UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE

FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

Radón v domoch – variácie, modely a sezónny korekčný faktor

Dizertačná práca

BRATISLAVA 2025 **Mgr. Viktória Benková**

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

Radón v domoch – variácie, modely a sezónny korekčný faktor

Dizertačná práca

Študijný program:	Jadrová a subjadrová fyzika
Študijný odbor:	4.1.2. všeobecná fyzika a matematická fyzika
Školiace pracovisko:	Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Školiteľ:	doc. RNDr. Monika Müllerová, PhD.
Konzultant:	doc. RNDr. Karol Holý, CSc.

BRATISLAVA 2025 **Mgr. Viktória Benková**

76784366

Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Mgr. Viktória Benková
Študijný program: jadrová a subjadrová fyzika (Jednoodborové štúdium, doktorandské III. st., denná forma)
Študijný odbor: fyzika
Typ záverečnej práce: dizertačná
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický
Názov: Radón v domoch – variácie, modely a sezónny korekčný faktor
Radon in houses – variations, models and seasonal correction factor

Anotácia: Radón sa do domov dostáva z rôznych zdrojov, ako je pôda, stavebný materiál, voda. Koncentrácia radónu v uzavretom priestore závisí jednak od prísunu radónu zo zdroja, ale aj veľkosti ventilačnej rýchlosti, s ktorou je radón z domu odstraňovaný. Kombináciou týchto dvoch parametrov sa v domoch prejavujú rôzne variácie radónu.
Cieľom dizertačnej práce bude otestovanie rôznych prístupov určenia priemernej ročnej koncentrácie radónu v domoch, medzi nimi aj pomocou sezónneho korekčného faktora. Bude overovaný sezónny korekčný faktor pre rôzne typy radónového rizika pôd a rôzne lokality Slovenska a snaha o jeho upresnenie. Súčasťou práce bude analýza kontinuálnych meraní radónu na pracovisku s ohľadom na pracovnú dobu.

Školiteľ: doc. RNDr. Monika Müllerová, PhD.
Konzultant: doc. RNDr. Karol Holý, CSc.
Katedra: FMFI.KJFB - Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Vedúci katedry: prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.

Dátum zadania: 09.01.2020
Dátum schválenia: 25.01.2021

prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
garant študijného programu

....
študent školiteľ

Abstrakt

Mgr. Viktória Benková*: Radón v domoch – variácie, modely a sezónny korekčný faktor* [Dizertačná práca].

Univerzita Komenského v Bratislave. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra jadrovej fyziky a biofyziky. Školiteľ: doc. RNDr. Monika Müllerová, Konzultant: doc. RNDr. Karol Holý, CSc., Bratislava, 2024. 108 strán.

Kľúčové slová: variácie radónu, objemová aktivita radónu, sezónny korekčný faktor, modely

Radón predstavuje významný prírodný zdroj ionizujúceho žiarenia vo vnútorných priestoroch (napr. v domoch, budovách, na pracoviskách), pričom dlhodobá expozícia zvýšenej objemovej aktivite radónu (OAR) je spojená so zvýšeným rizikom vzniku pľúcneho karcinómu. Presné určenie ročnej priemernej OAR je nevyhnutným predpokladom pre hodnotenie radónového rizika, pričom vzhľadom na sezónne výkyvy koncentrácie radónu v interiéri je potrebné výsledky krátkodobých meraní upraviť pomocou rôznych modelov. Jedným z aktuálne používaných modelov je založený na výpočte sezónnych korekčných faktorov (SKF).

Dizertačná práca sa zameriava na štúdium objemovej aktivity radónu v rodinných domoch na Slovensku s dôrazom na ich sezónne variácie a na ich modelovanie. Hlavným cieľom bolo odvodiť a overiť sezónny korekčný faktor na rôznych lokalitách prevažne západného Slovenska, ktorý by umožnil spoľahlivý odhad ročnej priemernej OAR na základe trojmesačných meraní počas jednotlivej sezóny.

Na základe experimentálnych údajov získaných zo 151 miestností v rôznych regiónoch Slovenska boli sezónne faktory zistené viacerými spôsobmi, vrátane spriemerovania hodnôt OAR z dvoch miestností v rámci jedného objektu. Výsledky preukázali vysokú mieru zhody medzi vypočítanými a reálne nameranými hodnotami ročnej OAR, čo potvrdzuje praktickú použiteľnosť navrhnutej metódy.

Práca tiež prináša návrh rozličných model na predikciu ročnej OAR, diskusiu o hraniciach použitia SKF v objektoch s atypickým priebehom radónových koncentrácií a odporúčania pre optimalizáciu meracích stratégií. Zistenia podporujú využitie sezónneho korekčného faktora ako efektívneho nástroja pri radónovej diagnostike, pričom jeho správna aplikácia môže výrazne prispieť k zefektívneniu radónových meraní na národnej úrovni.

Abstract

Mgr. Viktória Benková: *Radon in houses: variations, models and seasonal correction factor* [Dissertation thesis].

Comenius University in Bratislava. Faculty of mathematics, physics and informatics, Department of nuclear physics and biophysics. Supervisor: doc. RNDr. Monika Müllerová, PhD., Consultant: doc. RNDr. Karol Holý, CSc., Bratislava, 2024. 108 pgs.

Keywords: radon variations, radon activity concentration, seasonal correction factor, models

Radon is a significant natural source of ionizing radiation in indoor environments (such as houses, buildings, work places) , and long-term exposure to elevated indoor radon concentration (IRC) is associated with an increased risk of lung cancer. Accurate estimation of the annual average IRC is essential for radon risk assessment. Due to the seasonal variability of indoor radon concentrations, short-term measurements require adjustment using various models. One of the current models is based on the calculation of seasonal correction factors (SCFs).

This dissertation focuses on the study of indoor radon concentration in residential buildings in Slovakia, with a particular emphasis on seasonal variations and their modeling. The primary objective was to derive and validate seasonal correction factors, that would enable reliable estimation of the annual average IRC based on three-month measurements conducted during each season.

Based on experimental data from 151 rooms across different Slovak regions, the seasonal correction factors were verified through various approaches, including averaging of IRC values from two rooms within a single house. The results demonstrated a strong agreement between calculated and directly measured annual IRC values, confirming the practical applicability of the proposed method. The work also proposes a simple model for predicting annual IRC, discusses the limitations of SCF application in buildings with atypical seasonal radon behavior, and presents recommendations for optimizing measurement strategies. The findings support the use of seasonal correction factors as an effective tool in radon diagnostics, and their correct implementation can significantly improve the efficiency of radon surveys on a national scale.

Predhovor

Zdravotné riziko od ionizujúceho žiarenia je sprevádzané rôznym stupňom závažnosti. Jednotlivé tkanivá v ľudskom tele sa odlišujú mierou citlivosti, čím dochádza k rozličným prejavom biologických účinkov žiarenia. Vo všeobecnosti tieto účinky závisia od druhu žiarenia, absorbovanej dávky a časového faktora, počas ktorého pôsobí žiarenie na človeka (Buchancová, 2003).

Radón, ako jeden z najvýznamnejších prírodných rádioizotopov, je exhalovaný z pôdneho vzduchu a so svojimi produktmi premeny sa dostáva do organizmu, kde spôsobuje vnútorné ožiarenie. Po jeho inhalácií do dýchacieho traktu dochádza k expozícií v oblasti bronchiálnej sliznice, čo spôsobuje priame poškodenie DNA a z dlhodobého hľadiska môže nakoniec vyvrcholiť až v nádorové ochorenie. Podľa Svetovej zdravotnej organizácie (WHO) je teda radón charakterizovaný ako karcinogén typu 1A (Cabáneková, 2013).

Napriek známym skutočnostiam, nie sú zdravotné následky, spôsobené vysokou koncentráciou radónu a jeho produktami premeny, stále dostatočne prístupné bežnej populácií. Súčasné epidemiologické štúdie predpokladajú lineárny nárast rizika vzniku rakoviny o 16 % na 100 Bq/m^3 objemovej aktivity radónu, pričom vo vnútornej atmosfére, vrátane domácností a pracovísk, hladiny OAR môžu dosiahnuť hodnoty na úrovni niekoľko stoviek až tisícok Bq/m^3 (Cabáneková, 2013). Z uvedených dôvodov je preto nevyhnutné dbať na zníženie koncentrácie radónu v uzavretých priestoroch, kde sa jedinec počas väčšiny svojho dňa nachádza. V budove pracoviska je povinnosťou zamestnávateľa, aby na základe vypracovaného národného akčného plánu dbal na preskúmanie radónovej aktivity v budove a tak predchádzal možnému zdravotnému riziku pracovníkov. V pobytových priestoroch, rovnako ako v pracovnom prostredí, je taktiež nevyhnutné vykonať preventívnu radónovú diagnostiku, ktorej súčasťou je základná kontrola lokality a vyhodnotenie pravdepodobnosti výskytu vysokej úrovne radónu na danom území. Na zníženie koncentrácie radónu sa využívajú rozličné protiradónové opatrenia, založené najmä na mechanických úpravách budov.

Predložená práca sa preto venuje vyšetrovaniu príčin vysokých objemových aktivít radónu vo vnútorných priestoroch, ako aj ich zdrojom, spôsoby ventilácie a radiačnému riziku. Cieľom práce je poukázať na význam štúdia modelov, ktoré sa zaoberajú faktormi ovplyvňujúcimi koncentráciu radónu z rozličných hľadísk a zároveň prispieť k doposiaľ získaným poznatkom mechanizmu pohybu radónu v uzavretých priestoroch.

Poďakovanie

S prípravou práce mi veľmi pomohla moja školiteľka doc. RNDr. Monika Müllerová PhD. a môj konzulant práce doc. RNDr. Karol Holý, CSc. Bez ich odborného vedenia, významných rád a neustálej starostlivosti by táto práca v podobe, v akej ju predkladám, nemohla vzniknúť, a za to som im nesmierne vďačná. Ďalej by som sa chcela poďakovať mojej rodine a blízkym priateľom, ktorí vo mňa veria aj v časoch, kedy nedokážem veriť sama sebe.

Taktiež chcem vo veľkej miere poďakovať pracovníkom Slovenského hydrometeorologického ústavu za poskytnuté meteorologické údaje, ktoré som v práci využila pri analýze radónových dát.

Obsah

1 Radón 156
1.1 Základná charakteristika radónu 156
1.2 Chemicko-fyzikálne vlastnosti 156
1.3 Produkty premeny radónu 158
2 Správanie radónu v environmentálnych prostrediach 160
2.1 Radón v ovzduší a voľnej prírode 160
2.2 Radón vo vnútorných priestoroch 162
2.2.1 Zdroje radónu vo vnútorných priestoroch 162
2.2.2 Transport radónu vo vnútornej atmosfére 164
3 Dôvody merania radónu a jeho využitie 166
3.1 Zdravotné dôvody merania radónu 166
3.2 Vedecké dôvody merania radónu 167
3.3 Spôsoby merania radónu 168
4 Modely objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére 171
4.1 Model opísaný organizáciou UNSCEAR 171
4.2 Arvelov model 172
3.3 Jellov model 173
5 Modely objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére s využitím sezónnych korekčných faktorov 177
5.1 Krewskiho model 178
5.2 Crockettov model 180
5.3 Groves-Kirbyho model 182
6 Cieľ práce 184
7 Analýza objemovej aktivity radónu v budove verejnej správy 185
7.1 Použité metódy merania 185
7.2 Charakteristika pozorovanej lokality 186
7.3 Spracovanie nameraných údajov 186
7.3.1 Analýza priebehu objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére 186
7.3.2 Analýza denných variácií objemovej aktivity radónu a ich priemerných hodnôt pri rozdelení údajov podľa pracovných a voľných dní 188
7.3.3 Analýza variácií objemovej aktivity radónu v závislosti od parametrov vonkajšej atmosféry 195

7.3.4 Analýza nárastových kriviek objemovej aktivity radónu 201
7.4 Vyhodnotenie výsledkov 204
8 Harmonická analýza objemovej aktivity radónu vo vnútornom ovzduší 206
8.1 Použité nástroje merania 206
8.1.1 Meracie zariadenie RamaRn.....206
8.1.2 Vzťah na určenie OAR prostredníctvom harmonickej analýzy.....206
8.2 Pozorované lokality..... 207
8.3 Spracovanie nameraných údajov..... 207
8.3.1 Priemerná OAR a priemerná vonkajšia teplota 208
8.3.2 Koeficient úmernosti 212
8.3.3 Porovnanie priemerných hodnôt OAR získaných pomocou SKF a harmonickej analýzy 214
8.4. Vyhodnotenie výsledkov 215
9 Použitie sezónnych korekčných faktorov pre krátkodobé merania 216
9.1 Použité metódy..... 216
9.2 Pozorované lokality..... 216
9.3 Spracovanie nameraných údajov..... 216
9.3.1 Použitie sezónneho korekčného faktora 217
9.3.2 Sezónny korekčný faktor pre západ, severozápad a stredozápad Slovenska.....221
9.3.3 Porovnanie priemerných hodnôt sezónnych korekčných faktorov vo vybraných lokalitách 225
9.3.4 Odhad hodnôt objemovej aktivity radónu pri krátkodobých meraniach s využitím sezónnych korekčných faktorov 228
9.4 Vyhodnotenie výsledkov..... 230
Záver 233
Zoznam použitej literatúry 237

Zoznam skratiek a označení

BA - Bratislava

EF – efektívna dávka

EPA – Agentúra pre ochranu životného prostredia

EÚ – Európska Únia

HA – harmonická analýza

IAEA – Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu

ICRP – Medzinárodná komisia pre radiačnú ochranu

OAR – objemová aktivita radónu

OAR PD (celý deň) - objemová aktivita radónu v pracovných dňoch počas celého dňa

OAR PD (PD) - objemová aktivita radónu v pracovných dňoch počas pracovnej doby

OAR V - objemová aktivita radónu cez víkend

ppm – parts per million („častí na milión“)

^{226}Ra – rádium

^{219}Rn – aktinón

^{220}Rn - torón

^{222}Rn – radón

^{232}Th - torón

TSR2 – radónový senzor

SHMÚ – Slovenský hydrometeorologický ústav

SKF – sezónny korekčný faktor

SR – Slovenská republika

SÚJCHBO – Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany

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

WHO – World Health Organisation

Úvod

Podľa smernice Rady 2013/59/EURATOM je potrebné v členských krajinách EÚ realizovať národné akčné plány na riešenie dlhodobých rizík vyplývajúcich z ožiarenia radónom (European Commission, 2014). Ich úlohou je taktiež nájsť pobytové a pracovné priestory, v ktorých objemová aktivita radónu OAR presahuje stanovenú referenčnú hodnotu (300 Bq/m^3 za jeden kalendárny rok). Pri porovnávaní spracovaných údajov sa môžu vyskytnúť rôzne problémy, vyplývajúce z používania rôznych metód detekcie a vyhodnocovania, čo ďalej môže viesť k nejednoznačnostiam vo výpočtoch priemernej ročnej objemovej aktivity a tiež vo vyhodnotení ročnej efektívnej dávky (WHO, 2016).

Pre spoľahlivé určenie radiačnej záťaže jedinca je dôležité poznať presnú hodnotu OAR vo vnútornom prostredí s dôrazom na mieru využívania priestoru. Pomocou dlhodobého monitorovania radónu je ďalej možné získať poznatky o jeho sezónnych a denných variáciách, čo môže v budúcnosti poskytnúť predpoveď o správaní radónu pri daných meteorologických, stavebných a prírodných pomerov. V súvislosti so sezónnym monitorovaním radónu je tiež možné určiť priemernú ročnú hodnotu OAR pomocou výpočtovej metodiky korekčných faktorov.

Okrem experimentálnych odhadov sa na opis mechanizmu pohybu radónu v uzavretých priestoroch využívajú rozličné numerické metódy. Písomná práca kladie tiež dôraz na priblíženie a následne testovanie vybraných teoretických modelov, ktoré boli vypracované rôznymi vedeckými skupinami.

Na základe použitého modelu objemovej aktivity radónu je ďalej možné odhadnúť priemernú hodnotu efektívnej dávky. Odhad dávky sa mení v závislosti od z fyzikálnych, biologických a výkonnostných faktorov. Úloha modelovania tiež spočíva v presnom stanovení sezónnych korekčných faktorov s ohľadom na rozličné podmienky vo vnútorných priestoroch (ICRP, 1993).

Prehľad súčasnej problematiky

1 Radón

1.1 Základná charakteristika radónu

Radón bol objavený v roku 1898 nemeckým vedcom Friedrichom Ernestom Dornom, ktorý ho predstavil ako rádioaktívny plyn pochádzajúci z premeny rádia. Monitorovanie aktivity rádia na prelome 19. a 20. storočia taktiež skúmali aj iné skupiny vedcov, ako napr. Rutherford (1900) alebo Marie a Pierre Currie (1899) (Baskaran, 2016). Prvá publikácia o radóne bola uverejnená v roku 1900 F. E. Dornom, o rok na to popísal Rutherford emanáciu radónu z rádioaktívnej premeny tória (Ramsay, 1904).

Ako najťažší prvok spomedzi skupiny vzácnych plynov má radón v súčasnosti 36 izotopov, od ^{193}Rn po ^{228}Rn. Všetky sú charakterizované ako nestabilné a iba štyri z nich majú dobu polpremeny $T_{1/2}$ dlhšiu ako 1 h. Medzi najvýznamnejšie prírodné izotopy radónu, práve kvôli ich neustálej produkcii, patrí ^{219}Rn (aktinón) s dobou polpremeny $T_{1/2} = 3{,}96\ s$, ^{220}Rn (torón) s dobou polpremeny $T_{1/2} = 55{,}6\ s$ a ^{222}Rn (radón) s dobou polpremeny $T_{1/2} = 3{,}82$ dňa.

V porovnaní s ďalšími vzácnymi plynmi nebolo doposiaľ geochemické správanie radónu podrobne skúmané. Jeho monitorovanie je sústredené skôr na oblasť aktivity a radiačného rizika, kde boli v súčasnosti vyvinuté kvalitné detekčné techniky a monitorovacie systémy.

Vzhľadom k extrémne malej stabilite prevažnej väčšiny izotopov radónu sa meranie koncentrácie radónu v prostredí sústreďuje na detekciu relatívne stabilného izotopu ^{222}Rn.

1.2 Chemicko-fyzikálne vlastnosti

Atómy radónu a iných vzácnych plynov majú uzavretú elektrónovú štruktúru a sú mimoriadne stabilné práve kvôli vysokým ionizačným energiám. Prvá ionizačná energia (energia potrebná na odstránenie jedného elektrónu z atómového obalu) pre radón je 1037 kJ/mol, u ostatných vzácnych plynov sa zvyšuje s klesajúcim atómovým číslom.

Elektronegativita v periodickej tabuľke prvkov klesá so zvyšujúcim sa atómovým číslom, preto má radón pomerne nízku elektronegativitu (2,2 Paulingovej stupnice) (mcmaster.ca, 2019). V roku 1989 Schery a Whittlestone pozorovali správanie radónu pri rôznych počiatočných podmienkach a ukázali, že v suchom nízkotlakovom prostredí dochádza k významnému počtu interakcií radónu s pôdnymi zrnami. Tieto podmienky sú však na Zemi veľmi zriedkavé, takže v rámci meraní na zemskom povrchu sa považujú za zanedbateľné (Baskaran, 2016).

Radón pri normálnych hodnotách teploty a tlaku tvorí jednoatómový plyn s hustotou 9,73 $kg.m^{-3}$ (jlab.org, 1998). Keďže sa rozpustnosť s narastajúcim atómovým číslom zvyšuje, radón sa vyznačuje v porovnaní s inými vzácnymi plynmi vysokou mierou rozpustnosti, pričom je rozpustnejší v organických kvapalinách ako vo vode. Výparné teplo (miera práce, ktorú je potrebné vykonať na prekonanie atómových príťažlivých síl) má tiež narastajúcu tendenciu s atómovým číslom, čo platí aj pre radón (Kertes, 1979).

Pri normálnom tlaku je radón kvapalný iba v úzkom intervale teplôt medzi teplotou varu 211,3 K a teplotou topenia 202 K. Ak je radón ochladený pod svoju teplotu topenia, jeho charakteristická bezfarebnosť prechádza do voľným okom pozorovateľnej rádioluminescencie (jlab.org, 1998).

Radón leží na diagonále periodickej tabuľky medzi kovmi a nekovmi a vykazuje niektoré z charakteristík oboch skupín. Dokáže spontánne reagovať pri 25 °C alebo nižších teplotách s fluórom, halogénfluoridmi (okrem IF_5) a množstvom oxidačných solí.

Aj keď sa existencia radónových zlúčenín alebo iónov vo vodných roztokoch doposiaľ nepodarila dokázať, roztoky katiónového radónu, ako napríklad, fluorovodík a halogénfluoridy, je možné vyhotoviť v nevodných rozpúšťadlách.

Správanie chemickej sorpcie ^{222}Rn vzhľadom na jeho inertnosť sa prejavuje ako slabo reaktívne s inými prvkami alebo zlúčeninami. Schery a Whittlestone (1989) v určitých prípadoch predpokladali izolovanú sorpciu radónu na pôdu a horninové zrná, avšak v dôsledku vlhkosti bol jej príspevok v porovnaní s inými mechanizmami uvoľňovania zanedbateľný. Z hľadiska environmentálnych podmienok, ktoré sú na Mesiaci, v porovnaní s podmienkami na zemskom povrchu, Tanner dospel k záveru, že pre suché nízkotlakové prostredie mesačných hornín sa zdá byť sorpcia dôležitejšia, ale jej význam pri teplote a vlhkosti bežnej na zemskom povrchu doposiaľ nebol pozorovaný.

Keďže radón je plyn, jeho rovnovážne rozdelenie medzi plynnou a kvapalnou fázou možno opísať pomocou Henryho zákona

$$C_a K = C_w, \tag{1}$$

kde C_a predstavuje koncentráciu radónu v plynnej fáze [Bg/m^3 vzduchu v póroch], C_w je koncentrácia radónu vo vode [Bg/m^3 vody] a K je rozmerový rozdeľovací koeficient v závislosti od teploty.

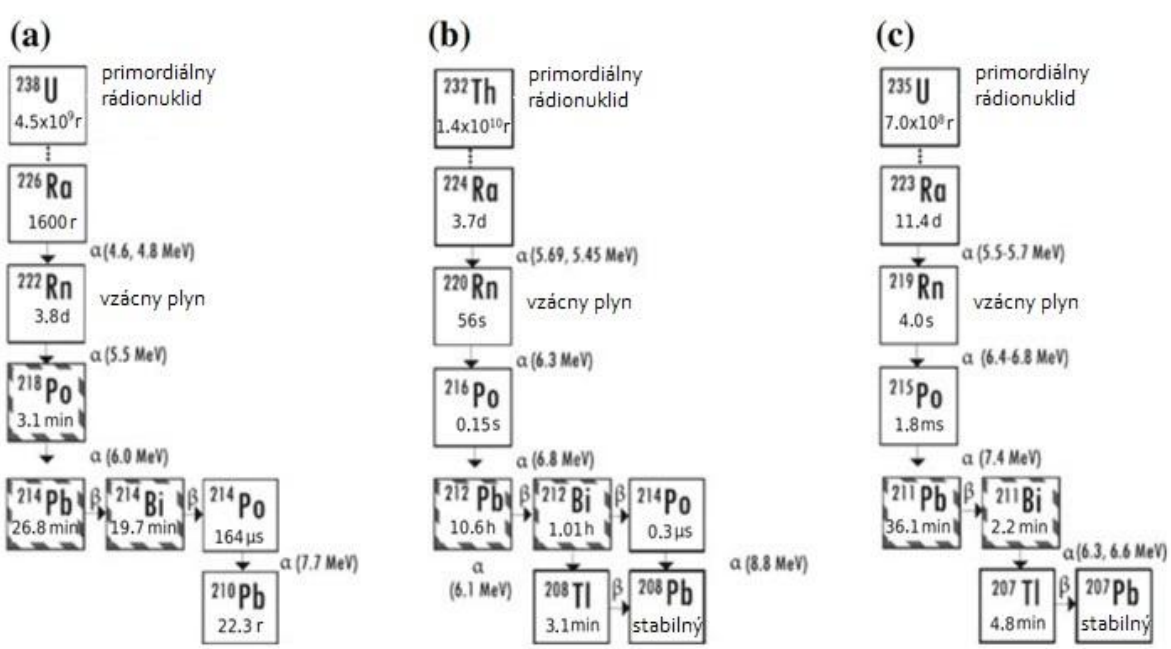
Priemerná rýchlosť radónu pri priemernej teplote atmosféry Zeme (14°C) je 165 m/s (Baskaran, 2016).

