0473-7 (cit. na str. 18).

26. GILMORE, Gordon. *Practical gamma-ray spectrometry, second edition*. 2nd. Wiley, 2008. ISBN 9780470861974. Dostupné z DOI: 10.1002/9780470861981 (cit. na str. 18).
27. L'ANNUNZIATA, Michael F. *Radioactivity: introduction and history*. Elsevier Science, 2007. ISBN 9780444527158 (cit. na str. 18).
28. BASKARAN, Mark. *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016 [cit. 2022-01-11]. ISBN 978-3-319-21329-3. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-21329-3 (cit. na s. 18, 19).
29. KDAIZ FJFI ČVUT V PRAZE A SÚRO V. V. I., Kolektiv autorů. *Ozáření z přírodního zdroje záření* [online]. [B.r.]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: https://www.radonvyprogram.cz/fileadmin/radonvyprogram/pdf_doc/Vzdelavaci_publikace_prirodni_zdroje_zareni.pdf (cit. na str. 18).
30. NAZAROFF, W. W.; NERO, Anthony V. (ed.). *Radon and its decay products in indoor air*. New York: J. Wiley, 1988. Environmental science and technology. ISBN 978-0-471-62810-1 (cit. na str. 19).
31. MUCHA, Josef. *Migrace radonu z podloží* [Měření radonu v Plzni a okolí] [online]. [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.radon-servis.cz/Radon/4-Migrace-radonu-z-podlozi> (cit. na str. 19).
32. ZÖLZER, Friedo; HAVRÁNKOVÁ, Renata. *Vliv provozu úpravny uranových rud MAPE Mydlovary na zdravotní stav jejich zaměstnanců a obyvatel v okolí*. Praha: NLN, Nakladatelství Lidové noviny, 2016. ISBN 978-80-7422-468-3 (cit. na s. 19, 20).
33. WHO. *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. Albany: World Health Organization, 2009. ISBN 9789241547673 (cit. na str. 19).
34. IARC. *Man-made Mineral Fibres and Radon* [online]. Lyon, 1988 [cit. 2023-01-27]. ARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 43. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK316364/> (cit. na str. 19).
35. LI, Zachary; FENG, Christopher. *Handbook of Radon: Properties, Applications and Health*. Hauppauge: Nova Science Publishers, Incorporated, 2012. ISBN 9781621001775 (cit. na str. 19).
36. SÚJB. *Národní akční plán - RANAP* [Radonový program České republiky] [online]. 2016. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.radonvyprogram.cz/narodni-akcni-plan-ranap/> (cit. na str. 20).
37. SABOL, Jozef. *Základy dozimetrie*. České vysoké učení technické, 1992 (cit. na str. 20).
38. CHARLES, Monty. Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2006 Report, Volume 1—Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B. *Radiation Protection Dosimetry* [online]. 2010, **138**(2), 187–189 [cit. 2023-02-08]. ISSN 0144-8420. Dostupné z DOI: 10.1093/rpd/ncp262. Publisher: Oxford University Press (cit. na str. 20).

