

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ
KATEDRA DOZIMETRIE A APLIKACE IONIZUJÍCÍHO
ZÁŘENÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Posouzení dopadu výskytu Rn-222
v tělese odvalu a jeho blízkém okolí
z hlediska radiační ochrany**

Autor: David Strnad

Vedoucí práce: Ing. Václav Štěpán, Ph.D.

Praha, 2021



Katedra: KDAIZ

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: David Strnad

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Název práce: Posouzení dopadu výskytu Rn-222 v tělese odvalu a jeho blízkém okolí z hlediska radiační ochrany
(česky)

Název práce: Assessment of Rn-222 presence near waste rock dumps from the radiation protection point of view
(anglicky)

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se obecně s existencí a vlastnostmi plyných radioaktivních izotopů v přírodních přeměnových řadách a jejich zdravotním dopadem.
2. Proveďte rešerši literatury se zaměřením na existenci a použití modelů proudění plynů v odvalech anebo sutích či štěrkovitých tělesech podobného charakteru.
3. Proveďte rešerši literatury k možnostem detekčních technik pro měření Rn-222/Rn-220 v blízkosti odvalů po těžbě radioaktivního nerostu.
4. Na základě rešerše vyberte klíčové parametry prostředí, které lze dostupnými prostředky experimentálně stanovit v blízkosti odvalů a jsou využitelné pro modely proudění.
5. Navrhněte a realizujte experimentální měření vybraných parametrů prostředí v reálných podmínkách.
6. Výsledky experimentu popište a diskutujte ve vztahu k problematice radiační ochrany blízkých sídel.

Doporučená literatura:

- [1] GILMORE, Gordon R. *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 9780470861981. DOI:10.1002/9780470861981.
- [2] COTHERN, C. Richard a James E. SMITH, ed. *Environmental Radon*. Boston, MA: Springer US, 1987. ISBN 978-1-4899-0475-1. DOI:10.1007/978-1-4899-0473-7.
- [3] BASKARAN, Mark. *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*. Cham: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-21328-6. DOI:10.1007/978-3-319-21329-3.
- [4] LEFEBVRE, René, Belkacem LAHMIRA a Walfried LÖBNER. Atmospheric control of radon emissions from a waste rock dump. *Environmental Geotechnics*. 2019, **6**(6), 381-392. ISSN 2051-803X. DOI:10.1680/jenge.15.00066.
- [5] LAWRENCE, Cameron E., Riaz A. AKBER, Andreas BOLLHÖFER a Paul MARTIN. Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009, **100**(1), 1-8. ISSN 0265931X. DOI:10.1016/j.jenvrad.2008.09.003.

Jméno a pracoviště vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce:

RNDr. Lenka Thinová, Ph.D.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Břehová 7
115 19 Praha

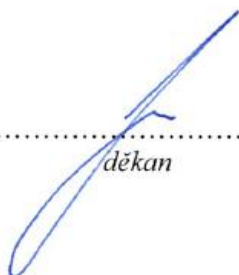
Datum zadání bakalářské práce: 15.10.2020

Termín odevzdání bakalářské práce: 7.7.2021

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.


.....
garant oboru


.....
vedoucí katedry


.....
děkan

V Praze dne 15.10.2020



Prohlášení

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

V Praze dne 2. 8. 2021

David Strnad

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Václavu Štěpánovi Ph.D. a konzultantce mé práce RNDr. Lence Thinové Ph.D. za jejich obrovskou ochotu, vstřícnost, trpělivost, cenné rady, velké množství nabídnutých konzultací a nemalý čas, který mi věnovali. Dále také mockrát děkuji za celkovou organizaci a pomoc při terénním měření.

Mé poděkování patří také SÚRO, v.v.i. a FJFI za zapůjčení sond, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Konkrétně bych chtěl poděkovat Janovi Hradeckému, Štěpánu Froňkovi a Ing. Ondřeji Kořistkovi za velkou pomoc při rozmístování sond, gamaspektrometrických měřeních a za zaslání fotodokumentace. Za pomoc při odečítání dat ze sond děkuji Ing. Josefu Vošahlíkovi a Mgr. Petru Otáhalovi Ph.D. ze SÚJCHBO, v.v.i. Dále bych chtěl poděkovat státnímu podniku DIAMO, konkrétně Ing. Martinu Čermákovi, za veškerou vstřícnost, poskytnutí archivních materiálů a zprostředkování možnosti přístupu do areálu. Za zapůjčení iontometrů děkuji Ústavu jaderné fyziky AV ČR, v.v.i. a projektu CRREAT.

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

Název práce: **Posouzení dopadu výskytu Rn-222 v tělese odvalu a jeho blízkém okolí z hlediska radiační ochrany**

Autor: David Strnad

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Václav Štěpán, Ph.D.
Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: RNDr. Lenka Thinová, Ph.D.

Abstrakt: Po těžbě uranu vznikají po celém světě odvaly s hlušinou, z nichž se do okolního vzduchu uvolňuje radon, jehož koncentrace mohou o několik řádů převyšovat běžné hodnoty. Většina odvalů, které ještě nebyly rekultivovány nebo přepracovány se, v České republice nachází poblíž města Příbram. Z hlediska radiační ochrany je významný odval u šachty č. 15 v blízkosti obcí Brod a Lešetice. Na základě rešerše studií proudění plynů v odvalech bylo na vytipovaná místa tohoto odvalu ve spolupráci se SÚRO, v.v.i. od 28. 5. 2021 do 15. 6. 2021 umístěno celkem 26 sond TSR 4, které zaznamenávaly hodnoty objemové koncentrace radonu, teplotu a vlhkost. Měření poskytlo informace o denních variacích objemové aktivity radonu, na jejichž základě bylo určeno proudění plynu v odvalu, které bylo porovnáno s výsledky modelových studií. Výsledky měření ukázaly vysoké hodnoty maximální i průměrné objemové aktivity radonu, které byly diskutovány z hlediska radiační ochrany. Z tohoto důvodu bude měření dále pokračovat, přičemž bude využito již získaných poznatků a zkušeností.

Klíčová slova: radon, radiační ochrana, ionizující záření, odvaly, proudění plynu

Title: **Assessment of Rn-222 presence near waste rock dumps from the radiation protection point of view**

Author: David Strnad

Abstract: Waste rock dumps, from which radon is released into the surrounding air and its concentrations can exceed the normal values by several orders of magnitude, are formed all over the world after uranium mining. Most dumps that have not yet been remediated or reprocessed in the Czech Republic are located near the town Příbram. From the point of view of radiation protection, there is a significant dump at the shaft No. 15 near the localities Brod and Lešetice. Based on a search of studies of gas flow in dumps, a total of 26 TSR 4 probes, which recorded the values of radon volume concentration, temperature and humidity, were in cooperation with SÚRO, v.v.i. from 28 May 2021 to 15 June 2021 placed on the selected places of this dump. Information on daily variations of radon volume activities, on its basis the gas flow was determined and compared with the results of model studies, were provided on the base of measurement. High values of maximum and average radon volume concentration, which were shown on the base of measurement, were discussed in terms of radiation protection. For this reason, the measurement with using the knowledge and experience already gained, will be continued.

Key words: radon, radiation protection, ionizing radiation, waste rock dumps, gas flow

Obsah

ÚVOD.....	10
1 RADIOAKTIVNÍ IZOTOPY	12
1.1 RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNA	12
1.1.1 Přeměna alfa.....	13
1.1.2 Přeměna beta minus.....	13
1.2 PŘÍRODNÍ PŘEMĚNOVÉ ŘADY	14
1.3 VLASTNOSTI RADONU.....	15
1.3.1 Chemické a fyzikální vlastnosti	16
1.3.2 Transport radonu	18
1.3.3 Dceřiné produkty radonu	19
1.4 ZDRAVOTNÍ DOPADY RADONU.....	20
1.4.1 Radonový program v ČR	20
1.4.2 Historie.....	21
1.4.3 Studie na zvířatech.....	21
1.4.4 Základní fakta	22
1.4.5 Vnější ozáření.....	22
1.4.6 Vnitřní ozáření	23
2 PROUDĚNÍ PLYNŮ V ODVALECH A DETEKCE RADONU	25
2.1 MOŽNOSTI DETEKČNÍCH TECHNIK RADONU POBLÍŽ ODVALŮ	25
2.2 MODELOVÉ STUDIE PROUDĚNÍ PLYNŮ V ODVALECH	27
2.2.1 Odval u šachty č. 1, důl Sullivan, Kanada.....	27
2.2.2 Odval 38neu, Německo.....	29
2.2.3 Okolí dolu Ranger, Austrálie	33
2.2.4 Odvaly na Příbramsku, Česká republika.....	36
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	42
3.1 POUŽITÉ TECHNICKÉ VYBAVENÍ.....	42
3.1.1 USB radonová sonda TSR 4.....	42
3.1.2 GT-40	43
3.1.3 RT-30.....	44
3.1.4 Ostatní vybavení	45
3.2 NAMĚŘENÁ DATA.....	46
3.2.1 Naměřená data ze sond TSR 4	46
3.2.2 Průměrné hodnoty OAR.....	50

3.2.3	<i>Naměřená data z GT-40</i>	57
3.2.4	<i>Naměřená data z RT-30</i>	60
3.2.5	<i>Naměřená data z iontometru</i>	61
3.2.6	<i>Data z infrakamery</i>	63
3.2.7	<i>Naměřená data z anemometru</i>	64
3.3	ANALÝZA A DISKUSE NAMĚŘENÝCH DAT	66
3.3.1	<i>Porovnání OAR z různě umístěných sond</i>	68
3.3.2	<i>Vztah mezi OAR a teplotou</i>	73
3.3.3	<i>Závislost OAR na směru větru</i>	75
3.3.4	<i>Srovnání dat ze sond, z GT-40, RT-30, iontometru a anemometru</i>	76
3.3.5	<i>Porovnání s výsledky Ramonis</i>	78
	ZÁVĚR	80
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83
	SEZNAM TABULEK	86
	SEZNAM OBRÁZKŮ	88

Úvod

Při těžbě uranu vznikaly po celém světě odvaly, z nichž se může uvolňovat radon, který představuje potencionální zdravotní riziko pro okolní obyvatelstvo. Cílem této práce, která vznikla ve spolupráci se Státním ústavem radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO, v.v.i.) a DIAMO, s. p., je posouzení dopadu výskytu radonu v tělese odvalu a jeho blízkém okolí z hlediska radiační ochrany. V dlouhodobé perspektivě se předpokládá využití výsledků v rámci evropského projektu RadoNorm.

Všechny nuklidy lze rozdělit do dvou základních skupin – na nuklidy stabilní a nuklidy nestabilní. Nestabilní nuklidy podléhají radioaktivní přeměně a nazýváme je radionuklidy. Některé radionuklidy se přeměňují ve více krocích, čímž vznikají přeměnové řady. Jednou z těchto řad je tzv. uranová přeměnová řada, která začíná ^{238}U a končí stabilním ^{206}Pb . Jedním z členů této řady je plynný a toxický radionuklid ^{222}Rn , jehož hlavním zdrojem je geologické podloží, ze kterého se pomocí difúze a konvekce transportuje do ovzduší. Radon a jeho produkty přeměny tvoří přibližně 50 % celkové dávky záření přijímaného širokou veřejností a zvyšují pravděpodobnost rakoviny plic. Odhaduje se, že radon je příčinou přibližně 3–14 % všech onemocnění rakovinou plic.

Velkým zdrojem radonu mohou být odvaly s nezužitkovatelným materiálem, které se jako následek těžby uranu nacházejí po celém světě. K posouzení možných zdravotních dopadů na obyvatele v okolí těchto odvalů a úspěšnou rekultivaci je důležité kromě měření koncentrací ^{222}Rn pochopit proudění plynu v odvalu. Této problematice se věnuje celé řada studií. V této práci jsou kromě studií v Kanadě, Německu a Austrálii zmíněny také dvě studie zabývající se odvaly v České republice, konkrétně na Příbramsku. V této lokalitě se nacházelo velké ložisko uranové rudy, po jehož vytěžení zůstalo mnoho odvalů, z nichž je z hlediska radiační ochrany významný odval u šachty č. 15, který se nachází v těsné blízkosti obcí Brod a Lešetice.

Právě na tomto odvalu bylo provedeno praktické měření. Na základě rešerše odborné literatury byly ve zvolených bodech na odvalu umístěny sondy pro měření objemové aktivity radonu. Kromě této veličiny byly pomocí dalších přístrojů měřeny i parametry jako např. příkon prostorového dávkového ekvivalentu, koncentrace U, Th, K a ^{137}Cs , dávkový příkon, počet záporných iontů ve vzduchu nebo rychlost proudění plynu v odvalu. Předmětem diskuse je analýza naměřených dat, konkrétně srovnání naměřených parametrů použitými

přístroji, porovnání naměřených objemových aktivit radonu na různých částech odvalu v různých částech dne a v neposlední řadě také určení toku plynu v odvalu. Zjištěné chování toku plynu v odvalu je srovnáno s výsledky zmíněných studií.

Závěr této práce obsahuje nejzásadnější naměřené hodnoty, diskusi vztahu k problematice radiační ochrany obyvatel blízkých sídel a zohlednění získaných výsledků pro návrh dalšího směřování výzkumu.

1 Radioaktivní izotopy

Atom se skládá z těžké hmoty koncentrované v jeho jádře, které je obklopeno elektronovým obalem. Hlavními složkami jádra jsou částice, které souhrnně nazýváme nukleony. Jedná se o protony s kladným elektrickým nábojem a o neutrony, které elektrický náboj nemají. Elektrony, nacházející se v elektronovém obalu, mají záporný elektrický náboj a jejich počet je stejný jako počet protonů, díky čemuž je celkový náboj atomu neutrální. Počet protonů v jádře charakterizuje daný prvek a je určen protonovým (atomovým) číslem Z , počet neutronů je určen neutronovým číslem N . Celkový počet nukleonů v jádře atomu je určen nukleonovým (hmotnostním) číslem A , přičemž platí $A = N + Z$. Je potřeba zdůraznit, že A neudává přesnou hmotnost atomu, je pouze její hrubou aproximací [1; 2].

Daný prvek může mít více než jeden konkrétní počet neutronů. Rozdíl v jejich počtu nemění chemické vlastnosti prvku, ale způsobuje značnou změnu jeho stability, což může vést k radioaktivní přeměně. Atomy se stejným protonovým, ale odlišným nukleonovým číslem se nazývají izotopy. Pokud mají dané atomy stejná i nukleonová čísla, nazývají se nuklidy. Obvyklý způsob označení nuklidu s atomovým číslem Z a hmotnostním číslem A je



kde X je chemická značka prvku. Jestliže je daný nuklid nestabilní a podléhá radioaktivní přeměně, nazývá se radionuklidem [1; 2].

1.1 Radioaktivní přeměna

Radioaktivní přeměna je samovolný děj uvnitř jádra atomu, jehož výsledkem je emise částic anebo elektromagnetického záření. Je provázena změnou hmotnosti – hmotnost dceřiného nuklidu je menší než hmotnost mateřského nuklidu, což souvisí s její exoergickou povahou – je uvolňována energie, jejíž velikost je dána vztahem zavedeným A. Einsteinem:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (1)$$

kde ΔE je změna energie, Δm změna hmotnosti a c je rychlost světla ve vakuu [2].

Nestabilní jádra se spontánně přeměňují na stabilnější konfigurace vyzařováním určitých částic a nějaké formy elektromagnetické energie. Při radioaktivních přeměnách můžeme pozorovat následující druhy záření:

- záření alfa
- záření beta
- záření gama

Záření alfa jsou těžké částice (jádra ${}^4\text{He}$) s velmi krátkým dosahem, z nichž většina nepronikne lidskou kůží, ale mohou být nebezpečné např. při vdechnutí nebo spolknutí. Záření beta jsou lehké částice (elektrony e^- nebo pozitrony e^+) krátkého dosahu, které mohou pronikat lidskou kůží a při dlouhodobém styku zdroje záření beta s pokožkou může dojít k jejímu poranění. Záření gama je vysoce pronikavé elektromagnetické záření krátkých vlnových délek, které z uvedených druhů záření představuje z hlediska spektra elektromagnetického vlnění největší nebezpečí pro člověka [3].

Rychlost, s níž se radioaktivní prvek přeměňuje, je vyjádřena poločasem přeměny $T_{1/2}$, což je střední doba, za níž se z počátečního počtu atomů daného radionuklidu samovolně přemění právě jedna polovina. $T_{1/2}$ nabývá široké škály hodnot od zlomku sekundy až po miliony let. V přírodních přeměnových řadách se setkáváme s přeměnou α a β^- , existuje ale také např. přeměna β^+ , elektronový záchyt nebo spontánní štěpení [3].

1.1.1 Přeměna alfa

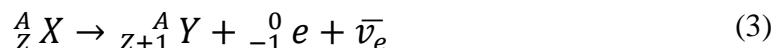
Při této přeměně je spontánně emitována těžká nabitá částice, která je totožná s jádrem ${}^4\text{He}$ (skládá se ze dvou protonů a ze dvou neutronů). Tento proces tedy snižuje atomové číslo o dvě jednotky, neutronové číslo o dvě jednotky a hmotnostní číslo o čtyři jednotky. Nejčastěji se vyskytuje u těžkých jader, jako je např. uran nebo plutonium. Obecné schéma této přeměny vypadá následovně [2]:



1.1.2 Přeměna beta minus

Při této přeměně je spontánně emitován elektron e^- a antineutrino $\bar{\nu}_e$, což je vysoce energetická elementární částice s velmi malou hmotností. Tento proces snižuje počet neutronů o jednu jednotku, zvyšuje atomové číslo o jednu jednotku a ponechává hmotnostní

číslo beze změny. Přeměna beta minus nastává tehdy, pokud je v jádře atomu příliš mnoho neutronů. Obecné schéma této přeměny vypadá následovně [2]:



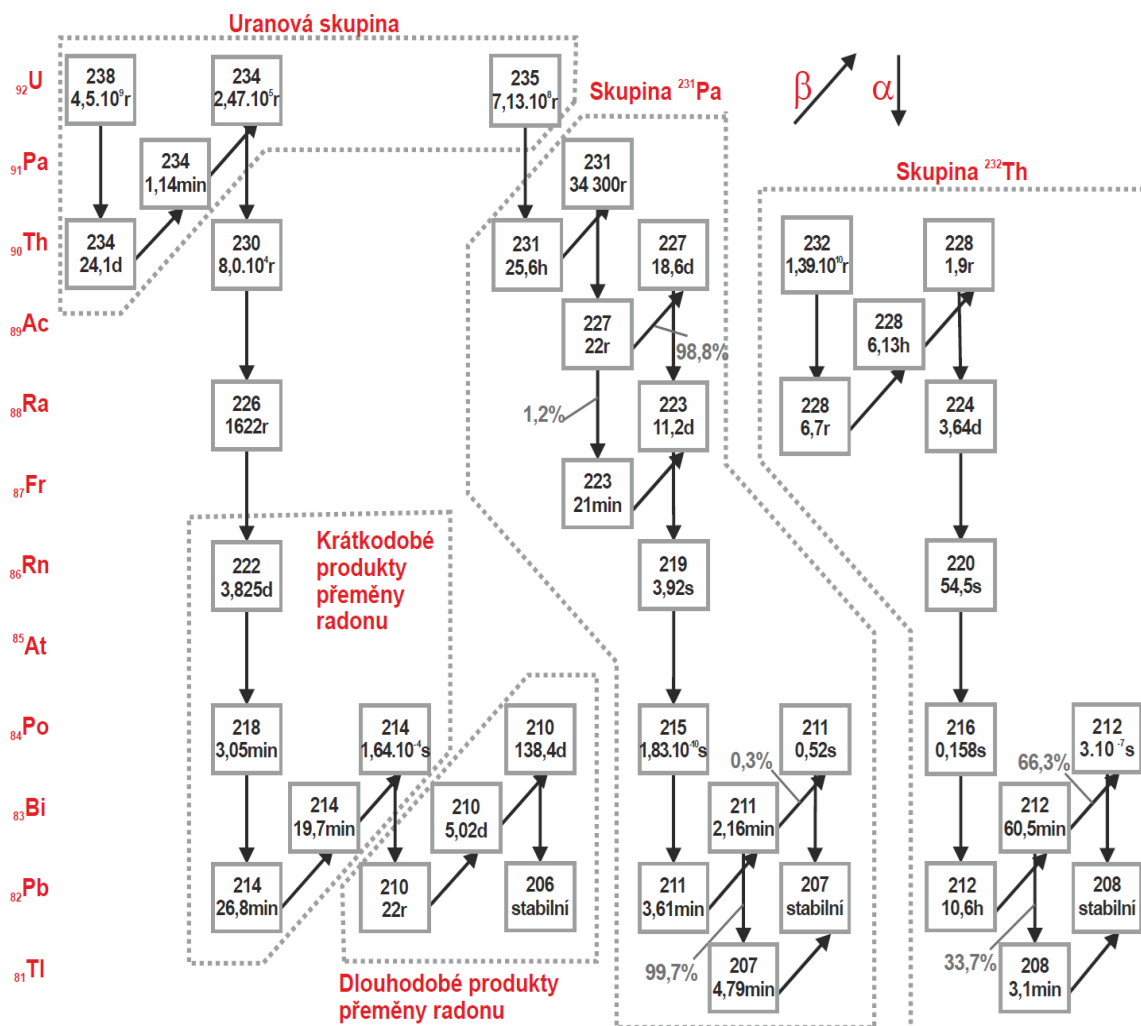
1.2 Přírodní přeměnové řady

Při přeměně radionuklidu dochází k jeho transformaci na jiný atom – produkt přeměny, přičemž může dojít i k přeměně na odlišný chemický prvek. Atomy se neustále transformují na nové produkty přeměny, dokud nedosáhnou stabilního stavu. Většina radionuklidů se přemění přímo na stabilní nuklid, avšak některé tvoří tzv. přeměnové řady [3].

Celkem existují čtyři přeměnové řady nebo řetězce radionuklidů. Kteroukoli z nich lze charakterizovat z hlediska hmotnostního čísla A jednoduchým výrazem $A = 4n + m$, což znamená, že hmotnostní čísla všech členů každé řady jsou dělitelná čtyřmi se stálým zbytkem. V rámci každé řady lze proto vyjádřit hmotnostní čísla nuklidů jako čtyřnásobek příslušného celého čísla n plus zbytek m , který je v rámci jedné řady pro všechny nuklidy stejný [1].

Existují tedy radioaktivní řady $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$ a $4n + 3$. Nuklidy z třech zmíněných řad se nacházejí v přírodě a tvoří většinu přirozené radioaktivity zemského původu. Jedná se o řadu $4n$ v čele s ${}^{232}\text{Th}$, která je známá pod názvem thoriová, o řadu $4n + 2$ v čele s ${}^{238}\text{U}$, která je známá pod názvem uranová a o řadu $4n + 3$ v čele s ${}^{235}\text{U}$, která je známá pod názvem aktiniová. Přírodní přeměnové řady jsou znázorněny na Obrázek 1. Radionuklid, který stojí na počátku každé řady má vzhledem ke stáří Země srovnatelný poločas přeměny. Nuklidy z řady $4n + 1$ v čele s ${}^{237}\text{Np}$, známé pod názvem neptuniová jsou vyráběny uměle, jelikož s výjimkou v zásadě stabilního konečného produktu ${}^{209}\text{Bi}$ nebyly v přírodě nalezeny [1].

Většina nuklidů ve zmíněných přeměnových řadách má pevné skupenství. Plynné skupenství mají pouze izotopy radonu. Právě vlastnosti a zdravotní účinky zmíněných izotopů radonu budou hlavním tématem zbývajících částí 1. kapitoly [1]



Obrázek 1: Přírodní přeměnové řady [25]

1.3 Vlastnosti radonu

Radon je všudypřítomný, vzácný, neviditelný plyn, který je bez zápachu, bez barvy a bez chuti. Jako poslední vzácný plyn byl objeven německým vědcem Friedrichem Ernestem Dornem v roce 1898. Na rozdíl od jiných vzácných plynů je radioaktivní a toxický, ale stejně jako jiné vzácné plyny je velmi málo reaktivní. Jelikož radon a jeho dceřiné produkty představují více než 70 % celkového ozáření pocházejícího z přírodních zdrojů, významně přispívají k ozáření běžné populace. Celkem existuje 36 izotopů radonu v rozmezí od ^{193}Rn do ^{228}Rn , všechny jsou radioaktivní, většina z nich má poločas přeměny kratší, než je 1 hodina, ale pouze tři izotopy jsou přítomny v přírodních přeměnových řadách. Jedná se o ^{219}Rn , který je známý také pod názvem aktinon a je přítomný v aktiniové přeměnové řadě,

o ^{220}Rn , který je známý také pod názvem thoron a je přítomný v thoriové přeměnové řadě a o ^{222}Rn , radon, který je přítomný v uranové přeměnové řadě. Izotopy ^{220}Rn a ^{222}Rn mají z hlediska zdravotních dopadů a dopadů na životní prostředí největší význam. Název radon byl odvozen od prvku radia, a to z důvodu, že ve všech zmíněných přeměnových řadách je mateřským nuklidem radonu právě radium. Radon nepřetržitě podléhá spontánní radioaktivní přeměně na čtyři pevné krátkodobé radionuklidy – ^{214}Bi , ^{214}Pb , ^{214}Po a ^{218}Po . V Tabulka 1 jsou pro porovnání uvedeny poločasy přeměny ^{219}Rn , ^{220}Rn a ^{222}Rn [4; 5].