1.3 Produkty premeny radónu

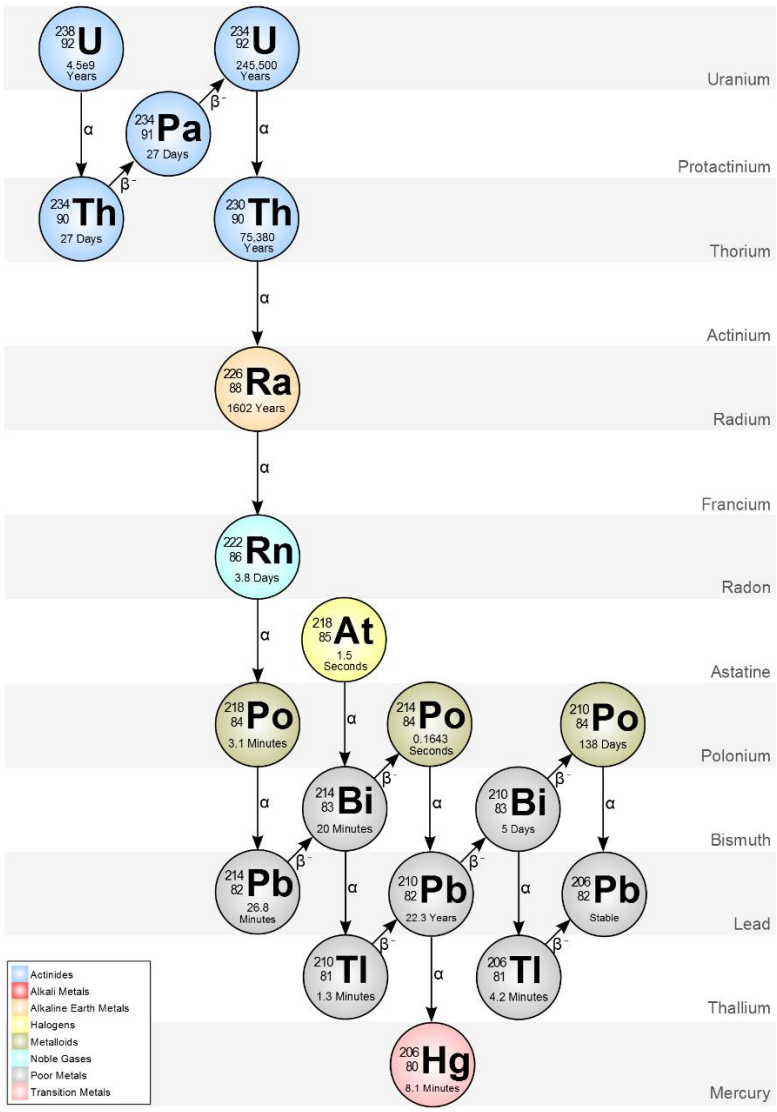
Koncentrácia konkrétneho izotopu v prostredí závisí jednak od veľkosti produkcie materského jadra, jednak od rýchlosti jeho premeny (Baskaran, 2016). Ich vývoj v rámci série rozpadov je opísaný pomocou Batemanových rovníc.

V dôsledku rádioaktívnej premeny uránu a tória sú v prírode nepretržite vytvárané tri izotopy radónu: ^{219}Rn (aktinón), ^{220}Rn (torón) a ^{222}Rn pochádzajúce z rôznych premenových radov. Izotopy ^{220}Rn a ^{222}Rn sú tvorené približne v rovnakom množstve, avšak s výrazným rozdielom v stabilite. Aktinón ^{219}Rn, ktorý je súčasťou aktíniového premenového radu má dobu polpremeny 4 s, torón ^{220}Rn, ktorý je súčasťou tóriového premenového radu má dobu polpremeny 55 s, zatiaľ čo radón ^{222}Rn, ktorý sa priamo premenia z ^{226}Ra a ktorý je súčasťou uránového premenového radu (pozri obr. 1; obr. 2), je najstabilnejším radónovým izotopom s dobou polpremeny až 3,82 dňa.

Súhrnná stredná životnosť dcérskych produktov ^{222}Rn (^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po) je 71,57 min, zatiaľ čo zodpovedajúca stredná životnosť ^{220}Rn (^{216}Po, ^{212}Pb, ^{212}Bi, ^{212}Po) a ^{219}Rn (^{215}Po, ^{211}Pb, ^{211}Bi, ^{207}Tl) sú 16,81 h a 1,03 h (Baskaran, 2016).



Obr. 1: *Rozpadové rady (zdroj: Baskaran, 2016)*



Obr. 2: *Schéma premenového radu uránu (zdroj: metadata.berkeley.edu, 2008)*

2 Správanie radónu v environmentálnych prostrediach

Keďže materský urán je prítomný prakticky vo všetkých horninách a pôdach, radón – ako dcérsky produkt premeny – je široko zastúpený v pôdach a vďaka ich vyplavovaniu je ho možné nájsť aj vo vode. Z pôdy uniká plynný radón do ovzdušia, v ktorom sa ďalej kvôli svojej nestabilite rozpadá, pričom jeho produkty premeny vykazujú tiež rádioaktívne vlastnosti. Vdychovaním vzduchu sa radón, ako aj rádioaktívne produkty premeny, dostávajú do dýchacích ciest a pri dlhodobom vystavení zvýšenej koncentrácii radónu môže dôjsť k vzniku rakoviny pľúc.

Základným dôvodom merania koncentrácie radónu a jeho aktivity v konkrétnom prostredí je prevencia pred poškodením zdravia z dôvodu dlhodobej expozície zvýšeným úrovniam rádioaktívneho radónu. Detekcia radónu má aj technické využitie v geologických a fyzikálnych vedách pri sledovaní javov s rýchlo sa meniacimi vlastnosťami.

Prirodzeným zdrojom radónu sú pôdy a materiály obsahujúce minerály a horniny s obsahom uránu a čiastočne tória ako aj s produktmi premeny týchto prvkov. Urán ako materský prvok radónu je zastúpený napríklad v uránových rudách, fosfátových mineráloch, granite a v menšom množstve aj v krasových horninách. V týchto materiáloch je urán pevne naviazaný, na hraniciach zŕn avšak spravidla dochádza k rozrušeniu štruktúry, čo umožňuje jeho vylúhovanie.

Rozpadajúci sa urán spôsobuje postupnú migráciu radónu do pôdy a z tej sa radón následne uvoľňuje do atmosféry a pevných stavieb vybudovaných na podloží, do ktorých môže prenikať cez trhliny, škáry, potrubia alebo tesnenia. Únik radónu z pôdy do atmosféry vo vysokej miere ovplyvňujú charakteristiky prostredia ako atmosférický tlak, teplota, vlhkosť, geologická štruktúra a vlastnosti pôdy (Swakon, 2005). Pomocou puklín vo vrstvách pôdy a hornín migruje radón ako vzácny plyn s vyššou hmotnosťou do podzemných priestorov, jaskýň a vo vyššej koncentrácii do banských priestorov. Radónom sa môžu obohatiť aj zdroje podzemnej vody, v povrchovej vode je však jeho koncentrácia zanedbateľná (Abbady, 2004).

2.1 Radón v ovzduší a voľnej prírode

Atómy radónu sa dostávajú z pôdy a hornín do atmosféry, vodných zdrojov a pevných materiálov dvoma spôsobmi, a to difúziou alebo konvekciou (Abdalla, 2020).

Obsah rádioaktívnych nuklidov v spodných vrstvách atmosféry závisí od koncentrácie ^{226}Ra a ^{232}Th v pôde, rýchlosti exhalácie z pôdy do atmosféry, distribúcie ^{222}Rn a ^{220}Rn a ich produktov premeny a od meteorologických parametrov. Koncentrácia radónu v atmosfére je ďalej významne ovplyvnená

procesmi atmosférického zrážania, ako sú napríklad advekcia a konvekcia vzdušných hmôt s rozdielnym obsahom rádia.

Medzi jednotlivé faktory, ktoré priamo určujú koncentráciu radónu v atmosfére blízko zemského povrchu, patria (UNSCEAR, 1988):

a) koncentrácia uránu a rádia v pôde a horninách;
b) emanačná kapacita pôdy;
c) pórovitosť pôdy alebo horniny;
d) barometrický gradient tlaku medzi rozhraniami;
e) pôdna vlhkosť a stupeň nasýtenia vody médiom;
f) ďalšie premenné.

Pri meraniach koncentrácie radónu v jednotlivých oblastiach je možné pozorovať jednak sezónne variácie, jednak variácie počas dňa.

Väčšina lokalít vykazuje sezónnu závislosť radónového signálu charakterizovanú vo všeobecnosti letným minimom a zimným maximom. Sezónne variácie radónu vo vonkajšej atmosfére sú pripisované zmenám rýchlosti horizontálneho transportu a vertikálneho zmiešavania. Vo všeobecnosti vykazujú pobrežné oblasti nižšie koncentrácie radónu; vnútrozemské oblasti výrazne vyššie koncentrácie (Crawford, 2013).

Rozdiely v koncentrácií radónu je možné tiež pozorovať aj v jednotlivých denných časových intervaloch. Napríklad vo vnútrozemí sa koncentrácie radónu typicky vyznačujú maximálnou hodnotou pre ranné hodiny okolo východu slnka a minimálnymi hodnotami od neskorého popoludnia.

Koncentrácia radónu vo vzdušných hmotách nad vnútrozemím v priebehu dňa však závisí aj od vzdialenosti od zemského povrchu a nadmorskej výšky. Počas noci je emisia radónu silne ovplyvnená vertikálnym gradientom, čo môže spôsobiť výrazné zvýšenie koncentrácie radónu blízko povrchu. Približne okolo popoludnia je možné pozorovať vývin tzv. konvektívnej hraničnej vrstvy atmosféry, čo môže viesť k rozdielnym hodnotám koncentrácií v jednotlivých vzdušných vrstvách až o dva rády. Nezanedbateľnú úlohu tu zohráva aj premiešavanie vzdušnej hmoty, vďaka ktorému sa vzduch s vyššou koncentráciou radónu z nižších nadmorských výšok dostáva do vyšších vrstiev. Tieto skutočnosti sú príčinou nerovnomerného rozdelenia koncentrácie radónu v ovzduší (Crawford, 2013)

Merania koncentrácie radónu v rozličných lokalitách teda môžeme charakterizovať pomocou ročnej a dennej zložky. Amplitúda dennej zložky je pre vnútrozemské oblasti väčšia ako amplitúda v pobrežných oblastiach a amplitúda ročnej zložky je pre pobrežné oblasti väčšia ako pre vnútrozemské oblasti (Crawford, 2013).

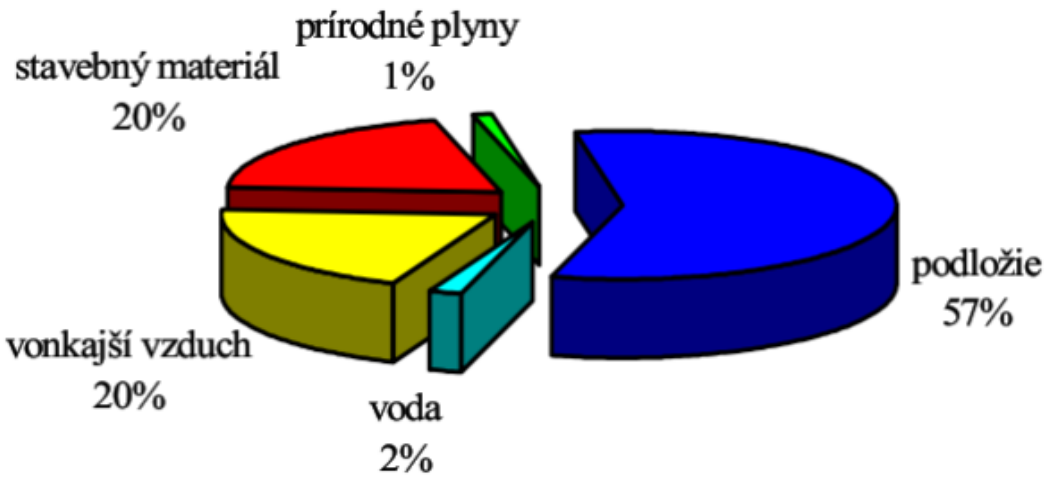
Niektoré práce sa pokúšali vysvetliť denné variácie v koncentrácii radónu krátkodobými zmenami geofyzikálnych veličín. Dokázaná bola napríklad korelácia medzi dennou periodicitou aktivity radónu a slnečným svitom (Crawford, 2013).

2.2 Radón vo vnútorných priestoroch

V súčasnosti je nemalá pozornosť venovaná hromadeniu radónu vo vnútornej atmosfére, a to hlavne kvôli vysokej radiačnej záťaži populácie z prírodných zdrojov. Je všeobecne známe, že radón v tomto smere obsadzuje prvenstvo a pokrýva až 50 % celkovej ročnej efektívnej dávky jedinca. Zdroj radónu vo veľkej miere pochádza z geologického podložia, ale z dôvodu premiešavania vzdušných hmôt vo vonkajšej atmosfére je jeho koncentrácia významná práve v uzavretých priestoroch. Percentuálne má najvyšší podiel v narastajúcej aktivite radónu pôdny zdroj alebo druh stavebného materiálu (Froňka, 2015).

2.2.1 Zdroje radónu vo vnútorných priestoroch

Radón do vnútorných priestorov preniká rôznymi cestami. Medzi najvýznamnejšie zdroje radónu v budovách patrí stavebné podložie, stavebný materiál a vonkajšie ovzdušie (obr. 3) (EPA, 2007).



Obr. 3: *Zdroje radónu v pobytových priestoroch (zdroj: UNSCEAR, 1993)*

Najväčším zdrojom radónu vo vnútornej atmosfére je geologické podložie, a teda je potrebné opísať faktory, ktoré zvyšujú mieru jeho uvoľňovania. Významný vplyv preukázal tlakový gradient

medzi vonkajšou a vnútornou atmosférou, kde kvôli vzniknutým podtlakom v nižších častiach objektu dochádza k nasávaniu pôdneho vzduchu cez netesnosti v podloží (UNSCEAR, 1993). Vysoká koncentrácia rádia v pôde, ktorá sa pohybuje od niekoľkých jednotiek (vo vápencoch a pieskovcoch) až po tisíce ppm (v kamenných materiáloch), pri vysokej priepustnosti a tesnosti podložia môže zvýšiť koncentráciu radónu nad povolenú hodnotu, čo môže viesť k neobývateľnosti priestoru.

Medzi významné faktory, zodpovedné za vysokú koncentráciu radónu vo vnútornej atmosfére, patria: 1) nedostatočná izolácia (ak nemá izolačná bariéra poruchy, ktorými by pôdny vzduch mohol byť nasávaný do domu, preniká radón len difúziou, a to väčšinou nevedie k jeho vysokým koncentráciám v dome) a 2) aktívne nasávanie pôdneho vzduchu do domu (spôsobené podtlakom v dome, vytvoreným v dôsledku rozdielu vnútorných a vonkajších teplôt (tzv. komínovým efektom v zime, vykurovanie). Ľahší teplý vzduch stúpa hore a uniká strechou alebo cez okná a dvere, pričom sa súčasne nasáva studený vonkajší vzduch. Okrem toho dochádza k aktívnemu nasávaniu pôdneho vzduchu obsahujúceho radón cez poruchy v kontaktnej ploche podložia (Müllerová, 2016).

V budove, kde je hlavným zdrojom radónu podložie, očakávame vyššiu objemovú aktivitu radónu (OAR) v noci ako počas dňa a tiež v zimných mesiacoch vyššiu ako v lete. Najvyšší nárast objemovej aktivity radónu je v skorých ranných hodinách, kedy je teplotný rozdiel medzi ovzduším v pôde a v budove najväčší. Odchýlka medzi dňom a nocou sa môže od priemeru líšiť o viac ako dvojnásobok, sezónne variácie môžu byť ešte vyššie. Domy s cementovou, mramorovou a dláždenou podlahou sa vyznačujú tiež vysokým obsahom rádia, avšak vďaka ich nepriepustnosti pôdneho vzduchu je množstvo naakumulovaného radónu podstatne nižšie (Kumar, 2018).

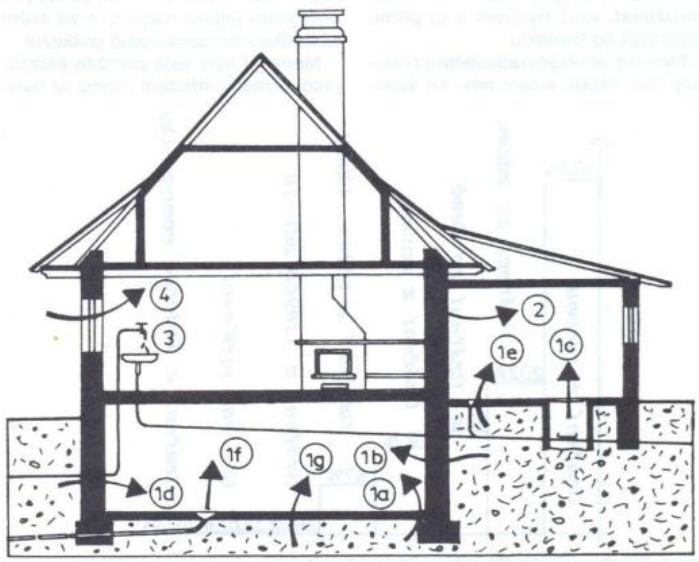
Ďalší významný zdroj radónu je stavebný materiál. Aktivita radónu zo stavebného materiálu závisí od druhu použitého materiálu, ktorý je charakterizovaný koncentráciou rádia (Baskaran, 2016). Maximálna priemerná ročná koncentrácia radónu a torónu je zvyčajne nameraná v obydliach s bahnitým typom stavebného materiálu (podlaha – blato, steny – tehly a strecha – blato). Dôvodom môžu byť taktiež vzniknuté praskliny a defekty, čo vedie k neustálej exhalácii pôdneho vzduchu do vnútorného prostredia (Kumar, 2018).

Pre jednotlivé stavebné materiály sú charakteristické vlastné hodnoty aktivity rádionuklidov a produktov ich premeny. Najčastejšie používanými stavebnými materiálmi sú betón, tehla a drevo. Koncentrácia rádionuklidov ^{226}Ra a ^{232}Th v stavebnej hmote závisí od pôvodu použitých materiálov (piesok, cement atď.).

2.2.2 Transport radónu vo vnútornej atmosfére

Objemová aktivita radónu vo vnútorných priestoroch je časovo aj priestorovo variabilná. Vo všeobecnosti sa mení v závislosti od troch procesov, a to od rýchlosti prísunu radónu, násobnosti výmeny ovzdušia a rádioaktívnej premeny radónu. Oproti štandardnej miere vetrania je premena radónu zanedbateľná, a teda v prvom priblížení je pozornosť sústredená na prvé dva javy. Ich priebeh je funkciou mnohých meteorologických parametrov, je závislý najmä od tlakového rozdielu medzi vonkajším a vnútorným prostredím, čo významne ovplyvňuje okamžitú hodnotu objemovej aktivity radónu (Baskaran, 2016). Tlakový gradient je priamo ovplyvnený teplotným gradientom, ktorý je definovaný ako rozdiel priemerných denných teplôt vo vnútri a mimo budovy. Najmenší teplotný gradient, obvykle v rozsahu niekoľkých stupňov, je v letnom období. Naopak, v zimnom období je teplotný gradient najväčší, čo je úmerné sezónnym variáciám radónu (Moravcsik, 2015).

Radón vstupuje do vnútornej atmosféry dvoma spôsobmi: 1) difúziou (transport hmoty z miest vyššej koncentrácie do miest s nižšou koncentráciou, napr. v pôdnom vzduchu, z podložia betónovou vrstvou); 2) konvekciou, prúdením (transport hmoty z miest s vyšším tlakom do miest s nižším tlakom, napr. nasávanie radónu z podložia otvorom v podlahe) (Abbady, 2004).



Obr. 4: *Hlavné zdroje radónu v pobytových priestoroch (zdroj: Moravcsik, 2015)*

Zmena OAR v miestnosti v čase *t* je daná bilanciou všetkých prísunov *R* a úbytku za časový interval *dt* (vetraním alebo rádioaktívnou premenou), so smernicou priamky vo forme ventilačnej rýchlosti a konštanty premeny radónu. Bilanciu popisuje obyčajná lineárna diferenciálna rovnica.

S počiatočnou aktivitou a zanedbaním premeny radónu dostávame vzťah, ktorým prekladáme namerané hodnoty hromadenia radónu v miestnosti.

Hlavné možnosti prísunu radónu do pobytového priestoru sú znázornené na obr. 4, kde je: 1. podložie pod objektom: 1a - trhliny medzi stenou a podlahou, 1b - trhliny v malte nachádzajúce sa v suteréne, 1c - netesnosti v poklopoch revíznych šácht, 1d - netesnosti okolo priestupov v základovej konštrukcii, 1e - inštalačné priestupy v podlahe, 1f – kanalizácia, 1g - difúzia cez praskliny v podlahe, 2. exhalácia zo stavebných materiálov, 3. voda dodávaná do objektu, 4. vonkajší vzduch (Moravcsik, 2015).

3 Dôvody merania radónu a jeho využitie

V jednotlivých environmentálnych prostrediach sa koncentrácia radónu môže líšiť o niekoľko rádov. Typická koncentrácia v obvyklom pevninskom vonkajšom prostredí je v rozmedzí 1 až 20 $Bq.m^{-3}$, v ovzduší nad oceánmi je rádovo 0,1 $Bq.m^{-3}$ (Abbady, 2004).

Omnoho vyššie môžu byť koncentrácie radónu v uzavretých priestoroch, najmä v priestoroch s obmedzenými možnosťami vetrania. Vo vnútri stavieb, v závislosti od stavebného materiálu, môžu koncentrácie radónu dosahovať desiatky až tisíce $Bq.m^{-3}$, ešte vyššie hodnoty je možné namerať v podzemných priestoroch (napr. jaskyne) a v banskom prostredí.

Nebezpečenstvo dlhodobého vystavenia sa účinkom radónu je teda veľké najmä v podzemných uzavretých a nevetraných priestoroch, takže dlhodobá práca v tomto prostredí zvyšuje radiačné riziko pre človeka. Radiačnú záťaž pre človeka však môže predstavovať aj dlhodobé vystavenie sa vysokej koncentrácii radónu v ovzduší obytných priestorov (El-Taher, 2018).

Naopak, radón uniknutý do vonkajšieho ovzdušia vo väčšine prípadov nepredstavuje zdravotný problém, keďže sa v ňom obvykle nachádza v malých koncentráciách nespôsobujúcich pre človeka vysokú radiačnú záťaž.

Na základe uvedených dôvodov je hlavným dôvodom určovania priemernej aktivity radónu v pracovnom alebo životnom prostredí zisťovanie, či efektívna dávka od radónu, ktorú obyvateľ alebo pracovník v tomto prostredí získa, neprekračuje limity, ktoré sú stanovené platnou legislatívou.

Okrem medicínskych dôvodov pre detekciu radónu možno využiť spôsoby a výsledky merania radónu aj vo vedeckých aplikáciách. Detekcia koncentrácie radónu v ovzduší umožňuje napríklad použiť poznatky o meniacej sa vzdušnej koncentrácii radónu (radónové stopovanie) na skúmanie niektorých meteorologických javov, detekcia pôdnej koncentrácie radónu je využiteľná pri pozorovaní niektorých geologických, hydrologických alebo fyzikálnych eventov.

3.1 Zdravotné dôvody merania radónu

Radón je najdôležitejším prírodným zdrojom žiarenia. Odhaduje sa, že radón a jeho dcérske produkty s krátkou dobou polpremeny prispievajú troma štvrtinami k ročnej efektívnej dávke prijatej človekom z prírodných zdrojov a sú zodpovedné za polovicu celkovej dávky. Radón do istej miery exhaluje zo všetkých druhov pôd a jeho koncentrácia v atmosfére závisí od zastúpenia uránu a rádia (Abbady, 2004).