39. LAHMIRA, Belkacem; LEFEBVRE, René. *Numerical Modeling of Gas Flow in the No. 1 Shaft Waste Rock Dump, Sullivan Mine, B.C., Canada*. 2008. Final report (cit. na s. 20, 21).
40. LEFEBVRE, René; LAHMIRA, Belkacem; LÖBNER, Walfried. Numerical modeling of gas flow to select a radon emission control method in waste rock dump 38neu, Germany. 2011, 8 (cit. na s. 21, 22).
41. LEFEBVRE, René; LAHMIRA, Belkacem; LÖBNER, Walfried. Atmospheric control of radon emissions from a waste rock dump. *Environmental Geotechnics* [online]. 2019, **6**(6), 381–392 [cit. 2021-12-14]. ISSN 2051-803X. Dostupné z DOI: 10.1680/jenge.15.00066 (cit. na str. 22).
42. LAWRENCE, Cameron E.; AKBER, Riaz A.; BOLLHÖFER, Andreas; MARTIN, Paul. Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2009, **100**(1), 1–8 [cit. 2022-01-11]. ISSN 0265931X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.09.003 (cit. na str. 22).
43. MUDD, Gavin M. Radon releases from Australian uranium mining and milling projects: assessing the UNSCEAR approach. *Journal of Environmental Radioactivity* [online]. 2008, **99**(2), 288–315 [cit. 2022-01-11]. ISSN 0265931X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.08.001 (cit. na str. 22).
44. FUKA, Mgr Vladimír; HUSZÁR, Mgr Peter. Studie proudění v idealizovaném modelu odvalu z uranového dolu na ložisku Příbram. [B.r.], 19 (cit. na str. 23).
45. SLEZÁKOVÁ, Miriam; FRONKA, Aleš. *Meranie 222Rn pomocou sond v blízkosti rádioaktívnych hald v Brodu u Příbrami*. Praha, 2018-04-15. výzkumná zpráva. SÚRO, v.v.i. (cit. na s. 24, 25).
46. THINOVÁ, Lenka; ŠTĚPÁN, Václav; STRNAD, David; KOŘISTKA, Ondřej; SEMENNIKOV, Vladislav; BICAN, Radek; ČERMÁK, Martin; FRONKA, Štěpán; HRADECKÝ, Jan; ROVENSKÁ, Kateřina; JÍLEK, Karel; OTÁHAL, Petr; HOLEČEK, Josef; VOŠAHLÍK, Josef. *Nové poznatky k sezónnímu chování objemových koncentrací radonu v blízkosti odvalu š. č. 15, Brod u Příbrami* [příspěvek na konferenci]. Stará Lesná, 2022. XLIII. Dni radiační ochrany 2022 (cit. na s. 25–28).
47. ČERMÁK, Martin; BICAN, Radek. *Zpráva o vyhodnocení programu monitorování, veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany, o. z. SUL za rok 2021* [online]. Příbram, 2022-03-23 [cit. 2023-04-17]. Z-03-ŘP-sp-22-01. DIAMO, s.p., odštěpný závod SUL. Dostupné z: https://www.diamo.cz/storage/app/media/dokumenty/SUL/Z-03-RP-sp-22-01_SUL_2021.pdf (cit. na s. 28, 29).
48. ČERMÁK, Martin; BICAN, Radek. *Zpráva o vyhodnocení programu monitorování, veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany, o. z. SUL za rok 2019* [online]. Příbram, 2020-03-09 [cit. 2022-02-08]. Z-03-ŘP-sp-22-01. DIAMO, s.p., odštěpný závod SUL. Dostupné z: <https://www.diamo.cz/storage/app/media/dokumenty/SUL/Vyhodnocen%C3%5C%AD%5C%20programu%C3%20monitorov%C3%A1n%C3%5C%AD%5C%20radia%C4%>