Tabulka 1: Poločasy přeměny izotopů radonu vyskytujících se v přírodě [5]

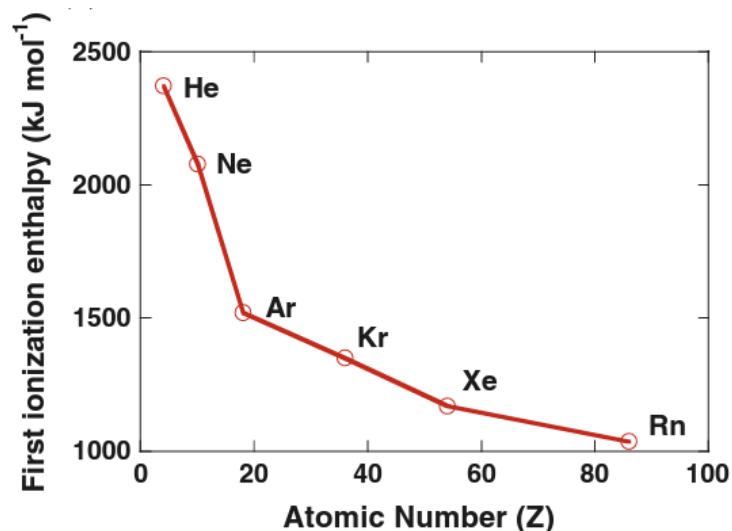
radionuklid	^{219}Rn	^{220}Rn	^{222}Rn
poločas rozpadu	3,98 s	55,83 s	3,82 d

Z radionuklidů uvedených v Tabulka 1 má nejdelší poločas přeměny právě ^{222}Rn , z čehož vyplývá, že do své přeměny může urazit poměrně velké vzdálenosti. Toto je jeden z hlavních důvodů, proč je potřeba se ^{222}Rn v radiační ochraně intenzivně zabývat. Pod pojmem „radon“ bude v dalším textu myšlen právě ^{222}Rn .

1.3.1 Chemické a fyzikální vlastnosti

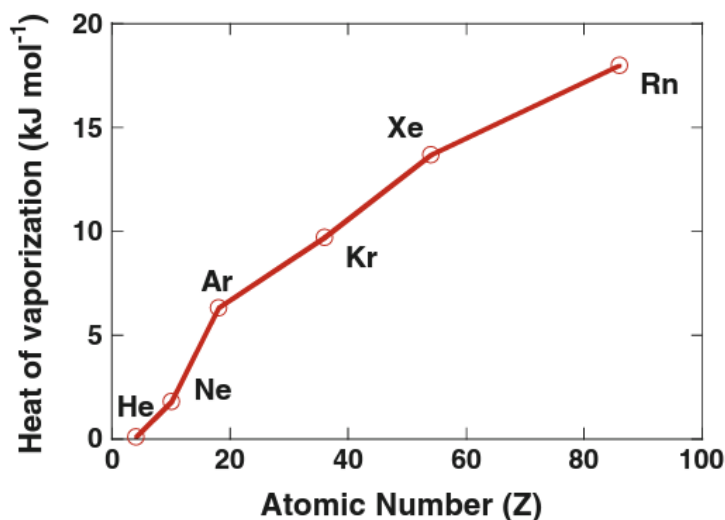
Radon leží v periodické soustavě prvků na rozmezí kovů a nekovů a vykazuje některé charakteristiky obou skupin. Z tohoto důvodu lze radon klasifikovat jako polokovový prvek spolu s křemíkem, bórem, arzenem a dalšími prvky. Z důvodu uzavřené elektronové struktury a velké hodnoty ionizační entalpie jsou atomy radonu a dalších vzácných plynů extrémně stabilní. Neexistují mezi nimi běžné interakce elektronových párů. Bylo prokázáno, že radon reaguje při teplotách nižších než 25 °C s fluorem, halogenfluoridy a řadou solí kyslíkatých kyselin, ale neexistují žádné důkazy o existenci radonových sloučenin nebo iontů ve vodných roztocích [5].

Slabé síly (van der Waalsovy síly nebo disperzní síly) jsou přímo úměrné polarizovatelnosti a nepřímo úměrné ionizační entalpii atomů. První ionizační energie (energie potřebná k odtrhnutí elektronu s nejvyšší energií z neutrálního atomu v plynném stavu) je pro radon 1 037 kJ / mol a pro ostatní vzácné plyny se zvyšuje se snižujícím se atomovým číslem, což je znázorněno na Obrázek 2 [5].



Obrázek 2: Závislost první ionizační energie na atomovém čísle daného prvku [5]

Radon má ze všech vzácných plynů nejvyšší atomové číslo, a jelikož elektronegativita ve sloupci periodické tabulky klesá s rostoucím atomovým číslem, má radon nejnižší elektronegativitu ze všech vzácných plynů. Jinými slovy, radon, jehož elektronegativita je 2,6 je o trochu reaktivnější než např. xenon, jehož elektronegativita je 2,2. Rozpustnost ve sloupci periodické tabulky se zvyšuje s rostoucím atomovým číslem, a proto je radon rozpustnější než např. již zmíněný xenon. Radon je dále lépe rozpustný v organických kapalinách než ve vodě. Hodnota měrného skupenského tepla varu (práce, kterou je třeba vykonat k překonání přitažlivých atomových sil) se zvyšuje s rostoucím atomovým číslem, a proto je pro radon ze všech vzácných plynů nejvyšší. Závislost měrného skupenského tepla varu na atomovém čísle je graficky znázorněna na Obrázek 3 [5].



Obrázek 3: Závislost měrného skupenského tepla varu na atomovém čísle daného prvku [5]

Základní atomové, fyzikální a chemické parametry radonu jsou shrnuty v Tabulka 2. Průměrné atomové rychlosti při průměrné povrchové teplotě na Zemi (14 °C neboli 287 °K) jsou pro vodík a vzácné plyny uvedeny Tabulka 3. Průměrná atomová rychlost radonu je podle očekávání výrazně nižší než u jiných vzácných plynů [5].

Tabulka 2: Atomové, fyzikální a chemické parametry radonu [5]

Vlastnost	hodnota
atomové číslo	86
hmotnostní číslo	222
konfigurace valenčních elektronů	6s ² 6p ⁶
hustota (kg · m ⁻³)	9,73
bod tání (°K)	202
bod varu (°K)	208
měrné skupenské teplo tání (kJ · mol ⁻¹)	3,247
měrné skupenské teplo varu (kJ · mol ⁻¹)	18
první ionizační energie (kJ · mol ⁻¹)	1037
elektronegativita	2,2
kovalentní poloměr (nm)	0,15

Tabulka 3: Závislost měrného skupenského tepla varu na atomovém čísle daného prvku [5]

izotop	H	He	Ne	Ar	Kr	Xn	²²² Rn
atomová rychlost (m · s ⁻¹)	2 456	1 232	549	390	269	215	165

1.3.2 Transport radonu

„Hlavním zdrojem radonu je geologické podloží, potažmo půda, ve které se průměrná objemová aktivita radonu v půdním plynu pohybuje řádově v kBq/m³. Z povrchu půdy uniká radon do atmosféry (emanuje) průměrnou rychlostí 20 Bq/m³/s. V přízemních vrstvách atmosféry se jeho aktivity pohybují v jednotkách až desítkách Bq/m³.“ [6]

Transport radonu z geologického podloží lze rozdělit na 2 etapy – první z nich je tzv. emanace, na jejímž počátku se atomy ²²⁶Ra přeměňují na atomy ²²²Rn. Poté, co tyto atomy doputují k povrchu minerálu, dochází k jejich přesunu do pórů a trhlin horniny. Druhou etapou je samotný transport radonu z geologického podloží, který je realizován pomocí dvou procesů – difúze a konvekce [7].

Konvekce je na rozdíl od difúze způsobena vnějšími fyzikálními jevy, jako je např. rozdíl tlaku a teploty v podloží a ve vnější atmosféře, velikostí tektonických struktur a poruch nebo pohyb podzemních vod [7].

Difúze je způsobena především fyzikálními jevy probíhajícími na úrovni atomů a molekul. Atomy a molekuly jsou v důsledku jejich tepelného pohybu přemísťovány z míst s jejich vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací. Dále difúze závisí teplotě a vlhkosti půdy, na uspořádání částic horniny a na pórovitosti prostředí. Je prokázáno, že k transportu radonu z půdy do atmosféry dochází převážně díky molekulární difuzi. Hustota toku radonu J^D (jednotka: $Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) je popsána tzv. Fickovým zákonem (2), podle něhož je J^D přímo úměrná jeho koncentračnímu gradientu.

$$J^D = -n_s D \nabla C \quad (2)$$

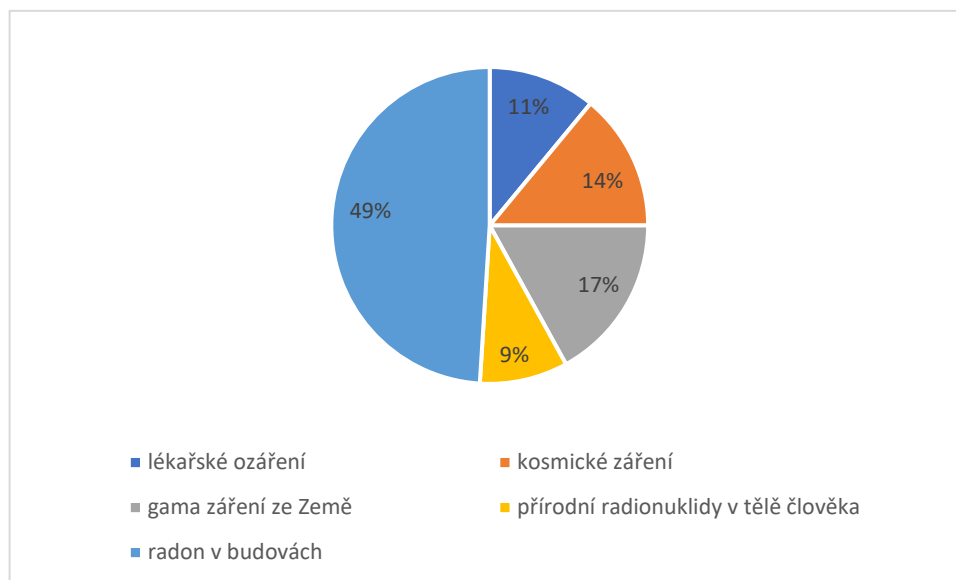
kde n_s je pórovitost půdy, D je difuzní koeficient a ∇C je koncentrační gradient aktivity radonu. Záporné znaménko ve vztahu (2) značí, že radon difunduje z vyšších koncentrací na nižší. Největší vliv na velikost D má vlhkost půdy [5; 7].

1.3.3 Dceřiné produkty radonu

Dceřiné produkty radonu jsou znázorněny v uranové přeměnové řadě na Obrázek 1. Největší nebezpečí spočívá v tom, že se mohou vázat na částičky aerosolu (tzv. vázaná frakce) nebo existovat volně (tzv. volná frakce), po vdechnutí se obě frakce mohou deponovat v plicích a zvyšovat pravděpodobnost vzniku rakoviny plic [5].

1.4 Zdravotní dopady radonu

Radon tvoří přibližně 50 % celkové dávky záření přijímaného širokou veřejností. Poměrný příspěvek složek k radiační zátěži obyvatelstva je znázorněn na Obrázek 4 [6].



Obrázek 4: Rozdělení dávek radiační zátěže [6]

Zájem lidí o zdravotní rizika spojená s ionizujícím zářením se během posledních čtyř desetiletí výrazně zvýšil. Jedním z důvodů mohou být relativně nedávné nehody reaktorů v jaderných elektrárnách – Three Mile Island v USA, Černobyl v bývalém SSSR nebo Fukušima v Japonsku [4].

Dalším důvodem mohou být současné intenzivní studie a měření radonu. V České republice v současnosti již třetí dekádu probíhá tzv. radonový program, ve kterém Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a Státní ústav radiační ochrany (SÚRO, v.v.i.) nabízí bezplatné měření radonu v domech pomocí stopových detektorů [8].

1.4.1 Radonový program v ČR

V České republice je již třetím desetiletím úspěšně SÚJB realizován tzv. radonový program, který je cílený na snižování koncentrací radonu v obytných prostorech a vzdělávání obyvatelstva v oblasti ochrany před radonem. V současné době běží program RANAP [9].

„RANAP je zpracován v souladu s požadavky SMĚRNICE RADY 2013/59/EURATOM ze dne 5. prosince 2013, kterou byly stanoveny základní bezpečnostní standardy ochrany před nebezpečím vystavení ionizujícímu záření, v souladu s dokumentem IAEA „Safety Standards General Safety Requirements Part 3.5 Existing exposure situation“

a v souladu se zákonem č. 263/2016 Sb., atomový zákon. (...) RANAP navazuje na Radonové programy České republiky, které byly realizovány na základě usnesení vlády v letech 2000 až 2009 a v letech 2010 až 2019. “ [9]

RANAP je zaměřen na regulaci ozáření obyvatel z radonu v budovách s obytnými nebo pobytovými místnostmi, školských zařízeních, budovách sloužících k zajištění sociálních nebo zdravotních služeb a na pracovištích se zvýšeným ozářením z radonu [9].

1.4.2 Historie

Důkazy o zvýšené úmrtnosti na respirační onemocnění u některých skupin havířů ve střední Evropě pocházejí ze šestnáctého století, ale až v devatenáctém století bylo odhaleno, že příčinou úmrtí byla rakovina plic. První podezření na radon jakožto primární příčinu uvedeného onemocnění padlo ve dvacátém století a jeho příčinná role byla definitivně potvrzena v padesátých letech tohoto století [5].

Studie, jichž se účastnili horníci, kteří byli pracovníě vystaveni radonu obvykle ve vysokých koncentracích, jasně prokázaly zvýšené riziko onemocnění rakoviny plic pro kuřáky i nekuřáky. Na základě těchto důkazů byl radon v roce 1988 klasifikován Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny (IARC) jako lidský karcinogen [5].

1.4.3 Studie na zvířatech

Základem pro hodnocení rizik expozice radonu jsou lidské epidemiologické údaje. Další vhled do podstaty vztahu expozice a zdravotních dopadů poskytují experimenty na zvířatech. První takové studie proběhly v 50. letech minulého století v USA a ve Francii, kde byli psi, potkani a křečci vystaveni radonu a jeho dceřiným produktům v kontrolovaných laboratorních podmínkách. Dýchací cesty zvířat, která inhalovala radon a jeho dceřiné produkty ve směsi vykazovaly více než stokrát vyšší aktivitu než dýchací cesty zvířat, která inhalovala samotný radon. Pokusy potvrdily, že dceřiné produkty radonu měly výrazný vliv na výskyt nádorů u potkanů. Experimenty byly také zaměřeny na studium souběžné expozice zvířat dceřiným produktům radonu, prachu z uranové rudy, výfukovým plynům ze vznětových motorů a cigaretovému kouři [4].

Ze studií na zvířatech vědci zjistili, že výskyt nádoru dýchacích cest se lineárně zvyšuje s kumulativní expozicí dceřiným produktům radonu. Je však potřeba zdůraznit, že

lokalizace a histopatologie rakoviny plic je u zvířat a lidí odlišná, a proto nelze experimentální údaje ze studií na zvířatech přímo aplikovat na lidskou populaci [4].

1.4.4 Základní fakta

Nejdůležitější poznatky o zdravotních účincích radonu jsou shrnuty v následujících bodech [10; 11]:

- Epidemiologické studie potvrzují, že radon zvyšuje riziko rakoviny plic u běžné populace. Další účinky radonu na zdraví nebyly dosud prokázány.
- Odhaduje se, že radon je příčinou přibližně 3–14 % všech onemocnění rakovinou plic.
- Radon je po kouření druhou nejzávažnější příčinou rakoviny plic v mnoha zemích. Je mnohem pravděpodobnější, že radon způsobí rakovinu plic u lidí, kteří kouří nebo kouřili v minulosti než u nekuřáků. Jedná se však také o primární příčinu rakoviny plic u lidí, kteří nikdy nekouřili.
- Není známa žádná prahová koncentrace, pod níž expozice radonu nepředstavuje žádné riziko. I nízké koncentrace radonu mohou vést k malému zvýšení rizika vzniku rakoviny plic.

Existují dva způsoby ozáření radonem – prvním způsobem je vnější ozáření a druhým způsobem je vnitřní ozáření [4].

1.4.5 Vnější ozáření

Radon a řada jeho dceřiných produktů emituje při přeměně alfa částice. K proniknutí alfa částice do tkání a buněk je potřeba, aby měla dostatečnou energii. Běžná alfa částice o energii 5,5 MeV může proniknout přibližně 40 μm měkké tkáně, přičemž během této cesty může poškodit až 4 buňky. Avšak k proniknutí lidskou kůží je potřeba energie o velikosti alespoň 7,5 MeV. Z alfa zářičů uvedených v Tabulka 4 vyzařuje tuto potřebnou energii ^{214}Po . Existuje podezření, že právě tento radionuklid je příčinou rakoviny kůže u horníků v uranových dolech s vysokou koncentrací radonu [4].

Tabulka 4: Poločas přeměny a energie α částic vybraných radionuklidů

izotop	$T_{1/2}$	energie α částice (MeV)
^{222}Rn	3,82 dne	5,49
^{218}Po	3,05 min	6,00
^{214}Po	1,64 μs	7,69

Alfa částice ztrácí ve vzduchu svou ionizační energii rychlostí cca 1 MeV/cm. Naše pokožka je tedy neproniknutelná i pro takové alfa částice, k jejichž emisi dochází pouhý cm od povrchu kůže. V běžném prostředí tedy není v blízkém okolí člověka dostatečné množství ^{214}Po , které by vedlo k možnosti onemocnění rakovinou kůže. Měkká tkáň v plicích a jiných vnitřních orgánech však nemá ochrannou vrstvu neživé látky jako kůže. Jelikož k průniku měkkou tkání o tloušťce 40 μm je zapotřebí pouze 5,5 MeV kinetické energie, mohou být všechny alfa záři uvedené v Tabulka 4 škodlivé, pokud v našem těle projdou radioaktivní přeměnou [4].

1.4.6 Vnitřní ozáření

K vnitřnímu ozáření dochází při požití nebo vdechnutí plynu, ve kterém je směs radonu a jeho produktů přeměny. Měkké tkáně v plicích a zažívacím traktu mohou být poškozeny většinou alfa částic emitovaných radonem a jeho dceřinými produkty [4].

Alfa částice mohou vstupovat do těla při konzumaci vody bohaté na radon. Po vypití takové vody radon difunduje stěnami žaludku a střev. Poté se krevním oběhem dostává do plic, odkud je vydechován. Vystavení stěn žaludku radonu a jeho dceřiným produktům se nepovažuje za rizikové z důvodu přítomnosti potravy, alfa částice totiž mohou být odstíněny velmi tenkou vrstvou jídla. Nejsou tedy známy žádné přímé důkazy spojující požitý radon se zvýšeným výskytem rakoviny trávicího traktu. Podle teoretického modelu jsou však dávky v plicích z požitého radonu o 2–3 řády nižší než dávky v plicích z inhalovaného radonu a celkově je tedy zdravotní riziko z požitého radonu výrazně menší ve srovnání se zdravotním rizikem z inhalovaného radonu [4].

Nejen u horníků pracujících v uranových dolech, ale také u běžné populace může být zvýšené množství radonu ve vnitřním prostředí příčinou rakoviny plic. Ačkoli je většina

radonového plynu vydechována, jeho dceřiné produkty, které jsou pevnými látkami, se mohou zadržovat na stěnách a membránách našeho dýchacího systému a poškozovat je [4].

Řasinkový epitel neboli vlhká výstelka průdušek je v zásadě tenká vrstva složená z pohárkových a řasinkových buněk nahoře a bazálních buněk dole. Právě bazální buňky jsou některými vědci považovány za cílové buňky pro alfa částice. Toto pozorování je založeno na skutečnosti, že zárodky rakoviny plic u horníků v uranových dolech se objevují primárně v průduškách tracheobronchiální oblasti [4].

2 Proudění plynů v odvalech a detekce radonu

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, radon je součástí uranové přeměnové řady a jelikož je uran, resp. mateřský prvek radium v různém množství přítomen v horninách zemské kůry, radon se z těchto hornin uvolňuje a stává se součástí půdního plynu. K jeho exhalaci do ovzduší poté dochází pomocí dvou transportních procesů – difúze a konvekce, které jsou podrobněji popsány v části 1.3.2. Stejně tak se radon uvolňuje do plynu v suťových polích nebo odvalech. V této kapitole budou jednak popsány možnosti detekčních technik radonu poblíž odvalů a jednak předchozí modelové studie proudění plynů v odvalech.

2.1 Možnosti detekčních technik radonu poblíž odvalů

Tlak energetického a zbrojního průmyslu vedl na různých místech po celém světě k těžbě uranové rudy. Během těžby vznikaly u uranových dolů odvaly s nezužitkovatelným materiálem (tzv. hlušinou). Tyto odvaly se nacházejí také v České republice a mohou být významným zdrojem radonu, jenž může mít negativní zdravotní dopady na okolní obyvatelstvo, což by mělo být zohledněno také v územních plánech. Je tedy důležité se problematikou exhalace radonu z odvalů a následných zdravotních účinků dále zabývat. Nezbytnou součástí studií chování radonu, jehož původ je v odvalu, je měření koncentrací radonu v půdním vzduchu v odvalu, na jeho povrchu a pro odhad ozáření obyvatelstva také v přilehlých obcích. V některých případech je nutné sledovat koncentrace přírodních radionuklidů ve vodách, pocházejících z odvalu [12].

Výsledky dlouhodobých kontinuálních měření koncentrací radonu, jeho krátkodobých produktů přeměny a dalších parametrů fyzikálních polí mohou být použity pro modelování a odhad chování radonu v daném odvalu a jeho blízkosti. V případě monitorování odvalu pro potřeby modelování využijeme metody kontinuální, umožňující sledování daných parametrů v co nejdelším časovém období, aby byly zastíženy sezónní změny. Kromě koncentrací radonu budou důležitými sledovanými parametry také rozdíly mezi vnitřní a vnější teplotou, diferenční tlaky mezi povrchovou vrstvou odvalu a vnějším prostředím, proudění plynu v odvalu, intenzita a směr větru v okolí odvalu atd. Nejčastěji používanými monitory koncentrací radonu v tomto případě jsou přístroje s polovodičovým

detektorem nebo ionizační komory, s dostatečnou kapacitou paměti a energetickou výdrží. Doplnkovou metodou může být gama spektrometrie in situ [12].

Pro odhad zdravotního dopadu radonu, jehož původ je v odvalu, je nezbytné především kontinuální monitorování OAR nebo EOAR (ekvivalentní objemová aktivita radonu, resp. objemová aktivita radonu krátkodobých dceřiných produktů radonu) v přílehlých obcích a znalost chování obyvatel (znalost doby pobytu uvnitř a vně budov). V případě odvalů je zdravotní dopad radonu, uvolňovaného do okolí, možné odhadnout podle metodického doporučení SÚJB *Postupy při výpočtu ozáření obyvatelstva přírodními radionuklidy uvolňovanými do životního prostředí a při posuzování zásahů v oblastech ovlivněných hornickou činností* platným od roku 2008. Toto doporučení je zohledněno také v Programech monitorování o. z. SUL, DIAMO, s. p. V obci Brod (a také v některých dalších obcích) jsou umístěny monitorovací stanice ALGADE Environmental, které poskytují výsledky ve formě měsíční ekvivalentní objemové koncentrace radonu v Bq/m^3 (EOAR – stanoveno měřením koncentrace dceřiných produktů přeměny, zachycených prosáváním na filtru během měřicího intervalu) a příkonu prostorového dávkového ekvivalentu v $\mu\text{Sv/h}$ (PPDE). Tyto výsledky ze tří monitorovacích bodů v obci Brod (označení o. z. SUL: B-2, B-3, B-4) slouží k odhadu efektivní dávky pro obyvatele (reprezentativní osobu). Výsledky jsou každoročně zveřejňovány jako součást Zpráv o vyhodnocení programu monitorování, veličin, parametrů a skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany, o. z. SUL. Např. v roce 2017 byla dávka ze zevního ozáření v obci Brod na monitorovacích bodech 2, 3 a 4 rovna 29, 62 a 14 μSv , zatímco úvazek efektivní dávky z inhalace krátkodobých produktů přeměny radonu byl 185, 554 a 337 μSv (všechny hodnoty jsou stanoveny po odečtu pozadí). V případě monitorovacího bodu B-3 a B-4 byla v roce 2017 překročena dávková optimalizační mez 250 μSv , proto je důležité se měřením radonu, s cílem pochopit chování radonu v okolí odvalu, dále věnovat [12].