Vo všeobecnosti radón sám o sebe významnú hrozbu nepredstavuje. Až 99 % z vdýchnutého radónu opúšťa naše pľúca s nasledujúcim výdychom. Problematickejšie sú zdravotne škodlivejšie produkty jeho premeny, ktoré sa môžu usádzať po celej dráhe dýchacích ciest a môžu tak viesť pri dlhšej expozícii k radikálnym zdravotným ťažkostiam. Preto je dôležité sledovať koncentráciu izotopu ^{222}Rn (a iných rádioaktívnych plynov) v ovzduší a v materiáloch obklopujúcich človeka v obydliach a v pracovnom prostredí a v prípade prekročenia prípustných limitov zamedziť dlhodobej expozícii nad hranicou bezpečnou pre ľudské zdravie (Bem, 2017).

Riziko rakoviny pľúc súvisí s dlhodobou vdychovanou dávkou, preto je dôležité, aby sa hladina radónu v domácnostiach a na pracoviskách čo najviac približovala dlhodobým bezpečným hodnotám. Udržiavanie bezpečnej hladiny však komplikuje skutočnosť, že koncentrácia ^{222}Rn sa v jednotlivých dňoch môže líšiť. V niektorých prípadoch, závislých od meteorologických vplyvov, môžu vzniknúť extrémne vysoké odchýlky (Miles, 2001).

3.2 Vedecké dôvody merania radónu

Kombinácia plynného skupenstva a rádioaktívnej premeny vytvára z radónu jedinečnú stopovaciu zložku na sledovanie prírodných procesov, pri ktorých môže dochádzať k výrazným parametrickým zmenám v krátkych časových obdobiach.

V meteorológii sa táto vlastnosť radónu čiastočne využíva pri trasovaní vzdušných hmôt. Podobne v hydrológii sa stopovanie radónu využíva pri skúmaní interakcie medzi povrchovou vodou, ktorá je obvykle málo nasýtená radónom a podzemnou vodou. Významné zvýšenie koncentrácie radónu v povrchovej vode indikuje prienik podzemnej vody.

V geológii sa meranie pôdnej koncentrácie radónu využíva pri hľadaní podpovrchových geologických zlomov a puklín, keďže koncentrácia radónu v oblasti geologických porúch je vo všeobecnosti vyššia.

Na základe meraní krátkodobých zmien v koncentrácii sa tiež skúmala možná závislosť medzi zmenou koncentrácie radónu a blížiacimi sa zemskými otrasmi. Predpokladalo sa, že nárast koncentrácie radónu by mohol súvisieť so vznikom nových podzemných trhlín, cez ktoré preniká na povrch radónom nasýtená podzemná voda. Experimentálne štúdie našli určitú súvislosť zvýšenej aktivity radónu s možnosťou vzniku zemetrasenia, ale keďže koncentrácia radónu sa môže meniť vplyvom viacerých geofyzikálnych faktorov, hypotéza sa s istotou nepotvrdila.

Vo všeobecnosti môžeme do budúcna vidieť potenciál výskumu geofyzikálnych aspektov ovplyvňujúcich aktivitu radónu na identifikáciu rôznych zmien geofyzikálnych javov (Steinitz, 2014).

Určenie koncentrácie radónu ako príspevku pozadia má široké využitie pri meraniach v podzemných laboratóriách. Čím sa nachádzame nižšie pod zemským povrchom, tým sa aktivita radónu zvyšuje a môže exhalovať do detektora (Wojcik, 1994). Pozorovanie vzácnych eventov môže byť tak vyhodnotené s vysokou neistotou, a preto je potrebné potlačiť úroveň pozadia od radónu na minimum (Müllerová, 2009).

Pretože radón aj antropogénne aerosóly sú prevažne suchozemského pôvodu, môže byť koncentrácia radónu dobrou mierkou pre antropogénne aerosólové zaťaženie. Zatiaľ čo radón je emitovaný zo všetkých pozemských povrchov, aerosóly sú výsledkom sekundárnych zdrojov, ako sú motorové vozidlá, spaľovanie palivového dreva, priemyselné emisie a elektrárne na pevnine. Pritom sa vychádza z predpokladu, že doba polpremeny radónu je porovnateľná s dobou pobytu primárnych aerosólov v atmosfére (Semkow, 1994).

3.3 Spôsoby merania radónu

Na detekciu radónu sa používajú technické zariadenia, ktoré súhrnne označujeme ako detektory radónu. V praxi sa používa veľké množstvo rozličných detektorov využívajúcich pre svoju činnosť rôzne fyzikálne princípy. Výber príslušného typu detektora závisí od toho, aké konkrétne charakteristiky nás zaujímajú pri meraní objemovej aktivity radónu v pracovnom alebo životnom prostredí. V mnohých prípadoch je potrebné poznať priemerné hodnoty expozícii radónu a produktov premeny z diskrétnych meraní za dlhé obdobie. Pre diagnostické účely je naopak vhodnejšie kontinuálne meranie koncentrácií radónu.

Na meranie radónu v ovzduší, pôde a vo vode v súčasnosti existuje široká škála spôsobov merania a detekčných zariadení. Vo všeobecnosti možno detektory radónu charakterizovať z hľadiska doby merania ako vhodné na krátkodobé a dlhodobé merania a z hľadiska odfiltrovania príspevku produktov premeny radónu ako pasívne a aktívne. Pri výbere konkrétnej techniky merania je potrebné popri prevádzkových nákladoch zvažovať tiež uskutočniteľnosť merania ako aj presnosť a použiteľnosť príslušnej metódy (El-Taher, 2018).

Detekčné zariadenia na krátkodobé merania radónu, ako napríklad adsorpčné detektory s aktívnym uhlím alebo ionizačné komory, slúžia na poskytnutie rýchlej predstavy o strednej hodnote koncentrácie radónu v skúmanom priestore. Pri tomto type meraní môže dôjsť k skresleniu výsledných hodnôt z dôvodu denných ako aj sezónnych variácií v koncentrácii radónu. Pri meraní ovzdušia v obydliach môžu napríklad výsledky namerané v období so zníženým vetraním (napr. v zime) nadhodnotiť priemerné dlhodobé hodnoty a naopak, výsledky získané v období zvýšeného vetrania

môžu podstatne podhodnotiť strednú ročnú hodnotu koncentrácie radónu. V prípadoch, keď potrebujeme zistiť strednú hodnotu koncentrácie za dlhšie obdobie, je potrebné použiť zariadenia s detektormi na dlhodobé meranie (WHO, 2009).

Možnosť získania údajov taktiež závisí od druhu odberov vzorky (bodové odbery, integrálne merania, kontinuálne merania). Pri bodových odberoch je meranie vykonané v krátkom časovom úseku (do 60 minút) a je vyhodnotené takmer okamžite po odobratí. Priemerná hodnota aktivity radónu za dlhšie časové obdobie sa najpresnejšie určuje pomocou integrálnej metódy, kde odoberáme údaje počas dlhého časového intervalu (dni až mesiace). Kontinuálny druh merania ukazuje aktuálnu informáciu aktivity radónu bez nutnosti zastavenia merania (Bem, 2017).

Pri meraniach radónu s použitím pasívnych detektorov nedochádza k prvotnému odfiltrovaniu produktov premeny radónu, k ich činnosti nie je potrebná dodatočná elektrická energia, ani čerpadlo (El-Taher, 2018). Obvykle sa používajú na dlhodobejšie merania. Medzi pasívne detektory patria napríklad stopové detektory alfa častíc alebo detektory typu PicoRad využívajúce pasívnu adsorpciu radónu na aktívnom uhlí (Chau, 2008).

Činnosť aktívnych detektorov je založená na princípe dodania elektrickej energie počas merania (Chau, 2008). Túto energiu potrebuje elektronické príslušenstvo a zariadenie na nepretržité meranie vzorky (El-Taher, 2018). Väčšina aktívnych detektorov využíva zber plynu v scintilačnej alebo ionizačnej komore, prípadne sa plyn nasáva cez vzorkovač s dvoma filtrami. Produkty premeny sa následne zbierajú z filtrov, z ktorých sa dá pomerne presne určiť ich početnosť v zvolenom časovom intervale.

Prehľad základných typov zariadení na meranie radónu s ich základnými charakteristikami je uvedený v tabuľke 1.

Tab. 1: Základné typy detektorov radónu a ich charakteristiky

Typ detektora	Zariadenie pasívne/aktívne	Typická neistota merania	Typická dĺžka obdobia zberu vzoriek	Prevádzkové náklady
Stopové detektory alfa častíc	pasívne	10 – 25 %	1 – 12 mes.	nízke
Adsorpčné detektory s aktívnym uhlím	pasívne	10 – 30 %	2 – 7 dní	nízke
Ionizačné komory	pasívne	8 – 15 %	5 dní – 1 rok	stredné

Elektronické integračné zariadenia	aktívne	± 25 %	2 dni – rok(y)	stredné
Kontinuálne radónové monitory	aktívne	± 10 %	1 hod. – rok(y)	vysoké

Poznámka: Typická neistota merania je udaná pri optimálnej dĺžke expozície na úrovni približne 200 $Bq.m^{-3}$ *(zdroj: World Health Organization, 2009)*

4 Modely objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére

Pomocou odhadovaných zdrojov prísunu radónu je v súčasnosti snaha o vytvorenie dôveryhodného modelu radónovej koncentrácie vo vnútorných priestoroch. Cieľom je čo najpresnejšie predpovedať správanie radónu v konkrétnom prostredí s danými počiatočnými podmienkami a určiť sezónne variácie v jednotlivých časových obdobiach.

Súčasné modely sa odvíjajú od prvých pokusov o predpovedanie zmien koncentrácií radónu v pobytových priestoroch. Medzi najvýznamnejšie príspevky patrí model od Arvela (1989), ktorý opisuje model koncentrácie radónu vo vnútorných priestoroch na základe sezónnych variácií.

Ďalšie matematické modelovanie koncentrácie radónu v interiéri vypracovali Capra et al. (1994) a Man a Yeung (1999), ktorí vo výpočtoch zahrnuli príspevok zo stavebných materiálov, Nero a Nazaroff (1984) podrobne opísali mechanizmus transportu radónu. Iné radónové modely, ktoré sú stále využívané pri súčasných meraniach, pochádzajú od Al-Ahmadyho (1996), Akbariho, (2013), Hauriho (2012) alebo od Jella et al. (2012).

4.1 Model opísaný organizáciou UNSCEAR

Jeden z prvých modelov, ktoré opisujú mechanizmus vstupu a úniku radónu v uzavretých priestoroch, bol opísaný Organizáciou pre účinky atómového žiarenia UNSCEAR v roku 1982. Zmeny obsahu radónu v čase vo vnútornom prostredí vyjadruje jednoduchý vzťah, ktorý v sebe zahŕňa základné procesy pohybu ^{222}Rn z vonkajšieho ovzdušia do uzavretého priestoru, resp. z vnútorných priestorov do vonkajšej atmosféry (UNSCEAR, 1982).

$$\frac{dA_{Rn}(t)}{dt} = e\frac{S}{V} + \frac{A_{RnP}}{V} + A_{RnV}\lambda_V - A_{Rn}(\lambda_V + \lambda_{Rn}) \tag{2}$$

Vo vzťahu (2) e predstavuje plošnú exhalačnú rýchlosť zo stien [m²/s], S je plocha stien miestnosti [m²], V je objem miestnosti [m³], A_{RnP} je OAR pochádzajúca z iných zdrojov [Bq/m³], A_{RnV} je OAR vonkajšej atmosféry [Bq/m³], λ_V je ventilačná rýchlosť [m/s] a λ_{Rn} je rozpadová konštanta radónu [1/s] (UNSCEAR, 1988). Rovnicu (2) je možné prepísať do zjednodušeného tvaru, kde je vstup radónu do domu zahrnutý v rámci jednej veličiny. Exhalačná rýchlosť hovorí o rýchlosti prísunu radónu z vonkajšieho ovzdušia, exhalácie z pôdy a zo stien (Müllerová, 2006).

Rovnicu OAR v čase t môžeme potom napísať ako

$$\frac{dA_{Rn}(t)}{dt} = \frac{R}{V} - A_{Rn}(t)(\lambda_V + \lambda_{Rn}), \tag{3}$$

kde $A_{Rn}(t)$ je objemová aktivita radónu v čase t $[Bq]$, R je exhalačná rýchlosť $\left[\frac{Bq}{s}\right]$, V je objem miestnosti $[m^3]$, λ_V je ventilačná rýchlosť $\left[\frac{Bq}{s}\right]$ a λ_{Rn} je rozpadová konštanta radónu $\left[\frac{1}{s}\right]$. V stacionárnom prípade ($\frac{dA_{Rn}(t)}{dt} = 0$) a za predpokladu, že $\lambda_V \gg \lambda_{Rn}$, sa bude priemerná koncentrácia radónu vo vnútornom priestore rovnať

$$A_{Rn}(t) = \frac{R}{\lambda_V V}. \tag{4}$$

Medzi hlavné faktory, ovplyvňujúce koncentráciu radónu v interiéri, patrí: a) ventilačný systém, ktorý má dopad na tlakový rozdiel medzi vonkajšou a vnútornou atmosférou, čo môže viesť k výraznému zvýšeniu komínového efektu; b) konštrukcia domu, od ktorej závisí exhalácia ovzdušia z pôdy do vnútra domu; c) faktory zahŕňajúce meteorologické zmeny (teplota, barometrický tlak, rýchlosť vetra); d) činnosti človeka v dome (ventilácia, zatepľovanie, protiradónové bariéry) (Müllerová, 2009).

4.2 Arvelov model

Arvelov model sa sústreďuje na závislosť koncentrácie radónu od sily zdroja, výmeny vzdušných más a meteorologických parametrov. Zdroj je charakterizovaný buď ako difúzny zdroj, kde radón vychádza zo stavebného materiálu a pôdy, alebo ako konvekčný zdroj radónu z pórov, poháňaný komínovým efektom. Zatiaľ čo v dome s difúznym zdrojom sa koncentrácia radónu pri zvyšovaní ventilačnej rýchlosti znižuje v dôsledku teplotných rozdielov, konvekčný zdroj radónu spôsobuje zvyšovanie jeho koncentrácie. Tento efekt je dôsledkom toho, že vplyv difúzneho zdroja sa s klesajúcou výmenou vzduchu znižuje, čo ďalej vplýva na koncentráciu ^{222}Rn (Arvela, 1989). Pomer zimnej a letnej koncentrácie závisí od príspevku dvoch vyššie uvedených typov zdrojov. V domoch s väčším vplyvom difúzneho zdroja nastáva denné maximum popoludní a v domoch s tlakovo-diferenčným zdrojom radónu je maximum v skorých ranných hodinách.

Na základe týchto úvah bolo Arvelovým cieľom vytvoriť model, ktorý dával do súvislosti koncentráciu radónu so silou zdroja, jeho variáciami, rýchlosťou výmeny vzduchu a meteorologickými faktormi (Arvela, 1989).

V roku 2015 Arvela pokračuje vo výskume o správaní radónu vo vnútornej atmosfére, tentokrát berie do úvahy vplyv vlhkosti pôdy, resp. množstvo spadnutých zrážok. Model odhaduje koncentráciu radónu vo vnútornej atmosfére pomocou nasledujúceho vzťahu, pričom sa predpokladá konštantná hodnota koncentrácie pôdneho radónu:

$$A_{Rn} = (S_{soil}\Delta\mathrm{T} + S_d)(\lambda + \lambda_v)^{-1}V^{-1} + A_{out} \quad (5)$$

A_{Rn} predstavuje koncentráciu radónu v unikajúcom vzduchu, ΔT je teplotný rozdiel medzi vnútorným a vonkajším prostredím, λ je rozpadová konštanta radónu. Rýchlosť prísunu radónu sa opätovne skladá z dvoch komponentov: S_{soil}, ktorého zdrojom je konvekcia medzi ovzduším v dome a pôdnym vzduchom a S_d, ktorý hovorí o rýchlosti radónu pochádzajúceho z procesu difúzie. Veličina λ_v predstavuje rýchlosť výmeny vzduchu medzi vonkajším a vnútorným ovzduším, A_{out} je koncentrácia radónu vo vonkajšom ovzduší a V je objem miestnosti (Arvela, 2015).

Celková infiltrácia radónu do interiéru sa dá vyjadriť ako

$$Q = ELA((f_{sr}\Delta T^{0,72})^2 + (f_{wr}v)^2)^{1/2}, \quad (6)$$

kde ELA je efektívna úniková plocha, f_{sr} je parameter komínového efektu, f_{wr} je parameter vetra a v predstavuje rýchlosť vetra. Efektívna úniková plocha charakterizuje priepustnosť stavebného materiálu budovy.

Pôdny radón sa do obytných priestorov dostáva hlavne cez nedostatočné tesnenie v základoch podložia, pričom jeho množstvo je ovplyvnené druhom pôdy pod podložím a jej zložením. Pôda pod budovou nie je priamo ovplyvnená množstvom zrážok, avšak horizontálny pohyb vody v pôde môže zvýšiť vlhkosť pôdy pod podložím.

Vo všeobecnosti sa s narastajúcim množstvom vody zvyšuje koncentrácia radónu v hĺbke stavebných základov domu. Vlhkosť pôdy ďalej vplýva vo veľkej miere na segmentovanie pôdneho radónu medzi plynnú a kvapalnú fázu pôdnych pórov a na znižovanie pôdnej difuzivity. Redukciu vykazuje taktiež permeabilita pôdy, pričom jej distribúcia závisí zväčša od pozorovanej hĺbky.

Štúdia napokon prichádza so záverom, že vyšetrovanie vlhkej pôdy sa ukazuje byť komplexnejšie v porovnaní so suchou pôdou. Výskum ďalej poukazuje na fakt, že vplyv pôdnych vlastností a jej sezónnych variácií môže ovplyvňovať variabilitu OAR v rovnakej miere ako teplota vonkajšieho prostredia.

3.3 Jellov model

Objemovej aktivite radónu v uzavretých priestoroch sa tiež venuje Jellov model, v ktorom sú obsiahnuté rozličné parametre ako koncentrácia radónu v podloží stavby a vonkajšej atmosfére, difúzia cez radónové bariéry, permeabilita podložia, tlakové diferencie medzi vonkajšou a vnútornou atmosférou, rôzne ventilačné rýchlosti (Jelle, 2010).

$$C_i = C_0 + P_{i-0}(C_0 - C_i)\frac{S_0}{V}\frac{1}{\lambda_v} + k_e(C_m - C_i)\frac{S_i}{V}\frac{1}{\lambda_v} + P_{s-i}(C_s - C_i)\frac{S_s}{V}\frac{1}{\lambda_v} + \\ + P_g \Delta p(C_s - C_i)\frac{S_s}{V}\frac{1}{\lambda_v}, \quad (7)$$

C_i v rámci Jellovho modelu vo vzťahu (7) vyjadruje OAR v pobytových priestoroch [Bq/m³], C_0 je OAR vo vonkajšom vzduchu [Bq/m³], C_m je OAR v konštrukčných materiáloch [Bq/m³], C_s je OAR v podloží [Bq/m³], P_{i-0} je radónová difúzna priepustnosť medzi vnútorným a vonkajším vzduchom [m/s], P_{s-i} je radónová difúzna priepustnosť cez podlahovú konštrukciu [m/s], P_g je permeancia podložia [m³/m²hPa], k_e je exhalačný koeficient stavebných materiálov [m/s], Δp je tlaková diferencia medzi vonkajším a vnútorným prostredím [Pa], V je objem miestnosti [m³], S_0 je plocha vonkajších stien v miestnosti [m²], S_i je plocha vnútorných stien, ktoré obsahujú stavebný materiál [m²], S_s je plocha podlahy budovy [m²] a λ_v je ventilačná rýchlosť [1/h] (Jelle, 2010).

Exhalačná rýchlosť E_s je vyjadrená na základe vzťahu:

$$E_S = \lambda_{Rn}.A_{m,Ra}.\rho.k_e.L.\tanh\left(\frac{d}{2L}\right), \quad (8)$$

kde λ_{Rn} je rozpadová konštanta radónu [1/s], $A_{m,Ra}$ je hmotnostná aktivita rádia v materiáli [Bq/kg], ρ je hustota materiálu [kg/m³], k_e je emanačný koeficient, L je difúzna dĺžka radónu [m] a d je hrúbka materiálu [m] (Jelle, 2010).

Motiváciou na vytvorenie daného modelu bolo hlavne zvyšovanie energetických požiadaviek pobytových priestorov, pri ktorých je potrebné dbať na dôkladnejšie utesnenie súčasných stavieb. V porovnaní s objemovou aktivitou radónu v budovách postavených pred rokom 1980 sa v novostavbách namerala zvýšená koncentrácia až o 70 – 75 % (Jelle, 2010), čo okrem príspevku tepelnej izolácie je možné vysvetliť ako dôsledok presnejších meraní pri použití novodobých detekčných systémov ionizujúceho žiarenia. Rozdiely môže taktiež zapríčiniť znížená ventilácia v priestore alebo častejšie využívanie priepustného pórobetónu ako stavebného materiálu (Jelle, 2010).

Vplyv geologického podložia sa mení v závislosti od priepustnosti použitého materiálu a vzduchotesnosti základovej konštrukcie. Radón sa môže jednoducho infiltrovať do domu cez malé trhliny v podlahových základoch stavby a hromadiť sa tak v uzavretom priestore (Jelle, 2012).

Jellov model vo všeobecnosti opisuje koncentráciu radónu z hľadiska niekoľkých faktorov, ktorými sú:

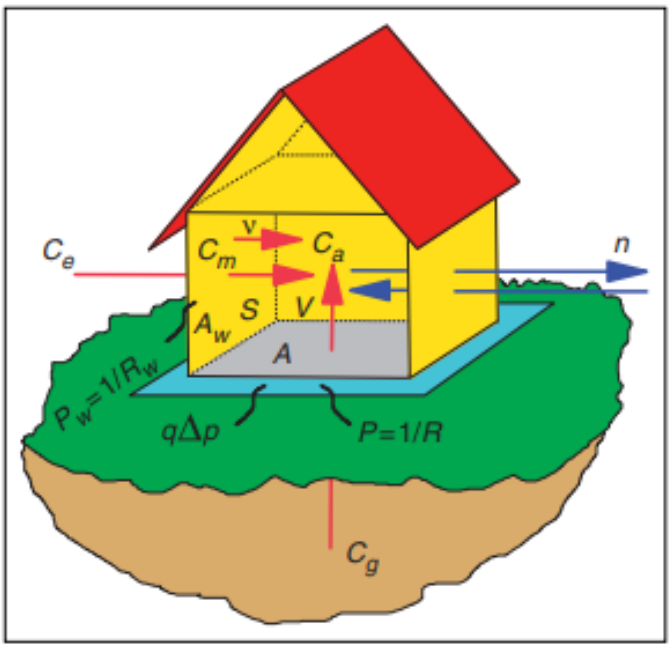
- koncentrácia radónu vo vonkajšom vzduchu [Bq/m^3],
- koncentrácia radónu v stavebných materiáloch [Bq/m^3],
- koncentrácia radónu v zemi [Bq/m^3],

- koeficient exhalácie radónu [m/s],
- difúzny odpor radónu [s/m], resp. priepustnosť [m/s] medzi vnútorným a vonkajším vzduchom,
- difúzny odpor radónu [s/m], resp. priepustnosť [m/s] radónovej bariéry pod prízemím budovy,
- vzduchová priepustnosť zeme [$m^3/(m^2hPa)$],
- rozdiel tlaku vzduchu medzi vonkajšou zemou a vnútorným priestorom na úrovni zeme [Pa],
- plocha budovy (miestnosti) smerom k vonkajšiemu vzduchu [m^2],
- pomer objemu budovy (miestnosti) a vnútornej plochy budovy (miestnosti) stavebných materiálov s obsahom radónu [m^3/m^2],
- pomer objemu budovy (miestnosti) k ploche budovy (miestnosti) k zemi [m^3/m^2],
- počet výmen vzduchu za hodinu v dôsledku vetrania, ktoré zahŕňa aj infiltráciu a odstraňovanie [výmena vzduchu/h],
- vetranie budovy.

Zjednodušene sa aktivita radónu v interiéri predpovedá cez súhrn štyroch hlavných príspevkov: a) vetranie a únik radónu z vonkajšieho vzduchu, b) exhalácia zo stavebných materiálov, c) difúzia pôdneho vzduchu z podložia a d) únik pôdneho vzduchu z podložia.

Schéma Jellovho modelu je zobrazená na obr. 5. Pod veličinou P, resp. R sa rozumie celková priepustnosť difúzie radónu, resp. celkový odpor difúzie radónu, ktorá okrem odolnosti radónovej bariéry predstavuje odpor v stavebnom materiáli pod budovou. Veličina q (priemerná priepustnosť pôdneho vzduchu) v sebe zahŕňa taktiež unikajúci vzduch z materiálu alebo z protiradónovej bariéry podložia domu. Výraz $q\Delta p$ potom hovorí o úniku pôdneho plynu do domu cez podlahu s plochou A pri tlakovom rozdiele Δp (Jelle, 2010).