- 8Dn%5C%C3%5C%AD%5C%20ochrany%5C%202019_o.%5C%20z.%5C%20SUL.pdf (cit. na s. 28, 29).
49. ČERMÁK, Martin; BICAN, Radek. *Zpráva o vyhodnocení programu monitorování, veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany, o. z. SUL za rok 2020*. Příbram, 2021-03-29. Z-03-ŘP-sp-22-01. DIAMO, s.p., odštěpný závod SUL (cit. na s. 28, 29).
 50. JÍLEK, K; SLEZÁKOVÁ, M; FRONKA, A; PROKOP, T; NEUBAUER, L. The NRPI multi-purpose on-line monitoring station for measurement of natural radioactivity in the ambient atmosphere and in the soil. *Radiation Protection Dosimetry* [online]. 2017, **177**(1), 57–62 [cit. 2022-01-29]. ISSN 0144-8420, ISSN 1742-3406. Dostupné z DOI: 10.1093/rpd/ncx138 (cit. na str. 29).
 51. THINOVA, L; BICAN, R; FRONKA, A; JOHNOVA, K; SOLC, J; VOSAHLIK, J. Radon concentration in the area of waste rock dumps, Brod, CR—case study. *Radiation Protection Dosimetry* [online]. 2017, **177**(1), 149–154 [cit. 2021-12-14]. ISSN 0144-8420, ISSN 1742-3406. Dostupné z DOI: 10.1093/rpd/ncx142 (cit. na str. 29).
 52. THINOVÁ, Lenka. *Shrnutí poznatků z monitorování duben 2017*. Praha, 2017. výzkumná zpráva. DIAMO, s.p. (cit. na str. 29).
 53. TUČEKOVÁ, Lucia. *Variace v koncentraci radonu na haldě bývalého uranového dolu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/q0qze/DP.pdf>. diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta (cit. na str. 30).
 54. TESLA, akciová společnost. *Systémy pro měření koncentrace radonu* [Měření koncentrace radonu] [online]. 2019. [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.tesla.cz/mereni-koncentrace-radonu/> (cit. na str. 31).
 55. TESLA, akciová společnost. *USB radonová sonda TSR4/M – Technický popis a návod k obsluze*. 2022. Dostupné také z: https://www.tesla.cz/wp-content/uploads/2022/05/052-410-100-TSR4M_IP67_sonda_manual_cz_v1.pdf (cit. na s. 32, 33).
 56. TESLA, akciová společnost. *TSR4S – SIGFOX bezdrátová radonová sonda – Technický popis a návod k obsluze*. 2022. Dostupné také z: https://www.tesla.cz/wp-content/uploads/2022/05/052-410-101-TSR4S_IP67_sonda_manual_cz_v1-1.pdf (cit. na s. 32, 33).
 57. TESLA, akciová společnost. *Program usbRADONview – Návod k obsluze*. 2021. Dostupné také z: https://www.tesla.cz/wp-content/uploads/2021/03/usbRADONview_app_manual_cz_v5.pdf (cit. na str. 33).
 58. *Bezdrátová meteostanice Vantage Pro2 Aktiv, DAV-6153EU* [online]. Davis Instruments, 2018 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.davis.cz/vantage-pro-2.html> (cit. na str. 34).
 59. *DavidStr99/odval* [GitHub, Inc.] [online]. 2023. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://github.com/DavidStr99/odval> (cit. na str. 46).

60. MCKINNEY, Wes. *Python for data analysis: data wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter*. Third. Beijing;Sebastopol;Tokyo;Farnham;Boston; O'Reilly, 2022. ISBN 9781098104030 (cit. na str. 46).
61. TOMS, Silas; CRICKARD, Paul; REES, Eric van. *Mastering Geospatial Analysis with Python: Explore GIS Processing and Learn to Work with GeoDjango, CARTOframes and MapboxGL-Jupyter*. Birmingham: Packt Publishing, Limited, 2018. ISBN 9781788293334 (cit. na str. 46).
62. DORMAN, Michael; GRASER, Anita. *Geocomputation with Python* [online]. [B.r.]. [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://py.geocomp.org> (cit. na str. 46).
63. *A Guide to Time Series Analysis in Python*. [B.r.] (cit. na str. 46).
64. PRABHAKARAN, Selva. *Time Series Analysis in Python – A Comprehensive Guide with Examples*. [B.r.] (cit. na str. 46).
65. PRABHAKARAN, Selva. *ARIMA Model – Complete Guide to Time Series Forecasting in Python*. [B.r.] (cit. na str. 46).
66. *About PostGIS* [PostGIS] [online]. 2023. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://postgis.net/> (cit. na str. 47).
67. GISMENTORS. *Školení QGIS pro začátečníky* [online]. 2023. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://training.gismentors.eu/qgis-zacatecnik/> (cit. na str. 47).
68. CUTTS, Andrew; GRASER, Anita. *Learn QGIS your step-by-step guide to the fundamental of QGIS 3.4, 4th edition*. 2018. ISBN 9781788997423. OCLC: 1144178947 (cit. na str. 47).
69. MIKIEWICZ, Dominik; MACKIEWICZ, Michal; NYCZ, Tomasz. *Mastering PostGIS: create, deliver, and consume spatial data using PostGIS*. 2017. ISBN 9781784395445. OCLC: 991530184 (cit. na str. 47).
70. *pgAdmin PostgreSQL Tools* [pgAdmin] [online]. 2023. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.pgadmin.org/> (cit. na str. 47).
71. HENDL, Jan. Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat. *Sociologický Časopis / Czech Sociological Review*. 2015, pp. 226–229 (cit. na s. 58, 62).
72. BONAROS, Billy. *Time Series Decomposition In Python* [Towards Data Science] [online]. 2021. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/time-series-decomposition-in-python-8acac385a5b2> (cit. na str. 64).
73. ČHMÚ. *Denní úhrn doby trvání slunečního svitu ve Středočeském kraji* [Denní data dle zákona 123/1998 Sb.] [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z-123-1998-Sb#> (cit. na str. 71).
74. BICAN, Radek. *Osobní komunikace – předání dat z ALGADE za rok 2022*. 2023 (cit. na s. 77, 78).