Pro zlepšení monitorování radiační situace v okolí odvalu š. č. 15 byla v roce 2016 na okraji obce Brod umístěna ve spolupráci s o. z. SUL stanice RAMONIS, kterou spravuje SÚRO, v.v.i. Mezi hlavní kontinuálně monitorované veličiny zde patří: OAR, EOAR, dávkový příkon, meteorologické parametry. První výsledky měření v obci Brod spolu se souhrnem měření o. z. SUL za roky 2009-2015 a dalšími měřeními a výpočty shrnuje zpráva [13].

V rámci předložené bakalářské práce byly k monitorování odvalu š. č. 15 použity přístroje, které byly k dispozici na FJFI a SÚRO, v.v.i. a které jsou detailně popsány v kapitole 3.1. K dispozici byly také výsledky měření OAR z monitorovací stanice RAMONIS (viz kap. 3.3.5).

2.2 Modelové studie proudění plynů v odvalech

V minulých letech bylo vypracováno několik modelových studií transportu plynu v odvalech nebo štěrkovitých tělesech podobného charakteru. Jedná se především o následující oblasti:

- odval u šachty č. 1, důl Sullivan, Kanada
- odval 38neu, Německo
- okolí dolu Ranger, Austrálie
- odvaly na Příbramsku, Česká republika

V následujících kapitolách budou metody a výsledky těchto studií podrobněji popsány.

2.2.1 Odval u šachty č. 1, důl Sullivan, Kanada

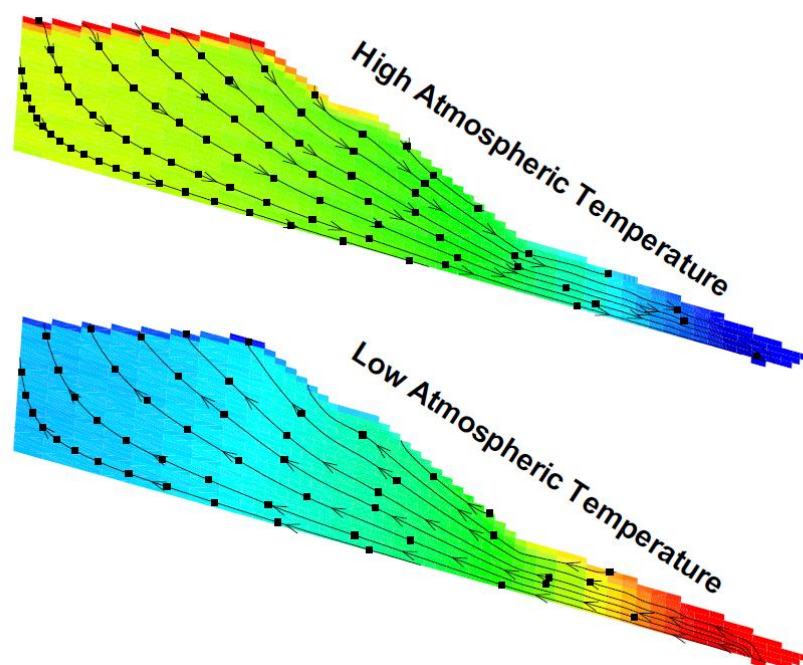
- lokalita: důl Sullivan, Britská Kolumbie, Kanada
- zhotovitel: společnost INRS (Institut national de la recherche scientifique) ve spolupráci s Teck Cominco Limited; Belkacem Lahmira a René Lefebvre
- časové období: červenec 2008 [14]

Tento odval se nachází na přirozeném svahu a je celý zakrytý. Odtok plynu zbaveného kyslíku drenážním potrubím v areálu u dolní části odvalu vyústil ve čtyři úmrtí. Účelem této studie bylo vyvinout numerický model pro zjištění fyzikálních mechanismů, které řídí tok plynu. Pro provádění výpočtů byl použit numerický simulátor Tough AMD. K vytvoření modelu bylo provedeno 6 monitorovacích vrtů a dále byly na odvalu umístěny 2 stanice monitorující půdní vlhkost a jedna meteorologická stanice. Předpokládalo se, že molární hmotnost skládkového plynu je ekvivalentní molární hmotnosti atmosférického vzduchu [14].

Bylo zkoumáno, zda tok plynu v odvalu mohou ovlivňovat následující mechanismy: gradient teploty, gradient tlaku, složení plynu a typ odpadní horniny. Tyto parametry navíc nejsou nezávislé, jelikož např. změna teploty plynu nebo jeho složení mohou způsobit změnu tlaku plynu. Bylo pozorováno, že z uvedených mechanismů má na tok plynu v odvalu největší vliv atmosférická teplota [14]

2.2.1.1 Vliv atmosférické teploty na tok plynu v odvalu

V této studii byl zkoumán vliv atmosférické teploty na tok plynu v odvalu při dvou odlišných teplotách: 5 °C a 36 °C. Bylo zjištěno, že při nízké atmosférické teplotě (5 °C) proudí plyn směrem od dolní části odvalu (tzv. pata odvalu) k horní části odvalu (tzv. koruna odvalu). V případě odvalu u dolu Sullivan do něj plyn při nízkých teplotách vstupoval především již zmíněným drenážním potrubím a vystupoval otvory v koruně odvalu. Bylo prokázáno, že rychlost plynu je největší u paty odvalu a během proudění ke koruně se postupně snižuje. Opačná situace nastává při vysoké atmosférické teplotě (36 °C), kdy plyn v odvalu proudí směrem od koruny k patě odvalu. Avšak podobně jako při nízké atmosférické teplotě je i při vysoké atmosférické teplotě rychlost plynu největší u paty odvalu, v tomto případě tedy při jeho výstupu z odvalu. Závislost toku plynu v odvalu na atmosférické teplotě je znázorněna na Obrázek 5 [14].



Obrázek 5: Závislost toku plynu v odvalu na atmosférické teplotě (v horní části obrázku je znázorněna závislost při teplotě 36 °C a v dolní části obrázku je znázorněna závislost při teplotě 5 °C) [14]

Pokud je atmosférická teplota stejná jako je teplota uvnitř odvalu, k proudění plynu odvalem nedochází. Vnitřní teplota odvalu u dolu Sullivan se pohybovala mezi 10–12 °C

a pokud byla taková i atmosférická teplota, drenážním potrubím neproudil žádný plyn. Dále bylo pozorováno hodinové až tříhodinové zpoždění mezi snížením teploty a zvýšením rychlosti v drenážním potrubí. Avšak zpoždění mezi zvýšením teploty a snížením rychlosti v drenážním potrubí pozorováno nebylo [14].

2.2.1.2 Vliv atmosférického tlaku a složení odvalového plynu na tok plynu v odvalu

Změny atmosférického tlaku mají nevýznamný vliv na rychlost proudění plynu v drenážním potrubí, a tedy obecně i na směr nebo rychlost proudění plynu v celém odvalu [14].

Tok plynu v odvalu je řízen relativním vztlakem dvou fází – odvalového plynu a atmosférického vzduchu, a přímo souvisí s jejich relativními hustotami. Přítomnost CO₂ v odvalovém plynu způsobuje, že je jeho molární hmotnost ekvivalentní molární hmotnosti atmosférického vzduchu. To znamená, že složení odvalového plynu nemá vliv na relativní hustoty zmíněných dvou fází. Změny hustoty atmosférického vzduchu jsou způsobeny kolísáním atmosférické teploty, zatímco hustota skládkového plynu je díky stabilní vnitřní teplotě v odvalu téměř konstantní. Pokud je atmosférická teplota nižší než teplota uvnitř odvalu, hustota atmosférického vzduchu je vyšší než hustota odvalového plynu, což způsobuje nasávání plynu ve spodní části odvalu a jeho tok směrem nahoru. Opačná situace nastává, pokud je atmosférická teplota vyšší než teplota uvnitř odvalu [14].

2.2.1.3 Vliv dalších faktorů na tok plynu v odvalu

Tok plynu odvalem je usnadněn, pokud je odpadní hornina v odvalu hrubá. Relativně nízká propustnost krycí vrstvy odvalu významně omezuje výměnu plynů mezi odvalem a atmosférou. Dokonalé zakrytí odvalu by vedlo k velmi odlišnému chování při proudění plynu. V případě odvalu u dolu Sullivan by směr proudění plynu byl velmi podobný i bez přítomnosti drenážního potrubí a krycí vrstvy. Velikost toku plynu by se však změnila, bez drenážního potrubí by byla menší a bez krycí vrstvy naopak větší [14].

2.2.2 Odval 38neu, Německo

- lokalita: odval 38neu, Bad Schlema, Německo

- zhotovitel: společnost INRS (Institut national de la recherche scientifique) ve spolupráci s Wismut GmbH a University of Saskatchewan; René Lefebvre, Belkacem Lahmira a Walfried Löbner
- časové období: 2011 [15]

Od roku 1991 se společnost Wismut GmbH stará o odpadní materiály vzniklé při těžbě uranu ve východním Německu. V bývalém těžebním areálu Schlema-Alberoda se poblíž obytných oblastí nachází celkem 23 odvalů s odpadní horninou. Halda 38neu, jejíž letecký snímek je na Obrázek 6, byla postavena podél přirozeného svahu na okraji obydleného údolí. Obsahuje 4,7 Mm³ odpadní horniny, její šířka je 750 m a maximální výška je 100 m [15].

Úkolem této studie bylo sledování výdechu radonu z odvalu po jeho sanaci, která zahrnovala přidání 1 m silného půdního krytu. Dalším úkolem bylo vyvinout vhodný koncepční model toku plynu v odvalu a identifikovat možnosti ovlivnění procesů transportu plynu za účelem zmírnění uvolňování radonu [15].



Obrázek 6: Letecký snímek odvalu 38neu [15]

2.2.2.1 Popis studie

V různých výškách na stěně odvalu bylo v půdním krytu provedeno měření diferenčního tlaku, což je rozdíl atmosférického tlaku a tlaku odvalového plynu. Záporné hodnoty diferenčního tlaku indikují nižší tlak odvalového plynu v porovnání s atmosférickým tlakem, kladné hodnoty naopak. Měřící body byly soustředěny v jedné linii procházející přes nejsilnější část odvalu. Neustálé monitorování těchto diferenčních tlaků provedla společnost Wismut GmbH během července a srpna 2010. Dále byla ze současné

topografie povrchu odvalu a dřívější přirozené topografie povrchu před umístěním odvalu odvozena tloušťka odpadní horniny. Rovněž byla měřena propustnost vzduchu pro půdní kryt a bylo zjištěno rozdělení velikosti odpadní horniny na odvalu. V neposlední řadě meteorologická stanice nepřetržitě monitorovala atmosférickou teplotu a tlak [15].

Diferenční tlaky byly pro každý měřící bod korelovány s atmosférickými teplotami. Ve všech měřících bodech byly diferenční tlaky nulové při teplotě 9,5 °C. Tato teplota odpovídá průměrné roční atmosférické teplotě v místě odvalu 38neu a předpokládá se, že jde také o průměrnou vnitřní teplotu v odvalu. Bylo zjištěno, že diferenční tlaky jsou ovlivňovány rozdíly mezi vnitřní teplotou v odvalu, o níž se předpokládá, že je konstantní a proměnlivou atmosférickou teplotou [15].

Diferenční tlaky byly podrobněji zkoumány pro běžné teploty v zimním (5 °C) a letním období (25 °C). Byla pozorována lineární závislost velikosti diferenčních tlaků na nadmořské výšce měřících bodů, která však byla pro uvedené atmosférické teploty téměř inverzní. V nadmořské výšce 440 m byly pro obě období naměřeny velmi nízké diferenční tlaky. Celkově byly diferenční tlaky v letním období vyšší než diferenční tlaky v zimním období, a to z důvodu, že letní teploty se více odchylují od průměrné vnitřní teploty v odvalu (9,5 °C) než zimní teploty. Při teplotě 25 °C je tlak odvalového plynu v horní části odvalu nižší než atmosférický tlak, v dolní části odvalu je tomu naopak. Toto má za následek proudění plynu odvalem směrem dolů. Při teplotě 5 °C je proudění plynu v odvalu opačné [15].

Hodnoty propustnosti půdního krytu odvalu získané z terénního měření odpovídaly hodnotám odvozeným od toku radonu. Bylo zjištěno, že při naměřené propustnosti půdní kryt omezuje vstup plynu do odvalu a výstup z něj, avšak hodnoty propustnosti byly mnohem vyšší, než se dalo očekávat na základě velikosti zrna v půdním krytu. Podle informací společnosti Wismut GmbH týkajících se jiného odvalu je tento vývoj směrem k vyšší propustnosti půdního krytu normální, a proto lze v budoucnu očekávat další zvýšení propustnosti půdního krytu i pro odval 38neu. Předpokládá se, že důvodem může být růst vegetace a přirozený vývoj materiálu vystaveného povětrnostním podmínkám [15].

2.2.2.2 Numerický model

Byly vyvinuty dva modely reprezentující tok plynu na odvalu 38neu pro atmosférické teploty 5 °C a 25 °C. Prvním z nich byl zjednodušený model, který zohledňoval pouze odpadní horninu. Druhý, podrobný model, zohledňoval dva typy odpadní horniny, hrubou vrstvu balvanů na základně odvalu a přirozenou půdu pod odvalem. Pro oba typy modelů byly použity následující zjednodušující předpoklady [15]:

- základna odvalu je nepropustná pro tok plynu
- přenos tepla vedením není v modelech zastoupen
- byl uvažován pouze tok plynu, voda byla nastavena jako nepohyblivá
- stejné složení odvalového plynu a atmosférického vzduchu

Zjednodušený model byl vytvořen především pro správnou kalibraci počátečních podmínek použitých u podrobného modelu. Do podrobného modelu byly dále zahrnuty údaje z:

- měření diferenčních tlaků v různých výškách podél povrchu odvalu
- měření hodnot objemových koncentrací radonu ve spodní části odvalu
- měření rychlosti proudění plynu v horní části odvalu při nízké atmosférické teplotě

Podrobný model tedy simuluje rychlost a směr tok plynu v odvalu. Oba vytvořené modely byly použity pro výzkum možností snížení koncentrací radonu [15].

2.2.2.3 Snížení koncentrací radonu v okolí odvalu

V této studii byla kromě jiného navrhována následující opatření k potenciálnímu snížení toku radonu [15]:

- 1) vertikální bariéry v celé tloušťce odpadní horniny umístěné na patě nebo ve středu odvalu (potenciál: změna proudění plynu v odvalu)
- 2) zesílení půdního krytu v horní části odvalu (potenciál: snížení propustnosti půdního krytu pro vzduch na koruně odvalu)
- 3) vyvrtání otvorů v půdním krytu ve střední části odvalu (potenciál: změna proudění plynu v odvalu, snížení koncentrací radonu u paty odvalu)

- 4) realizace vertikálních odvzdušňovacích vrtů ve spodní části odvalu (potenciál: pasivní odvod odvalového plynu při jeho proudění odvalem směrem dolů a následné snížení toku plynu u paty odvalu) – považováno za nejlepší možné řešení

2.2.2.4 Navazující studie z roku 2019

V roce 2019 byla na odvalu 38neu provedena stejnou společností další studie, která navázala na tu z roku 2010. Byla založena na datech z terénního měření diferenčního tlaku v půdním krytu provedeného již v předešlé studii. K modelování proudění plynu v odvalu byl stejně jako v případě odvalu u dolu Sullivan v Kanadě použit numerický simulátor Tough AMD. Tento simulátor dobře reprezentuje přenosové procesy a reakce uvnitř odvalu kyselinotvorných hornin obsahujících pyrit. Uvažuje teplo a 3 složky – vodu, kyslík a ostatní plyny, které vzduch obsahuje. Kromě stejných závěrů jako u studie z roku 2010 tato nová studie poukázala na důležitost vnitřní geometrie odvalu, které úzce souvisí s prouděním plynu v odvalu. Dle této studie by tedy měl být kladen důraz na historické záznamy o stavbě odvalu, které by pravděpodobně mohly napomoci k lepší představě o preferenčních cestách plynu v odvalu [16].

2.2.3 Okolí dolu Ranger, Austrálie

- lokalita: okolí uranového dolu Ranger, severní Austrálie
- zhotovitel: School of Physical and Chemical Sciences (Queensland University of Technology) ve spolupráci se společností Environmental Research Institute of the Supervising Scientist a se společností International Atomic Energy Agency; Cameron E. Lawrence, Riaz A. Akber, Andreas Bollhöfer a Paul Martin
- časové období: 2002–2003 [17]

V této studii byla použita data z měření přímo v uranovém dole Ranger a také na odvalech obsahujících odpadní horninu. Zkoumány byly především následující parametry ovlivňující exhalaci radonu: koncentrace ^{226}Ra v půdě, struktura a vlhkost půdy, množství srážek a přítomnost vegetace. Cíle studie byly následující:

- 1) poskytnout data o koncentracích radonu a jejich časových změnách během těžby

- 2) získat vstupní parametry pro modely proudění radonu
- 3) předpovědět pravděpodobná místa výdechu radonu po sanaci dané oblast

Měření hustoty toku radonu byla prováděna na různých místech v suchých obdobích v letech 2002 a 2003 a dále v pravidelných intervalech během jednoho roku [17].

2.2.3.1 Lokalita

Důl Ranger se nachází 230 km východně od města Darwin v tropické části severní Austrálie, kde je typické střídání období sucha a dešťů. Průměrné roční srážky se pohybují okolo 1 500 mm, přičemž více než 95 % z nich spadne během měsíců listopad–duben (období dešťů). Z toho vyplývá, že vlhkost půdy je vysoká v období dešťů a nízká a relativně konstantní v období sucha. Důl Ranger byl v provozu od roku 1980 do ledna 2021 a produkoval více než 5 000 tun U_3O_8 ročně. Předchozí studie naznačily, že největšími zdroji radonu jsou zde důlní jáma, místo s vytěženou rudou, odval s odpadní horninou a zpracovatelský závod [17].

2.2.3.2 Popis studie

Množství radonu bylo měřeno celkem na 654 místech, z nichž 298 se nacházelo přímo v oblasti dolu Ranger. Měření bylo provedeno jednak v místech, kde se nacházely horniny obsahující uran a jednak v místech s přirozeným půdním profilem. Měřící místa byla dále kategorizována buď jako přirozená anebo ovlivněná člověkem. Sezónní měření byla prováděna v každém místě jednou měsíčně po dobu jednoho roku [17].

Hustoty toku radonu byly měřeny pomocí nádob s aktivním uhlím a pomocí scintilačních emanometrů. Popis těchto metod je předmětem následujících dvou krátkých odstavců [17].

První použitou metodou bylo tedy měření pomocí nádob s aktivním uhlím. Nejprve byly nádoby naplněny 25 g aktivního uhlí a nejméně 24 hodin a poté byly nejméně 24 hodin před použitím zahřívány v peci při teplotě 110 °C, aby došlo k desorpci jakéhokoli dříve adsorbovaného radonu. Po vyjmutí z pece byly nádoby uzavřeny a přepraveny na daná místa k odběru vzorků, kde byly otevřeny, převráceny a pevně přitlačeny k zemi do hloubky asi 1 cm, aby bylo zajištěno dobré utěsnění mezi okrajem nádoby a zeminou. O čtyři až pět dní později byly nádoby znovu uzavřeny a vráceny do laboratoře. Aktivita ^{222}Rn adsorbovaného na aktivním uhlí byla stanovena na základě emise záření gama od ^{214}Pb a ^{214}Bi počítané gama spektrometrem s krystalem $NaI(Tl)$. Nádoby s aktivním uhlím jsou vhodné pro měření

průměrné hodnoty hustoty toku radonu po dobu obvykle několika dní, avšak při vyšších hustotách toku radonu může být doba měření kratší. Malou nevýhodou této metody je velmi malý povrch, jež každá nádoba pokrývá. Nejen z tohoto důvodu bylo užito také druhé metody na měření hustoty toku radonu – scintilační emanometrie [17].

U této metody byly použity dva scintilační emanometry navržené společností ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation), které po kalibraci sloužily k online monitorování exhalace radonu. Jejich hlavní výhodou je jednak měření hustoty toku radonu v relativně krátkém časovém intervalu a jednak to, že část pro odběr vzorků pokrývá větší povrch než nádoba v předchozí metodě [17].

2.2.3.3 Výsledky studie

Měření v období sucha prokázala nízkou a relativně stabilní vlhkost půdy v její horní vrstvě. V tomto období byla největší hustota toku radonu zaznamenána v tzv. vrstvě lateritu, což je jemnozrnná půda vytvořená zvětráváním hornin, která kromě velkého množství oxidů a hydroxidů železa obsahuje také velké množství uranu. Hustota toku radonu byla dále největší v místech s vysokou pórovitostí půdy, z čehož vyplývá, že pórovitost půdy je dalším významným faktorem ovlivňujícím exhalaci radonu. K vyšší pórovitosti půdy významně přispívá přítomnost vegetace, neboť kořenový systém vytváří půdu více pórovitou, a dokonce i v období sucha v ní udržuje určitou vlhkost. Z výsledků studie je dále patrné, že hustota toku radonu závisí téměř přímo úměrně na aktivitě ^{226}Ra v daném místě [17].

U dlouhodobého měření během celého roku byly mezi jednotlivými měsíci pozorovány významné rozdíly v hustotách toku radonu. Vysvětlení těchto rozdílů je však obtížné kvůli velkému počtu ovlivňujících faktorů, jako je míra infiltrace vody do půdy, množství srážek, pórovitost půdy a její struktura v daném místě. Půdní vlhkost je v období dešťů hlavním faktorem řídícím exhalaci radonu. Bylo pozorováno, že zvýšení vlhkosti půdy vede nejprve ke zvýšení exhalace radonu, která je nejvyšší při 3-4% objemové vlhkosti půdy. Avšak při 5% objemové vlhkosti půdy nastává zlom a s dalším nárůstem půdní vlhkosti voda působí jako mechanická zábrana a hustota toku radonu klesá. Největší rozptyl v naměřených hustotách toku radonu byl zaznamenán v měsíci dubnu, a to z důvodu, že jde o přechodný měsíc mezi obdobím dešťů a sucha. Celkově z výsledků měření vyplývá, že hustota toku radonu je nejvyšší v období sucha, s příchodem období dešťů klesá a během období dešťů je velmi proměnlivá [17].

2.2.4 Odvaly na Příbramsku, Česká republika

- lokalita: odvaly na Příbramsku, Středočeský kraj, Česká republika
- zhotovitel: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy ve spolupráci se státním podnikem DIAMO; Vladimír Fuka, Peter Huszár a Petr Pišoft
- časové období: 2017

2.2.4.1 Ložisko uranové rudy na Příbramsku

Uranové ložisko Příbram je endogenním hydrotermálním zrudněním v metalogenetické provincii Českého masivu [18].

„Za celé období exploatace příbramského ložiska, tj. za období 1947-1991 (44 let), bylo z podzemí vytěženo celkem 48,8 kt uranu, 6,2 kt olova, 2,4 kt zinku a 28,9 t stříbra. K tomu účelu bylo opracováno 19,6 mil. m² žilné plochy, vytěženo 6 mil. m³ aktivních základek a vyraženo 2 188 km horizontálních důlních děl, zasahujících do hloubky až 1,5 km.“ [18]

Zatímco odvaly po těžbě polymetalického zrudnění z ložiska Příbram jsou již rekultivovány, odvaly po těžbě radioaktivního nerostu jsou kromě několika výjimek, které byly rozebrány a tříděny na kamenivo pro liniové stavby, zachovány v původní podobě. Podrobnější záznamy o původu a rozložení materiálu na odvalech neexistuje. Podle záznamů DIAMO, s. p. je na odvalu u šachty č. 15 v současné době uloženo 7 507 639 m³ kameniva, tj. cca 12 762 986 t. Odhaduje se, že odval obsahuje cca 0,005 % zbytkového obsahu uranové mineralizace (cca 600-700 t uranu), což je řádově více než průměrný obsah uranu v horninách [18].

2.2.4.2 Numerický model

Jedním ze základních bodů této studie bylo vytvoření numerického modelu potřebného pro simulaci proudění plynu v odvalu. Dále byl pomocí výpočetní sítě vytvořen idealizovaný symetrický odval, na němž byl simulován vliv teploty na proudění plynu v odvalu [19].

Jedná se o numerický model vhodný pro popis proudění a přestupu tepla v porézních látkách, který byl upraven přímo na prostředí půdy a sypaného kameniva. Model byl vytvořen na základě metody konečných objemů, se kterými pracuje volně šiřitelná knihovna OpenFOAM verze 1612+1 [19].

Pro numerickou implementaci byly použity následující rovnice zohledňující kromě permeability, porozity a fyzikálních vlastností pevných látek i další parametry [19]:

1) Rovnice kontinuity

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

kde \vec{u} je vektor rychlosti.

2) Pohybová rovnice po zahrnutí Darcyho odporu

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla P - \frac{\vartheta}{K} \vec{u} + \vec{g} \frac{T - T_0}{T_0} \quad (4)$$

kde Φ je porozita prostředí, t čas, P tlak tekutiny vydělený referenční hustotou ρ_0 , ν kinematická viskozita vzduchu, K permeabilita prostředí, \vec{g} vektor tíhového zrychlení, T teplota a T_0 referenční hodnota teploty.