Vetranie budovy nie je explicitne vyjadrené v modeli, avšak v rovnici (7) je možné jeho vplyv zahrnúť ako efektívnu koncentráciu radónu. Únik ovzdušia medzi vnútorným a vonkajším prostredím je v rámci modelu uvedený v celkovom počte výmen vzduchu za hodinu n. Emisia alebo rýchlosť exhalácie radónu z povrchového materiálu budovy je na obr. 5 označená ako veličina C_a. V rámci prvého priblíženia sa považuje koncentrácia radónu vo vonkajšom vzduchu C_e a koncentrácia radónu v stavebných materiáloch C_m za zanedbateľnú (Jelle, 2012).



Obr. 5: *Zjednodušený model radónovej penetrácie a ventilácie v budove (zdroj: Jelle, 2010)*

5 Modely objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére s využitím sezónnych korekčných faktorov

Na základe pozorovania sezónnych variácií objemovej aktivity radónu je v súčasnosti vytvorených niekoľko modelov, ktoré sa zameriavajú na opis koncentrácie radónu počas jednotlivých ročných období pomocou sezónnych korekčných faktorov. Metóda nachádza široké využitie práve pri krátkodobých meraniach, kde prostredníctvom korekcie je možné zistiť priemernú ročnú objemovú aktivitu radónu. Korekčné faktory umožňujú presnejšie určiť nameranú hodnotu koncentrácie radónu v budovách a tak ohodnotiť potenciálne radónové riziko (Müllerová, 2021).

Vzťah na výpočet sezónnych korekčných faktorov (SCF) pre Slovensko založený na práci M. Müllerovej et al. je vyjadrený ako

$$SCF_i = \frac{AM_a}{AM_i}, \tag{9}$$

kde AM_a je priemerná hodnota koncentrácie radónu za rok [Bq/m³] a AM_i je priemerná hodnota koncentrácie radónu za 3-mesačné obdobie, kde *i* označuje číslo mesiaca, v ktorom meranie začalo [Bq/m³].

Na základe vzťahu (9) boli tak nájdené priemerné hodnoty sezónnych korekčných faktorov, uvedené v tab. 2.

Tab. 2: Sezónne korekčné faktory s rozdelením podľa kontaktu s podložím

	k_3	k_6	k_9	k_{12}
Všetky dáta	1.15 ± 0.25	1.48 ± 0.31	0.86 ± 0.18	0.78 ± 0.17
V kontakte s podložím	1.11 ± 0.24	1.51 ± 0.32	0.84 ± 0.18	0.80 ± 0.17
Bez kontaktu s podložím	1.28 ± 0.27	1.38 ± 0.29	0.92 ± 0.20	0.71 ± 0.15

(zdroj: Müllerová, 2021)

Vo všeobecnosti dosahuje OAR maximum počas zimných mesiacov a najnižšie hodnoty cez letné obdobie. Sezónne variácie sa avšak môžu líšiť v rámci jednotlivých oblastí, hlavne kvôli rozdielom vo využívaní priestoru alebo kvôli meteorologickým a geologickým faktorom. Na základe uvedených

skutočností vypracovali rôzne vedecké skupiny modely sezónnych korekčných faktorov, ktoré boli ďalej aplikované v teréne.

5.1 Krewskiho model

Pri monitorovaní radónu sa kladie veľký dôraz na jeho sezónne variácie počas roka. Krewski rozlišuje medzi priemernou aktivitou radónu v rozdielnych časových intervaloch a pomocou korekčných faktorov sa snaží odhadnúť, ako sa radón správa vo vnútorných priestoroch počas celého roka.

Jeho cieľom je zabezpečiť presnosť rozličných meraní, ktoré trvajú menej ako 12 mesiacov a kde je potrebné urobiť dodatočnú korekciu, ktorá zahŕňa sezónne faktory. Na základe dvoch modelov, sezónneho a multiplikačného, určuje Krewski sezónne korekčné koeficienty a ich spoľahlivosť testuje porovnaním teoretických a experimentálnych dát.

Sezónny model, pôvodne navrhnutý Pinelom a kol. (1995), opisuje koncentráciu radónu v domácnostiach pomocou korekčných faktorov pre každý mesiac počas jedného roka s následnou integráciou 6-mesačného obdobia. Meranie počas prvého polroka slúžilo na vypracovanie modelu a jeho spoľahlivosť je ohodnotená na základe nameraných údajov z druhého 6-mesačného intervalu (Krewski, 2005).

Okrem sezónneho modelu sa Krewski venuje jednoduchšiemu opisu správania radónu v uzavretých priestoroch prostredníctvom multiplikačného modelu. Jeho predpoveď priemernej koncentrácie radónu spočíva v zbere údajov počas jedného roka, v ktorom je priemerná ročná úroveň OAR ekvivalentná 6-mesačnému meraniu. Obidva modely sú matematicky priblížené a porovnané v nasledujúcej časti.

Sezónny model

Nech M_i označuje priemernú koncentráciu radónu v pobytovom priestore i za určité časové obdobie $(t_i^{(1)}, t_i^{(2)})$, merané v jednotkách [Bq/m³]. Ak zavedieme funkciu $f_i(t) > 0$ priestore i a v čase t, bude pre M_i platiť vzťah

$$M_i = \frac{1}{t_i^{(2)} - t_i^{(1)}} \left(\int_{t_i^{(1)}}^{t_i^{(2)}} f_i(t) dt \right). \tag{10}$$

V jednoduchom modeli sezónnych variácií môžeme funkciu $f_i(t)$ prepísať do tvaru $f_i(t) = s(t)h_i$, kde $s(t)$ je periodická funkcia s časovým intervalom 12 mesiacov a hladinou koncentrácie

radónu v čase t a h_i predstavuje multiplikačný faktor, ktorý hovorí o rozdiele medzi typickým vnútorným priestorom a priestorom i.

Potom môžeme vo vzťahu (10) písať

$$M_i = \frac{1}{t_i^{(2)} - t_i^{(1)}} \left(\int_{t_i^{(1)}}^{t_i^{(2)}} s(t)dt \right) h_i. \tag{11}$$

Po zlogaritmovaní (11) získame vzťah

$$logM_i = log\left(\frac{1}{t_i^{(2)} - t_i^{(1)}} \int_{t_i^{(1)}}^{t_i^{(2)}} s(t)dt \right) + logh_i. \tag{12}$$

Pre $j = 1,2, \dots ,12$, môžeme označiť koncentráciu radónu, integrovanú počas celého mesiaca j, veličinou m_j, kde $j = 1$ predstavuje prvý mesiac v roku (január). Potom vzťah (12) môžeme vyjadriť počas 6-mesačného intervalu vo vnútornom priestore i v mesiaci j ako

$$logM_i = \log\left(\sum_{k=j}^{j+5} \frac{1}{6} m_k \right) + logh_i. \tag{13}$$

s konvenciou $m_{k+12} = m_k$. Veličina M_i podlieha normálnemu rozdeleniu, takže rovnaké rozdelenie predpokladáme aj pre výraz $\log(h_i)$, so strednou hodnotou 0 (Krewski, 2005).

Na základe odhadovanej hodnoty m_j vieme ďalej ohodnotiť korekčné faktory jednotlivých ročných období. Odhad hodnoty m_j je pomerne komplikovaný a je potrebné vykonať istý počet priblížení na jej explicitné vyjadrenie. Podrobný opis je vypracovaný Krewskim v článku *„Modeling seasonal variation in indoor radon concentrations“* (Krewski, 2005).

Ak si ďalej vezmeme meranie počas časového obdobia $t \leq 12$ vo vnútornom priestore s prvým mesiacom j, môžeme koncentráciu radónu podľa sezónneho modelu napísať v tvare

$$M^{(t)} = \left(\frac{1}{t} \sum_{k=j}^{j+t-1} m_k \right) h. \tag{14}$$

Pri výsledkoch v čase $t = 12$, teda počas celého roka, bude pre koncentráciu radónu platiť

$$M^{(12)} = \left(\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} m_k \right) h. \tag{15}$$

Vzťahy (14) a (15) vo všeobecnosti tvoria základ techniky výpočtu priemernej celoročnej koncentrácie radónu pri meraniach s $t < 12$, pričom pre $M^{(12)}$ môžeme písať

$$M^{(12)} = C_j^{(t)} M^{(t)}, \tag{16}$$

kde korekčný faktor $C_j^{(t)}$ je ohodnotený ako

$$C_j^{(t)} = \frac{t}{12} \frac{\sum_{k=1}^{12} m_k}{\sum_{k=j}^{j+t-1} m_k}. \tag{17}$$

Predpokladaná priemerná koncentrácia radónu v rámci jedného roka sa získava vynásobením koncentrácie pozorovanej počas t mesiacov a korekčným faktorom $C_j^{(t)}$, kde j predstavuje mesiac, v ktorom sa meranie začalo (Krewski, 2005).

Multiplikačný model

Multiplikačný model jednoduchým spôsobom s využitím premenných $y_{i,12}$, $y_{i,k}^{\beta_0}$ a $\beta_{i,k}$ predpovedá priemernú koncentráciu radónu počas jedného roka v tvare

$$y_{i,12} = \alpha_{i,k} y_{i.k}^{\beta_0}, \tag{18}$$

kde i , k, a $y_{i,12}$ predstavujú poradie prvého mesiaca, meracie obdobie v počte mesiacov a ročný prieskum i a k označujú hodnoty v intervaloch $(i = 1, \dots, 12; k = 5,6,7)$.

Rovnicu (18) môžeme prepísať ako

$$logy_{i,12} = \beta_0 logy_{i.k} + log\alpha_{i,k} I_{\Lambda_{i,k}}(y_{l,r}), \tag{19}$$

kde $I_{\Lambda_{i,k}} = \begin{Bmatrix} 0\ ak\ (i,k) \neq (l,r) \\ 1\ ak\ (i,k) = (l,r) \end{Bmatrix}$.

Hlavnou ideou multiplikačného modelu je, že 12-mesačnú priemernú koncentráciu radónu možno predpovedať vynásobením koncentrácie radónu pozorovanej za obdobie kratšie ako 12 mesiacov a tzv. multiplikátora, ktorý je určený empiricky pomocou logaritmicko-lineárnej regresie (Krewski, 2005).

5.2 Crockettov model

Sezónne a denné variácie vnútornej koncentrácie radónu spolu s obývateľnosťou domov predstavujú rozdiel medzi nameranými hodnotami počas dňa a noci a vyššími hodnotami v zime ako v lete. Vo všeobecnosti sa táto výrazná zmena pripisuje tlakovému rozdielu (Crockett, 2016).

Na uvedené cykly však vplýva množstvo ďalších faktorov, ktorých miera pôsobenia sa líši vzhľadom k času a priestoru. Patrí sem napríklad vonkajšia teplota, atmosférický tlak, búrky, zrážky, účinok prílivu a odlivu alebo obývateľnosť príbytkov. Zmeny faktorov môžu byť, okrem prílivových efektov, periodicky nepredvídateľné a nepravidelné, čím sa metodika odhadu aktivity radónu významne komplikuje (Crockett, 2016).

V súčasnosti existujú rozličné modely, ktoré opisujú koncentráciu radónu vo vnútorných priestoroch z odlišných hľadísk. Postendorfer a kol. (1994) sa zameriaval na vplyv rýchlosti vetra, ktorý sa javil ako najvýznamnejší pri pomerne stabilnej teplote v budove. Vedecká skupina pod vedením

Climenta v roku 1999 poukazovala na koreláciu radónu s vlhkosťou, zrážkami a vetrom (Crockett, 2016).

Účinky vzniknutých podtlakov v uzavretých priestoroch boli opísané Eatonom a Scottom v roku 1984 a potvrdené Milesom v roku 2001 dobrou koreláciou medzi strednou koncentráciou radónu a teplotou počas mesiaca.

Ďalšie modely sa sústreďujú na závislosť koncentrácie radónu od vonkajšej teploty, od oblačnosti, zrážok a vlnovej spektrálnej analýzy alebo pozorujú súvislosť medzi tokom radónu a jeho koncentráciou v pôdnom plyne so zmenami atmosférického tlaku (Girault, 2009).

Uvedený model pochádzajúci od Crocketta nadväzuje na prácu Groves-Kirkbyho a kol. z roku 2006, ktorá skúmala zmeny koncentrácie radónu z pohľadu meteorologických faktorov v troch domácich suterénoch v Northamptonshire. Aj keď pri pozorovaní bola zistená iba slabá korelácia medzi zrážkami alebo medzi priemernou dennou teplotou a aktivitou radónu, napriek tomu štúdia identifikovala celkový obsah atmosférickej vlhkosti ako hlavný meteorologický faktor zmeny aktivity radónu (Crockett, 2016).

Sezónne korekčné faktory

Niektoré výskumné skupiny sa sústredili na opis sezónnych variácií radónu v interiéri prostredníctvom krátkodobých meraní. Pritom sa však so zníženou dobou merania rovnomerne znižuje presnosť a reprezentatívnosť priemernej hodnoty koncentrácie radónu, ktorá by platila pre všetky ročné obdobia (Crockett, 2016).

Z teoretického hľadiska je cieľom vytvoriť model, ktorý by nameranú hodnotu prispôsobil času a dobe trvania merania v rámci ročnej variácie. Zavádza sa tzv. sezónny korekčný faktor (SCF), ktorý sa využíva na škálovanie dát z krátkodobých meraní.

V mnohých krajinách predstavuje SCF násobiaci faktor, ktorý sa počíta podľa počiatočného mesiaca a trvania merania. Na základe jeho experimentálne získaných hodnôt je tak možné vykonať merania radónu kedykoľvek počas roka a s korekciou SCF tak získať spoľahlivú informáciu o aktivite radónu pre isté monitorovacie obdobie vo vzťahu k jeho začiatku (Crockett, 2016).

Presnosť údajov sa však znižuje so zväčšujúcim sa rozsahom geografickej oblasti, pre ktorý existuje známy sezónny faktor, pretože môže potenciálne dochádzať k vyhladeniu charakteristických faktorov pre menšie regióny (Crockett, 2016). Napriek možným odchýlkam výslednej aktivity radónu, je výhoda modelu s využitím SCF očividná a v budúcnosti model nájde perspektívu v jednoduchšej identifikácií potenciálne rizikových domov ožiarených radónom (Crockett, 2016).

5.3 Groves-Kirbyho model

Tento model pristupuje k výpočtu sezónnych korekčných faktorov využitím korelácie medzi meteorologickými parametrami a OAR vo vnútornej atmosfére. Vychádza z Milesovho semi-empirického vzťahu, kde je teplotný rozdiel zodpovedný za variácie OAR v interiéri:

$$R = 33 - 1{,}26T, \tag{20}$$

kde R je priemerná mesačná OAR vo vnútornej atmosfére $[Bq.m^{-3}]$ a T predstavuje priemernú teplotu vo vonkajšej atmosfére $[°C]$.

Vzťah (20) je ďalej možné upraviť vzhľadom k využívaniu priestoru, kde sa priemerná ročná koncentrácia radónu bude rovnať

$$R = (C - 4) \times \left(\frac{1}{[1{,}645 - 0{,}063T]}\right) + 4, \tag{21}$$

kde C je priemerná OAR vážená vzhľadom k využívaniu priestoru.

Štúdia je zameraná hlavne na testovanie správnosti daného prístupu. Výsledkom experimentu bola dobrá korelácia medzi teplotným diferenciálom a OAR vo vnútornej atmosfére. Množstvo vlhkosti vzduchu vo väčšej miere ovplyvňovalo namerané koncentrácie radónu ako pomer zrážok, pričom v budúcnosti je možnosť sledovať vplyv hodnoty rosného bodu v miestnosti. Vo všeobecnosti model preukázal presnejšie výsledky pri dlhších časových intervaloch (Groves-Kirby, 2015).

Výskumná časť

6 Cieľ práce

Dizertačná práca má dva hlavné ciele. Prvý je zameraný na radónovú diagnostiku pracovného prostredia, druhý cieľ sa zameriava na upresnenie sezónnych korekčných faktorov pre Slovensko. Prvým cieľom dizertačnej práce je kompletná charakteristika uzavretých priestorov z hľadiska objemovej aktivity radónu, vrátane jeho zdrojov, transportu a ventilácie. Prostredníctvom rozsiahlych kontinuálnych meraní je možné určiť priemerné ventilačné rýchlosti a rýchlosti prísunu radónu do vnútornej atmosféry podľa rozdelenia typu dní voľnočasového alebo pracovného charakteru. Porovnanie ich rozdielnych hodnôt OAR je ďalej využité na získanie poznatkov o nadhodnotení radiačného rizika jednotlivca v rámci ožiarenia radónom a jeho produktov premeny. Na priblíženie transportu radónu smerom dnu a von z budovy sú ďalej pozorované sezónne a denné variácie s ohľadom na ich odlišné meteorologické, stavebné a prírodné pomery.

Okrem experimentálnych odhadov sa na opis mechanizmu pohybu radónu v uzavretých priestoroch využívajú rozličné numerické metódy. Výskumná práca bude tiež klásť dôraz na testovanie týchto typov vybraných teoretických modelov, ktoré sú vypracované rôznymi vedeckými skupinami.

Ďalším cieľom dizertačnej práce je v súvislosti so sezónnym monitorovaním radónu v pobytových priestoroch určiť priemernú ročnú hodnotu OAR pomocou výpočtovej metodiky korekčných faktorov. Hlavným zámerom práce je kompletná analýza OAR vo vnútornej atmosfére a tak zníženie rizika, ktorými sú jedinci vystavení v dobe využívania priestoru.

Stanovené ciele práce:

- Získavanie nových celoročných dát o objemovej aktivite radónu na základe integrálnych meraní pre určovanie korekčných faktorov, ktoré umožnia výpočet priemerných ročných objemových aktivít radónu pre rôzne oblasti Slovenska
- Analýza dát dlhodobých kontinuálnych meraní radónu v rodinných domoch z rôznych lokalít Slovenska v závislosti od meteorologických podmienok, štúdium denných a sezónnych variácií radónu
- Využitie dlhodobých kontinuálnych meraní radónu pre testovanie teoretických modelov správania sa radónu vo vnútorných priestoroch
- Na základe dát z kontinuálneho monitorovania radónu testovať rôzne metódy určovania priemernej ventilačnej rýchlosti a rýchlosti prísunu radónu do vnútornej atmosféry počas pracovných a voľných dní

7 Analýza objemovej aktivity radónu v budove verejnej správy

Spolu s charakterom zdroja (pôda, stavebný materiál, voda a vonkajšia atmosféra) vplývajú na koncentráciu radónu na pracoviskách aj meteorologické parametre. Okrem meteorologických parametrov je dôvodom nárastu koncentrácie radónu znížený vetrací režim, kedy je prostredníctvom vykurovania zvýšená teplota budovy, čím dochádza k vzniku podtlaku a nasávaniu pôdneho vzduchu z podložia. V letnom období sa vnútorné priestory vetrajú oveľa častejšie, čím sa teplotný rozdiel spolu s koncentráciou radónu podstatne znižuje (Jelle, 2010).

7.1 Použité metódy merania

Na účely monitorovania radónu vo vnútornej atmosfére budovy verejnej správy bol využitý kontinuálny radónový detektor TERA, ktorý je súčasťou systému TSRP1 spoločnosti TESLA v Českej republike. Používa sa hlavne na meranie objemovej aktivity radónu a reguláciu koncentrácie radónu s využitím aktuátora a silového relé.

Detekčný systém pozostáva z bezdrôtovej radónovej sondy TSR2, ktorej základom je merná komora s polovodičovým detektorom a z centrálnej jednotky TCR3. Sonda je určená ku kontinuálnemu meraniu OAR v uzavretých priestoroch. Radón vstupuje do komory difúziou cez vstupný filter na dne sondy, kde dochádza k jeho detekcii. Výsledky sa spracovávajú v 4-minútových intervaloch, pričom detektor počíta aktuálnu hodnotu koncentrácie radónu v intervale 1 hodiny (kĺzavý priemer 15 po sebe idúcich hodnôt). Okrem hodinových hodnôt detektor zaznamenáva taktiež dlhodobú hodnotu koncentrácie radónu za 24 hodín (priemer z 24 po sebe nasledujúcich hodnôt). Sonda ukladá časový záznam koncentrácie radónu, ako aj hodnoty teploty, tlaku a vlhkosti (v intervale 1 hodina) do svojej vnútornej pamäte. Namerané hodnoty sa môžu zo sondy ďalej stiahnuť kontinuálne v priebehu merania alebo jednorazovo po skončení merania. Základné parametre radónovej sondy sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3: Parametre radónovej sondy *(zdroj: sujchbo.cz, 2017)*

Citlivosť merania	0,15 imp/hod/Bq/m^3
Rozsah merania	5 - 65535 Bq/m^3
Neistota merania	< 15% pri 300 Bq/m^3 a 24 hodinovom meraní

7.2 Charakteristika pozorovanej lokality

Dlhodobé monitorovanie radónu prebiehalo v historickej budove mestského úradu v období od decembra 2020 do novembra 2021. Meranie prebiehalo v miestnosti, ktorá bola v kontakte s podložím a po rekonštrukcii bola vybavená plastovými oknami. Budova bola využívaná počas pracovnej doby (od pondelka do piatka) v časoch od 7:30 - 15:30, s výnimkou sviatkov. Bola pozorovaná závislosť objemovej aktivity radónu od meteorologických parametrov s cieľom vyhodnotiť ročné a denné variácie koncentrácie radónu. Okrem charakteristiky radónovej aktivity vo vnútornej atmosfére budovy verejnej správy sa získané výsledky môžu aplikovať na budúce analýzy pracovných a pobytových priestorov z hľadiska využívania priestoru.

Obr. 6: *Pozorovaná lokalita - budova verejnej správy v Prievidzi (zdroj: autor práce)*

7.3 Spracovanie nameraných údajov

7.3.1 Analýza priebehu objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére

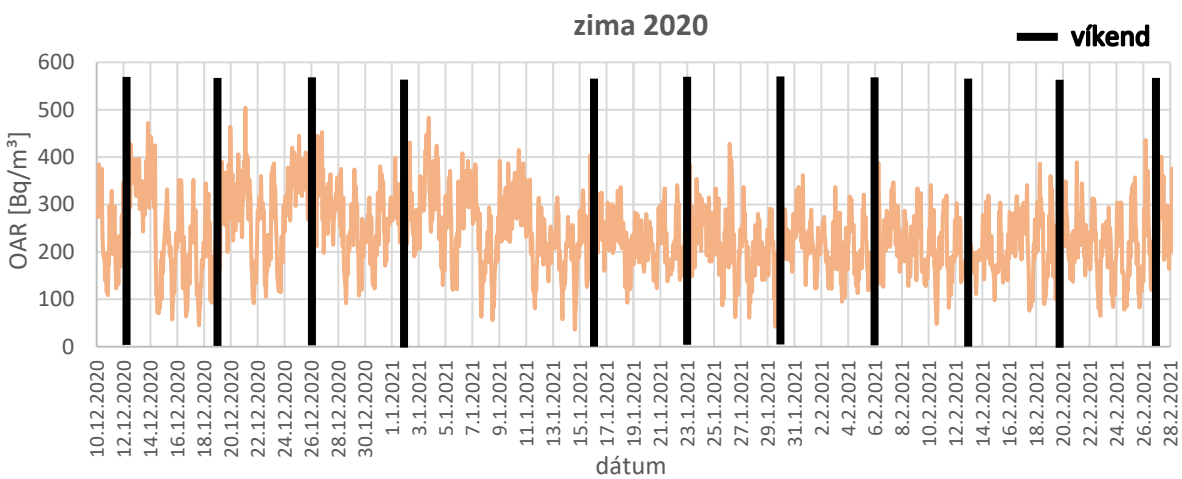
Objemová aktivita radónu spolu s vnútornou teplotou bola kontinuálne monitorovaná s meracím intervalom 1 hodina. Denné vlny boli pozorované s maximom v noci a v ranných hodinách, čo bolo pravdepodobne spôsobené uzatvorením miestnosti po pracovnej dobe. Minimálne hodnoty boli namerané v časoch od 11-18 hodiny, kedy bol priestor nepravidelne vetraný. Sezónne variácie sa

prejavili hlavne väčším rozptylom priemerných hodnôt objemovej aktivity radónu počas letných mesiacov ako v zimnom období.