Seznam tabulek

1.1	Procentuální podíl na těžbě uranu v letech 1945–2007 [9]	13
1.2	Procentuální podíl na těžbě uranu v roce 2021 [10]	13
1.3	Ložiska uranu v českých zemích [11]	14
1.4	Parametry odvalů na Příbramsku [21]	15
1.5	Pět největších odvalů na Příbramsku [21]	16
1.6	Izotopy radonu v přírodních přeměnových řadách [28]	18
1.7	Faktor nerovnováhy F stanovený na louce mezi odvalem a obcí Brod [46]	26
1.8	Hodnoty EOAR (Bq/m^3) naměřené detektory ALGADE na Příbramsku [48, 49, 47]	29
1.9	Průměrné hodnoty aktivity K, U, Th (v Bq/kg) [52]	29
2.1	Technické parametry sond TSR4M/TSR4S [55, 56]	33
2.2	Provozní podmínky sond TSR4M/TSR4S [55, 56]	33
2.3	Technické parametry meteostanice Davis Vantage Pro2 Aktiv [58]	34
2.4	Osazení měřicích bodů sondami v jednotlivých částech kampaně (měřicí body jsou shodné s měřicími body ve 2. kampani)	45
3.1	Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m^3) naměřené sondami umístěnými v hlušině u paty odvalu v období od 29. 5. do 5. 8. 2021	51
3.2	Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m^3) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m u paty odvalu v období od 29. 5. do 5. 8. 2021	51
3.3	Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m^3) naměřené sondami umístěnými v hlušině na koruně a stěně odvalu v období od 29. 5. do 5. 8. 2021 (měřicí body „13“, „14“, „15“, „16“ – koruna odvalu, „5“, „8“ – stěna odvalu)	51
3.4	Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m^3) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 5. 2. do 8. 4. 2022 (měřicí body „A“, „B“, „C“ – pata odvalu, „D“, „E“, „F“, „G“, „H“, „I“ – koruna odvalu)	52

3.5	Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m ³) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 9. 4. do 26. 5. 2022 (měřicí body „A“, „B“, „C“ – pata odvalu, „D“, „E“, „F“, „G“, „H“, „I“ – koruna odvalu)	52
3.6	Průměry, mediány a maxima OAR (v Bq/m ³) naměřené sondami umístěnými ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 27. 5. do 18. 10. 2022, (měřicí body „A“, „B“, „B1“, „C“ – pata odvalu, „D“, „F“, „G“, „H“, „I“ – koruna odvalu)	52

Seznam obrázků

1.1	Příbramské odvaly (velikost symbolů reprezentuje objem uložené hlusiny), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz , data převzata z [22]	16
1.2	Východní část odvalu š. č. 15 (vlevo areál s těžní věží, v pozadí odval š. č. 4) [23]	17
1.3	Vzdálenost odvalu š. č. 15 k přilehlým obcím Brod a Lešetice, mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz	17
1.4	Přírodní přeměnové řady [29]	18
1.5	Vliv teploty na tok plynu odvalem (v horní části je znázorněno proudění při vysoké atmosférické teplotě, zatímco v dolní části při nízké atmosférické teplotě) [39]	21
1.6	Výpočetní síť s 2566 buňkami reprezentující odval [44]	23
1.7	Model odvalu rozdělený do 3 zón – vnitřek odvalu, okrajová vrstva, půdní podloží [44]	23
1.8	Měřicí body na odvalu š. č. 15 a v jeho okolí při měření v letech 2017–2018 [45]	24
1.9	Pohled z koruny na louku mezi odvalem š. č. 15 a obcí Brod, v pozadí město Příbram (foto: Lenka Thinová)	25
1.10	Rozmístění měřicích bodů na louce mezi odvalem a obcí Brod [46]	26
1.11	Naměřené dávkové příkony na louce mezi odvalem a obcí Brod pomocí přístroje GT-40) [46]	27
1.12	Hodnoty OAR naměřené ve všech měřicích bodech přístroji umístěnými v přízemní vrstvě (výška 70 cm) [46]	27
1.13	Hodnoty OAR naměřené přístroji umístěnými ve skupině měřicích bodů nejbliže k odvalu [46]	28
2.1	Sonda TSR4S s popisem základních částí [56]	32
2.2	Program usbRADONview sloužící pro stažení dat ze sond TSR4 přes USB kabel [57]	33
2.3	Webové rozhraní MONTES umožňující živý přenos a stahování dat ze sond TSR4S	34
2.4	Meteostanice umístěná na těžní věži odvalu š. č. 15	35