3) Rovnice přenosu tepla

$$(\Phi \rho_0 c_p + (1 - \Phi) \rho_s c_{ps}) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 c_p \nabla \cdot (\vec{u} T) = \nabla \cdot [(\Phi k + (1 - \Phi) k_s) \nabla T] \quad (5)$$

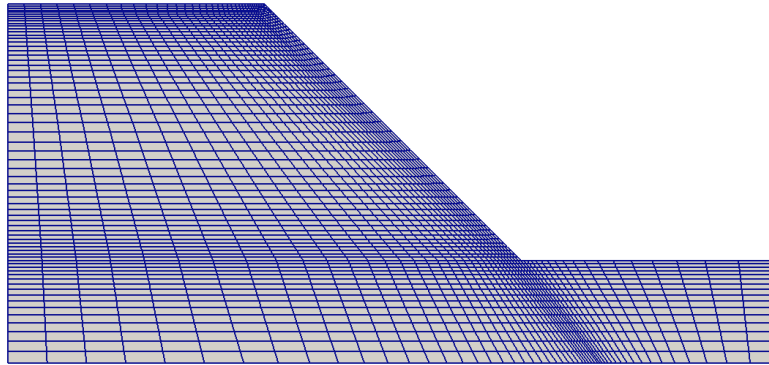
kde ρ_0 je referenční hustota, c_p měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku, ρ_s hustota pevné látky, c_{ps} měrná tepelná kapacita pevné látky, k tepelná vodivost vzduchu a k_s tepelná vodivost pevné látky.

4) Rovnice transportu radonu v porézním prostředí

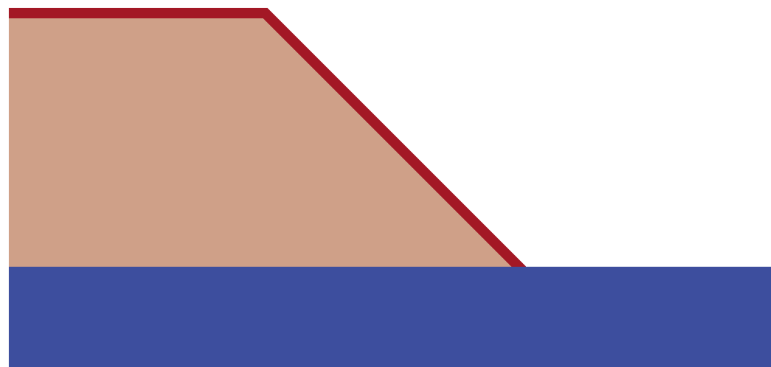
$$\Phi \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} c) = \nabla \cdot (D_b \nabla c) + (1 - \Phi) \lambda_{Ra} \varepsilon c_{Ra} - \Phi \lambda c \quad (6)$$

kde c je objemová aktivita radonu, D_b celková difuzivita vzduchu v porézním prostředí pro radon, λ_{Ra} přeměnová konstanta ^{226}Ra , ε koeficient emanace radonu pro dané prostředí, c_{Ra} objemová aktivita ^{226}Ra na m^3 horniny a λ přeměnová konstanta ^{222}Rn .

Výpočetní síť s 2566 buňkami reprezentující idealizovaný symetrický odval je znázorněna na Obrázek 7. Výpočetní síť byla dále rozdělena na 3 zóny, které jsou znázorněny na Obrázek 8. Modrou barvou je označeno půdní podloží, světle červenou vnitřek odvalu a tmavě červenou je označena okrajová vrstva odvalu o tloušťce 2 metry. Z Obrázek 7 je patrné, že výpočetní síť je nejhustší právě v oblasti okrajové vrstvy odvalu [19].



Obrázek 7: Výpočetní síť reprezentující idealizovaný symetrický odval [19]

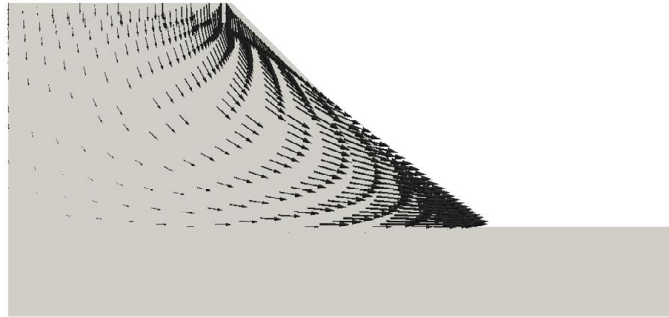


Obrázek 8: Rozdělení výpočetní sítě do 3 zón – půdní podloží, vnitřek odvalu, okrajová vrstva odvalu [19]

2.2.4.3 Výsledky studie

Podobně jako u již jmenovaných studií byla zjištěna závislost toku plynu v odvalu na teplotě vnější atmosféry. Bylo zjištěno, že v letním období je teplota v odvalu nižší než v jeho okolí, vzduch v odvalu je těžší, než vzduch v okolí a plyn tedy proudí odvalem směrem dolů a vystupuje u jeho paty. Tok plynu v odvalu v letním období je pomocí vektorů rychlosti znázorněn na Obrázek 9. V zimním období je situace přesně opačná – vzduch v odvalu je lehčí, než vzduch v jeho okolí a plyn proudí odvalem směrem nahoru a vystupuje na koruně odvalu. Dále byla pozorována vyšší rychlost toku plynu v okrajové vrstvě odvalu, a to z důvodu, že je v tomto místě vyšší permeabilita. Bylo také potvrzeno uplatnění jednoho

z Fourierových zákonů, podle nějž zpoždění chodu teploty v půdě od chodu teploty na povrchu roste s hloubkou, a to přibližně o 25 až 30 dní na každý metr hloubky.



Obrázek 9: Proudění uvnitř odvalu v létě znázorněné pomocí vektorů rychlosti [19]

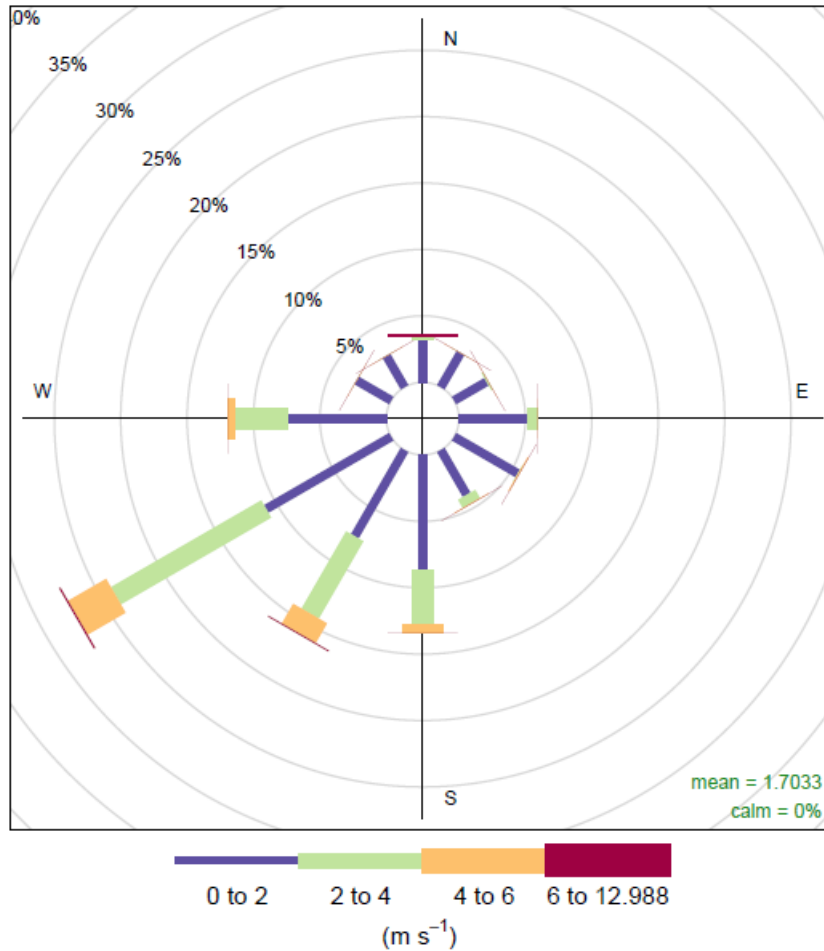
2.2.4.4 Předchozí měření objemových aktivit radonu

Od srpna 2017 do konce ledna 2018 provedl SÚRO, v.v.i. ve spolupráci s o. z. SUL, DIAMO, s. p. a FJFI v oblasti odvalu u šachty č. 15 a obci Brod kontinuální měření radonu. Sondy byly rozmístěny na 16 různých místech znázorněných na Obrázek 10. Část z nich byla umístěna v obci, a to jak uvnitř objektů, tak venku. K měření uvnitř objektů byly použity také přístroje RADIM 3A. Kromě objemových aktivit radonu (dále OAR) sondy zaznamenávaly také teplotu a relativní vlhkost vzduchu, přičemž OAR měřily s přibližně 3-5 hodinovým zpožděním. V jednom měřicím bodu v obci Brod byla umístěna meteostanice, jež zaznamenávala rychlost a směr větru, úhrn srážek, teplotu, tlak, relativní vlhkost vzduchu, intenzitu slunečního svitu a teplotu půdy v různých hloubkách [20].



Obrázek 10: Rozmístění sond pro měření OAR na odvalu u šachty č. 15 a v jeho okolí v období od srpna 2017 do ledna 2018 (autor: Lenka Thinová)

Nejvyšší hodnoty OAR byly zaznamenány v měřicích bodech 8, 9, a 10 u paty odvalu a v měřicím bodu 1 v ohlubni šachty, přičemž jejich průměrné hodnoty se pohybovaly nad 1000 Bq/m^3 a maximální hodnoty se pohybovaly nad $30\,000 \text{ Bq/m}^3$. Naopak nejnižší hodnoty OAR byly zaznamenány v měřicích bodech 2, 3 a 4 v Lešetících a jejich okolí, kde maximální hodnoty OAR nepřekročily 1000 Bq/m^3 . Bylo zjištěno střídání období s vyššími hodnotami OAR a s nižšími hodnotami OAR, přičemž nižší hodnoty OAR byly zaznamenány v zimních měsících [20]. Na Obrázek 11 je znázorněn graf větrné růžice v měřicím bodu 16, do něhož jsou zahrnuta meteorologická data z období od 11. 8. 2017 do 26. 1. 2018. Nejčastěji foukal slabý JZ vítr rychlostí 2–4 m/s [20].



Obrázek 11: Graf větrné růžice v měřicím bodu 16 [20]

Vysoké okamžité a průměrné OAR byly v měřicím bodu 16 naměřeny nejčastěji při slabém JV větru, tedy v případě, kdy vítr vanul směrem od odvalu směrem k obci Brod. Dále byly maximální hodnoty OAR naměřeny při stabilních podmínkách atmosféry, kdy vanul slabý vítr a teplota ve výšce 10 m byla vyšší než teplota ve výšce 2 m. Stabilních podmínek atmosféry bylo dosaženo nejčastěji v noci, a proto byly převážně v nočních hodinách zaznamenány maximální hodnoty OAR. Maximální a průměrné hodnoty OAR byly dále zaznamenány v hodinách, kdy nepršelo [20].

3 Experimentální část

Tato kapitola vychází z předchozí rešeršní části a dokumentuje praktické měření provedené na odvalu u šachty č. 15 v Brodu u Příbrami. Kromě popisu použitého technického vybavení jsou zde uvedeny naměřené hodnoty OAR a dalších fyzikálních parametrů. Část 3.3 obsahuje analýzu a diskusi naměřených dat, jsou zde uvedeny souvislosti mezi naměřenými hodnotami a porovnání s modelovými studiemi.

3.1 Použité technické vybavení

V této kapitole je stručně popsáno technické vybavení použité pro měření objemových aktivit radonu a také vybavení použité pro měření ostatních parametrů důležitých pro určení toku plynu tělesem odvalu.

3.1.1 USB radonová sonda TSR 4

Jedná se o přenosnou sondu určenou k samostatnému kontinuálnímu měření objemové aktivity radonu (OAR) primárně v uzavřených vnitřních prostorech. Sonda ukládá výsledky do interní paměti, jejichž odečet je kromě klasického propojení s počítačem přes USB možný také pomocí bezdrátového přenosu dat na vzdálenost max. 600 m. Nabíjení vysokokapacitního akumulátoru je možné rovněž pomocí USB nebo z adaptéru 230 V / 50 Hz. Základní popis sondy TSR 4 je znázorněn na Obrázek 12 [21].

Radon, který do měřicí komory uvnitř sondy vstupuje difuzí přes vstupní filtr, je následně detekován polovodičovým fotodetektozem. Na základě měření ve 2minutových intervalech sonda vypočítává krátkodobé (0,5hodinový klouzavý průměr z RaA (Po-218)) i dlouhodobé hodnoty koncentrace radonu (24hodinový klouzavý průměr z RaA (Po-218) + RaC (Po-214)). Kromě těchto hodnot jsou do interní paměti zaznamenávány hodnoty teploty a vlhkosti a naměřená energetická spektra. Omezujícím faktorem pro venkovní použití této sondy je maximální možná vlhkost 90 %, při jejímž překročení nemusí být naměřené údaje přesné [21].



Obrázek 12: Sonda TSR 4 s popisem základních částí [21]

3.1.2 GT-40

Tento přenosný gama spektrometr, který je určen pro použití v terénu, je vhodný pro rychlé a přesné stanovování aktivit zářičů gama. Naměřená data zaznamenává do paměti spolu se souřadnicemi GPS [22].

Pracuje ve 2 základních módech. Prvním z nich je tzv. Survey určený pro skenování terénu – měří se příkon prostorového dávkového ekvivalentu, druhým je tzv. Assay určený pro měření koncentrací vybraných radionuklidů včetně plošné koncentrace ^{137}Cs . Přístroj GT – 40 je pro ilustraci znázorněn na Obrázek 13 [22].



Obrázek 13: Ilustrační snímek přístroje GT-40 [22]

3.1.3 RT-30

Tento vysoce citlivý a odolný přístroj je určen pro terénní spektrometrii záření gama, identifikaci neutronů, vyhledávání zářičů, určování radioizotopů a měření dávkového příkonu. Jeho výhodou je nízká hmotnost a snadná manipulace [23].

Pracuje ve 2 základních módech. Prvním z nich je tzv. Survey určený pro vyhledávání zářičů s paralelním měřením dávkového příkonu, druhým je tzv. Identification určený pro identifikaci nalezených zdrojů. Přístroj RT-30 je pro ilustraci znázorněn na Obrázek 14 [23].



Obrázek 14: Ilustrační snímek přístroje RT-30 [23]

3.1.4 Ostatní vybavení

Pro měření počtu záporných iontů byla použita dvojice iontometrů COM 3200 PRO II. Jejich použití v terénu je znázorněno na Obrázek 29.

Pro měření teploty a rychlosti proudění plynu mezi balvany u paty odvalu byly použity anemometry Testo 405i a starší model Testo 400. Umístění anemometru mezi balvany u paty odvalu je znázorněno na Obrázek 32.

Pro průzkum teplotních rozdílů u paty odvalu byla použita pochůzková sada s termokamerou Wiris PRO zapůjčená od Workswell s.r.o. Ilustrační snímek z termokamery je znázorněn na Obrázek 30.

3.2 Naměřená data

V této části jsou uvedeny hodnoty fyzikálních parametrů naměřených pomocí výše zmíněných přístrojů. Analýza těchto dat je pak obsahem kapitoly 3.3.

3.2.1 Naměřená data ze sond TSR 4

3.2.1.1 Rozmístění sond na odvalu

Sondy TSR 4 byly na odvalu u šachty č. 15 umístěny dne 28. 5. podle předem rozmyšleného plánu (zohledněno bylo předpokládané ohřívání odvalu, z dřívějších studií známá větrná růžice a poloha obce Brod) za pomoci pracovníků ze SÚRO, v.v.i. a data z nich byla odečtena dne 15. 6. Data byla zpracována z období, kdy sondy měřily po celý den, tj. od 29. 5. do 14. 6. Celkem bylo rozmístěno 26 sond (19 sond z majetku SÚRO, v.v.i. a 7 sond FJFI), avšak při odečítání dat byla u 5 z nich zjištěna nefunkčnost, kdy většinou chyběla podstatná část záznamu. Data byla tedy zpracována ze zbylých 21 sond, které obsahovaly záznam z celého období. Všechny sondy byly umístěny do nepromokavého plastového krytu polepeného stříbrnou fólií. Uvnitř krytu nicméně docházelo ke kondenzaci vody na sondě. Vrchní uzávěr obalu byl opatřen informační cedulkou.

Na základě rešerše literatury a předpokládaného proudění plynu odvalem v letních měsících směrem dolů byla většina sond umístěna u paty odvalu. Sondy u paty odvalu byly rozmístěny po celém jeho obvodu s větší koncentrací směrem k obci Brod. Pro co nejpřesnější analýzu proudění plynu v odvalu byly sondy u paty odvalu umístěny většinou po dvojicích, kdy jedna sonda byla částečně zapuštěna do hlušiny a druhá sonda byla poblíž připevněna na strom ve výšce přibližně 1,5 m. Další sondy byly umístěny na stěnu odvalu a po obvodu koruny odvalu. Přehled rozmístění funkčních sond v jednotlivých bodech na mapě je uveden na Obrázek 15. Sondy v hodinových intervalech zaznamenávaly objemovou aktivitu radonu (dále OAR), aktuální teplotu a aktuální vlhkost. Celkem bylo umístěno 11 sond u paty odvalu v hlušíně, 7 sond na stromě, 5 sond na koruně a 3 sondy v suťovém svahu, který byl velmi obtížně přístupný kvůli vysokému úhlu sklonu svahu.



Obrázek 15: Rozmístění sond na odvalu

Tabulka 5: Přehled rozmístění funkčních sond v jednotlivých bodech na mapě

rozmístění sond	číslo na mapě
1 sonda v hlušině u paty odvalu + 1 sonda na stromě u paty odvalu	1, 2, 3, 4, 7
1 sonda v hlušině u paty odvalu + 1 sonda v hlušině na stěně odvalu	5
1 sonda v hlušině u paty odvalu	10
1 sonda v hlušině na stěně odvalu	8
1 sonda na stromě u paty odvalu	6, 9
1 sonda v hlušině na koruně odvalu	12, 13, 14, 15, 16

Na Obrázek 16 je znázorněna ukázka rozmístění sond na patě odvalu, kdy jedna sonda je v hlušině a druhá sonda je připevněna na stromě, na Obrázek 17 je znázorněna ukázka umístění sondy na stěně odvalu, na Obrázek 18 je ukázka umístění sondy na koruně odvalu a na Obrázek 19 je zachyceno stahování dat ze sondy do počítače přes kabel USB.



Obrázek 16 Ukázka rozmístění sond na patě odvalu, kdy jedna sonda je v hlušině a druhá sonda je připevněna na stromě (foto: Jan Hradecký)



Obrázek 17: Umístění sondy na stěně odvalu



Obrázek 18: Umístění sondy na koruně odvalu v bodu 3 – v pozadí obec Brod a město Příbram

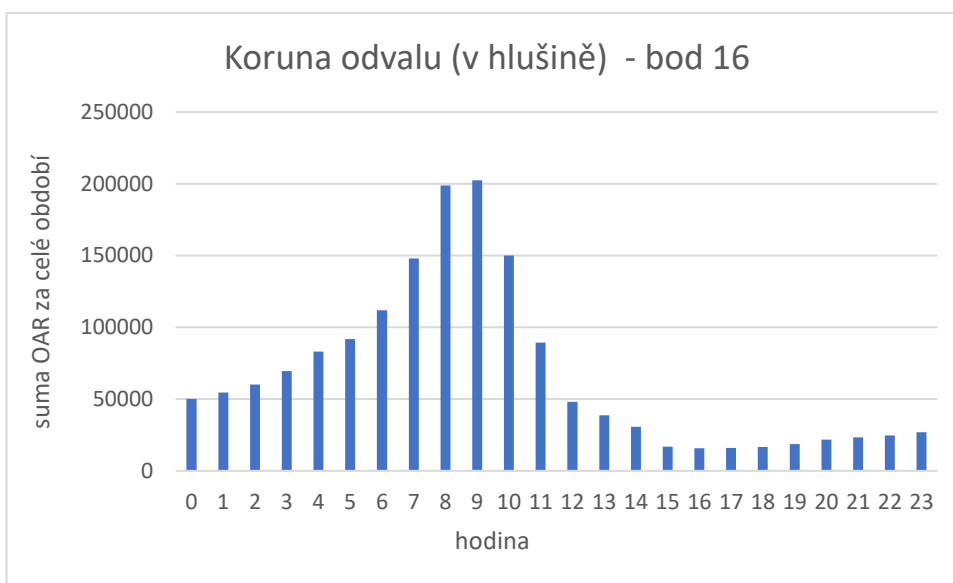


Obrázek 19: Stahování dat ze sondy umístěné na stěně odvalu v bodu 10 přes kabel USB (foto: Václav Štěpán)

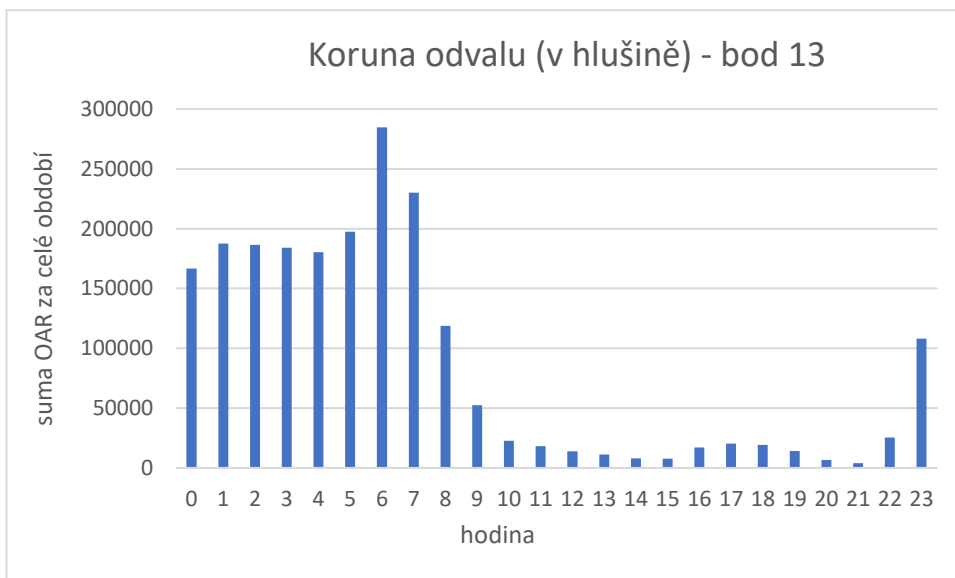
3.2.2 Průměrné hodnoty OAR

Pro porovnání OAR v jednotlivých měřících bodech a pro nalezení skupin měřících bodů s podobným chováním OAR v závislosti na denní době je vhodné vypočítat průměrné hodnoty OAR v různých denních časových intervalech. Pro co nejlepší určení těchto intervalů byly pro 6 reprezentativních měřících bodů vytvořeny kumulativní grafy OAR v jednotlivých hodinách dne za celé pozorované období.

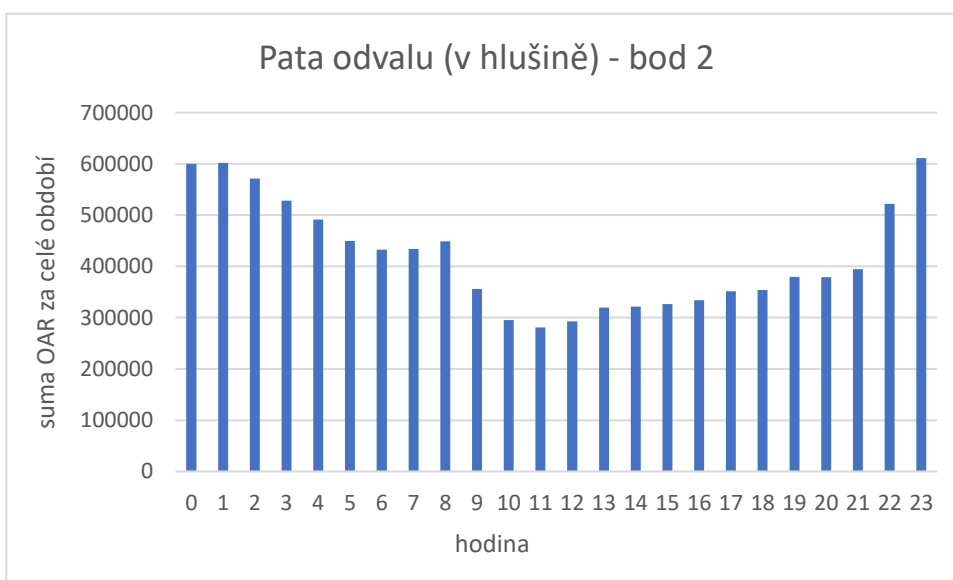
Na Obrázek 20 a Obrázek 21 jsou znázorněny kumulativní grafy OAR v bodech 16 a 13 v hlušině na koruně odvalu. Na Obrázek 22 a Obrázek 23 jsou znázorněny kumulativní grafy OAR v bodech 2 a 7 v hlušině u paty odvalu. Na Obrázek 24 je znázorněn kumulativní graf OAR v bodu 6 na stromě u paty odvalu a na Obrázek 25 je znázorněn kumulativní graf OAR v bodu 8 v hlušině na stěně odvalu.