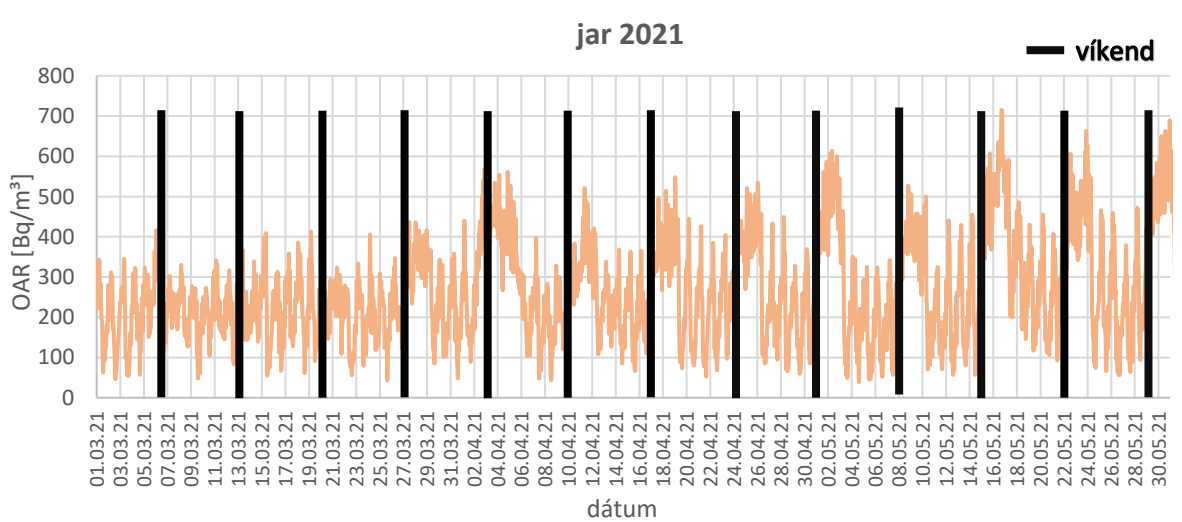
Na obr. 7-10 je znázornený časový priebeh objemovej aktivity radónu, kde je viditeľný nárast koncentrácie počas voľných dní a je možné tak pozorovať vplyv užívania vnútorného priestoru na namerané hodnoty objemovej aktivity radónu.

Hodnoty objemovej aktivity radónu počas jednotlivých mesiacov sa pohybovali v rozmedzí 139,2 až 628,1 Bq.m^{-3}, pričom najnižší denný priemer aktivity radónu bol nameraný v mesiaci február a maximum bolo dosiahnuté v novembri.

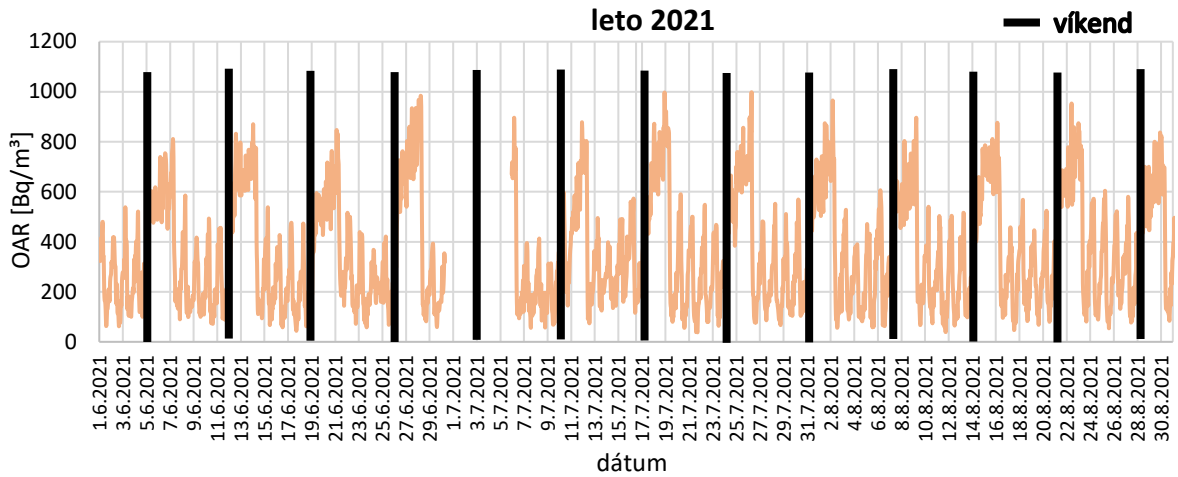
Podľa denného časového intervalu pracovnej doby boli analyzované rastové krivky objemovej aktivity radónu, na základe ktorých bolo možné odhadnúť ventilačnú rýchlosť a rýchlosť prísunu radónu do vnútorných priestorov pracoviska.



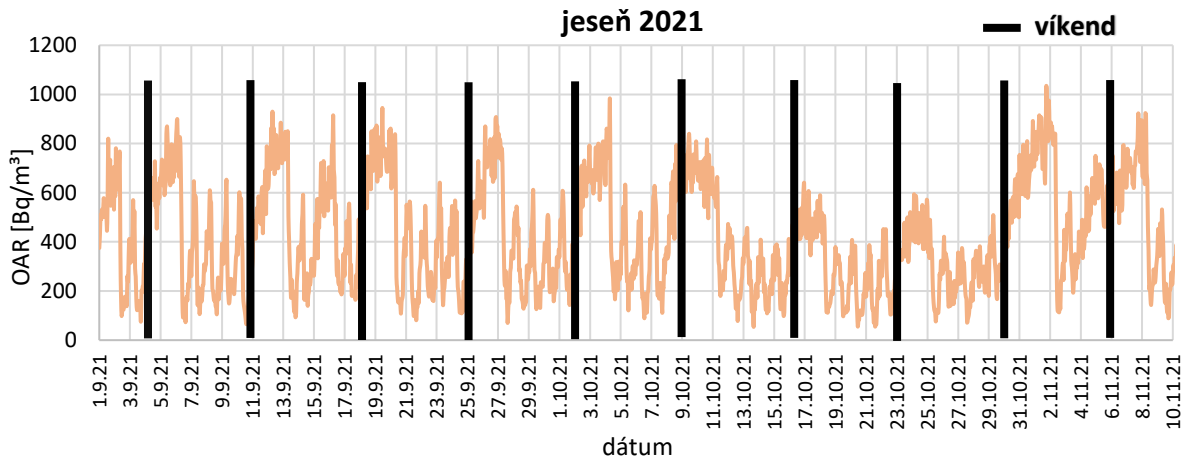
Obr. 7: *Priebeh OAR počas mesiacov december až február vplyvom využívania priestoru (zdroj: autor práce)*



Obr. 8: *Priebeh OAR počas mesiacov marec až máj vplyvom využívania priestoru (zdroj: autor práce)*



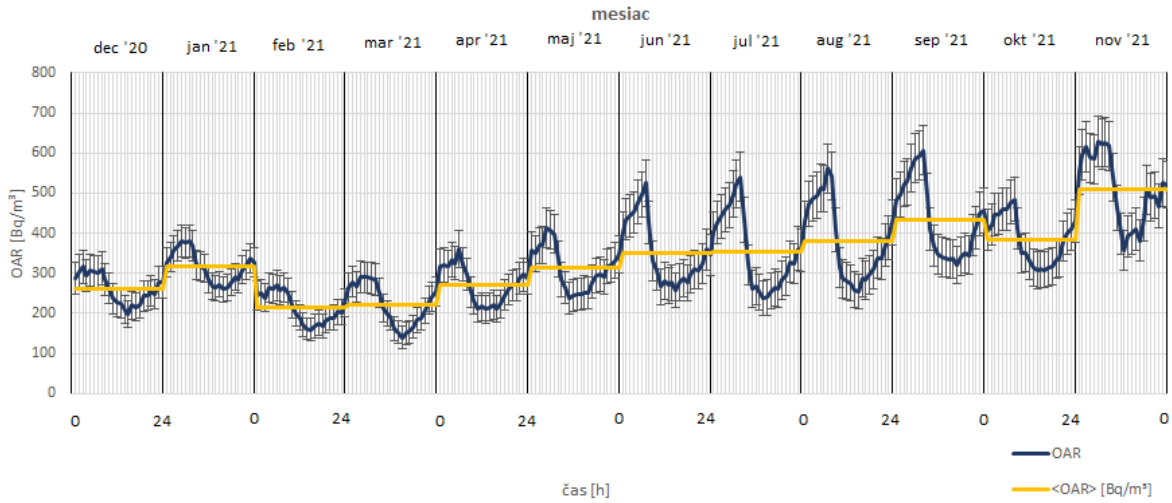
Obr. 9: *Priebeh OAR počas mesiacov jún až august vplyvom využívania priestoru (zdroj: autor práce)*



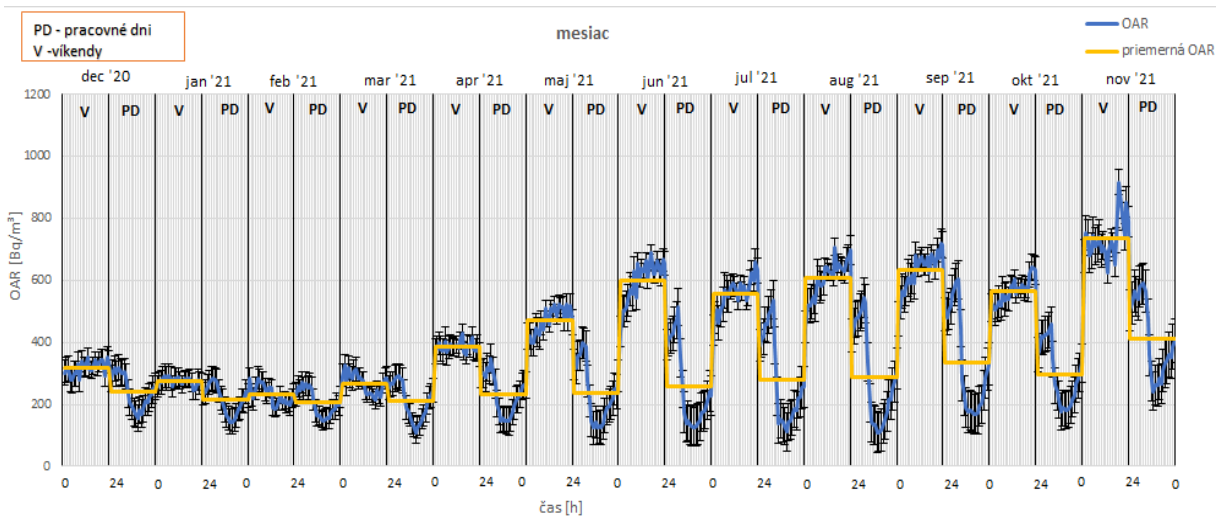
Obr. 10*:Priebeh OAR počas mesiacov september až november vplyvom využívania priestoru (zdroj: autor práce)*

7.3.2 Analýza denných variácií objemovej aktivity radónu a ich priemerných hodnôt pri rozdelení údajov podľa pracovných a voľných dní

V súvislosti s vyhodnocovaním OAR radónu na pracovisku z integrálnych meradiel je dôležité poznamenať, že merania OAR počas voľných dní môžu byť z dôvodu nevyužívania priestoru neporovnateľne vyššie ako počas pracovných dní. Práve táto skutočnosť môže viesť k nadhodnoteniu efektívnych dávok získaných na základe integrálnych meraní v porovnaní so skutočnou dávkou získanou počas pracovnej doby. Pomocou porovnania objemových aktivít radónu počas pracovnej doby s objemovou aktivitou radónu nameranou cez voľné dni bolo teda možné pozorovať k akému nadhodnoteniu môže týmto prístupom dôjsť. Obr. 11 zobrazuje denné vlny radónu počas mesiacov december 2020 až november 2021 a obr. 12 rozlišuje pracovné a voľné dni.



Obr. 11: *Denné variácie objemovej aktivity radónu počas jednotlivých mesiacov december 2020 až november 2021 (zdroj: autor práce)*



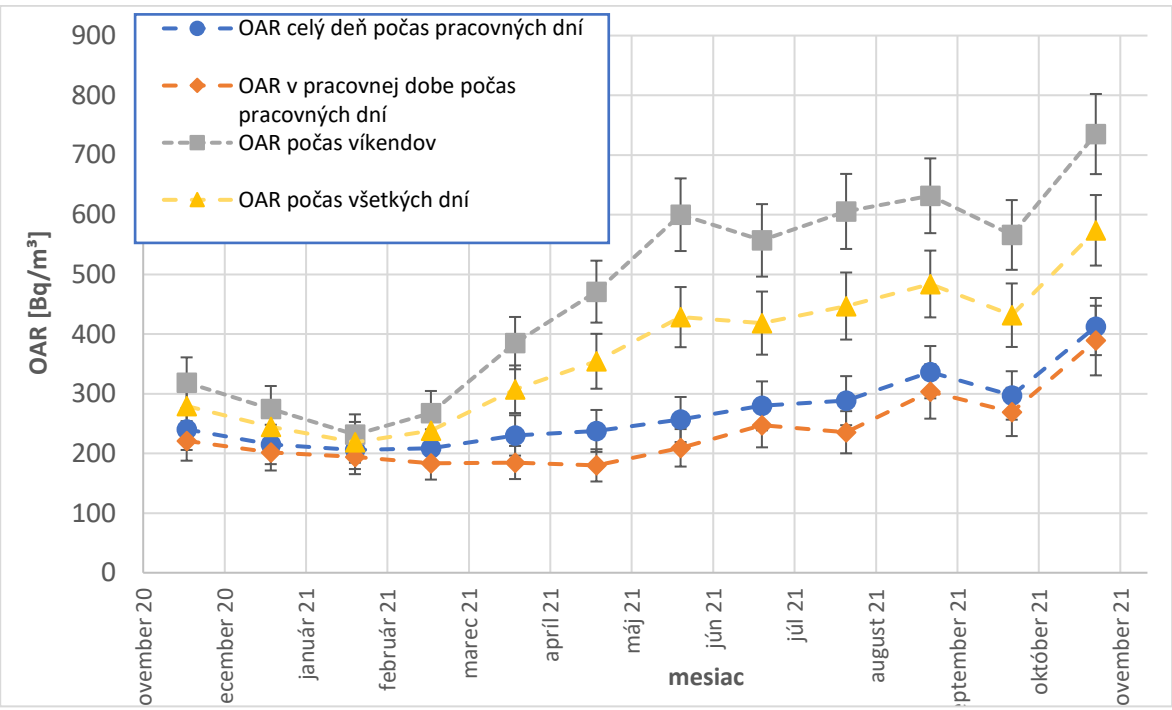
Obr. 12: *Denné variácie objemovej aktivity radónu z hľadiska pracovných dní a víkendov počas mesiacov december 2020 až november 2021 (zdroj: autor práce)*

Okrem vyšších hodnôt objemových aktivít počas víkendov a sviatkov je viditeľná výrazná variabilita aktivity cez pracovné dni, spôsobená pravidelným využívaním priestoru počas pracovnej doby. Maximálna hodnota pri meraní OAR počas všetkých dní bola v ranných hodinách a s minimom vo večernom čase, pričom počas pracovných dní bolo maximum v neskorých hodinách až v noci a minimálna OAR bola v pracovnej dobe v závislosti od vetrania miestnosti. Tab. 4 uvádza priemerné hodnoty OAR počas jednotlivých mesiacov pri rozlíšení na voľné dni, všetky dni, pracovné dni (celý deň) a pracovné dni počas pracovnej doby (od pondelka 7:30 do piatka 16:30).

Tab. 4: Porovnanie priemerných OAR počas pracovnej doby (PD) a víkendov (V)

Mesiac	OAR–V [Bq/m³]	OAR-všetky dni [Bq/m³]	OAR-PD [Bq/m³] - celý deň	OAR-PD [Bq/m³] -pracovná doba
december 2020	318 ± 43	280 ± 40	240 ± 34	221 ± 33
január 2021	275 ± 39	245 ± 36	215 ± 33	202 ± 30
február 2021	232 ± 34	219 ± 34	206 ± 32	194 ± 29
marec 2021	268 ± 37	238 ± 37	209 ± 32	184 ± 28
apríl 2021	385 ± 44	307 ± 40	230 ± 34	185 ± 28
máj 2021	471 ± 52	354 ± 46	238 ± 35	180 ± 27
jún 2021	600 ± 62	428 ± 50	257 ± 38	209 ± 31
júl 2021	557 ± 61	418 ± 53	280 ± 41	247 ± 37
august 2021	605 ± 63	447 ± 56	288 ± 41	235 ± 35
september 2021	632 ± 63	484 ± 56	336 ± 44	304 ± 46
október 2021	566 ± 58	432 ± 53	297 ± 41	269 ± 40
november 2021	735 ± 67	574 ± 59	413 ± 48	389 ± 58

Na obr. 13 sú znázornené rozdiely objemových aktivít počas jednotlivých mesiacov pri rozlíšení na voľné dni, všetky dni, pracovné dni (celý deň) a pracovné dni počas pracovnej doby.



Obr. 13: *Porovnanie priemerných OAR počas pracovných dní po celý deň (OAR PD – celý deň),OAR počas pracovnej doby (OAR PD), víkendov (OAR V) a všetkých dní (OAR) (zdroj: autor práce)*

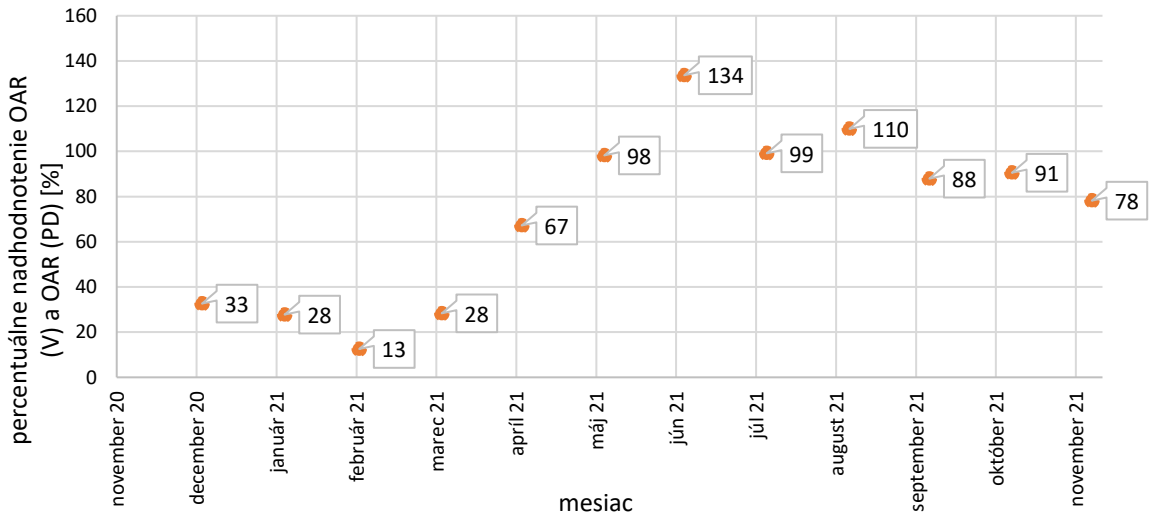
Výsledky sme ďalej vyhodnotili percentuálne, prostredníctvom efektívnej dávky a relatívnej amplitúdy so zámerom na poukázanie rôznych dopadov integrálneho merania.

Percentuálne vyhodnotenie

Rozdiel medzi objemovými aktivitami sa dá opísať percentuálne, pomocou vzťahu

$$x[\%] = \frac{OAR\,(V) - OAR(PD)}{OAR(PD)}, \tag{22}$$

kde OAR (V) je objemová aktivita počas víkendov a sviatkov a OAR (PD) je objemová aktivita počas pracovných dní. V tomto prípade porovnávame úroveň radónu hlavne z hľadiska rozdelenia celých dní podľa využívania budovy. Získané nadhodnotenie je znázornené na obr. 14.

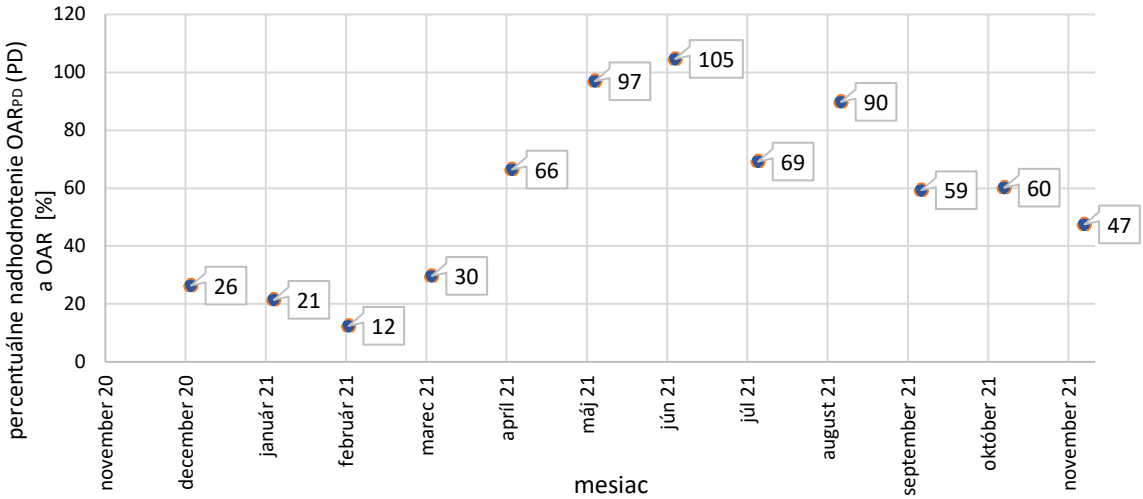


Obr. 14: *Percentuálne nadhodnotenie OAR počas víkendov a OAR počas pracovných dní (zdroj: autor práce)*

Okrem celých dní sme objemovú aktivitu sledovali pri skrátení pracovných dní podľa pracovnej doby na dobu od pondelka 7:30 do piatka 16:30. Spracované údaje sme ďalej porovnávali s dátami zo všetkých dní, aby sme sa čo najpresnejšie priblížili k integrálnemu prístupu monitorovania radónu. Na percentuálne hodnotenie sme použili vzťah

$$x[\%] = \frac{OAR\,(tot) - OAR_{PD}(PD)}{OAR_{PD}(PD)}. \tag{23}$$

$OAR(tot)$ označuje objemovú aktivitu počas všetkých dní a $OAR_{PD}(PD)$ predstavuje objemovú aktivitu počas pracovnej doby (pondelok 7:30 až piatok 16:00). Grafické znázornenie so získanými výsledkami je znázornené na obr. 15.



Obr. 15: *Percentuálne nadhodnotenie OAR počas pracovných dní v rámci pracovnej doby a OAR počas všetkých dní (zdroj: autor práce)*

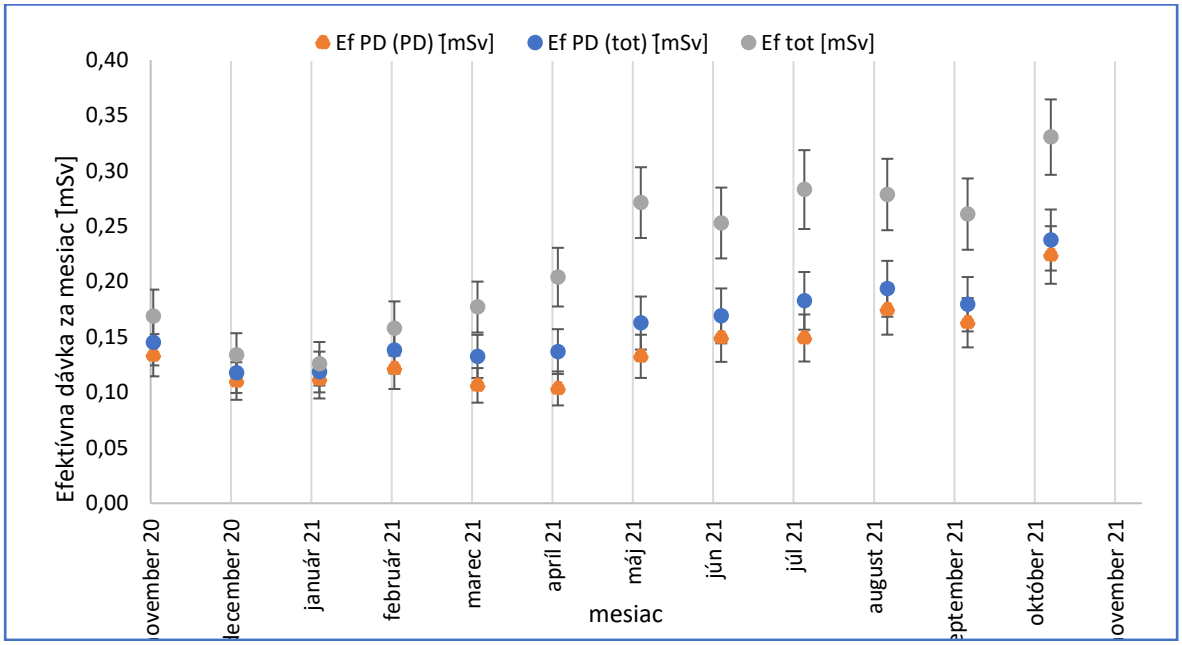
Z obr. 14 a 15 vidíme, že najväčšie rozdiely medzi OAR počas pracovných dní a víkendov, resp. počas pracovnej doby a všetkých dní boli zistené v mesiacoch máj (98 %, 97 %), jún (134 %, 105 %) a august (110 %, 90 %), kedy boli pozorované najvyššie nad-hodnotenia OAR. Najnižšie nadhodnotenie (13 % a 12 %) bolo zistené v mesiaci február.