2.5	Rozmístění měřicích bodu na odvalu během 1. kampaně (zeleně – měřicí body u paty odvalu, modře – měřicí body na stěně odvalu, červeně – měřicí body na koruně odvalu), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz . . .	37
2.6	Sonda v ochranném krytu umístěná na stromě u paty odvalu (foto: Jan Hradecký)	38
2.7	Sondy v ochranném krytech umístěné v hlušině na stěně odvalu (vlevo) a v hlušině u paty odvalu (vpravo)	38
2.8	Nová konstrukce sondy s těsnícími prvky (vlevo), složená sonda (vpravo)	39
2.9	Východní stěna odvalu s teplými plošnými i bodovými výduchy (autor: Václav Štěpán)	40
2.10	Plošný výduch s řadou menších bodových výduchů na terase východní stěny odvalu (autor: Václav Štěpán)	41
2.11	Rozmístění měřicích bodu na odvalu během 2. kampaně (světle modře – měřicí body u paty odvalu, tmavě modře – měřicí body na koruně odvalu), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz	42
2.12	Sonda umístěná v měřicím bodu „E“ opatřená ochranným krytem vyrobeným z PET lahve (foto: Václav Štěpán)	43
2.13	Nový kryt z PETG s možností tisku na 3D tiskárně (autor: Václav Štěpán)	44
2.14	Rozmístění měřicích bodu na odvalu během 3. kampaně (červeně - měřicí body u paty odvalu, oranžově - měřicí body na koruně odvalu), mapový podklad - Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz	45
2.15	Schéma relační databáze obsahující 6 tabulek (rovnými čarami jsou znázorněny vazby mezi tabulkami)	48
2.16	Část tabulky <i>campaign</i> zobrazené v programu pgAdmin 4	48
3.1	Průměrné denní hodnoty OAR v měřicích bodech u paty odvalu v období od 5. 2. do 5. 6. 2022	53
3.2	Průměrné denní hodnoty OAR v měřicích bodech na koruně odvalu v období od 5. 2. do 5. 6. 2022	54
3.3	Průměrné denní hodnoty OAR ve všech měřicích bodech a průměrné denní hodnoty teploty v období od 5. 2. do 5. 6. 2022	55
3.4	Průměrné hodnoty OAR na odvalu v zimním (vlevo) a letním (vpravo) období, poloměr bodů je úměrný OAR, mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz [2] .	56
3.5	Hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech u paty odvalu ve výšce 1,5 m nad terénem během srpna 2022 (šedou barvou zvýrazněn úsek s výrazným společným průběhem v hodnotách OAR)	57