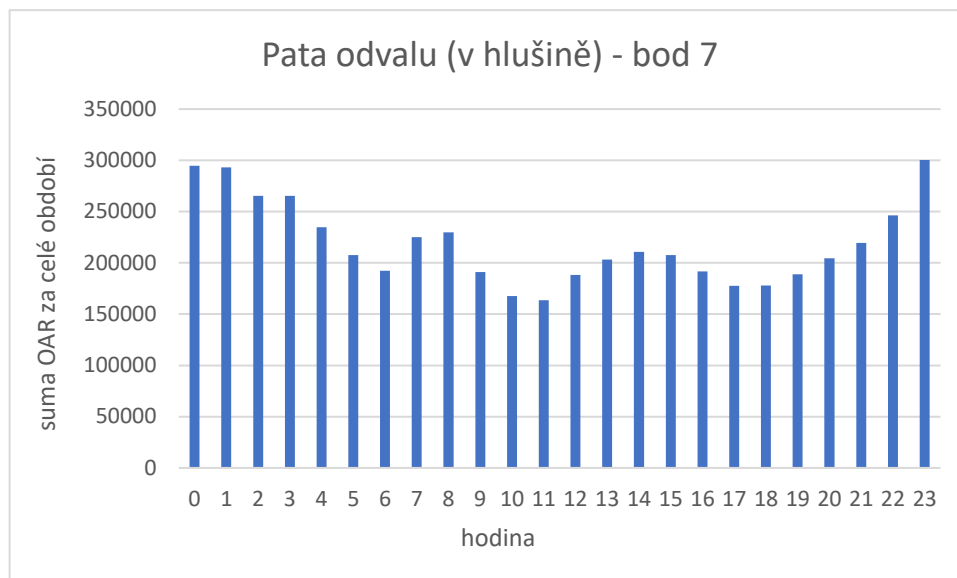
Obrázek 20: Suma OAR v bodu 16 v hlušině na koruně odvalu



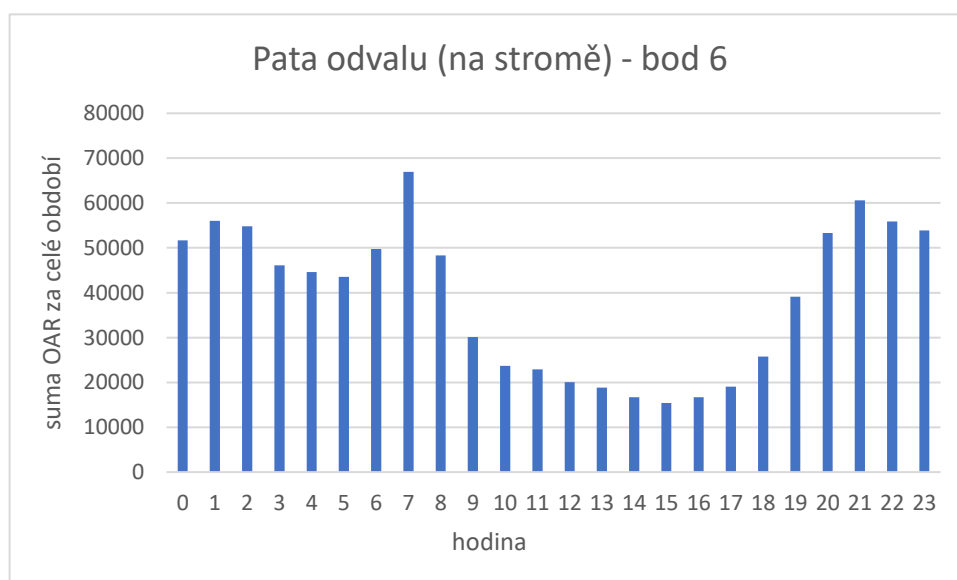
Obrázek 21: Suma OAR v bodu 13 v hlušině na koruně odvalu



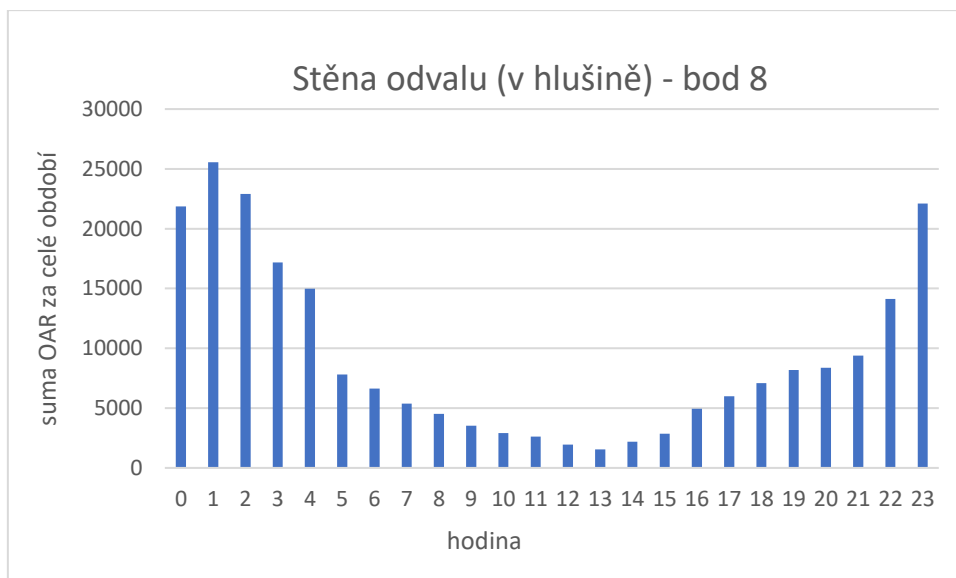
Obrázek 22: Suma OAR v bodu 2 v hlušině u paty odvalu



Obrázek 23: Suma OAR v bodu 7 v hlušině u paty odvalu



Obrázek 24: Suma OAR v bodu 6 na stromě u paty odvalu



Obrázek 25: Suma OAR v bodu 8 v hlušině na stěně odvalu

Z uvedených kumulativních grafů vyplývá, že suma OAR za celé období v bodu 16 v hlušině na koruně odvalu je nejvyšší mezi 7. a 10. hodinou a v bodu 13 mezi 4. a 7. hodinou. Dále z uvedených kumulativních grafů vyplývá, že suma OAR za celé období v bodech 2 a 7 v hlušině u paty odvalu, v bodu 6 na stromě u paty odvalu a v bodu 8 v hlušině na stěně odvalu je nejvyšší mezi 23. a 2. hodinou.

Denní časové intervaly pro výpočet průměrné OAR, které byly vybrány na základě uvedených dat jsou uvedeny v Tabulka 6. Jeden den je pomocí těchto intervalů rozdělen na 6 částí po 4 hodinách. Tyto intervaly zohledňují právě výše zmíněná časová rozmezí, ve kterých byly vypočítány nejvyšší sumy OAR na různých místech odvalu.

Tabulka 6: Denní časové intervaly pro výpočet průměrné OAR

denní doba	časový interval
ráno	03:00 - 06:59
dopoledne	07:00 - 10:59
poledne	11:00 - 14:59
odpoledne	15:00 - 18:59
večer	19:00 - 22:59
noc	23:00 - 02:59

V Tabulka 7, Tabulka 8, Tabulka 9 a Tabulka 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty OAR a mediány OAR (vše v Bq/m³) za celý den a jeho části u sond umístěných v hlušině u paty odvalu, na stromě u paty odvalu, v hlušině na koruně odvalu a v hlušině na stěně odvalu.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty OAR a mediány OAR (vše v Bq/m³) za celý den a jeho části u sond umístěných v hlušině u paty odvalu

část dne	parametr	umístění na mapě						
		1	2	3	4	5	7	10
celý den	OAR	9 231	24 700	27 122	12 419	3 064	12 859	1 703
	medián	4 437	23 703	32 738	14 174	2 254	11 055	920
ráno (03:00 - 6:59)	OAR	12 615	27 961	20 677	8 713	3 987	13 238	2 675
	medián	7 160	14 740	25 343	3 950	2 600	6 936	2 676
dopoledne (7:00 - 10:59)	OAR	9 902	22 570	27 698	15 443	2 681	11 967	2 440
	medián	7 254	21 995	33 094	17 270	1 952	11 504	1 954
poledne (11:00 - 14:59)	OAR	2 412	17 858	28 782	13 888	1 848	11 254	736
	medián	2 329	20 160	33 097	15 696	1 203	10 013	396
odpoledne (15:00 - 18:59)	OAR	3 314	20 101	28 688	11 251	3 962	11 096	585
	medián	3 475	23 327	32 675	11 857	2 722	9 701	258
večer (19:00 - 22:59)	OAR	8 243	24 639	29 862	12 998	2 460	12 636	1 263
	medián	7 368	26 714	32 632	14 550	2 322	11 713	856
noc (23:00 - 2:59)	OAR	18 903	35 072	27 022	12 222	3 446	16 966	2 518
	medián	20 963	38 144	33 711	15 818	2 883	16 975	2 332

Tabulka 8: Průměrné hodnoty OAR a mediány OAR (vše v Bq/m³) za celý den a jeho části u sond umístěných na stromě u paty odvalu

část dne	parametr	umístění na mapě						
		1	2	3	4	6	7	9
celý den	OAR	6 438	7 185	4 765	1 300	2 289	3 136	2 075
	medián	4 741	3 751	1 053	628	1 401	2 080	1 692
ráno (03:00 - 6:59)	OAR	6 555	6 706	7 742	1 533	2 705	4 494	2 642
	medián	4 688	5 601	9 171	1 345	1 060	2 954	2 778
dopoledne (7:00 - 10:59)	OAR	3 180	2 285	4 084	1 537	2 487	2 691	1 843
	medián	3 023	1 604	2 369	1 067	1 709	1 768	1 410
poledne (11:00 - 14:59)	OAR	3 228	2 518	769	475	1 155	1 573	1 615
	medián	2 663	2 058	255	485	1 071	1 258	1 407
odpoledne (15:00 - 18:59)	OAR	5 268	5 250	629	466	1 131	1 946	1 954
	medián	5 569	5 318	155	380	1 025	1 253	1 401
večer (19:00 - 22:59)	OAR	10 566	12 094	4 932	1 190	3 072	2 835	1 704
	medián	11 021	11 105	1 964	561	2 633	2 798	1 269
noc (23:00 - 2:59)	OAR	9 832	14 257	10 434	2 598	3 182	5 275	2 691
	medián	11 453	14 277	10 531	2 427	1 815	3 361	2 908

Tabulka 9: Průměrné hodnoty OAR a mediány OAR (vše v Bq/m³) za celý den a jeho části u sond umístěných v hlušině na koruně odvalu

část dne	parametr	umístění na mapě				
		12	13	14	15	16
celý den	OAR	1 540	5 111	1 447	253	3 939
	medián	201	141	387	102	895
ráno (03:00 - 6:59)	OAR	3 451	12 449	2 566	545	5 239
	medián	228	163	484	156	1 142
dopoledne (7:00 - 10:59)	OAR	2 172	6 238	3 093	486	10 283
	medián	260	161	495	142	1 105
poledne (11:00 - 14:59)	OAR	508	752	667	96	3 038
	medián	181	134	310	85	753
odpoledne (15:00 - 18:59)	OAR	397	948	462	80	958
	medián	182	123	391	70	544
večer (19:00 - 22:59)	OAR	636	738	470	95	1 297
	medián	173	138	358	87	770
noc (23:00 - 2:59)	OAR	2 076	9 543	1 424	216	2 816
	medián	202	149	432	125	886

Tabulka 10: Průměrné hodnoty OAR, nejistoty a mediány OAR (vše v Bq/m³) za celý den a jeho části u sond umístěných v hlušině na stěně odvalu

část dne	parametr	umístění na mapě	
		5	8
celý den	OAR	804	551
	medián	483	325
ráno (03:00 - 6:59)	OAR	1 349	685
	medián	1 143	375
dopoledne (7:00 - 10:59)	OAR	575	240
	medián	291	136
poledne (11:00 - 14:59)	OAR	384	122
	medián	293	10
odpoledne (15:00 - 18:59)	OAR	551	307
	medián	374	284
večer (19:00 - 22:59)	OAR	814	590
	medián	609	518
noc (23:00 - 2:59)	OAR	1 149	1 359
	medián	862	1 062

3.2.2.1 Nejvyšší naměřené hodnoty OAR

V Tabulka 11, Tabulka 12, Tabulka 13 a Tabulka 14 jsou uvedeny nejvyšší naměřené hodnoty OAR za celé pozorované období u sond umístěných v hlušině u paty odvalu, na stromě u paty odvalu, v hlušině na koruně odvalu a v hlušině na stěně odvalu.

Tabulka 11: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m³) za celé pozorované období u sond umístěných v hlušině u paty odvalu

	umístění na mapě						
	1	2	3	4	5	7	10
OAR (Bq/m ³)	48 208	100 288	74 565	40 576	46 464	47 264	7 738
datum	12. 6.	12. 6.	1. 6.	10. 6.	2. 6.	8. 6.	4. 6.
čas	2:00	7:00	22:25	11:00	16:34	3:00	9:00

Tabulka 12: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m³) za celé pozorované období u sond umístěných na stromě u paty odvalu

	umístění na mapě						
	1	2	3	4	6	7	9
OAR (Bq/m ³)	26 366	57 824	28 617	8 500	17 500	17 855	7 077
datum	5. 6.	1. 6.	1. 6.	8. 6.	5. 6.	8. 6.	11. 6.
čas	2:08	23:00	22:22	7:00	1:57	3:00	16:11

Tabulka 13: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m³) za celé pozorované období u sond umístěných v hlušině na koruně odvalu

	umístění na mapě				
	12	13	14	15	16
OAR (Bq/m ³)	22 944	183 111	39 865	7 442	91 232
datum	1. 6.	31. 5.	1. 6.	31. 5.	31. 5.
čas	6:37	1:54	9:14	7:04	9:00

Tabulka 14: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m³) za celé pozorované období u sond umístěných v hlušině na stěně odvalu

	umístění na mapě	
	5	8
OAR (Bq/m ³)	5 899	3 511
datum	10. 6.	3. 6.
čas	6:35	4:00

3.2.3 Naměřená data z GT-40

Měření přístrojem GT-40 bylo provedeno dne 28. 5. 2021 za pomoci pracovníků ze SÚRO, v.v.i. ve všech měřících bodech na patě odvalu, na stěně odvalu a na koruně odvalu znázorněných na mapě na Obrázek 15. Celkem bylo přístrojem GT-40 provedeno 19 měření. Na Obrázek 26 je znázorněno měření přístrojem GT-40 v bodu 16 na koruně odvalu a na Obrázek 27 je znázorněno měření přístrojem GT-40 v bodu 15 rovněž na koruně odvalu.



Obrázek 26: Měření přístrojem GT-40 v bodu 16 na koruně odvalu



Obrázek 27: Měření přístrojem GT-40 v bodu 15 na koruně odvalu – v pozadí obec Žežice

Přístrojem GT-40 byly měřeny následující parametry: příkon prostorového dávkového ekvivalentu – PPDE (nSv/h), koncentrace K (%), koncentrace U (ppm), koncentrace Th (ppm) a plošná koncentrace ^{137}Cs (kBq/m²).

V Tabulka 15 a Tabulka 16 jsou uvedeny tyto parametry naměřené v měřících bodech u paty odvalu, v Tabulka 17 jsou uvedeny parametry naměřené v měřících bodech na koruně odvalu a v Tabulka 18 jsou uvedeny parametry naměřené v měřících bodech na stěně odvalu.

Tabulka 15: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ¹³⁷Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech u paty odvalu

bod na mapě	1	2	3	4	5	6
PPDE (nSv/h)	13,55	25,15	30,18	14,28	13,10	14,59
K (%)	2,86	2,87	3,38	2,82	2,91	4,59
chyba K (%)	0,04	0,06	0,09	0,05	0,05	0,05
U (ppm)	8,11	27,08	29,79	8,29	6,60	5,59
chyba U (ppm)	0,17	0,27	0,39	0,19	0,19	0,18
Th (ppm)	11,76	11,92	16,28	12,36	12,99	13,48
chyba Th (ppm)	0,41	0,61	0,88	0,46	0,47	0,46
Cs-137 (kBq/m ²)	0,61	0,50	1,73	0,84	0,53	< 0,00
chyba Cs-137 (kBq/m ²)	0,13	0,20	0,30	0,14	0,14	-

Tabulka 16: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ¹³⁷Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech u paty odvalu

bod na mapě	7*	8	9	10	11
PPDE (nSv/h)	205,94	22,14	13,49	30,25	51,42
K (%)	< 0,00	3,17	2,75	3,38	2,89
chyba K (%)	-	0,06	0,04	0,09	0,08
U (ppm)	364,49	20,69	7,98	29,43	70,12
chyba U (ppm)	4,41	0,25	0,17	0,30	0,41
Th (ppm)	< 0,00	12,62	10,43	18,24	11,94
chyba Th (ppm)	-	0,57	0,41	0,68	0,86
Cs-137 (kBq/m ²)	< 0,00	0,63	0,72	1,61	0,62
chyba Cs-137 (kBq/m ²)	-	0,19	0,13	0,22	0,30

*při měření nebyla dodržena požadovaná geometrie

Tabulka 17: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ¹³⁷Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech na koruně odvalu

bod na mapě	12	13	14	15	16
PPDE (nSv/h)	26,89	13,13	17,55	14,95	23,04
K (%)	2,47	2,61	2,66	2,82	2,50
chyba K (%)	0,09	0,04	0,05	0,05	0,05
U (ppm)	31,45	8,39	13,87	10,67	25,48
chyba U (ppm)	0,25	0,18	0,23	0,20	0,24
Th (ppm)	10,42	8,82	12,15	10,47	7,43
chyba Th (ppm)	0,56	0,42	0,55	0,47	0,53
Cs-137 (kBq/m ²)	0,74	0,59	1,12	1,05	0,73
chyba Cs-137 (kBq/m ²)	0,19	0,13	0,18	0,15	0,18

Tabulka 18: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ¹³⁷Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech na stěně odvalu

bod na mapě	5	8	10
PPDE (nSv/h)	14,11	24,09	40,29
K (%)	2,67	2,53	3,34
chyba K (%)	0,05	0,06	0,09
U (ppm)	7,40	28,45	48,18
chyba U (ppm)	0,19	0,26	0,41
Th (ppm)	14,56	8,82	16,71
chyba Th (ppm)	0,48	0,57	0,89
Cs-137 (kBq/m ²)	0,71	< 0,00	1,07
chyba Cs-137 (kBq/m ²)	0,15	-	0,31

3.2.4 Naměřená data z RT-30

Měření přístrojem RT-30 bylo provedeno dne 28. 5. 2021 za pomoci pracovníků ze SÚRO, v.v.i. ve všech měřících bodech na patě odvalu, na stěně odvalu a na koruně odvalu znázorněných na mapě na Obrázek 15. Přístrojem RT-30 byl po celou dobu jeho přítomnosti na odvalu v pětisekundových intervalech měřen dávkový příkon \dot{D} . V Tabulka 19, Tabulka 20, Tabulka 21 a Tabulka 22 jsou uvedeny průměrné hodnoty \dot{D} a jeho směrodatné odchylky σ vypočítané ze 30 měření v každém měřícím bodu na patě odvalu, koruně odvalu a stěně odvalu.

Tabulka 19: Průměrné hodnoty \dot{D} a jeho nejistoty v měřících bodech u paty odvalu

bod na mapě	1	2	3	4	5	6
\dot{D} ($\mu\text{Gy/h}$)	0,10	0,11	0,14	0,14	0,11	0,10
$\sigma_{\dot{D}}$ ($\mu\text{Gy/h}$)	0,01	0,01	0,05	0,03	0,03	0,02

Tabulka 20: Průměrné hodnoty \dot{D} a jeho nejistoty v měřících bodech u paty odvalu

bod na mapě	7	8	9	10	11
\dot{D} ($\mu\text{Gy/h}$)	0,10	0,43	0,16	0,27	0,41
$\sigma_{\dot{D}}$ ($\mu\text{Gy/h}$)	0,02	0,48	0,02	0,02	0,03

Tabulka 21: Průměrné hodnoty \dot{D} a jeho nejistoty v měřících bodech na koruně odvalu

bod na mapě	12	13	14	15	16
\dot{D} ($\mu\text{Gy/h}$)	0,16	0,14	0,16	0,15	0,16
$\sigma_{\dot{D}}$ ($\mu\text{Gy/h}$)	0,01	0,04	0,08	0,03	0,03

Tabulka 22: Průměrné hodnoty \dot{D} a jeho nejistoty v měřících bodech na stěně odvalu

bod na mapě	5	8	10
\dot{D} ($\mu\text{Gy/h}$)	0,11	0,42	0,28
$\sigma_{\dot{D}}$ ($\mu\text{Gy/h}$)	0,01	1,00	0,06

3.2.5 Naměřená data z iontometru

Měření za použití dvou iontometrů bylo provedeno dne 15. 6. 2021 v ranních a dopoledních hodinách ve vybraných měřících bodech na patě odvalu a koruně odvalu. Na Obrázek 28 je znázorněn údaj z iontometru naměřený v měřícím bodu 11 u paty odvalu a na Obrázek 29 je znázorněn údaj z iontometru naměřený v měřícím bodu 7 mezi balvany u paty odvalu.

Především z důvodu možné nenulové rychlosti větru v okamžiku měření iontometrem považují za nejreprezentativnější údaj z iontometru hodnotu nejvyššího naměřeného počtu záporných iontů N . V Tabulka 23 a Tabulka 24 jsou znázorněny nejvyšší hodnoty počtu záporných iontů naměřené ve vybraných bodech u paty odvalu a na koruně odvalu. Nejvyšší počet záporných iontů byl zaznamenán poblíž ohlubně šachty a činil 96 600 záporných iontů.