Efektívna dávka

Vzniknuté rozdiely medzi koncentráciou radónu z hľadiska využívania priestoru možno opísať tiež prostredníctvom hodnoty efektívnej dávky. Efektívna dávka vo všeobecnosti vyjadruje súčet ekvivalentných dávok vo všetkých orgánoch alebo tkanivách vynásobených príslušným tkanivovým váhovým faktorom (ujd.gov.sk, 2025). Efektívnu dávku získanú prostredníctvom aktivity radónu môžeme tiež vyjadriť v tvare

$$E_f = FT\bar{A}_v f, \qquad (24)$$

kde E_f je efektívna dávka [mSv], T je doba expozície [h], F je rovnovážny faktor (0,4), f je dávkový konverzný faktor [9 nSv.h^{-1}/Bq.m^{-3}] a $\overline{A_v}$ je priemerná OAR [Bq/m³]. Pomocou uvedenej metódy sme získali výsledky znázornené na obr. 16 a v tab. 5, kde $E_{f\ PD}(PD)$ je efektívna dávka, získaná počas pracovných dní v intervale od pondelka 7:30 až do piatka 16:30 [mSv], $E_{f\ PD}(tot)$ je efektívna dávka počas úplných pracovných dní [mSv] a $E_{f\ tot}$ je efektívna dávka počas všetkých dní [mSv].



Obr. 16: *Efektívna dávka získaná od radónu za jeden mesiac v závislosti od priemernej OAR (zdroj: autor práce)*

Tab. 5: Efektívna dávka získaná od radónu za jeden mesiac v závislosti od priemernej OAR

Mesiac	Ef $_{PD}$ (PD) [mSv]	Ef $_{PD}$ (tot) [mSv]	Ef $_{tot}$ [mSv]
december 2020	0,13 ± 0,02	0,15 ± 0,02	0,17 ± 0,02
január 2021	0,11 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,13 ± 0,02
február 2021	0,11 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,13 ± 0,02
marec 2021	0,12 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,16 ± 0,02
apríl 2021	0,11 ± 0,02	0,13 ± 0,02	0,18 ± 0,02
máj 2021	0,10 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,20 ± 0,03
jún 2021	0,13 ± 0,02	0,16 ± 0,02	0,27 ± 0,03
júl 2021	0,15 ± 0,02	0,17 ± 0,02	0,25 ± 0,03
august 2021	0,15 ± 0,02	0,18 ± 0,03	0,28 ± 0,04
september 2021	0,17 ± 0,02	0,19 ± 0,03	0,28 ± 0,03
október 2021	0,16 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,26 ± 0,03
november 2021	0,22 ± 0,03	0,24 ± 0,03	0,33 ± 0,03

Zhrnutie nadhodnocovania koncentrácie radónu v podobe efektívnej dávky preukázalo taktiež najväčší rozdiel v mesiaci jún, kde sa efektívna dávka počas všetkých dní rovnala 0,27 mSv, pričom s

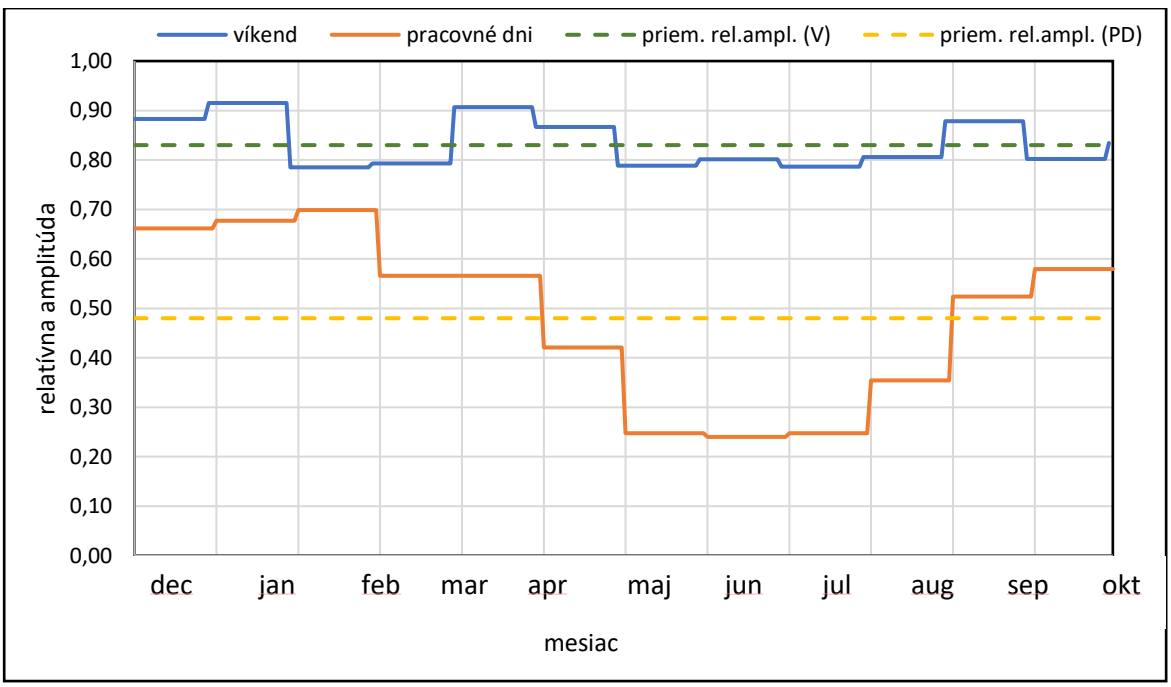
OAR počas pracovnej doby dosahovala dávka hodnotu len 0,13 mSv. Najvyššia efektívna dávka bola získaná v mesiaci november (0,33 mSv) počas všetkých dní a najnižšia hodnota efektívnej dávky bola v mesiaci máj (0,11 mSv) počas pracovnej doby.

Porovnanie relatívnych amplitúd dennej vlny OAR

Pomocou relatívnych amplitúd vieme rozdiely medzi aktivitami porovnať z hľadiska ich variácií. Najväčšia variabilita OAR bola pozorovaná počas pracovných dní, na rozdiel od toho počas víkendov boli zistené len minimálne variácie v pracovnom priestore. Relatívne amplitúdy boli vypočítané podľa vzťahu

$$|A_{rel}| = \frac{(OAR_{MAX,\,i})/2 - \overline{OAR}_i}{\overline{OAR}_i}, \tag{25}$$

kde A_{rel} je relatívna amplitúda, OAR_{MAX} je maximálna OAR v čase t v mesiaci i [Bq/m³] a $\overline{OAR}i$ je priemerná OAR za mesiac *i* [Bq/m³]. Výsledné hodnoty rozdelené podľa mesiacov sú zobrazené na obr. 17 a uvedené v tab. 6.



Obr. 17: *Porovnanie relatívnej amplitúdy počas pracovných dní a počas víkendov (zdroj: autor práce)*

Tab. 6: Porovnanie relatívnej amplitúdy počas pracovných dní a počas víkendov

Mesiac	Časť týždňa	Relatívna amplitúda
december 2020	víkend	0,88
	prac. dni	0,66
január 2021	víkend	0,92
	prac. dni	0,68
február 2021	víkend	0,79
	prac. dni	0,70
marec 2021	víkend	0,79
	prac. dni	0,57
apríl 2021	víkend	0,91
	prac. dni	0,57
máj 2021	víkend	0,87
	prac. dni	0,42
jún 2021	víkend	0,79
	prac. dni	0,25
júl 2021	víkend	0,80
	prac. dni	0,24
august 2021	víkend	0,79
	prac. dni	0,25
september 2021	víkend	0,81
	prac. dni	0,35
október 2021	víkend	0,88
	prac. dni	0,52
november 2021	víkend	0,80
	prac. dni	0,58

Relatívne amplitúdy OAR počas víkendov sa pohybovali v intervale 0,79 až 0,92, a teda v porovnaní s pracovnými dňami (0,24 až 0,70) boli približne stále. Maximálna amplitúda počas víkendov bola nájdená v januári a počas pracovných dní vo februári. Najnižšia hodnota (0,79) cez voľné dní bola zistená v mesiacoch február, marec, jún a august a relatívna amplitúda počas pracovných dní s hodnotou 0,24 bola zistená v júli.

7.3.3 Analýza variácií objemovej aktivity radónu v závislosti od parametrov vonkajšej atmosféry

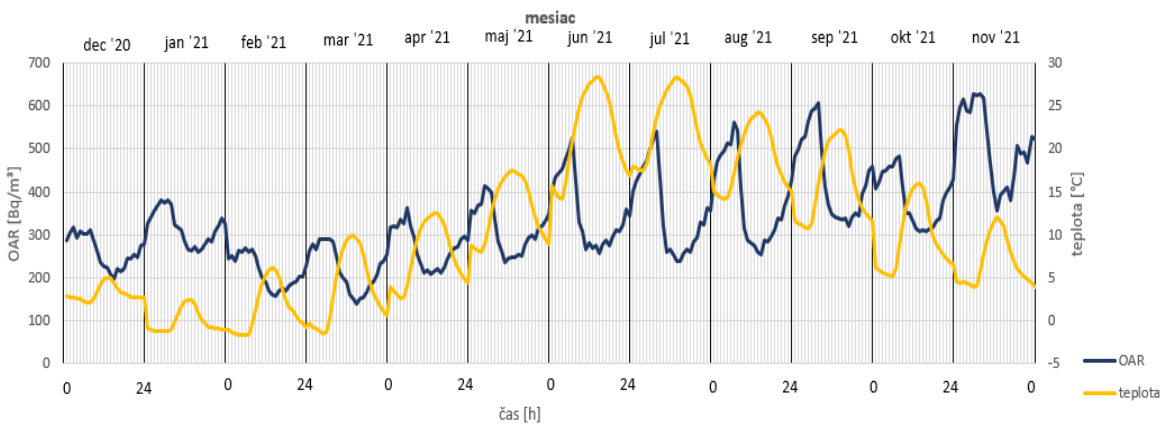
V rámci merania bola sledovaná zmena OAR v závislosti od meteorologických parametrov, konkrétne od vonkajšej teploty, tlaku, rýchlosti vetra, úhrnu zrážok a gradientu teploty medzi vonkajšou a vnútornou atmosférou. Koncentrácia radónu počas dňa vykazuje nárast s východom slnka, kedy teplotný rozdiel medzi vonkajšou a vnútornou atmosférou dosahuje vysoké hodnoty (Ďurčík, 1996).

Ročné variácie radónu sa väčšinou vyznačujú maximom v zimnom ročnom období a minimom v letnom období, čo je spôsobené najmä kvôli diferencii medzi vonkajšou a vnútornou teplotou.

Súčasťou monitorovania radónu v budove bolo aj skúmanie korelácie týchto faktorov s koncentráciou radónu nameranou vo vnútornej atmosfére. Na základe štatistiky je tak možné poukázať na hlavné príčiny zvýšenej objemovej aktivity v uzavretých priestoroch, a tak v budúcnosti vyhodnotiť optimálne podmienky na stavbu nových budov. Na pozorovanie vplyvu meteorologických parametrov nám boli poskytnuté namerané dáta od SHMÚ pre najbližšiu meteorologickú stanicu, konkrétne časový záznam o vonkajšej teplote, tlaku, rýchlosti a úhrne zrážok.

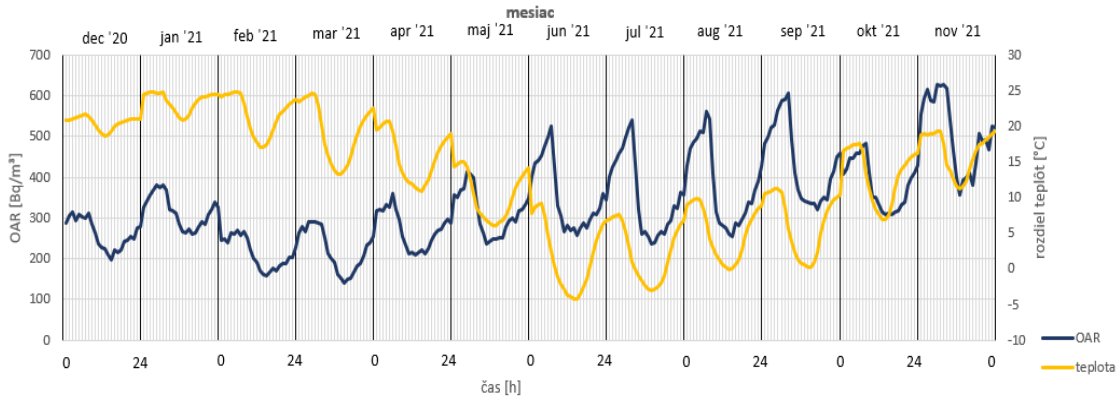
Pri skúmaní variácií radónu je dôležité, aby boli podmienky v atmosfére vo veľkej miere konštantné, a teda je výhodné zamerať sa na túto závislosť vzhľadom ku kratšiemu časovému obdobiu. Na základe uvedenej úvahy sme ročný zber dát rozdelili podľa mesiacov a pozorovali korelácie s jednotlivými faktormi.

Na obr. 18 sú zobrazené denné variácie objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére a teploty vo vonkajšej atmosfére.



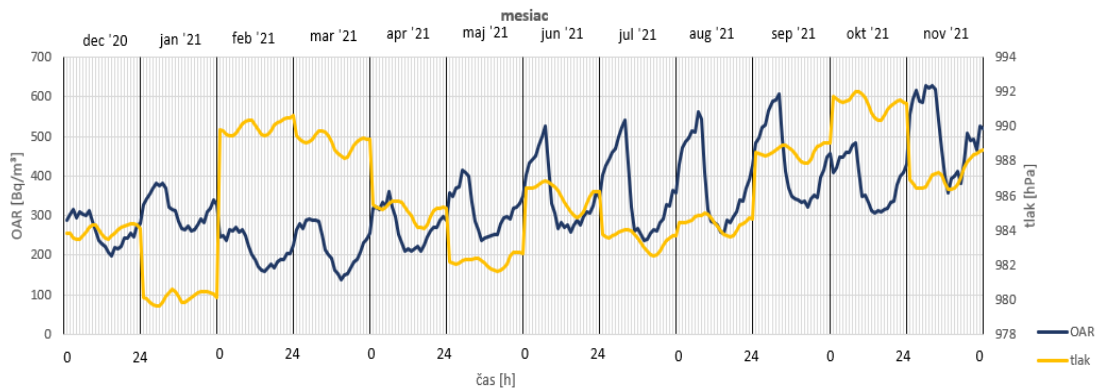
Obr. 18: *Denné variácie objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére a teploty vo vonkajšej atmosfére (zdroj: autor práce)*

Vo všeobecnosti objemová aktivita radónu vo vnútornej atmosfére narastá s poklesom teploty, kedy dochádza k aktívnemu nasávaniu radónu práve vďaka teplotným rozdielom medzi vnútorným a vonkajším prostredím. Preto je výhodné poukázať na závislosť objemovej aktivity od diferencie vnútornej a vonkajšej teploty (obr. 19), kde je s narastajúcim rozdielom teplôt pozorovaný narastajúci trend objemovej aktivity radónu. Pri skúmaní vplyvu teploty je tiež možné preukázať silnejšiu koreláciu medzi danými veličinami s 2 – 4 hodinovým oneskorením objemovej aktivity voči teplote (tab. 7).



***Obr. 19**: Denné variácie objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére a rozdielu teploty medzi vnútornou a vonkajšou atmosférou (zdroj: autor práce)*

Ďalší parameter, úzko prepojený s teplotou, je tlak vonkajšej atmosféry. Z obr. 20 a získaných korelačných koeficientov (tab. 7) nevieme jednoznačne určiť závislosť objemovej aktivity radónu od tlaku, keďže hodnoty korelačného koeficientu sa nachádzajú v intervale -0,39 až 0,75. Môžeme predpokladať, že faktory, ovplyvňujúce denné vlny OAR vo vnútornej atmosfére, majú počas roka rozličnú mieru vplyvu na aktivitu radónu.



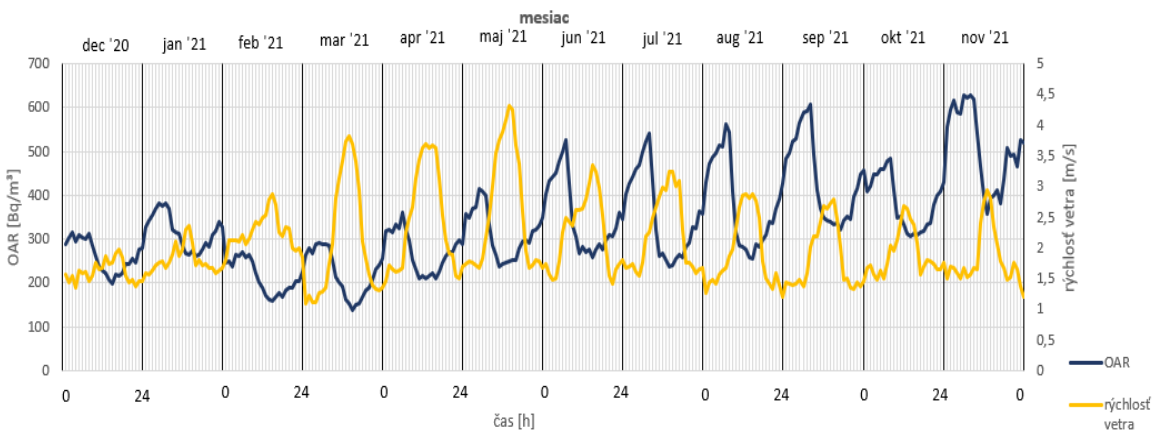
***Obr. 20:** Denné variácie objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére a tlaku (zdroj: autor práce)*

Tab. 7: Korelačné koeficienty medzi objemovou aktivitou radónu vo vnútornej atmosfére a vybranými meteorologickými parametrami počas mesiacov december 2020 až november 2021

Mesiac	Korelačný koeficient (R^2)					
	medzi OAR a teplotou vo vonkajšom prostredí	medzi OAR a tlakom	medzi OAR a rýchlosťou vetra	medzi OAR a vlhkosťou	medzi OAR a rozdielom teplôt	OAR a rozdielom teploty s 2hod-posunom
dec 20	-0,79	-0,07	-0,63	-0,44	0,80	0,84
jan 21	-0,71	-0,39	-0,48	-0,15	0,69	0,87
feb 21	-0,82	-0,10	-0,59	-0,20	0,80	0,95

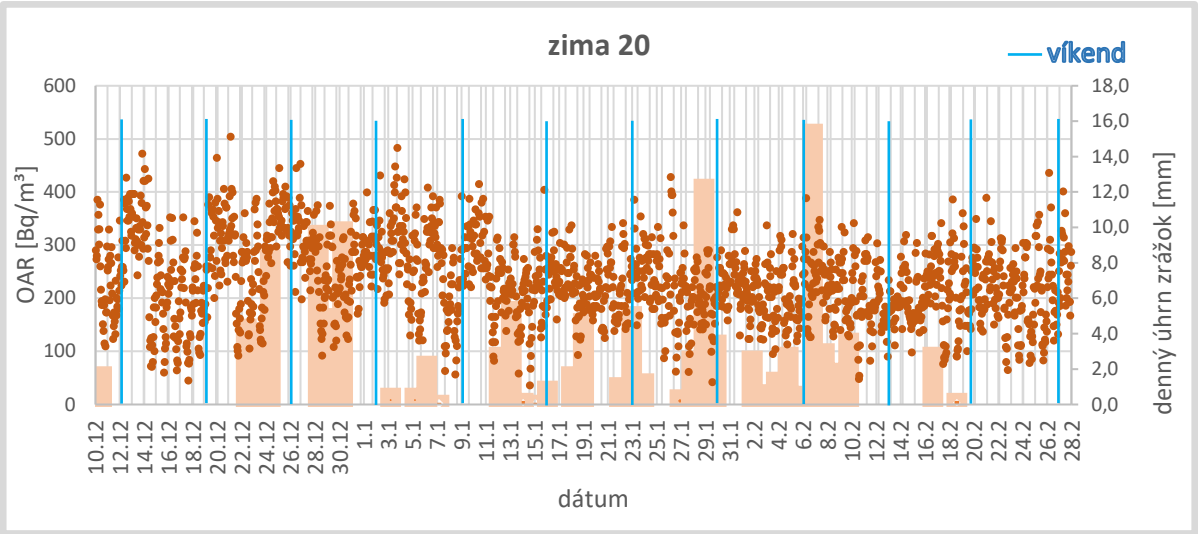
mar 21	-0,88	0,75	-0,81	0,28	0,87	0,99
apr 21	-0,94	0,62	-0,89	0,35	0,93	0,91
máj 21	-0,85	0,39	-0,82	-0,29	0,83	0,93
jún 21	-0,75	0,74	-0,49	-0,02	0,73	0,93
júl 21	-0,68	0,74	-0,58	0,19	0,66	0,92
aug 21	-0,80	0,63	-0,66	0,14	0,78	0,95
sep 21	-0,69	0,27	-0,49	-0,34	0,66	0,93
okt 21	-0,80	0,72	-0,57	-0,26	0,77	0,95
nov 21	-0,75	-0,01	-0,68	-0,64	0,72	0,92

Rýchlosť vetra ako ďalší parameter pôsobiaci na koncentráciu radónu ukazuje vo všeobecnosti antikoleračný vzťah v intervale od -0,89 až -0,48. Táto skutočnosť hovorí o tom, že s narastajúcou rýchlosťou vetra objemová aktivita radónu vo vnútornej atmosfére klesá (obr. 21).