3.6	Společný průběh v hodnotách OAR v měřicích bodech umístěných ve výšce 1,5 m u paty odvalu	58
3.7	Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („1“, „2“, „3“, „4“, „6“ a „9“) a na koruně odvalu („12“, „13“ a „14“) vypočtené pro měsíční období od 1. 7. do 1. 8. 2021	59
3.8	Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („1“, „2“, „3“, „4“, „6“ a „9“) a na koruně odvalu („12“, „13“ a „14“) vypočtené pro týdenní období od 29. 5. do 6. 6. 2021	60
3.9	Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („A“, „B“, „B1“ a „C“) a na koruně odvalu („D“, „G“ a „H“) vypočtené pro měsíční období od 1. 9. do 1. 10. 2022	61
3.10	Hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech u paty („A“ a „B“) a na koruně odvalu („G“ a „H“) v období od 1. 9. do 1. 10. 2022	61
3.11	Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR v měřicích bodech u paty („A“, „B“ a „C“) a na koruně odvalu („D“, „E“, „F“, „G“, „H“ a „I“) vypočtené pro týdenní období od 27. 2. do 6. 3. 2022	62
3.12	Autokorelace hodnot OAR naměřených v měřicím bodu „A“ ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 1. 6. do 1. 10. 2022 vypočítaná pro zpoždění v řádu dnů	63
3.13	Autokorelace hodnot OAR naměřených v měřicím bodu „A“ ve výšce 1,5 m nad terénem v období od 6. 8. do 13. 8. 2022 vypočítaná pro zpoždění v řádu hodin	64
3.14	Dekompozice časové řady OAR naměřených v měřicím bodu „A“ u paty odvalu v období od 5. 2. do 5. 7. 2022	65
3.15	Dekompozice časové řady OAR naměřených v měřicím bodu „G“ na koruně odvalu v období od 5. 2. do 5. 7. 2022	65
3.16	Průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a průměrné denní hodnoty teploty a vlhkosti naměřené meteostanicí v půlročním období od 19. 2. do 19. 8. 2022	66
3.17	Korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi průměrnými denními hodnotami OAR naměřenými v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a průměrnými denními hodnotami teploty a vlhkosti naměřenými meteostanicí v půlročním období od 19. 2. do 19. 8. 2022	67
3.18	Hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a hodnoty teploty a vlhkosti naměřené meteostanicí v týdnu od 6. 8. do 13. 8. 2022	68

3.19	Korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi hodnotami OAR naměřenými v měřicích bodech „A“, „B“, „C“ u paty odvalu, „D“, „G“, „H“ na koruně odvalu a hodnotami teploty a vlhkosti naměřenými meteostanicí v týdnu od 6. 8. do 13. 8. 2022	69
3.20	Korelační koeficienty znázorňující korelaci mezi různě zpožděnými hodnotami OAR naměřenými v měřicím bodu „B“ a teplotou naměřenou meteostanicí v týdnu od 6. 8. do 13. 8. 2022	69
3.21	Průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“ a „C“ u paty odvalu a průměrné denní hodnoty tlaku vzduchu, naměřené během srpna 2022	70
3.22	Průměrné denní hodnoty OAR naměřené v měřicích bodech „A“, „B“ a „C“ u paty odvalu a hodnoty denních srážek v období od 1. 6. do 1. 9. 2022 (šedou barvou zvýrazněna období s vyššími srážkami) . . .	71
3.23	Umístění detektorů ALGADE (červeně), stanice Ramonis (oranžově) a vybraných sond na odvalu (modře), mapový podklad – Ortofoto ČR, r. 2021, Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz . . .	73
3.24	Hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a přílehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „3“ a „4“ ve výšce 1,5 m v období od 22. 7. do 1. 8. 2021	74
3.25	Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR naměřenými stanicí Ramonis a přílehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „1“, „2“, „3“, „4“ (pata odvalu) a „12“ (koruna odvalu) v období od 22. 7. do 1. 8. 2021	75
3.26	Hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a přílehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „B“ a „F“ ve výšce 1,5 m v období od 1. 3. do 15. 3. 2022	76
3.27	Hodnoty OAR naměřené stanicí Ramonis a přílehlými sondami na odvalu umístěnými v měřicích bodech „B“ a „B1“ ve výšce 1,5 m v období od 22. 7. do 1. 8. 2022	76
3.28	Měsíční hodnoty OAR vypočtené z měsíčních hodnot EOAR naměřených detektory ALGADE v lokalitách B-2, B-3, B-4 [74] a průměrné měsíční hodnoty OAR naměřené u paty odvalu v měřicím bodu „B“ ve výšce 1,5 m	78
3.29	Korelační koeficienty vyjadřující míru korelace mezi hodnotami OAR vypočtenými z měsíčních hodnot EOAR naměřených detektory ALGADE v lokalitách B-2, B-3, B-4 a průměrnými měsíčními hodnotami OAR naměřenými na odvalu v měřicím bodu „B“ ve výšce 1,5 m . . .	78