Obrázek 28: Údaj z iontometru naměřený v bodu 11 u paty odvalu (základní rozsah)



Obrázek 29: Údaj z iontometru naměřený v bodu 7 mezi balvany u paty odvalu (na iontometru je nastaven rozsah X10)

Tabulka 23: Nejvyšší naměřené hodnoty N ve vybraných bodech u paty odvalu

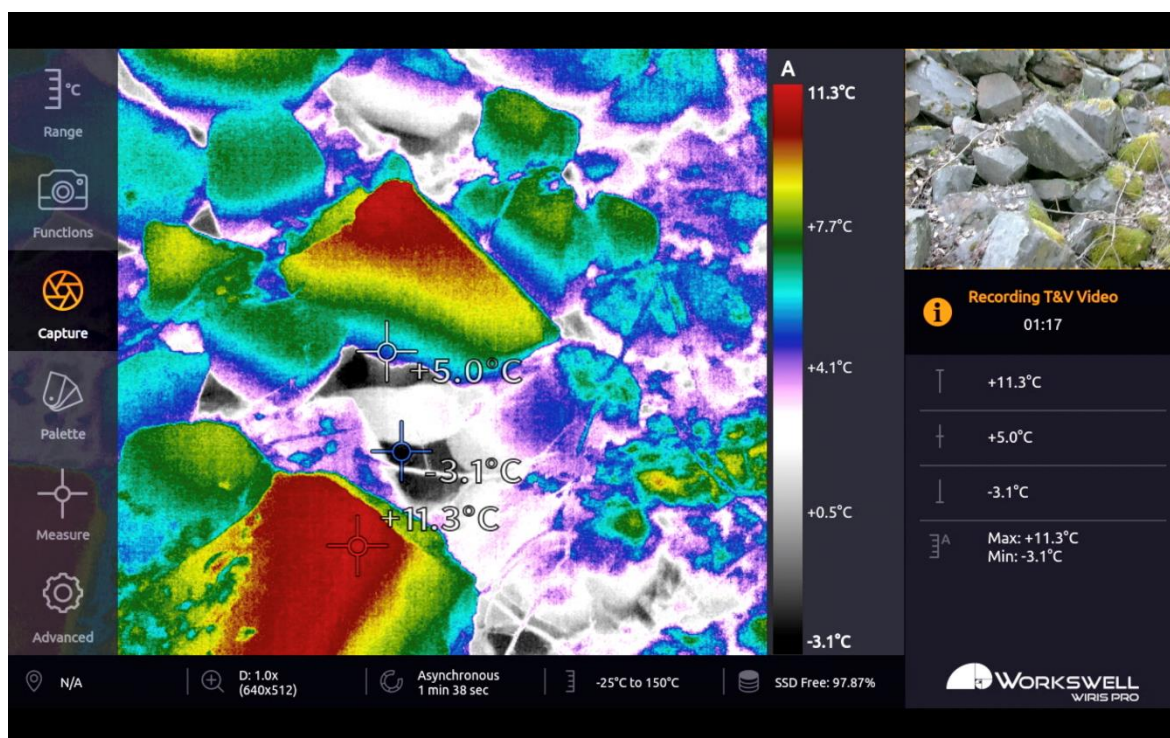
bod na mapě	5	6	7	8	9	11
N	18 290	66 600	38 000	45 800	40 500	18 700

Tabulka 24: Nejvyšší naměřené hodnoty N ve vybraných bodech na koruně odvalu

bod na mapě	14	15
N	2 000	640

3.2.6 Data z infrakamery

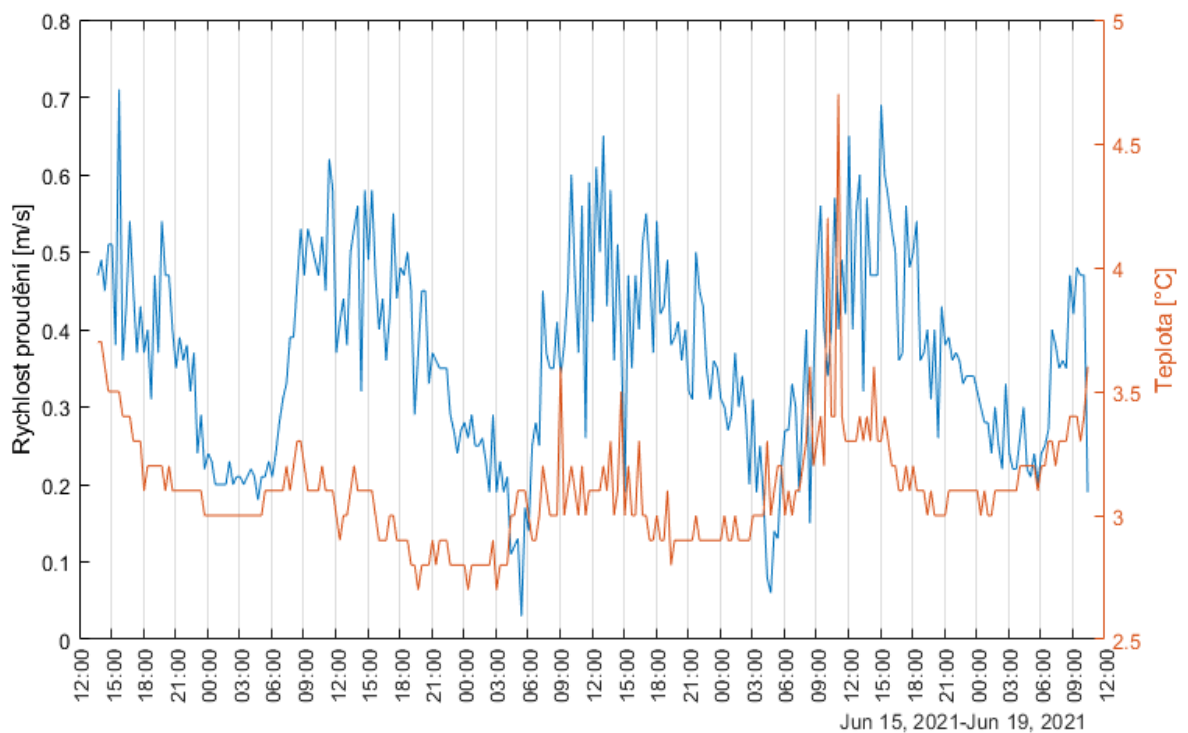
Průzkum infrakamerou byl proveden dne 28. 5. 2021 v odpoledních hodinách na různých místech u paty odvalu. Cílem bylo nalezení místa s nejnižší teplotou, a tedy potenciálního místa silnějšího výdechu plynu z odvalu. Toto místo bylo nalezeno v měřicím bodu 7, znázorněném na mapě na Obrázek 10. Na Obrázek 30 je znázorněn záznam z infrakamery pořízený v měřicím bodu 7 u paty odvalu. Nejnižší teplota, která byla zaznamenána činila $-3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž uváděná chyba měření přístroje výrobcem je $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 30: Záznam z infrakamery pořízený v měřicím bodu 7 u paty odvalu

3.2.7 Naměřená data z anemometru

Na základě dat z infrakamery a nalezení potencionálního místa silnějšího výdechu plynu z odvalu byl od 15. 6. 2021 do 19. 6. 2021 v měřícím bodu 7 mezi balvany umístěn anemometr určený pro měření rychlosti proudění plynu. Záznam z anemometru obsahující naměřené hodnoty teploty a rychlosti proudění je znázorněn na Obrázek 31. Na Obrázek 32 je znázorněno umístění anemometru přímo vedle sondy v měřícím bodu 7 u paty odvalu a na Obrázek 33 je znázorněn detail měřícího hrotu anemometru.



Obrázek 31: Záznam z anemometru umístěného v bodu 7 u paty odvalu (autor: Václav Štěpán)



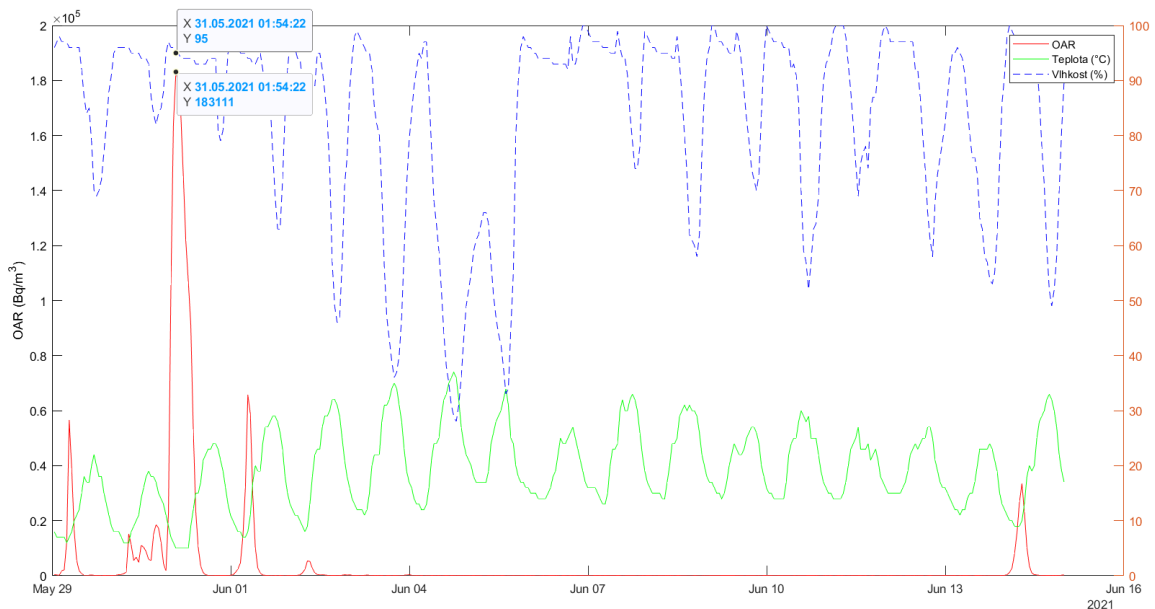
Obrázek 32: Umístění anemometru přímo vedle sondy v měřícím bodu 7 u paty odvalu (autor: Václav Štěpán)



Obrázek 33: Detail měřícího hrotu anemometru umístěného v měřícím bodu 7 u paty odvalu (autor: Václav Štěpán)

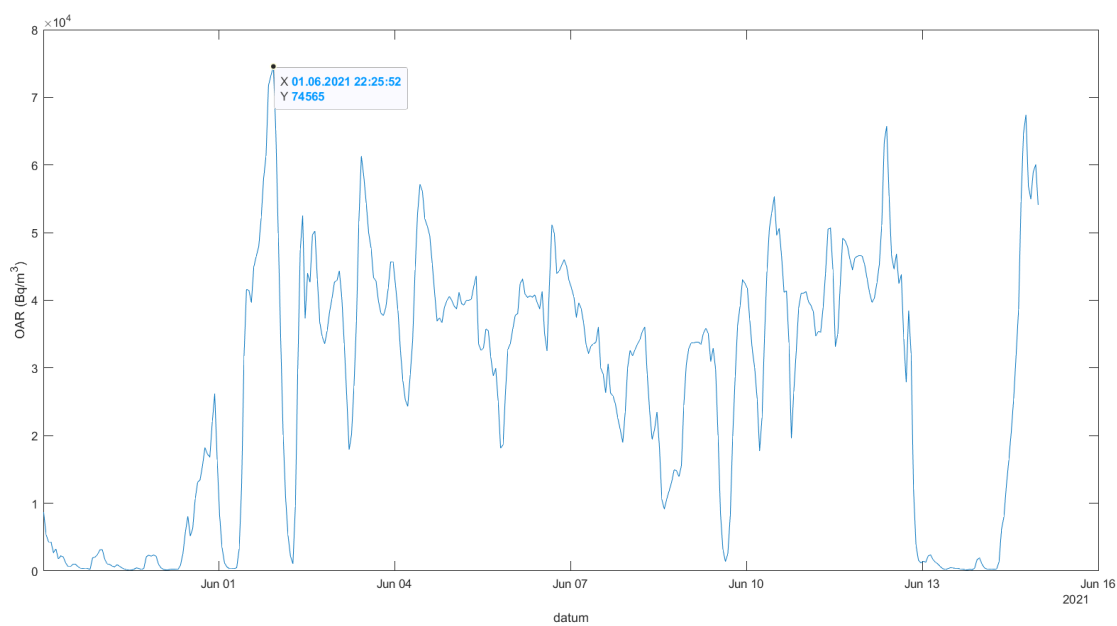
3.3 Analýza a diskuse naměřených dat

Nejvyšší průměrná OAR byla zaznamenána v měřícím bodu 3 v hlušině u paty odvalu a činila $27\,122\text{ Bq/m}^3$. Naopak nejnižší průměrná OAR byla zaznamenána v měřícím bodu 15 v hlušině na koruně odvalu a činila 253 Bq/m^3 . Nejvyšší maximální OAR byla zaznamenána dne 31. 5. 2021 v 1:54 v měřícím bodu 13 na koruně odvalu a činila $183\,111\text{ Bq/m}^3$. Je však potřeba zdůraznit, že v daném čase byla sondou naměřena vlhkost 95 % (Obrázek 34), přičemž maximální hodnota vlhkosti udaná výrobcem, při které sonda měří správné údaje, je 90 %. Je tedy možné, že maximální hodnota OAR je v důsledku vysoké vlhkosti zkreslená a skutečná hodnota je nižší.

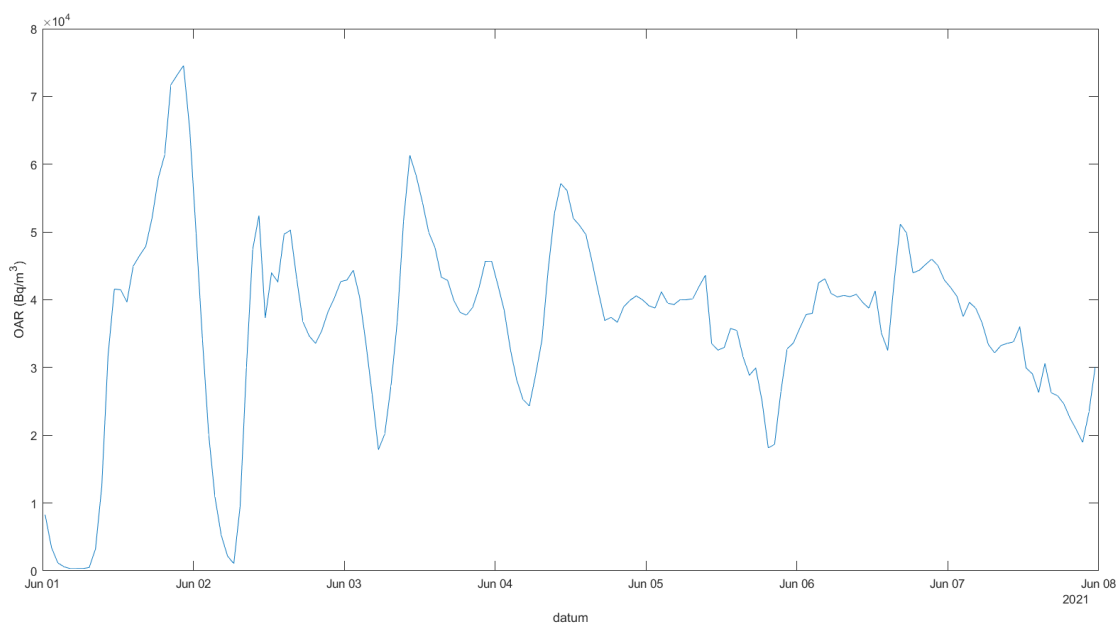


Obrázek 34: OAR, teplota a vlhkost zaznamenané během celého období v bodu 13 v hlušině na koruně odvalu

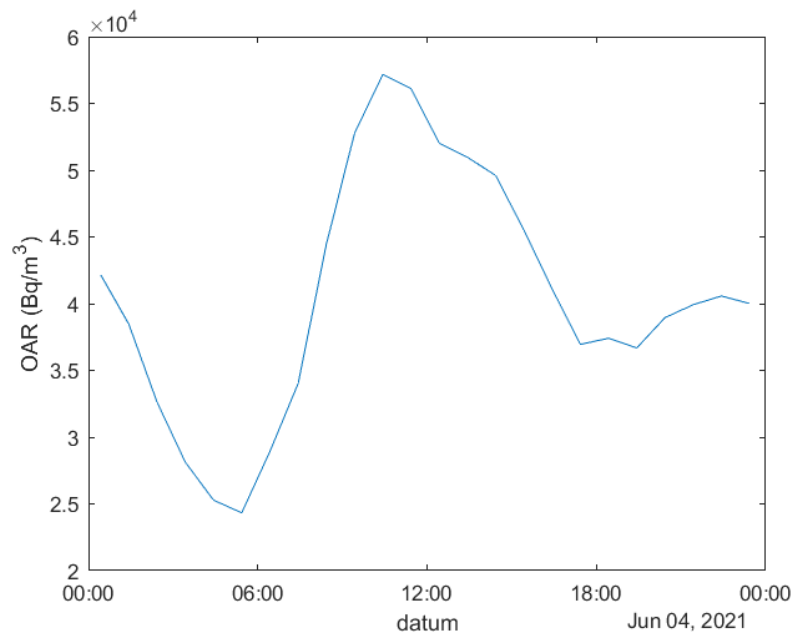
Na Obrázek 35, Obrázek 36 a Obrázek 37 jsou pro ilustraci graficky znázorněny hodnoty OAR v bodu 3 v hlušině u paty odvalu (kde byla zaznamenána nejvyšší průměrná hodnota OAR) během celého pozorovaného období, během jednoho týdne a během jednoho dne.



Obrázek 35: Záznam OAR v měřicím bodu 3 v hlušině u paty odvalu za celé pozorované období



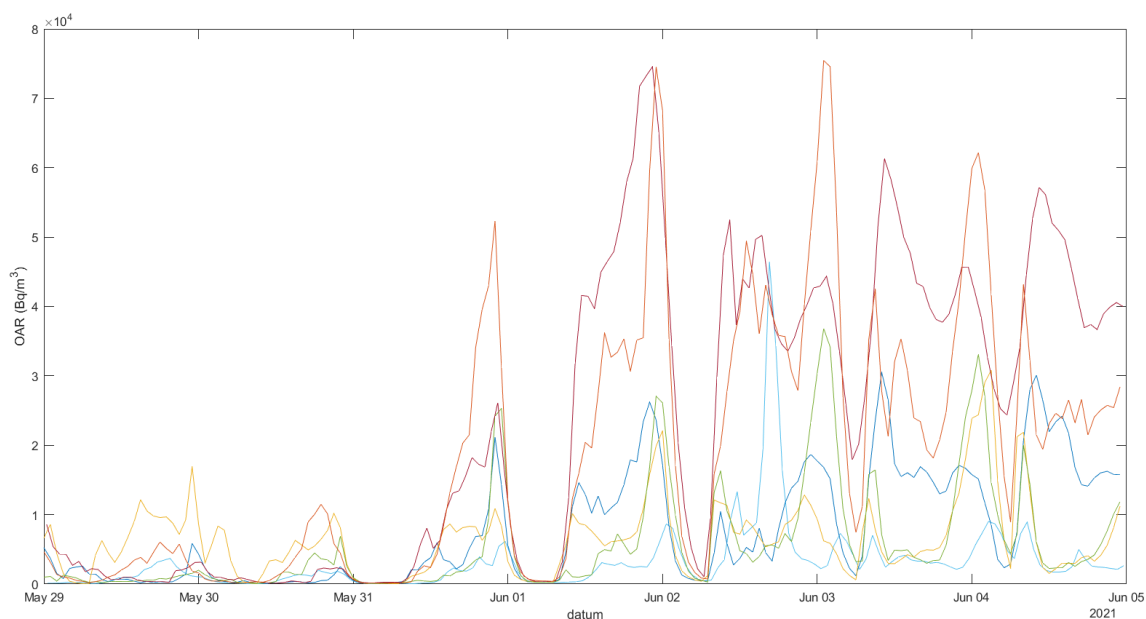
Obrázek 36: Záznam OAR v měřicím bodu 3 v hlušině u paty odvalu během jednoho týdne (od 1. 6. 2021 do 7. 6. 2021)



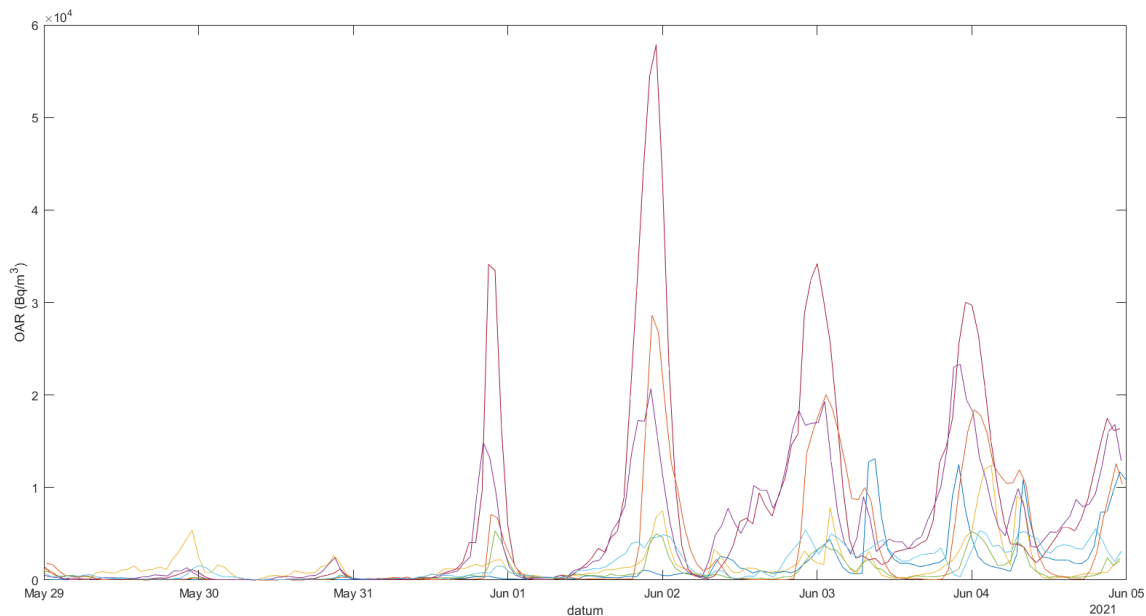
Obrázek 37: Záznam OAR v měřícím bodu 3 v hlušině u paty odvalu během jednoho dne (4. 6. 2021)

3.3.1 Porovnání OAR z různě umístěných sond

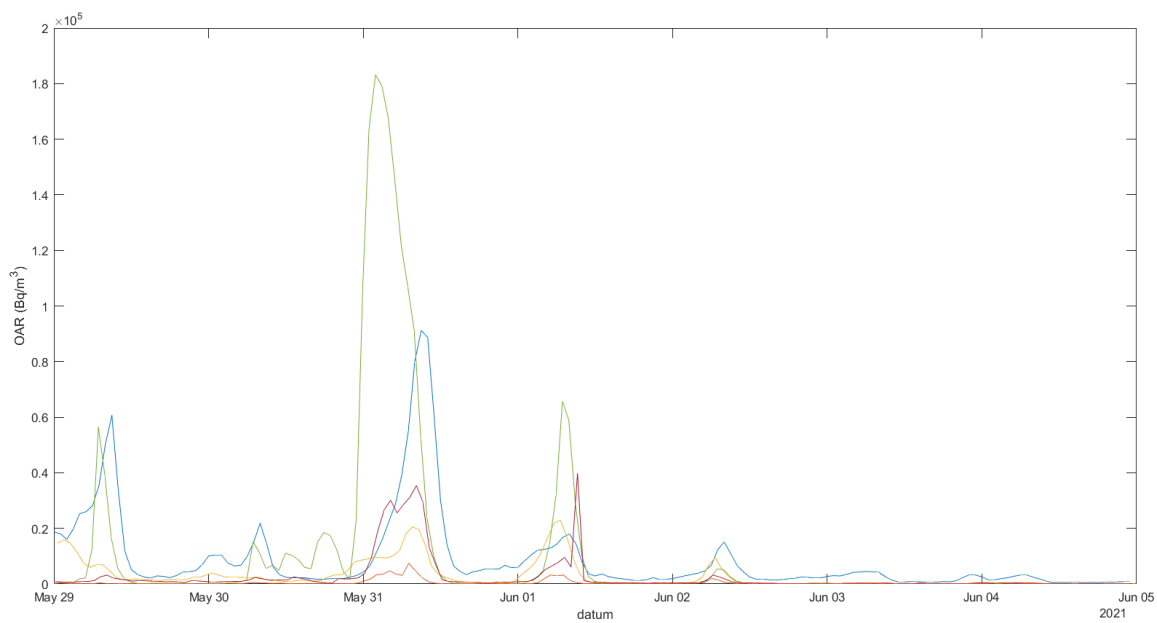
Na Obrázek 38, Obrázek 39, Obrázek 40 a Obrázek 41 jsou znázorněny hodnoty OAR pro přehlednost pouze během prvního týdne měření (od 29. 5. do 4. 6.) naměřené všemi sondami v hlušině u paty odvalu, na stromě u paty odvalu, v hlušině na koruně odvalu a v hlušině na stěně odvalu.



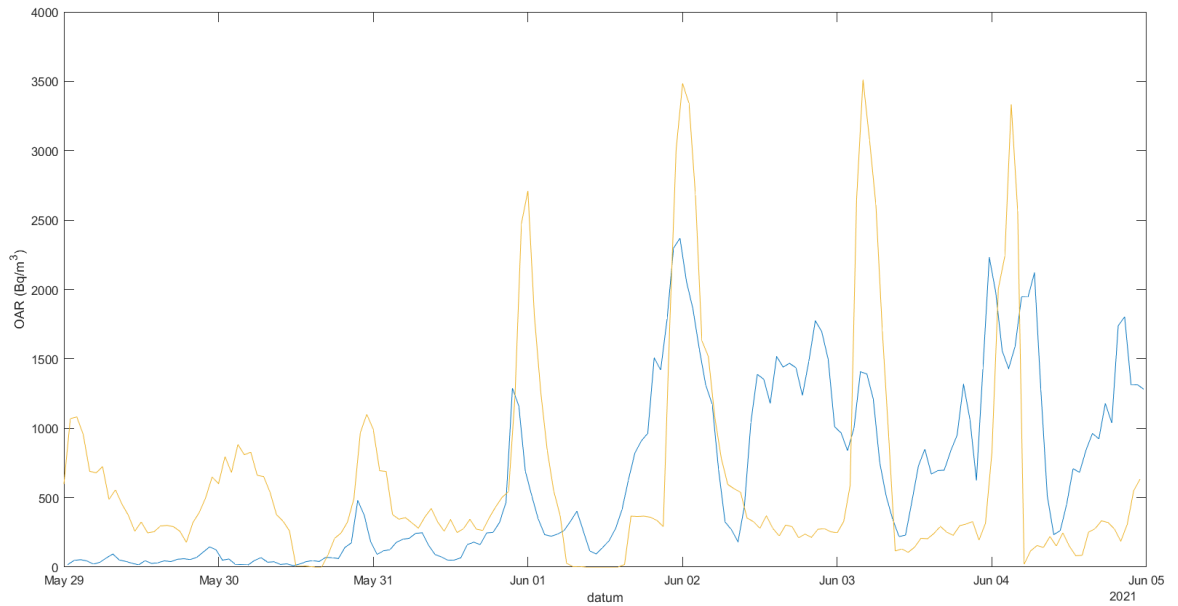
Obrázek 38: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami v hlušině u paty odvalu



Obrázek 39: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami na stromě u paty odvalu



Obrázek 40: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami v hlušině na koruně odvalu



Obrázek 41: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami v hlušině na stěně odvalu

Z uvedených grafů je patrný společný trend velikosti OAR v závislosti na části dne, kdy se pravidelně střídají období s nízkou a vysokou koncentrací radonu. Zatímco u skupiny sond umístěných u paty odvalu a na stěně odvalu nastává pík (maximum) OAR vždy kolem půlnoci, u skupiny sond umístěných na koruně odvalu nastává tento pík vždy později, a to v ranních hodinách.