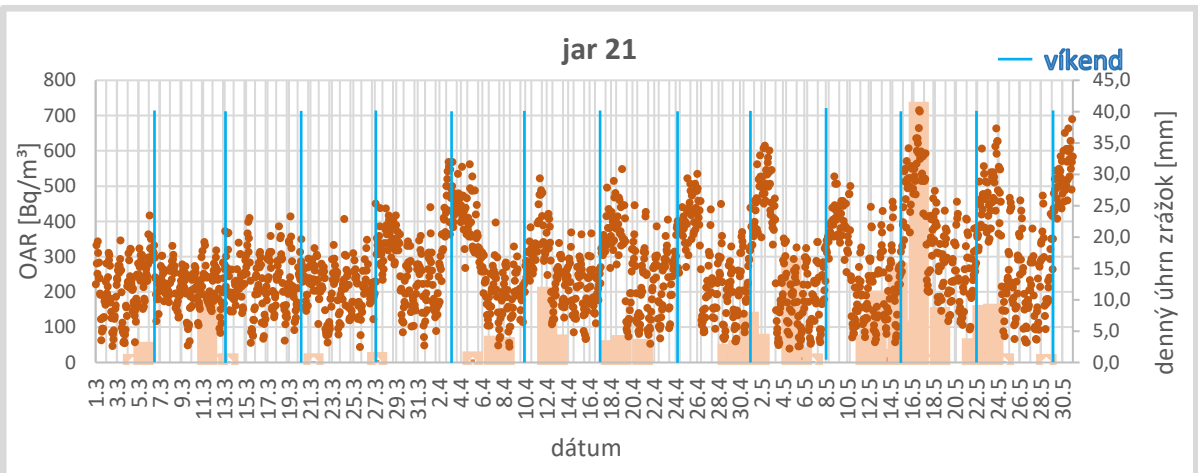


Obr. 21: *Denné variácie objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére a rýchlosti vetra (zdroj: autor práce)*

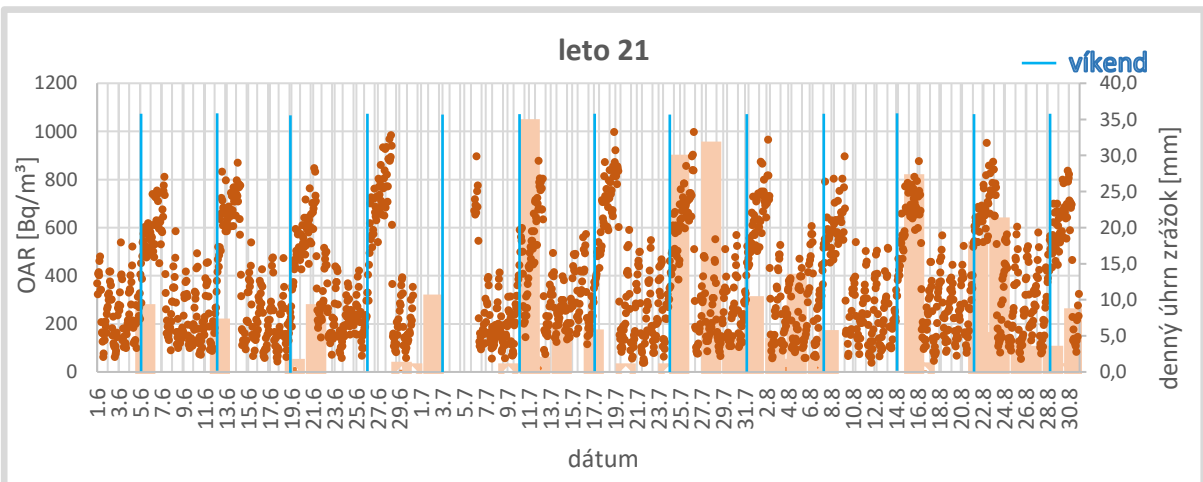
Úhrn zrážok alebo vlhkosť vzduchu vo vonkajšej atmosfére je spolu s priebehom OAR zobrazený na obr. 22 – 25 rozdelený podľa ročných období. Po výpočte korelácií nebola medzi nimi nájdená priama závislosť, hodnoty korelačného koeficientu sa pohybujú v intervale medzi hodnotami -0,64 a 0,35.



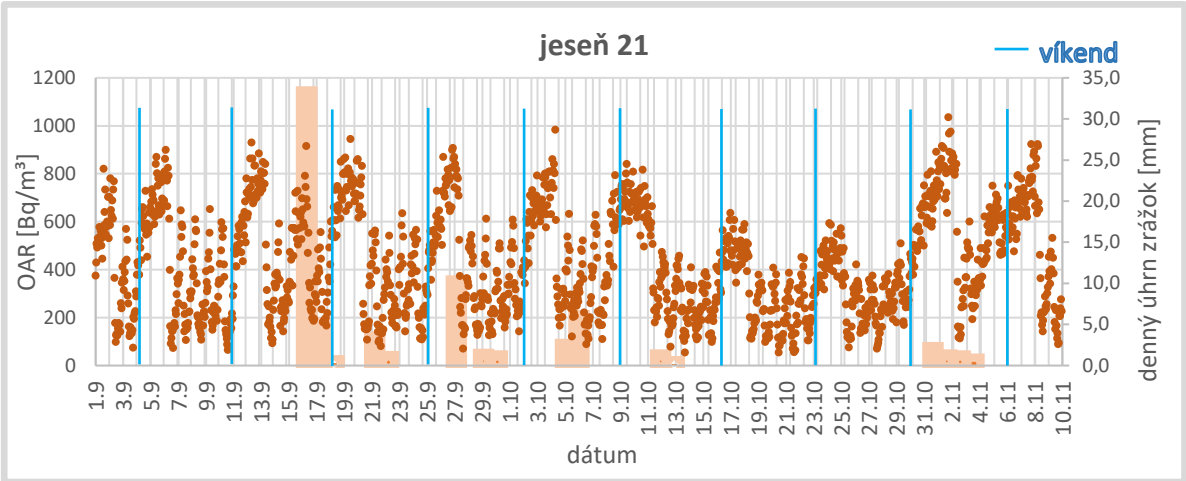
Obr. 22: *Priebeh objemovej aktivity radónu a úhrnu zrážok za ročné obdobie zima 2020 (zdroj: autor práce)*



Obr. 23*: Priebeh objemovej aktivity radónu a úhrnu zrážok za ročné obdobie jar 2021 (zdroj: autor práce)*



Obr. 24: *Priebeh objemovej aktivity radónu a úhrnu zrážok za ročné obdobie leto 2021 (zdroj: autor práce)*



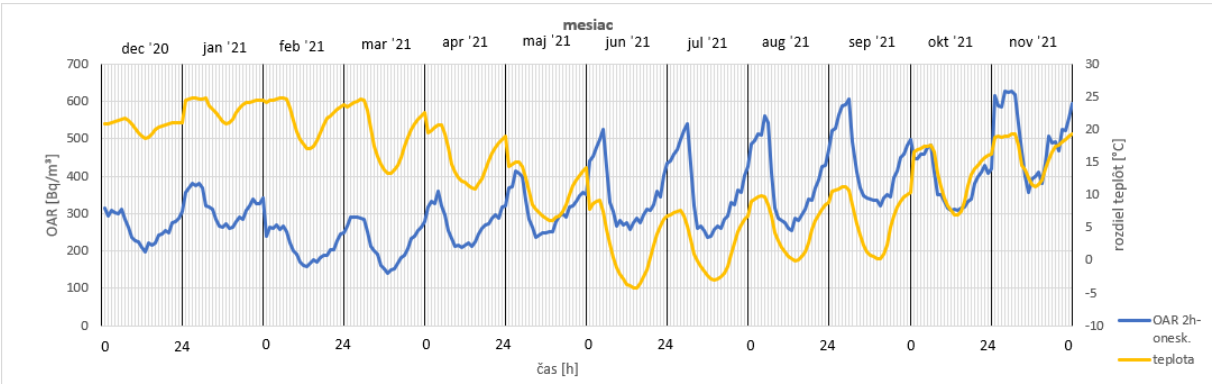
Obr. 25: *Priebeh objemovej aktivity radónu a úhrnu zrážok za ročné obdobie jeseň 2021 (zdroj: autor práce)*

Pri skúmaní meteorologických parametrov bolo významné ukázať vplyv rozdielu vnútornej a vonkajšej teploty najprv pri OAR získanej počas všetkých dní a potom s OAR nameranou iba počas pracovnej doby. Korelácia objemovej aktivity radónu a teplotnej diferencie sa preukázala ako významnejšia pri jej dvojhodinovom oneskorení ako pri súbežnom priebehu, a teda môžeme odhadnúť, že zmena teploty sa na koncentrácií radónu preukáže po približne dvoch hodinách. Výsledkom pozorovaní a príslušnej analýzy OAR v závislosti od gradientu teploty bola zistená veľmi dobrá priemerná korelácia na úrovni ~0,92. Pri výbere pracovných dní bola získaná priemerná antikorelácia na úrovni ~0,21. Rozdiel v hodnotách bol pravdepodobne spôsobený pri pracovnej dobe vplyvom vetrania (využívania priestoru) a pri všetkých dňoch sa OAR zvyšuje prostredníctvom nasávania radónu napr. z podložia kvôli vzniknutému podtlaku. Jednotlivé korelačné koeficienty v rámci mesiacov sú uvedené v tab. 8.

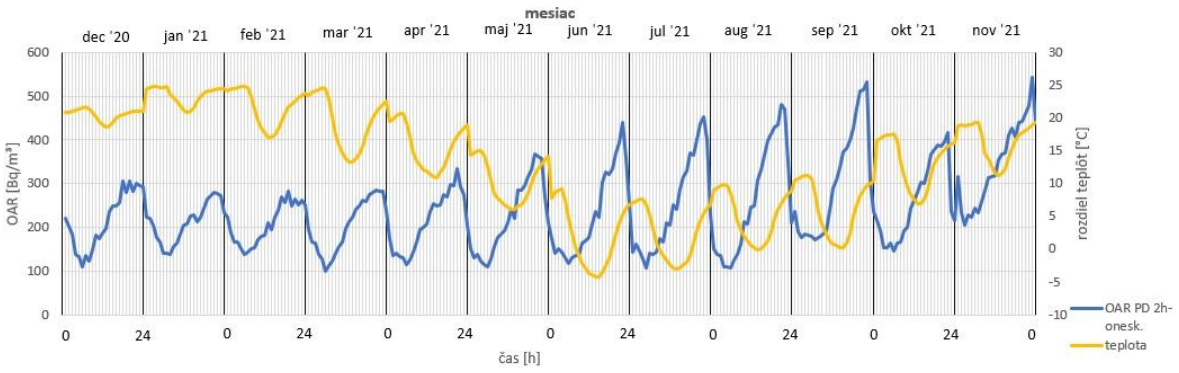
Tab. 8: Korelačné koeficienty medzi objemovou aktivitou radónu vo vnútornej atmosfére počas všetkých dní; počas pracovnej doby a rozdielom vnútornej a vonkajšej teploty počas mesiacov december 2020 až november 2021

Korelačný koeficient (R^2)		
Mesiac	**R^2 (OAR a rozdiel teplôt)**	**R^2 (OAR (pracovná doba) a rozdiel teplôt)**
december 2020	0,84	-0,17
január 2021	0,87	0,05
február 2021	0,95	-0,21

marec 2021	0,99	-0,31
apríl 2021	0,91	-0,42
máj 2021	0,93	-0,27
jún 2021	0,93	-0,11
júl 2021	0,92	-0,20
august 2021	0,95	-0,33
september 2021	0,93	-0,18
október 2021	0,95	-0,30
november 2021	0,92	-0,09



***Obr. 26**: Priebeh dennej vlny OAR s 2-hodinovým oneskorením (všetky dni) a rozdielu vnútornej a vonkajšej teploty (zdroj: autor práce)*



***Obr. 27:** Priebeh dennej vlny OAR s 2-hodinovým oneskorením (pracovné dni počas pracovnej doby 8:00-7:00) a rozdielu vnútornej a vonkajšej teploty (zdroj: autor práce)*

7.3.4 Analýza nárastových kriviek objemovej aktivity radónu

Objemová aktivita radónu vo vnútorných priestoroch je časovo aj priestorovo variabilná. Vo všeobecnosti sa mení v závislosti od troch procesov, a to od rýchlosti prísunu radónu, násobnosti

výmeny ovzdušia a rádioaktívneho rozpadu radónu. Oproti štandardnej miere vetrania je rozpad radónu zanedbateľný, a teda v prvom priblížení je pozornosť sústredená na prvé dva javy. Ich priebeh je závislý od tlakového rozdielu medzi vonkajším a vnútorným prostredím, čo významne ovplyvňuje okamžitú hodnotu objemovej aktivity radónu (Baskaran, 2016).

Základná charakteristika analýzy nárastových kriviek

Analýza nárastových kriviek je založená na práci A. Froňku, ktorý z časovej charakteristiky objemovej aktivity radónu v miestnosti odhaduje rýchlosť prísunu radónu do miestnosti ako aj jeho ventilačnú rýchlosť (Froňka, 2015). V modeli sú dané veličiny považované za konštantné počas vybraného časového intervalu. Regresnú analýzu, ktorá vychádza zo vzťahu (26), možno najvýhodnejšie použiť pri modelovom príklade s minimálnou objemovou aktivitou radónu v čase t_0 a následnom náraste aktivity po uzavretí miestnosti. Vplyv činnosti užívateľa je potlačený a OAR rastie, až kým po 10 - 60 hodinách nedosiahne rovnovážny stav (Froňka, 2015). Vzťah, ktorý opisuje časový nárast OAR, vychádza z analytického riešenia diferenciálnej rovnice prvého stupňa s počiatočnou podmienkou $A(t = 0) = A_0$.

$$A(t) = A_0 + \left(\frac{R}{\lambda}\right).(1 - e^{-\lambda t}), \tag{26}$$

kde R je rýchlosť prísunu radónu do miestnosti $[Bq.m^{-3}.h^{-1}]$, λ je ventilačná rýchlosť $[h^{-1}]$ a A_0 je OAR v čase $t = 0$ $[Bq.m^{-3}.h^{-1}]$. Na základe uvedeného vzťahu je možné získané údaje objemovej aktivity radónu spracovať prostredníctvom regresnej analýzy, a tak odhadnúť rýchlosť prísunu radónu.

V prípadoch, kde je ventilačná rýchlosť $\lambda \leq 0{,}02\ h^{-1}$, môžeme vzťah písať v tvare

$$A(t) = A_0 + (Rt), \tag{27}$$

a teda je nárastová krivka analyzovaná lineárne.

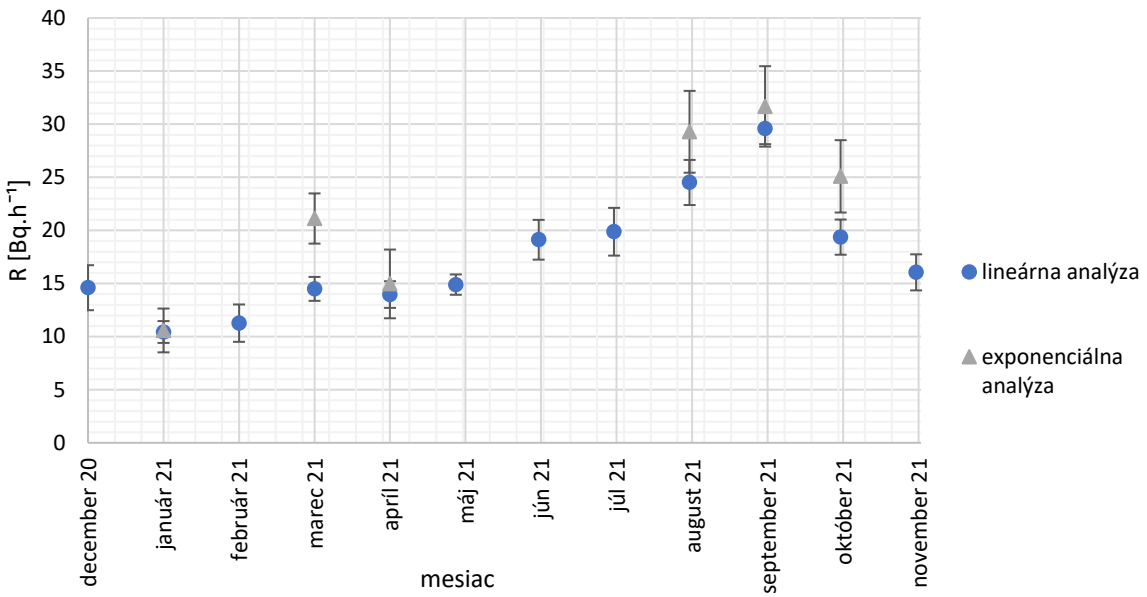
Rýchlosť prísunu radónu R

Pomocou vzťahov (26) a (27) boli na základe regresnej analýzy nárastových kriviek OAR vyhodnotené priemerné hodnoty rýchlosti prísunu radónu (tab. 9) znázornené na obr. 28. V prípade prekladania údajov exponenciálnou závislosťou boli kvôli nízkej ventilačnej rýchlosti vybrané iba nárasty v niektorých mesiacoch, a teda hodnotu rýchlosti prísunu radónu do miestnosti R bolo možné získať s dostatočnou presnosťou len pomocou lineárnej analýzy. Po vyvetraní miestnosti a skončení pracovnej doby dochádzalo k postupnému nárastu aktivity radónu, až kým nebol dosiahnutý saturovaný stav OAR v miestnosti, ktorý bol ovplyvnený ventilačnou rýchlosťou a dobou polpremeny. Analýza prebiehala vo vybraných dňoch, kedy bol potlačený vplyv vonkajších faktorov. Priemerné hodnoty

rýchlosti prísunu radónu sa pohybovali od 10,58±2,06 $Bq.m^{-3}.h^{-1}$ po 31,68±3,79 $Bq.m^{-3}.h^{-1}$ (exponenciálna analýza) a 10,44±1,03 $Bq.m^{-3}.h^{-1}$ po 29,59±1,47 $Bq.m^{-3}.h^{-1}$ (lineárna analýza), pričom k minimu došlo v mesiaci január a k maximu v septembri. Priemerná rýchlosť prísunu radónu dosiahla hodnotu 22,12±3,12 $Bq.m^{-3}.h^{-1}$ z exponenciálnej analýzy a 17,35±1,61 $Bq.m^{-3}.h^{-1}$ pomocou lineárnej analýzy. Korelácia s OAR bola vykonaná s úplnými údajmi z lineárnej analýzy s koeficientom na úrovni R^2~0,6±0,04. V porovnaní s priemernými aktivitami radónu, najnižšie priemerné objemové aktivity radónu boli získané v mesiaci december, február a marec, kedy hodnoty rýchlosti prísunu radónu do miestnosti patria k najnižším. Korelácia avšak nie je jednoznačná, z čoho môžeme predpokladať, že na výslednú objemovú aktivitu radónu vo vnútornej atmosfére vplýva súbežne veľké množstvo rozličných faktorov.

Tab. 9: Zhrnutie rýchlosti prísunu radónu *R* z lineárnej a exponenciálnej analýzy pre jednotlivé mesiace pri korelačnom koeficiente R^2

Mesiac	**Exponenciálna analýza**			**Lineárna analýza**		
	R [Bq.h^{-1}]	**neistota R [Bq. h^{-1}]**	**R²**	**R [Bq. h^{-1}]**	**neistota R [Bq. h^{-1}]**	**R²**
dec 20						
jan 21	10,58	2,06	0,90	14,61	2,12	0,88
feb 21				10,44	1,03	0,93
mar 21	21,12	2,36	0,99	11,27	1,76	0,85
apr 21	14,96	3,24	0,95	14,50	1,13	0,96
máj 21				13,96	1,25	0,95
jún 21				14,90	0,96	0,97
júl 21				19,12	1,87	0,93
aug 21	29,29	3,85	0,98	19,88	2,25	0,90
sep 21	31,68	3,79	0,99	24,51	2,12	0,94
okt 21	25,09	3,41	0,98	19,37	1,66	0,95
nov 21				16,05	1,70	0,92



Obr. 28: *Rýchlosti prísunu radónu získané z lineárnej a exponenciálnej analýzy pre jednotlivé mesiace (dáta spracované na denné vlny OAR za mesiac počas pracovných dní v čase pon.8:00 – pia.7:00 (zdroj: autor práce)*

7.4 Vyhodnotenie výsledkov

Kapitola 7 ponúka prehľad o správaní radónu vo vnútornej atmosfére budovy verejnej správy so zámerom spresniť metodiku určenia priemernej objemovej aktivity radónu vzhľadom na pracovnú dobu a dobu voľna a tak znížiť nepresnosť nadhodnotenia radiačného rizika od radónu stanoveného pomocou stopových meradiel. Kontinuálne meranie nám umožnilo získať údaje potrebné pre podrobnejšiu radónovú diagnostiku. Prostredníctvom analýzy jednotlivých meteorologických vplyvov je snahou zovšeobecniť poznatky o variáciách rýchlostí prísunu radónu do miestnosti a v budúcnosti tak prispieť k vzniku modelu koncentrácie radónu v uzavretých priestoroch. Jedným z ďalších zjednodušení pri určovaní priemerných hodnôt OAR je práve využitie nárastových kriviek objemovej aktivity radónu na základe rýchlosti prísunu radónu do domu.

Táto časť výskumnej činnosti skúma monitorovanie radónu v miestnosti mestského úradu v závislosti od meteorologických parametrov a využívania priestoru. Pomocou získaných údajov je možné skúmať sezónne a denné variácie OAR a tak ohodnotiť rozdiely v priemerných hodnotách koncentrácie radónu, pričom najnižšie priemerné hodnoty boli namerané v mesiacoch január, február a marec a najvyššia hodnota bola získaná v novembri. Nízka denná variabilita radónu bola pozorovaná v období december až apríl a vysokú dennú variabilitu vykazovali mesiace jún až september.

Objemová aktivita radónu je vo všeobecnosti rozdielna pri meraniach počas pracovnej doby, voľných dní alebo všetkých dní. Pri hodnotách objemových aktivít radónu počas víkendov a sviatkov

bola viditeľná nižšia variabilita aktivity, avšak počas pracovných dní sa hodnoty OAR menili počas dňa výraznejšie, čo bolo spôsobené pravidelným využívaním priestoru a vetraním (oknom, dverami). Maximálna hodnota OAR bola v ranných hodinách a s minimom vo večernom čase bez rozdielu na využívaní priestoru, no počas pracovných dní bolo maximum v neskorých hodinách až v noci a minimálna OAR bola v pracovnom čase dôsledkom vetrania.

Ohodnotenie rozdielu priemerných hodnôt v rámci jednotlivých dní bolo uskutočnené niekoľkými metódami (percentuálne, pomocou efektívnej dávky a prostredníctvom relatívnej amplitúdy). Najvyššie percentuálne nadhodnotenie pri porovnávaní OAR v pracovných dňoch a počas všetkých dní bolo zistené v mesiaci jún (105%), najnižšia hodnota (12%) bola dosiahnutá vo februári. Zhrnutie nadhodnocovania koncentrácie radónu v podobe efektívnej dávky preukázalo taktiež najväčší rozdiel v mesiaci jún, kde sa E_f počas všetkých dní rovnala 0,27 mSv, pričom s OAR počas pracovnej doby dosahovala dávka hodnotu len 0,13 mSv. Relatívne amplitúdy OAR počas víkendov sa pohybovali v intervale 0,79 až 0,92 a teda v porovnaní s pracovnými dňami (0,24 až 0,70) boli približne konštantné.

Pomocou analýzy nárastových kriviek boli zistené veľmi nízke hodnoty ventilačnej rýchlosti, rýchlosť prísunu radónu do miestnosti vykazovala sezónne variácie s maximom v septembri a minimom v januári. Výsledkom pozorovaní a príslušnej analýzy OAR v závislosti od gradientu teploty bola zistená veľmi dobrá priemerná korelácia na úrovni ~0,92. Pri výbere pracovných dní bola získaná priemerná antikorelácia na úrovni ~0,21. Rozdiel v hodnotách bol pravdepodobne spôsobený pri pracovnej dobe vplyvom vetrania (využívania priestoru) a pri všetkých dňoch sa OAR zvyšuje prostredníctvom nasávania radónu napr. z podložia kvôli vzniknutému podtlaku. Na podrobnejšie skúmanie priemerných hodnôt rýchlosti prísunu radónu do miestnosti a jeho ventilačnej rýchlosti je potrebné vykonať experiment vo viacerých miestnostiach pracoviska a s jeho pravidelným užívaním, pričom bude možné presnejšie určiť minimálnu aktivitu A_0.

Cieľom merania bolo pozorovať koncentráciu radónu vo vnútornej atmosfére počas celého roku (denné a sezónne variácie, meteorologické vplyvy, vplyv ľudskej činnosti, ventilačné rýchlosti), a tak zistiť k akému nadhodnoteniu môže dochádzať v porovnaní celkovej OAR ku OAR iba počas pracovnej doby. Testovanie rôznorodého metodiky a následného spracovania merania môže v budúcnosti zjednodušiť predikovanie zvýšenej objemovej aktivity radónu vo vnútornej atmosfére a tak presnejšie odhadnúť radiačné riziko, ktorému je jedinec vystavený.

8 Harmonická analýza objemovej aktivity radónu vo vnútornom ovzduší

8.1 Použité nástroje merania

8.1.1 Meracie zariadenie RamaRn

Na monitorovanie radónu s cieľom určiť jeho objemovú aktivitu pomocou harmonickej analýzy sme využili meracie zariadenie RamaRn. Patrí medzi pasívne detektory, ktoré sa využívajú na stanovenie priemernej hodnoty OAR a jeho hlavnou súčasťou je difúzna komora a stopový detektor KODAK. Základné parametre radónovej sondy sú uvedené v tab. 10.

Používané stopové detektory radónu Ramarn boli zakúpené a vyhodnocované SÚJCHBO Milín v Českej republike.