Na základě předchozího zjištění společného trendu velikosti OAR během dne u zmíněných 4 skupin sond (sondy v hlušině u paty odvalu, sondy na stromě u paty odvalu, sondy v hlušině na koruně odvalu, sondy v hlušině na stěně odvalu) byly za účelem porovnání velikostí OAR u těchto skupin sond vypočítány celkové průměrné OAR během celého období a jednotlivých částí dne. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 25.

Tabulka 25: Průměrné hodnoty OAR v hlušině a na stromě u paty odvalu, v hlušině na koruně odvalu a v hlušině na stěně odvalu za celé pozorované období a jednotlivé části dne

část dne	umístění na odvalu							
	PO (hlušina)		PO (strom)		KO (hlušina)		SO (hlušina)	
	t (°C)	OAR (Bq/m ³)	t (°C)	OAR (Bq/m ³)	t (°C)	OAR (Bq/m ³)	t (°C)	OAR (Bq/m ³)
celé období	12	13 014	14	3 884	19	2 458	19	678
ráno (03:00 - 6:59)	6	12 838	7	4 625	12	4 850	10	1 017
dopoledne (7:00 - 10:59)	9	13 243	13	2 587	17	4 454	14	408
poledne (11:00 - 14:59)	17	10 968	20	1 619	25	1 012	25	253
odpoledne (15:00 - 18:59)	19	11 285	21	2 378	27	569	28	429
večer (19:00 - 22:59)	13	13 157	16	5 199	21	647	21	702
noc (23:00 - 2:59)	8	16 593	9	6 896	14	3 215	13	1 254

V Tabulka 25 jsou rovněž uvedeny průměrné teploty zaznamenané sondami na daných místech odvalu v celém pozorovaném období a jednotlivých částech dne. Podle závěrů studií uvedených v části 2.2 proudí plyn odvalem směrem dolů a vystupuje u paty odvalu při teplotách vyšších, než je vnitřní teplota v odvalu (v případě odvalu 38neu a odvalu u dolu Sullivan byla vnitřní teplota v odvalu přibližně 10 °C).

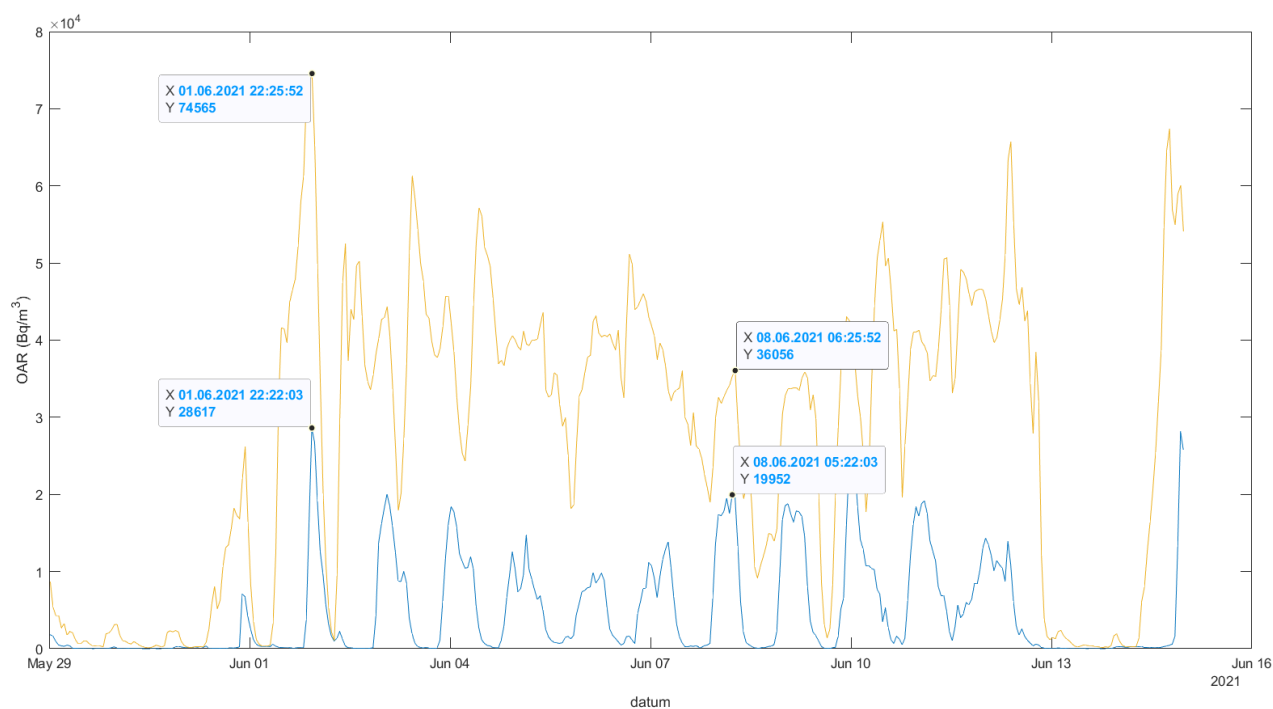
Z Tabulka 25 je patrné, že nejvyšší hodnoty OAR za celé pozorované období byly naměřeny v hlušině a na stromě u paty odvalu, což je v souladu s předchozím tvrzením, jelikož průměrná námi zaznamenaná teplota u paty odvalu činila 12 °C. Nejvyšší hodnoty OAR u paty odvalu byly zaznamenány konkrétně v nočních hodinách mezi 23:00 a 3:00 přičemž průměrná teplota v této době činila 8 °C. Toto je sice teplota, při které by měl proudit plyn odvalem směrem dolů, avšak uvedených studiích bylo rovněž zjištěno určité zpoždění mezi změnou teploty a následnou reakcí toku plynu v odvalu. Vysoké hodnoty OAR v nočních hodinách jsou tedy pravděpodobně zpožděnou reakcí na vyšší teploty zaznamenané v odpoledních hodinách.

Z Tabulka 25 je dále patrné, že nejvyšší hodnoty OAR na koruně odvalu byly zaznamenány mezi 3:00 a 7:00, tedy v době, kdy byla teplota nejnižší, a to 12 °C. Toto je opět teplota, při které by měl proudit plyn odvalem směrem dolů, avšak jelikož se jedná o průměrnou teplotu, tak v některých ranních hodinách byla teplota určitě nižší než 12 °C a plyn tedy proudil odvalem směrem nahoru. Na koruně odvalu byly rovněž zaznamenány maximální hodnoty OAR za pozorované období.

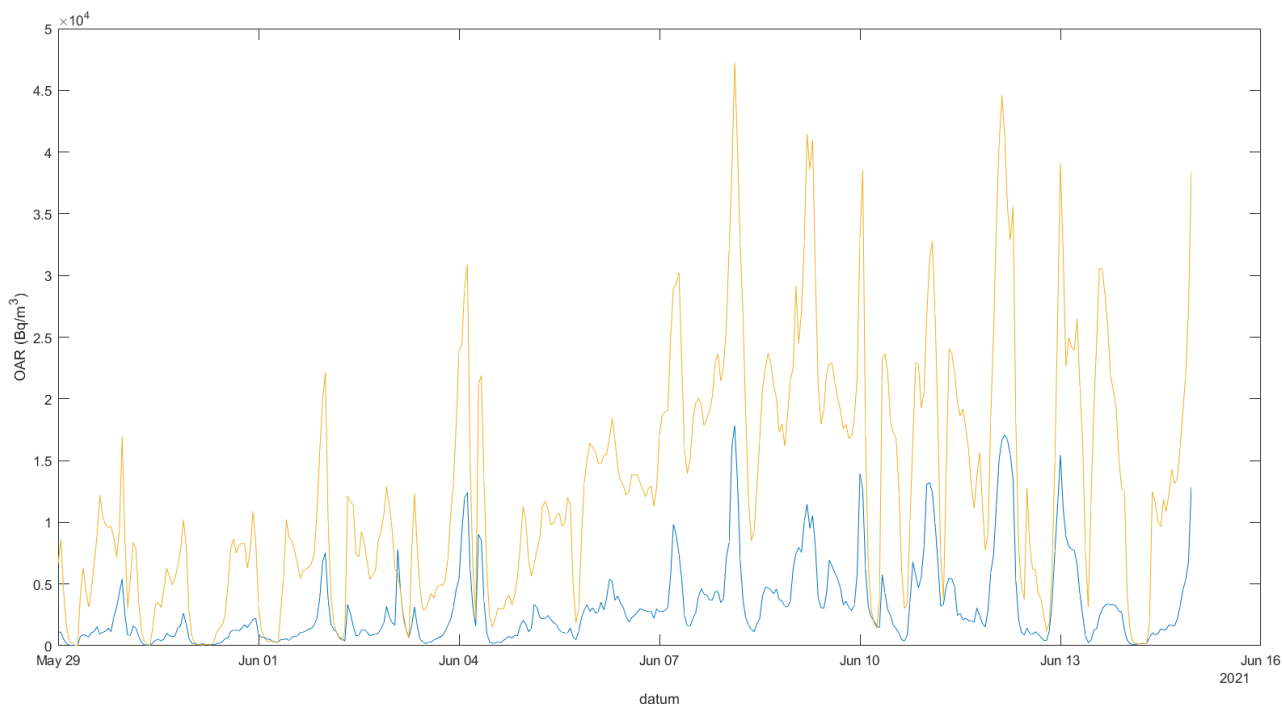
Nejnižší průměrná OAR byla zaznamenána u skupiny sond na stěně odvalu, což je rovněž uvedeno v Tabulka 25 Toto opět koresponduje se závěry výše zmíněných studií, ve kterých byly jako primární místa výdechu plynu z odvalu určeny pata odvalu a koruna odvalu. Stěnou odvalu vytéká malé množství plynu, a proto zde byly zaznamenány nejnižší hodnoty OAR.

3.3.1.1 Porovnání OAR ze sond v hlušině a na stromě

Pro srovnání OAR ze sond umístěných ve stejném bodu u paty odvalu, kdy jedna sonda je umístěna v hlušině a druhá v její blízkosti na stromě, byly vybrány body 3 (severní část odvalu, směrem k obci Brod) a 7 (jižní část odvalu). Srovnání jsou graficky znázorněna na Obrázek a Obrázek. Vybrání těchto bodů bylo učiněno z důvodu jejich umístění na různých světových stranách odvalu.



Obrázek 42: Porovnání OAR zaznamenaných sondami v měřícím bodu 3 na patě odvalu (oranžová křivka – sonda v hlušině, modrá křivka – sonda na stromě)



Obrázek 43: Porovnání OAR zaznamenaných sondami v měřícím bodu 7 na patě odvalu (oranžová křivka – sonda v hlušině, modrá křivka – sonda na stromě)

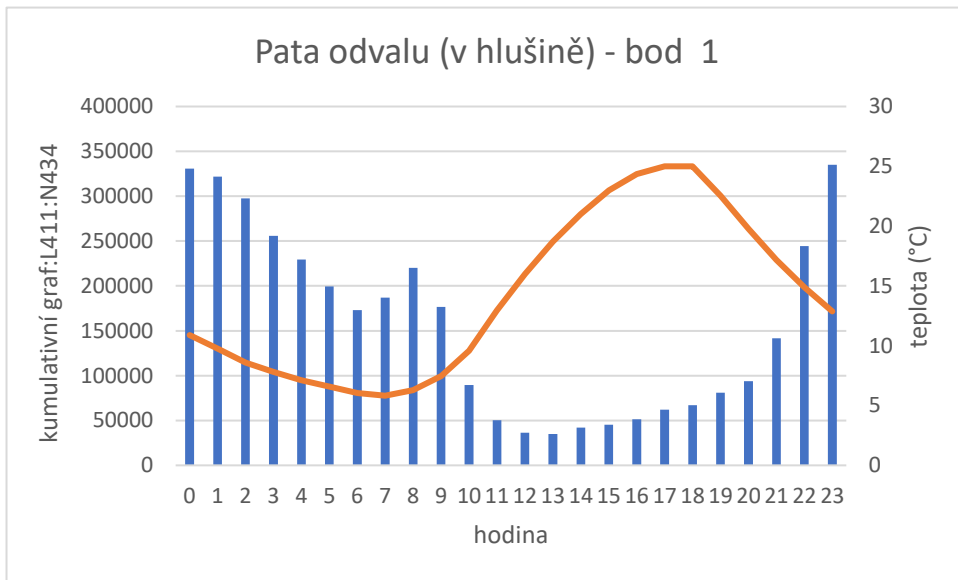
Z Obrázek a Obrázek je patrné, že OAR je vždy vyšší u sondy umístěné v hlušině. Dále je i zde patrný společný trend velikosti OAR v čase, kdy u sond umístěných na stromě a v hlušině v jednom místě nastávají píky OAR téměř v totožném čase. Z dostupných dat nelze určit možné zpoždění nárůstu či poklesu OAR mezi sondami v hlušině a na stromě, a to z důvodu, že předpokládané zpoždění je menší než zvolený interval měření 1 h.

3.3.2 Vztah mezi OAR a teplotou

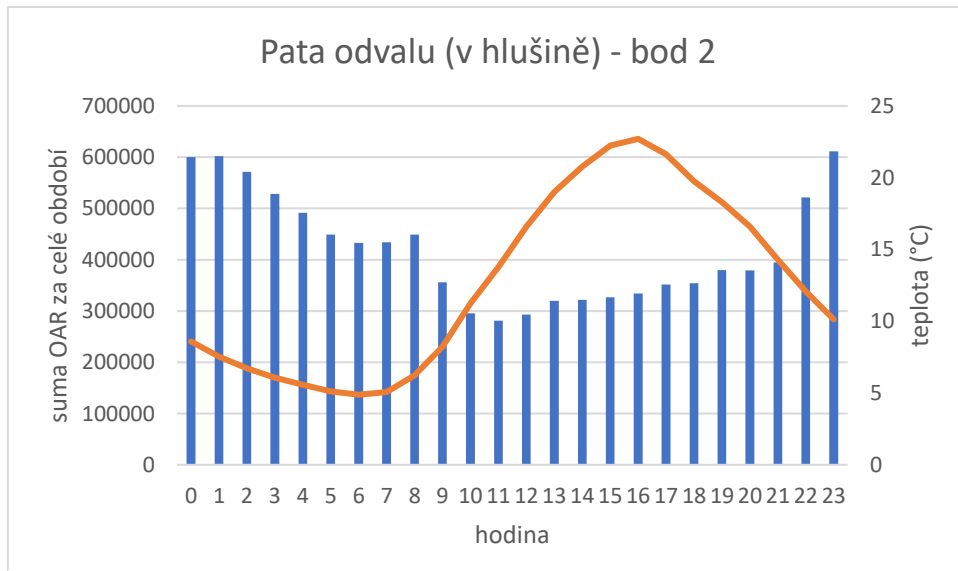
Na Obrázek 44 a Obrázek 45 je znázorněn vztah mezi sumou OAR za celé pozorované období v bodech 1 a 2 v hlušině u paty odvalu. Z obou grafů je patrné zpoždění mezi nárůstem teploty a nárůstem OAR. Nejvyšší teploty byly v těchto bodech zaznamenány okolo 16. hodiny, přičemž k prudšímu nárůstu OAR docházelo až okolo 21. hodiny.

Na Obrázek 46 a Obrázek 47 je znázorněn vztah mezi sumou OAR za celé pozorované období v bodech 15 a 16 v hlušině na koruně odvalu. Z obou grafů je patrné, že v době, kdy byly teploty nejnižší, začaly hodnoty OAR prudce stoupat.

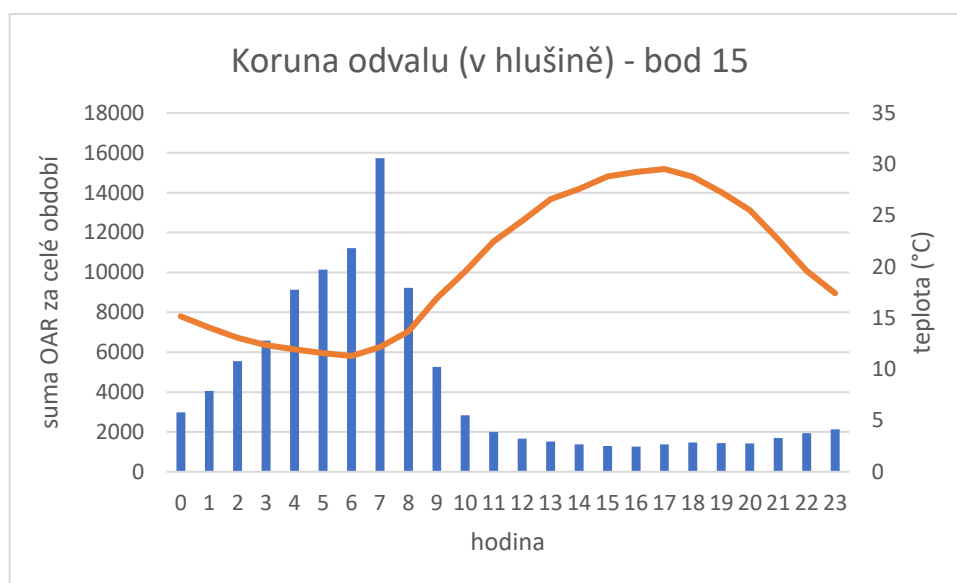
Toto pozorování opět koresponduje se závěry studií zmíněných v části 2.2, a to takových, že při vysokých teplotách vytéká vzduch z odvalu u jeho paty a při nízkých atmosférických teplotách u jeho koruny, přičemž je důležité zahrnout do těchto úvah již zmiňované zpoždění mezi změnou teploty a reakcí toku plynu v odvalu.



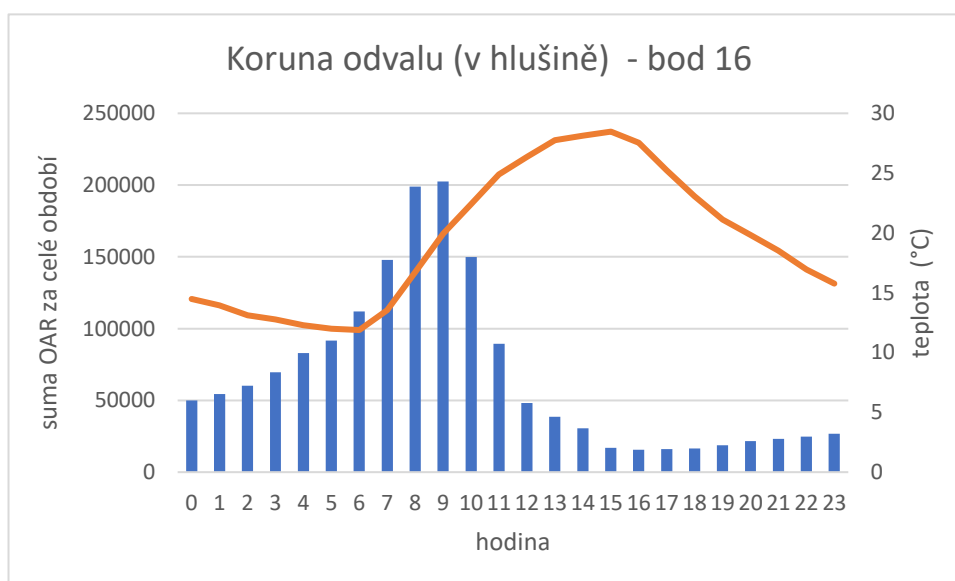
Obrázek 44: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřicím bodu 1 v hlušině na patě odvalu



Obrázek 45: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřicím bodu 2 v hlušině na patě odvalu



Obrázek 46: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřícím bodu 15 v hlušině na koruně odvalu



Obrázek 47: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřícím bodu 16 v hlušině na koruně odvalu

3.3.3 Závislost OAR na směru větru

Při určitém směru proudění větru může docházet ke zvyšování OAR na jiných místech na odvalu či jeho okolí. Z hlediska radiační ochrany je významný JV směr větru, při němž proudí vzduch z odvalu směrem k obci Brod.

3.3.4 Srovnání dat ze sond, z GT-40, RT-30, iontometru a anemometru

Z Tabulka 15, Tabulka 16, Tabulka 17 a Tabulka 18 je patrné, že na rozdíl od koncentrace U se koncentrace K, Th a ^{137}Cs v jednotlivých měřících bodech výrazně nelišily. Větší rozdíly byly naměřeny v hodnotách koncentrace U. Nejvyšší hodnota U byla zaznamenána v měřícím bodu 7 a činila 364, 49 ppm, což je několikanásobně více, než bylo naměřeno v jiných měřících bodech. Tato hodnota však může být způsobena špatnou geometrií měření nebo přítomností malého kousku horniny (smolince), vykazujícího větší aktivitu. Z Tabulka 16 je dále patrné, že v měřícím bodu 7 byla zaznamenána nulová koncentrace K, Th a ^{137}Cs . Tento údaj je zcela jistě chybný, přičemž možné vysvětlení je takové, že vlivem vysoké fluence částic dochází k přehlcení elektroniky detektoru, vysoké mrtvé době a selhání vyhodnocovacího algoritmu (sonda byla rovněž umístěna v nevhodné geometrii měření). Srovnání by i tak bylo pouze hypotetické, protože zatímco přenosný spektrometr GT-40 registruje gama záření z hloubky do max 50 cm (a v místech s vysokými koncentracemi radonu může samozřejmě měřit i produkty přeměny radonu emitující záření gama deponované na okolních površích), koncentrace radonu při povrchu odvalu může být ovlivněna jeho transportem z větších hloubek.

V Tabulka 26 je uvedeno porovnání PPDE naměřeného ve vybraných bodech u paty odvalu přístrojem GT-40 a průměrných OAR v hlušíně v těchto bodech. Závislost těchto veličin byla zkoumána pomocí korelačního koeficientu, jehož hodnota je $\rho = 0,41$, což značí mírnou závislost mezi uvedenými veličinami. Je pravděpodobné, že vyšší závislost by nastala v případě srovnání PPDE s okamžitými OAR v daných bodech. Toto srovnání však není možné, a to z důvodu, že měření pomocí přístroje GT-40 proběhlo současně s umístěním sond, které několik hodin po zapnutí nezaznamenávají přesné údaje. V Tabulka 27 je uvedeno porovnání PPDE naměřeného v měřících bodech u paty odvalu přístrojem GT-40 a \dot{D} naměřeného přístrojem RT-30 v těchto bodech. V tomto případě je hodnota korelačního koeficientu $\rho = 0,66$, což značí středně silnou závislost mezi uvedenými veličinami. Lze tedy říct, že s rostoucím PPDE v daném místě roste také \dot{D} .

Tabulka 26: Srovnání PPDE z přístroje RT-40 a průměrných OAR ve vybraných bodech v hlušíně u paty odvalu

bod na mapě	1	2	3	4	5	10
PPDE (nSv/h)	13,55	25,15	30,18	14,28	13,10	30,25
OAR (Bq/m ³)	9 231	24 700	27 122	12 419	3 064	1 703

Tabulka 27: Srovnání PPDE z přístroje GT-40 a \dot{D} z přístroje RT-30 v měřících bodech u paty odvalu

bod na mapě	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11
PPDE (nSv/h)	13,55	25,15	30,18	14,28	13,10	14,59	22,14	13,49	30,25	51,42
\dot{D} ($\mu\text{Gy/h}$)	0,10	0,11	0,14	0,14	0,11	0,10	0,43	0,16	0,27	0,41

V Tabulka 28 je uvedeno porovnání nejvyššího počtu záporných iontů N naměřeného ve vybraných měřících a hodnot okamžité OAR v těchto bodech. Hodnota korelačního koeficientu je v tomto případě $\rho = 0,91$, což značí silnou závislost mezi N a okamžitou hodnotou OAR. Zde je však potřeba zdůraznit, že nemáme k dispozici dostatečný počet bodů pro jistotu správného určení takové závislosti.

Tabulka 28: Srovnání nejvyššího počtu záporných iontů N naměřeného iontometry a okamžité hodnoty OAR ve vybraných měřících bodech

bod na mapě	5	7	14	15
N	18 290	38 000	2 000	640
OAR (Bq/m^3)	1 039	20 762	298	87

Na Obrázek 34 jsou graficky znázorněny teplota a rychlost proudění plynu naměřené pomocí anemometru během 4 dnů v měřícím bodu 7 mezi balvany u paty odvalu. Z grafu je patrné, že při zvýšení rychlosti proudění plynu dochází ve většině případů ke snížení teploty, což by mohlo znamenat, že se v odvalu nacházejí místa s koncentrací velmi chladného vzduchu nebo ledu, který byl v odvalu vytvořen během zimního období a během letního období chladný vzduch naopak proudí z odvalu ven. O možné přítomnosti podzemního ledu v kamenných sutích v letním období je pojednáno v [24].

Nízké teploty naměřené anemometrem v bodu 7 u paty odvalu jsou v souladu s nízkou průměrnou teplotou v tomto místě naměřenou pomocí sondy. V Tabulka 29 jsou pro porovnání uvedeny průměrné teploty za celé období a v jednotlivých částech dne v měřících bodech 3 a 7 v hlušině u paty odvalu. Zatímco v bodu 5 byly během dne zaznamenány v závislosti na části dne výraznější rozdíly v teplotách, v bodu 3 byla teplota po celou dobu téměř konstantní a pohybovala se okolo $3\text{ }^\circ\text{C}$.

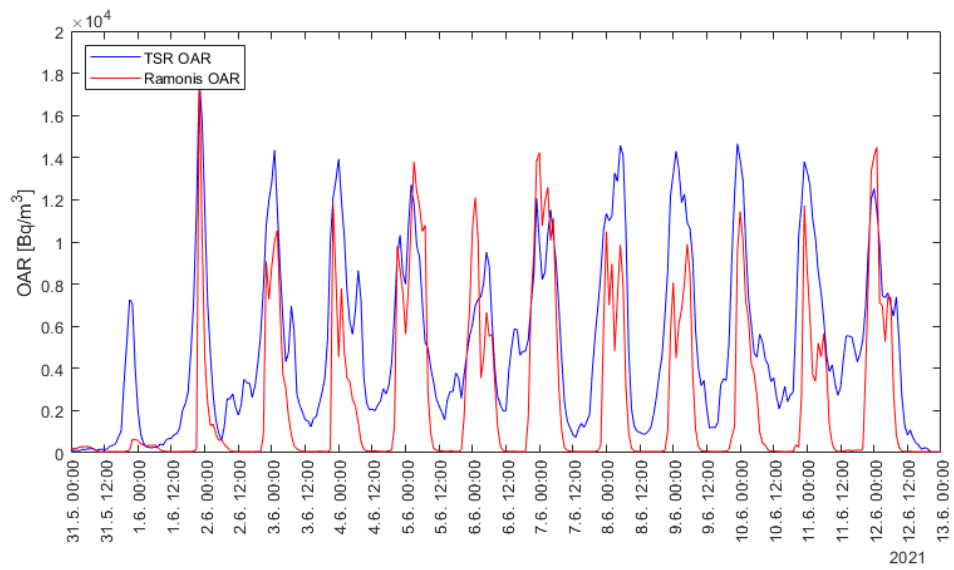
Tabulka 29: Srovnání teplot naměřených sondami v měřicích bodech 5 a 7 v hlušině u paty odvalu

část dne	umístění na odvalu	
	5	7
celé období	10,8	3,1
ráno (03:00 - 6:59)	5,3	3,0
dopoledne (7:00 - 10:59)	8,4	3,1
poledne (11:00 - 14:59)	17,5	3,3
odpoledne (15:00 - 18:59)	15,9	3,1
večer (19:00 - 22:59)	10,9	2,9
noc (23:00 - 2:59)	6,7	3,0

OAR by teoreticky měla záviset na rychlosti proudění plynu zaznamenané anemometrem. Toto srovnání však není možné provést z důvodu náhlé nečinnosti sondy v době měření anemometrem.

3.3.5 Porovnání s výsledky Ramonis

Krátce před odevzdáním práce se povedlo získat data z měřicí stanice Ramonis, provozované SÚRO v.v.i. mezi severním svahem odvalu a obcí Brod. Na Obrázek 48 je pro období 31.5.2021 až 13.6.2021 zobrazeno porovnání objemové aktivity radonu naměřené Ramonis a určené jako průměr hodnot ze sond TSR na stromech na měřicích bodech 1, 3 a 4. Období představuje podmnožinu měření z Ramonis, kdy stanice zaznamenávala zvýšené objemové koncentrace, měřicí body 1, 3, 4 byly nejbližší měřicí body.



Obrázek 48: Srovnání průměrné hodnoty OAR na stromech v měřících bodech 1, 3, 4 a OAR zaznamenaných Ramonis (data poskytnuta Ing. Karlem Jilkem, SÚRO, v.v.i. a zpracována Ing. Václavem Štěpánem Ph.D.)

Závěr

Cílem této práce bylo posouzení dopadu výskytu ^{222}Rn v tělese odvalu a jeho blízkém okolí z hlediska radiační ochrany.

Na základě rešerše literatury bylo zjištěno, že významnými vlastnostmi radonu jsou jeho radioaktivita, toxicita a malá reaktivita. Radon spolu s jeho dceřinými produkty představují přibližně 50 % celkové dávky přijímané širokou veřejností. Závažným potencionálním zdravotním dopadem radonu a jeho dceřiných produktů je rakovina plic. Dále bylo zjištěno, že radon, jakožto součást geologického podloží, se do ovzduší uvolňuje pomocí dvou transportních procesů – difúze a konvekce. Velkým zdrojem radonu mohou být odvaly s nezužitkovatelným materiálem vniklé po těžbě uranu. Prouděním plynu v odvalech se zabývá celá řada studií, v práci byly zmíněny studie v Kanadě, Německu, Austrálii a České republice. Tyto studie simulují proudění v odvalu na základě odlišných metod, některé používají např. numerický model. Jejich společným závěrem je závislost proudění plynu v odvalu na teplotě. Zatímco v letních měsících proudí plyn odvalem směrem dolů a vytéká u jeho paty, v zimních měsících je proudění opačné a plyn vytéká z odvalu na jeho koruně. Existuje mnoho detekčních technik radonu, které mohou být rozděleny z hlediska použití ve vnitřním nebo venkovním prostředí. Avšak např. i sondy určené pro kontinuální měření objemových aktivit radonu ve vnitřním prostředí lze při použití vhodného krytu použít ve venkovních podmínkách.

Praktické měření bylo provedeno na odvalu poblíž šachty č. 15, jenž je jedním z mnoha odvalů vzniklých na Příbramsku po těžbě uranu. Tento odval je však významný z hlediska možného vlivu na zdraví okolních obyvatel, jelikož se nachází v těsné blízkosti obcí Brod a Lešetice. V období od 28. 5. 2021 do 15. 6. 2021 bylo pomocí sond TSR 4 v hodinových intervalech provedeno měření objemových koncentrací radonu, aktuální teploty a vlhkosti. Sondy byly na základě rešerše odborné literatury a předpokládaného proudění plynu v odvalu v letním období rozmístěny především rovnoměrně podél paty odvalu, kde byly umístěny vždy po dvojicích, kdy jedna sonda byla v hlušině a druhá ve výšce přibližně 1,5 m na stromě. Další sondy byly také rozmístěny v hlušině na stěně odvalu a v hlušině na koruně odvalu. Kromě zmíněných parametrů měřených sondami bylo provedeno v místech umístění sond měření dalších fyzikálních parametrů pomocí jiných přístrojů. Přístrojem GT-40 byly kromě příkonu prostorového dávkového ekvivalentu

měřeny také koncentrace U, Th, K a ^{137}Cs a přístrojem RT-30 byl měřen dávkový příkon. Iontometry byl dále měřen počet záporných iontů. Na základě průzkumu infrakamerou bylo nalezeno místo s nejnižší teplotou u paty odvalu, které bylo označeno jako potenciaální místo silnějšího výdechu plynu z odvalu. Do tohoto místa byl následně umístěn anemometr, který po 4 dny monitoroval teplotu a rychlost proudění plynu.

Z výsledků měření vyplývá, že nejvyšší hodnoty objemových koncentrací radonu v tomto období byly naměřeny ve večerních hodinách u paty odvalu, což souhlasí s výsledky studie provedené SÚRO, v.v.i. Příčinou je opožděná reakce proudění plynu v odvalu na vyšší teploty v odpoledních hodinách, při kterých plyn proudí odvalem směrem dolů. Nižší průměrné, avšak nejvyšší maximální objemové aktivity radonu byly zaznamenány na koruně odvalu v ranních hodinách. Příčinou vyšších objemových aktivit radonu na koruně odvalu v ranních hodinách je noční ochlazení, při kterém je okolní teplota nižší, než teplota v odvalu a plyn proudí odvalem směrem dolů. Nejnižší objemové aktivity radonu byly zaznamenány na stěně odvalu, a to pravděpodobně z důvodu, že preferovaným výstupem plynu z odvalu jsou jeho pata a koruna, což koresponduje se závěry studií provedených na odvalu u dolu Sullivan a odvalu 38neu. Na základě korelačního koeficientu byla zkoumána závislost mezi příkonem prostorového dávkového ekvivalentu a průměrnou hodnotou objemové aktivity radonu, mezi příkonem prostorového dávkového ekvivalentu a dávkovým příkonem, a nakonec mezi nejvyšším naměřeným počtem záporných iontů a okamžitou hodnotou objemové aktivity radonu, kde vyšla závislost nejsilnější.

Zaznamenané průměrné objemové aktivity radonu jsou mnohonásobně vyšší, než je běžná hodnota objemové aktivity radonu v ovzduší, která činí přibližně 5 Bq/m^3 . Sondami však byla v jednom bodu zaznamenána průměrná objemová aktivita radonu v hlušině u paty odvalu $27\,122 \text{ Bq/m}^3$ a v jiném bodu na stromě u paty odvalu $7\,185 \text{ Bq/m}^3$. Při proudění vzduchu od odvalu směrem k okolním obcím může i v těchto obcích docházet ke zvýšení objemové aktivity radonu, což může vést k dopadům na zdraví jejich obyvatel. Tento problém se však netýká pouze obyvatel okolních obcí, v těsné blízkosti odvalu se totiž nachází cyklostezka a odval je volně přístupný, čehož někteří lidé využívají a na odval vstupují. Je potřeba zdůraznit, že odvaly se zatím nepovažují za rizikové pro okolní obyvatelstvo z hlediska zdravotních dopadů. Toto je jeden z důvodů, proč je potřeba se dále touto tematikou zabývat a na základě dlouhodobějšího pozorování posoudit možné zdravotní dopady odvalu na okolní obyvatelstvo.

Další kroky budou směřovat ke zmíněnému dlouhodobějšímu měření, přičemž na základě již naměřených dat bude upraveno rozmístění sond, jež budou více koncentrovány do míst, kde byly zaznamenány vysoké průměrné objemové aktivity radonu. Bude také zapotřebí upravit kryt sondy, aby uvnitř něj nedocházelo ke kondenzaci vody a následnému poškození sondy. Přínosné by dále bylo zajištění bezdrátového přenosu dat ze sond, například pomocí sítě SigFox. Pro měření rychlosti a směru větru by bylo velmi užitečné umístění meteostanice přímo v areálu bývalé jámy.

Seznam použité literatury

- [1] COTHERN, Richard C. *Environmental Radon*. 1987. Editor James E. SMITH. New York: Plenum Press, 1987. ISBN 0-306-42707-9.
- [2] GILMORE, Gordon. *Practical gamma-ray spectrometry*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-86196-7.
- [3] L'ANNUNZIATA, MICHAEL F. *Radioactivity: introduction and history* [online]. Elsevier Science, 2007 [cit. 2021-04-23]. ISBN 9780444527158.
- [4] FENG, Christopher a Zachary LI. *Handbook of Radon: Properties, Applications, and Health* [online]. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2012 [cit. 2021-07-04]. ISBN 9781621003694. Dostupné z: databáze EBSCOhost
- [5] BASKARAN, Mark. *Radon: a tracer for geological, geophysical and geochemical studies* [online]. Switzerland: Springer, 2016 [cit. 2021-07-04]. Springer geochemistry. ISBN 9783319213293. Dostupné z: databáze Proquest
- [6] ZÖLZER, Friedo a Renata HAVRÁNKOVÁ. *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.
- [7] MUCHA, Josef. Migrace radonu z podloží. *RDM servis: Měření radonu v Plzni a okolí* [online]. Spálené Poříčí [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <https://www.radon-servis.cz/Radon/4-Migrace-radonu-z-podlozi>
- [8] *Radonový program České republiky* [online]. Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2016 [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <https://www.radonovyprogram.cz/uvodni-strana/>
- [9] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. Národní akční plán - RANAP. *Radonový program České republiky* [online]. Praha: Státní úřad pro

jadernou bezpečnost, 2016 [cit. 2021-08-03]. Dostupné z:
<https://www.radonovyprogram.cz/narodni-akcni-plan-ranap/>

- [10] WHO *Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective* [online]. France: World Health Organization, 2009 [cit. 2021-07-04]. ISBN 9789240684188. Dostupné z: databáze Proquest
- [11] DARBY, S., D. HILL, A. AUVINEN et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* [online]. 2005, **330**(7485) [cit. 2021-07-29]. ISSN 0959-8138. Dostupné z: doi:10.1136/bmj.38308.477650.63
- [12] THINOVÁ, Lenka. *Ústní sdělení*.
- [13] THINOVÁ, Lenka. *Shrnutí poznatků z monitorování okolí převážně odvalu š. č. 15*. 2017.
- [14] LAHMIRA, Belkacem a René LEFEBVRE. *Numerical Modeling of Gas Flow in the No. 1 Shaft Waste Rock Dump, Sullivan Mine, B.C., Canada* [online]. , -90 [cit. 2021-07-08]. Dostupné z: <http://espace.inrs.ca/id/eprint/553/1/R000970.pdf>
- [15] LEFEBVRE, René, Belkacem LAHMIRA a Walfried LÖBNER. *Numerical modeling of gas flow to select a radon emission control method in waste rock dump 38neu, Germany* [online]. [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: [http://espace.inrs.ca/id/eprint/518/1/doc-2410\(1\).pdf](http://espace.inrs.ca/id/eprint/518/1/doc-2410(1).pdf)
- [16] LEFEBVRE, René, Belkacem LAHMIRA a Walfried LÖBNER. Atmospheric control of radon emissions from a waste rock dump. *Environmental Geotechnics* [online]. 2019, **6**(6), 381-392 [cit. 2021-07-17]. ISSN 2051-803X. Dostupné z: doi:10.1680/jenge.15.00066
- [17] LAWRENCE, Cameron E., Riaz A. AKBER, Andreas BOLLHÖFER a Paul MARTIN. 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. 2021-07-17]. ISSN 0265931X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvrad.2008.09.003
- [18] Historie bývalých Uranových dolů Příbram (I. část). *ZDAŘ BŮH.CZ* [online]. [cit. 2021-08-02]. Dostupné z: <https://www.zdarbuh.cz/reviry/ud-pribram/historie-byvalych-uranovych-dolu-pribram/>
- [19] FUKA, Vladimír, Peter HUSZÁR a Petr PIŠOFT. *Studie proudění v idealizovaném modelu odvalu z uranového dolu na ložisku Příbram* [online]. , 1-12 [cit. 2021-08-02].
- [20] SLEZÁKOVÁ, Miriam a Aleš FRONČKA. *Meranie 222Rn pomocou sond v blízkosti rádioaktívnych hald v Brodu u Příbrami*. 2018.
- [21] WLAN bezdrátová a USB radonová sonda TSR 4: Technický popis a návod k obsluze. In: *Tesla* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: https://www.tesla.cz/wp-content/uploads/2021/03/052-410-047-TSR4_sonda_manual_cz_v1.pdf
- [22] Instruments for Detection of Radiation: GT-40. In: *Georadis* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <http://www.georadis.com/cs/produkty/gt-25.html>
- [23] Instruments for Detection of Radiation: RT-30. In: *Georadis* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <http://www.georadis.com/cs/produkty/rt-30.html>
- [24] RŮŽIČKA, Vlastimil. Podzemní led v kamenných sutích: Ostrůvky severské přírody s chladnomilnými rostlinami a živočichy v České republice. *Vesmír* 77 [online]. **1998**(7), 397-398 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1998/cislo-7/podzemni-led-kamennych-sutich.html>
- [25] KOLEKTIV AUTORŮ KDAIZ FJFI ČVUT V PRAZE A SÚRO V.V.I. *Ozáření z přírodního zdroje záření: Výukový text* [online]. , 54 [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: https://www.radonovyprogram.cz/fileadmin/radonovyprogram/pdf_doc/Vzd_elavaci_publikace_prirodni_zdroje_zareni.pdf

Seznam tabulek

Tabulka 1: Poločasy přeměny izotopů radonu vyskytujících se v přírodě [5].....	16
Tabulka 2: Atomové, fyzikální a chemické parametry radonu [5]	18
Tabulka 3: Závislost měrného skupenského tepla varu na atomovém čísle daného prvku [5]	18
Tabulka 4: Poločas přeměny a energie α částic vybraných radionuklidů [4]	24
Tabulka 5: Přehled rozmístění funkčních sond v jednotlivých bodech na mapě.....	47
Tabulka 6: Denní časové intervaly pro výpočet průměrné OAR.....	53
Tabulka 7: Průměrné hodnoty OAR a mediány OAR (vše v Bq/m ³) za celý den a jeho části u sond umístěných v hlušině u paty odvalu	54
Tabulka 8: Průměrné hodnoty OAR a mediány OAR (vše v Bq/m ³) za celý den a jeho části u sond umístěných na stromě u paty odvalu	54
Tabulka 9: Průměrné hodnoty OAR a mediány OAR (vše v Bq/m ³) za celý den a jeho části u sond umístěných v hlušině na koruně odvalu	55
Tabulka 10: Průměrné hodnoty OAR, nejistoty a mediány OAR (vše v Bq/m ³) za celý den a jeho části u sond umístěných v hlušině na stěně odvalu.....	55
Tabulka 11: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m ³) za celé pozorované období u sond umístěných v hlušině u paty odvalu	56
Tabulka 12: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m ³) za celé pozorované období u sond umístěných na stromě u paty odvalu	56
Tabulka 13: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m ³) za celé pozorované období u sond umístěných v hlušině na koruně odvalu	56
Tabulka 14: Nejvyšší hodnoty OAR (Bq/m ³) za celé pozorované období u sond umístěných v hlušině na stěně odvalu	56
Tabulka 15: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ¹³⁷ Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech u paty odvalu	59
Tabulka 16: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ¹³⁷ Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech u paty odvalu	59

Tabulka 17: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ^{137}Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech na koruně odvalu	60
Tabulka 18: Parametry (PPDE, koncentrace K, U, Th a ^{137}Cs) a jejich chyby naměřené přístrojem GT-40 v měřících bodech na stěně odvalu	60
Tabulka 19: Průměrné hodnoty D a jeho nejistoty v měřících bodech u paty odvalu	61
Tabulka 20: Průměrné hodnoty D a jeho nejistoty v měřících bodech u paty odvalu	61
Tabulka 21: Průměrné hodnoty D a jeho nejistoty v měřících bodech na koruně odvalu ...	61
Tabulka 22: Průměrné hodnoty D a jeho nejistoty v měřících bodech na stěně odvalu	61
Tabulka 23: Nejvyšší naměřené hodnoty N ve vybraných bodech u paty odvalu	63
Tabulka 24: Nejvyšší naměřené hodnoty N ve vybraných bodech na koruně odvalu	63
Tabulka 25: Průměrné hodnoty OAR v hlušině a na stromě u paty odvalu, v hlušině na koruně odvalu a v hlušině na stěně odvalu za celé pozorované období a jednotlivé části dne	71
Tabulka 26: Srovnání PPDE z přístroje RT-40 a průměrných OAR ve vybraných bodech v hlušině u paty odvalu	76
Tabulka 27: Srovnání PPDE z přístroje GT-40 a D z přístroje RT-30 v měřících bodech u paty odvalu	77
Tabulka 28: Srovnání nejvyššího počtu záporných iontů N naměřeného iontometry a okamžité hodnoty OAR ve vybraných měřících bodech	77
Tabulka 29: Srovnání teplot naměřených sondami v měřících bodech 5 a 7 v hlušině u paty odvalu	78

Seznam obrázků

Obrázek 1: Přírodní přeměnové řady [22]	15
Obrázek 2: Závislost první ionizační energie na atomovém čísle daného prvku [5].....	17
Obrázek 3: Závislost měrného skupenského tepla varu na atomovém čísle daného prvku [5]	17
Obrázek 4: Rozdělení dávek radiační zátěže [6]	20
Obrázek 5: Závislost toku plynu v odvalu na atmosférické teplotě (v horní části obrázku je znázorněna závislost při teplotě 36 °C a v dolní části obrázku je znázorněna závislost při teplotě 5 °C) [14]	28
Obrázek 6: Letecký snímek odvalu 38neu [15]	30
Obrázek 7: Výpočetní síť reprezentující idealizovaný symetrický odval [19].....	38
Obrázek 8: Rozdělení výpočetní sítě do 3 zón – půdní podloží, vnitřek odvalu, okrajová vrstva odvalu [19]	38
Obrázek 9: Proudění uvnitř odvalu v létě znázorněné pomocí vektorů rychlosti [19].....	39
Obrázek 10: Rozmístění sond pro měření OAR na odvalu u šachty č. 15 a v jeho okolí v období od srpna 2017 do ledna 2018 (autor: Lenka Thinová).....	40
Obrázek 11: Graf větrné růžice v měřícím bodu 16 [20].....	41
Obrázek 12: Sonda TSR 4 s popisem základních částí [21]	43
Obrázek 13: Ilustrační snímek přístroje GT-40 [22]	44
Obrázek 14: Ilustrační snímek přístroje RT-30 [23].....	45
Obrázek 15: Rozmístění sond na odvalu	47
Obrázek 16 Ukázka rozmístění sond na patě odvalu, kdy jedna sonda je v hlušině a druhá sonda je připevněna na stromě (foto: Jan Hradecký).....	48
Obrázek 17: Umístění sondy na stěně odvalu.....	48
Obrázek 18: Umístění sondy na koruně odvalu v bodu 3 – v pozadí obec Brod a město Příbram.....	48
Obrázek 19: Stahování dat ze sondy umístěné na stěně odvalu v bodu 10 přes kabel USB (foto: Václav Štěpán).....	49

Obrázek 20: : Suma OAR v bodu 16 v hlušině na koruně odvalu.....	49
Obrázek 21: Suma OAR v bodu 13 v hlušině na koruně odvalu.....	51
Obrázek 22: Suma OAR v bodu 2 v hlušině na patě odvalu	51
Obrázek 23: Suma OAR v bodu 7 v hlušině na patě odvalu	52
Obrázek 24: Suma OAR v bodu 6 na stromě u paty odvalu.....	52
Obrázek 25: Suma OAR v bodu 8 v hlušině na stěně odvalu.....	53
Obrázek 26: Měření přístrojem GT-40 v bodu 16 na koruně odvalu	57
Obrázek 27: Měření přístrojem GT-40 v bodu 15 na koruně odvalu – v pozadí obec Žežice	58
Obrázek 28: Údaj z iontometru naměřený v bodu 11 u paty odvalu (základní rozsah)	62
Obrázek 29: Údaj z iontometru naměřený v bodu 7 mezi balvany u paty odvalu (na iontometru je nastaven rozsah X10, počet záporných iontů je tedy 66 600).....	62
Obrázek 30: Záznam z infrakamery pořízený v měřícím bodu 7 u paty odvalu	63
Obrázek 31: Záznam z anemometru umístěného v bodu 7 u paty odvalu (autor: Václav Štěpán)	64
Obrázek 32: Umístění anemometru přímo vedle sondy v měřícím bodu 7 u paty odvalu (autor: Václav Štěpán)	65
Obrázek 33: Detail měřícího hrotu anemometru umístěného v měřícím bodu 7 u paty odvalu (autor: Václav Štěpán)	65
Obrázek 34: OAR, teplota a vlhkost zaznamenané během celého období v bodu 13 v hlušině na koruně odvalu.....	66
Obrázek 35: Záznam OAR v měřícím bodu 3 v hlušině u paty odvalu za celé pozorované období	67
Obrázek 36: Záznam OAR v měřícím bodu 3 v hlušině u paty odvalu během jednoho týdne (od 1. 6. 2021 do 7. 6. 2021).....	67
Obrázek 37: Záznam OAR v měřícím bodu 3 v hlušině u paty odvalu během jednoho dne (4. 6. 2021)	68
Obrázek 38: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami v hlušině u paty odvalu.....	38

Obrázek 39: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami na stromě u paty odvalu	69
Obrázek 40: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami v hlušině na koruně odvalu.	69
Obrázek 41: Graf OAR naměřených od 29. 5. do 4. 6. sondami v hlušině na stěně odvalu ...	70
Obrázek 42: Porovnání OAR zaznamenaných sondami v měřícím bodu 3 na patě odvalu (oranžová křivka – sonda v hlušině, modrá křivka – sonda na stromě).....	72
Obrázek 43: Porovnání OAR zaznamenaných sondami v měřícím bodu 7 na patě odvalu (oranžová křivka – sonda v hlušině, modrá křivka – sonda na stromě).....	73
Obrázek 44: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřícím bodu 1 v hlušině na patě odvalu	74
Obrázek 45: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřícím bodu 2 v hlušině na patě odvalu	74
Obrázek 46: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřícím bodu 15 v hlušině na koruně odvalu.....	75
Obrázek 47: Graf sumy OAR a průměrné teploty za celé období v měřícím bodu 16v hlušině na koruně odvalu.....	75
Obrázek 48: Srovnání průměrné hodnoty OAR na stromech v měřících bodech 1, 3, 4 a OAR zaznamenaných Ramonis (data poskytnuta Ing. Karlem Jílkem, SÚRO, v.v.i.a zpracována Ing. Václavem Štěpánem Ph.D.)	79