Tab. 10: Parametre radónovej sondy

Objem komory	609,9 x 10^{-6} m^3
Účinnosť detekcie	2,4 ± 0,1 stop·cm-2/kBq·h·m-3
Rozsah merania	0,08 – 160 MBq·h·m-3
Minimálna detekovateľná aktivita	0,027 MBq·h·m-3
Optimálna doba použitia	2 – 14 mesiacov

8.1.2 Vzťah na určenie OAR prostredníctvom harmonickej analýzy

Harmonická analýza vychádza zo vzťahu medzi priemernými hodnotami OAR a vonkajšou teplotou počas jednotlivých mesiacov

$$A_{Rn,m} = A_{Rn,r}\left[1 + Acos\left(\frac{2\pi}{P}t - \varphi\right)\right], \tag{28}$$

kde $A_{Rn,m}$ je priemerná 3-mesačná/mesačná hodnota OAR, P označuje periódu cyklu, t je čas od začiatku cyklu a φ znamená fázu.

Pritom pre $A_{Rn,m}$, platí

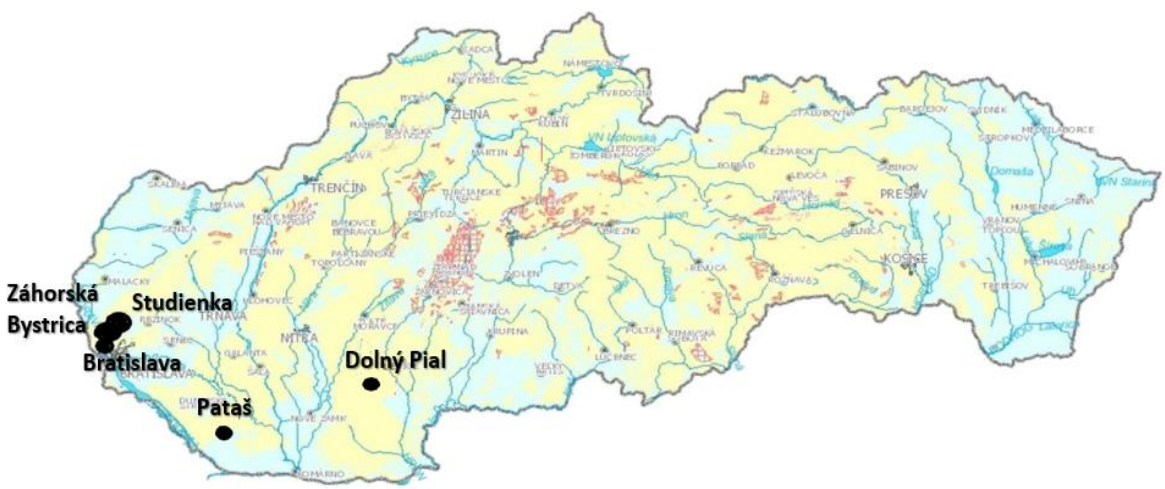
$$A_{Rn,m} = A_{Rn,\,min} + K\Delta T_i\,, \tag{29}$$

kde $A_{Rn,min}$ je minimálna priemerná mesačná OAR v roku, ΔT_i prírastok teploty a K označuje koeficient úmernosti. Potom $A_{Rn,r}$ môžeme vyjadriť vzťahom

$$A_{Rn,r} = \frac{A_{Rn,min} + K\Delta T_1}{\left[1 + A\cos\left(\frac{2\pi}{P}t - \varphi\right)\right]}. \tag{30}$$

8.2 Pozorované lokality

Meranie prebiehalo vo vnútornej atmosfére obývaných domov v západnej a v juhozápadnej časti Slovenska. Pozorované miesta boli vybrané na základe geologických podmienok a mapy radónového rizika, zostavenej pomocou monitorovania pôdneho radónu. Meranie prebiehalo v rozsahu približne jedného roka v trojmesačných alebo mesačných intervaloch.



Obr. 29: *Mapa radónového rizika (ozn. modrá - nízke radónové riziko, žltá – stredné radónové riziko, červená – vysoké radónové riziko, čierne kruhy – pozorované lokality) (zdroj: autor práce)*

8.3 Spracovanie nameraných údajov

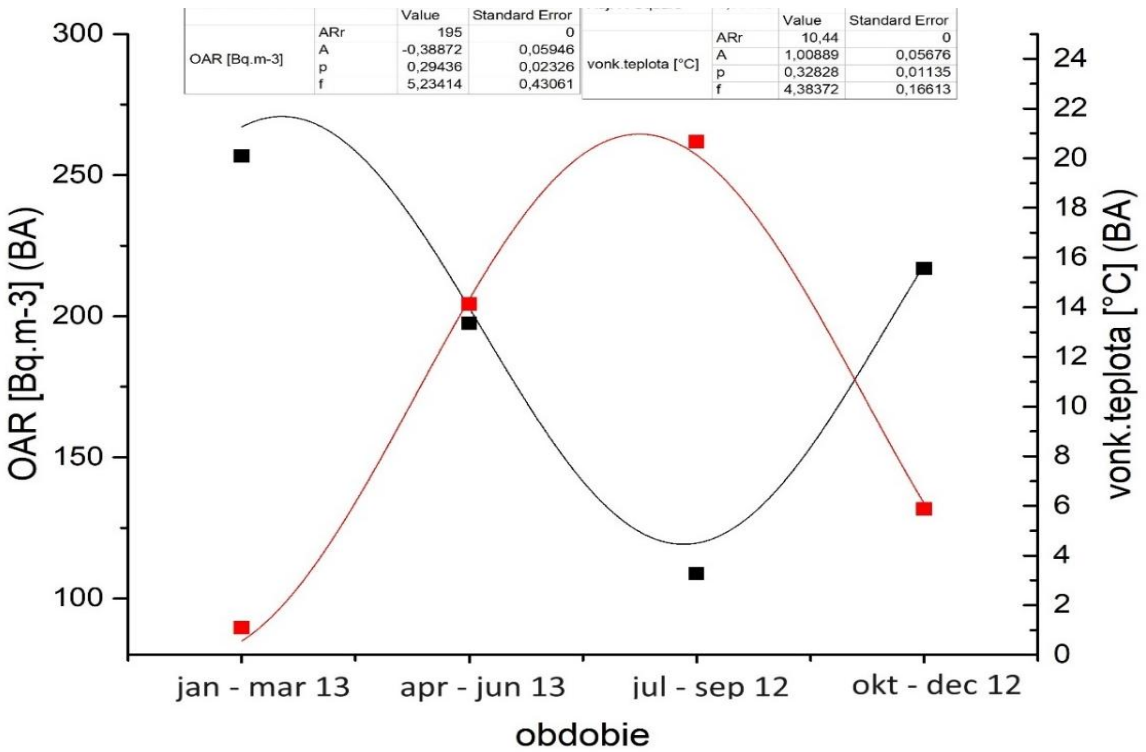
Na základe mapy radónového rizika sme merali objemovú aktivitu radónu vo vybraných domoch v západnej a juhozápadnej časti Slovenska, a to na piatich lokalitách (obr. 29): V Bratislave, Studienke, Záhorskej Bystrici, Dolnom Piali a Pataši. Pozorovaním vlnového priebehu sezónnych variácií objemovej aktivity radónu a vonkajšej teploty a ich vzájomnej antikorelácií bol nájdený vzťah pre priemernú ročnú hodnotu OAR. Vo všeobecnosti bola maximálna hodnota pri meraní OAR počas zimy, minimum bolo dosahované v letných mesiacoch. Pomocou daného vzťahu sme tak mohli zistiť koeficient úmernosti počas jednotlivých mesiacov s minimom vo februári a maximom v auguste v Pataši

a s minimom v apríli a maximom v novembri v Dolnom Piali. Prostredníctvom regresnej analýzy sme získali parametre opisujúce vzťah medzi OAR a vonkajšou teplotou, z ktorých sme ďalej určili priemernú aktivitu za rok. Porovnaním priemernej hodnoty OAR za rok získanej z harmonickej analýzy a OAR získanej pomocou sezónnych korekčných faktorov vidíme na niektorých lokalitách (Bratislava, Záhorská Bystrica) pomerne dobrú zhodu (v rámci intervalu neistôt).

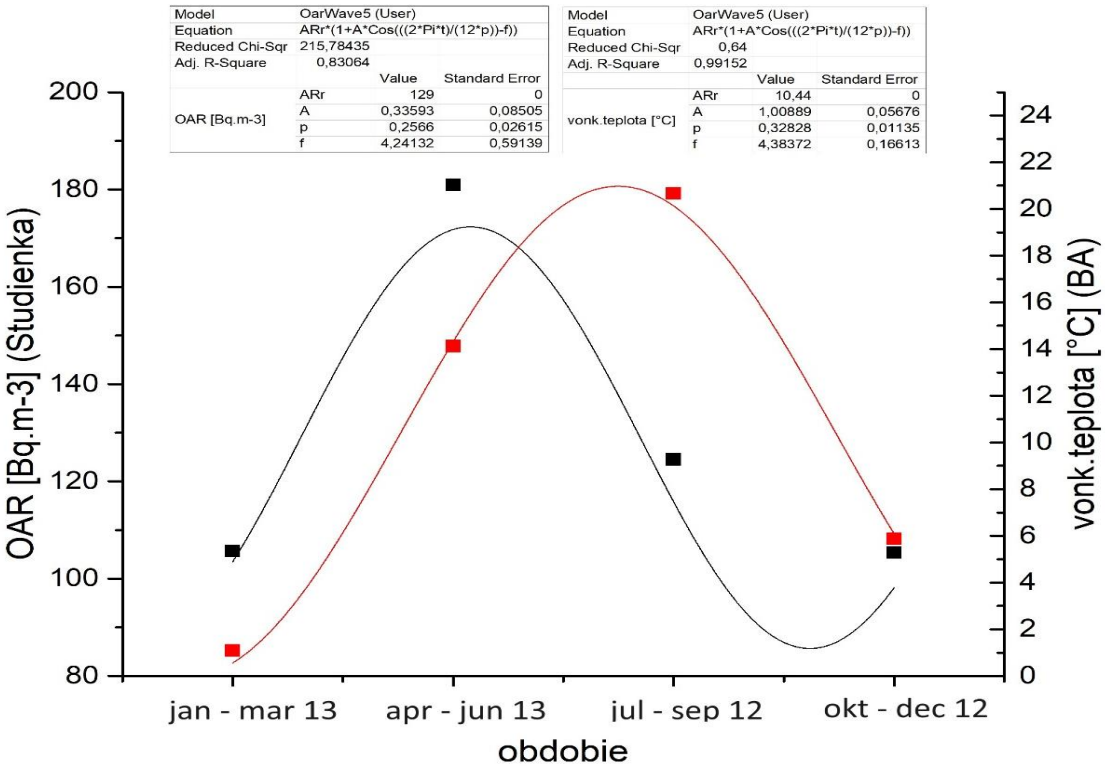
8.3.1 Priemerná OAR a priemerná vonkajšia teplota

Na obr. 30 – 32 sú znázornené namerané priemerné trojmesačné hodnoty objemovej aktivity a vonkajšej teploty na lokalitách v Bratislave, Studienke a Záhorskej Bystrici. Na obr. 33 a 34 sú znázornené namerané priemerné mesačné hodnoty objemovej aktivity a vonkajšej teploty na lokalitách v Dolnom Piali a Pataši.

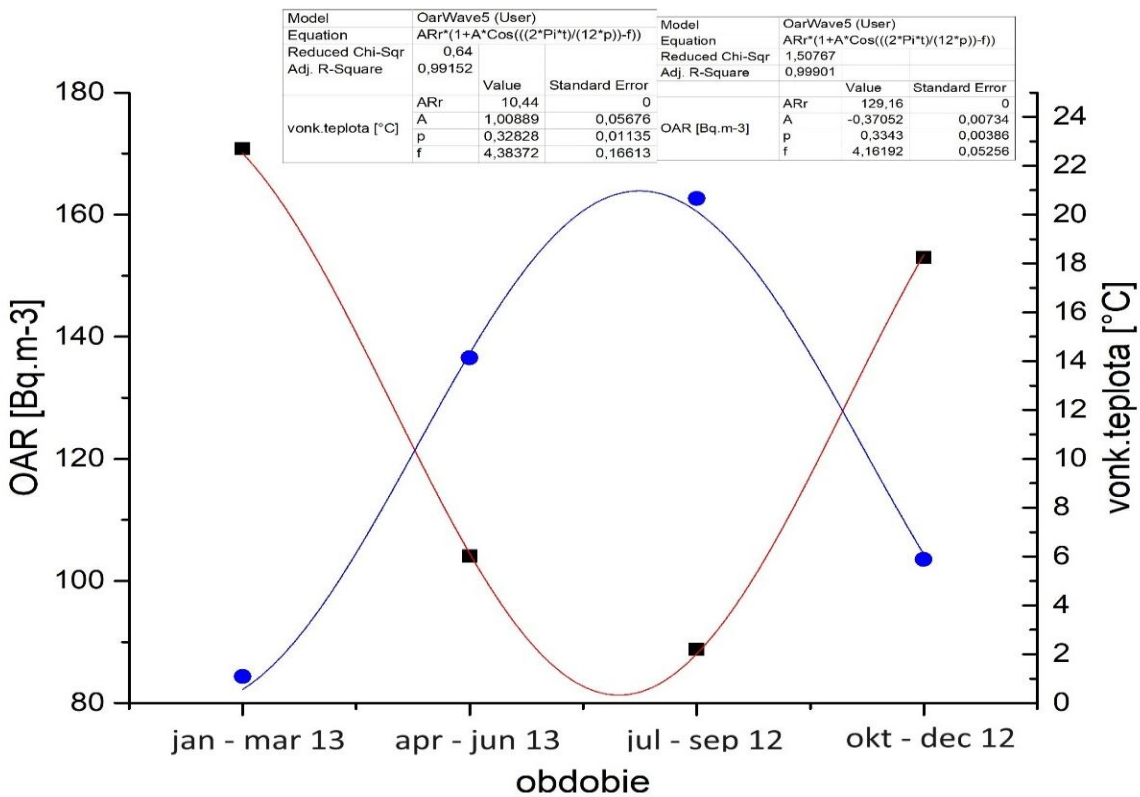
Vďaka antikorelácií objemovej aktivity a vonkajšej teploty bolo ďalej možné namerané údaje analyzovať pomocou vzťahu (28) a získať tak ostatné parametre vo vzťahu (tab. 11 a 12).



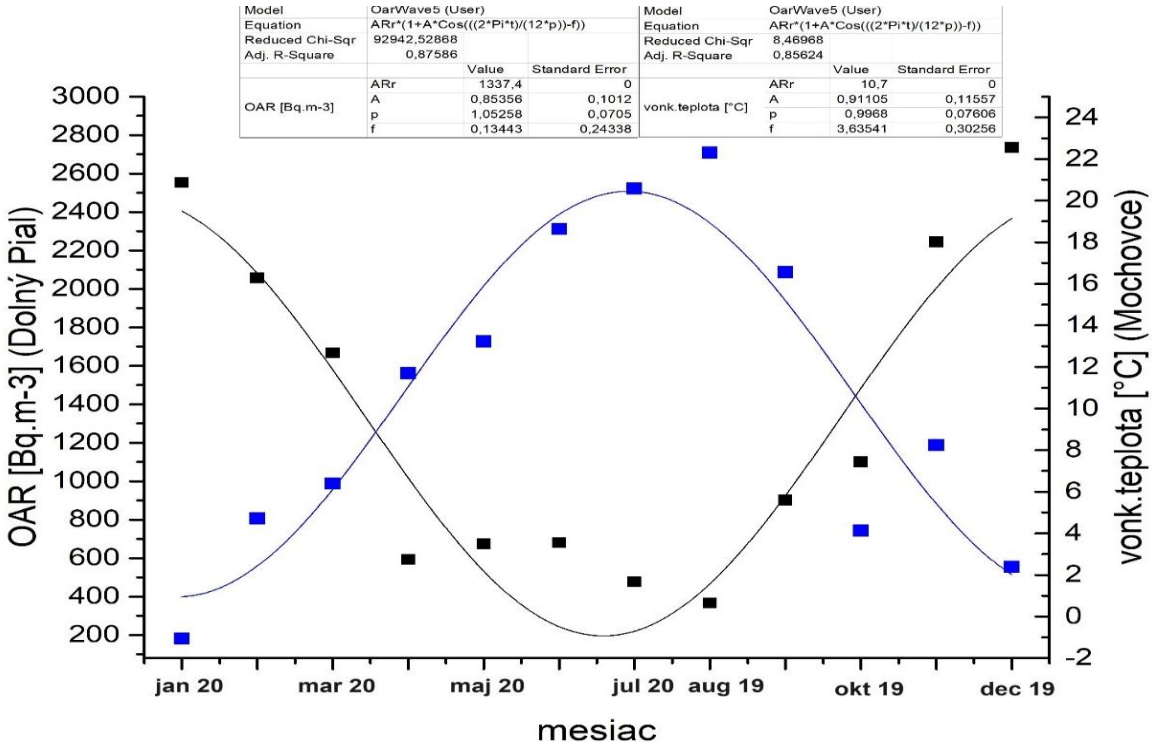
Obr. 30: *Priemerné trojmesačné hodnoty OAR a vonkajšej teploty namerané v Bratislave (zdroj: autor práce)*



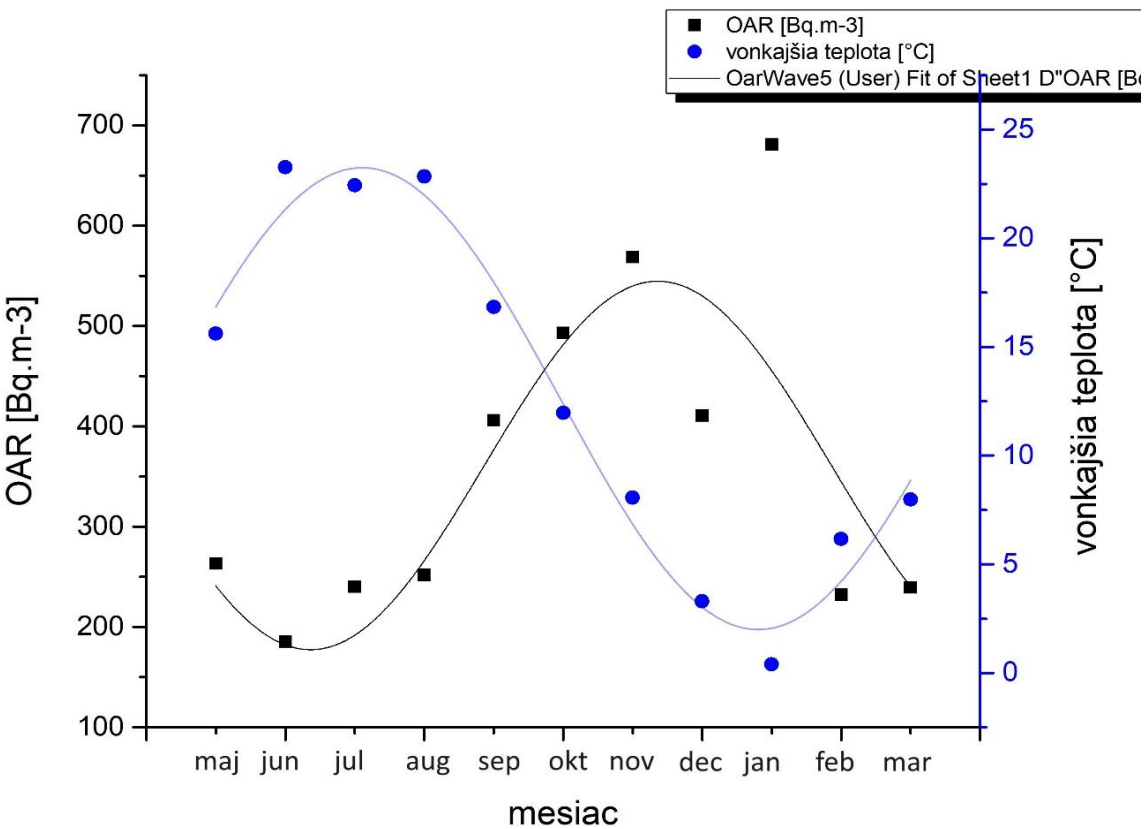
Obr. 31: *Priemerné trojmesačné hodnoty OAR a vonkajšej teploty namerané v Studienke (zdroj: autor práce)*



Obr. 32: *Priemerné trojmesačné hodnoty OAR a vonkajšej teploty namerané v Záhorskej Bystrici (zdroj: autor práce)*



Obr. 33: *Priemerné mesačné hodnoty OAR a vonkajšej teploty namerané v Dolnom Piali (zdroj: autor práce)*



Obr. 34: *Priemerné mesačné hodnoty OAR a vonkajšej teploty namerané v Pataši (zdroj: autor práce)*

Tab. 11: Získané parametre OAR z harmonickej analýzy zo vzťahu (28) pre lokality Bratislava, Studienka, Záhorská Bystrica, Dolný Pial a Pataš

Lokalita	OAR (ročný priemer) [Bq.m^{-3}]	Amplitúda	Perióda	Fáza	R^2
Bratislava	195 ± 5	0,39 ± 0,06	0,29 ± 0,02	5,23 ± 0,43	0,93
Studienka	129 ± 7	-0,34 ± 0,09	0,26 ± 0,03	4,24 ± 0,6	0,83
Záhorská Bystrica	129 ± 2	-0,37 ± 0,01	0,33 ± 0,01	4,16 ± 0,05	0,99
Dolný Pial	1337 ± 13	0,85 ± 0,10	1,05 ± 0,08	0,13 ± 0,24	0,88
Pataš	361 ± 54	-0,51 ± 0,12	0,83 ± 0,10	1,49 ± 0,54	0,61

Tab. 12: Získané parametre vonkajšej teploty z harmonickej analýzy zo vzťahu (28) pre lokality Bratislava, Studienka, Záhorská Bystrica, Dolný Pial a Pataš

Lokalita	Vonkajšia teplota (ročný priemer) [°C]	Amplitúda	Perióda	Fáza	R^2
Bratislava, Studienka, Záhorská Bystrica	10,4 ± 0,6	1,01 ± 0,06	0,33 ± 0,01	4,40 ± 0,17	0,99
Dolný Pial	10,7 ± 3,4	0,91 ± 0,11	0,99 ± 0,07	3,64 ± 0,30	0,86
Pataš	12,6 ± 0,5	-0,84 ± 0,05	-0,95 ± 0,03	1,43 ± 0,13	0,97

Získané korelačné koeficienty medzi hodnotami objemovej aktivity radónu a vonkajšej teploty pre dané lokality sú uvedené v tab. 13. Jasná antikorelácia daných veličín je preukázaná v lokalitách Záhorská Bystrica, Bratislava a Dolný Pial, pričom v Pataši je antikolerácia výrazne nižšia. Avšak v lokalite Studienka antikorelácia preukázaná nebola, čo mohlo byť spôsobené mnohými faktormi, ako je činnosť človeka v pobytovom priestore alebo stavebná charakteristika domu. Napriek tomu sme meranie z analýzy nevylúčili, aby sme výsledky mohli pozorovať aj v prípadoch, kde nie sú naše podmienky merania ideálne.

Tab. 13: Korelačný koeficient medzi nameranými hodnotami OAR a vonkajšej teploty pre lokality Bratislava, Studienka, Záhorská Bystrica, Dolný Pial a Pataš

Lokalita	Korelačný koeficient R^2
Bratislava	- 0,95 ± 0,05
Studienka	0,51 ± 0,49
Záhorská Bystrica	- 0,98 ± 0,01
Dolný Pial	- 0,85 ± 0,0004
Pataš	- 0,62 ± 0,04

8.3.2 Koeficient úmernosti

Na základe vzťahu (29) je ďalej určený koeficient úmernosti, ktorý je daný pomerom rozdielu priemernej mesačnej hodnoty OAR $A_{Rn,m}$ s minimálnou priemernou mesačnou OAR v roku $A_{Rn,min}$ a prírastkom teploty ΔT_i. Vypočítané hodnoty sú získané pre mestá Pataš a Dolný Pial z dôvodu integrálneho merania OAR za jeden mesiac počas roka (tab. 15 a 17).

Minimálna OAR v Pataši je získaná v júni v roku 2019 s hodnotou $\mathrm{OAR} = 185{,}32\ Bq.m^{-3}$ a v Dolnom Piali v august v roku 2019 s hodnotou $\mathrm{OAR} = 366{,}5\ Bq.m^{-3}$ (tab. 14, 16).

Tab. 14: Priemerné mesačné hodnoty vonkajšej teploty a OAR v Pataši

Mesiac	Vonkajšia teplota [°C]	OAR [Bq/m³]
január 2020	0,40	681
február 2020	6,16	232
marec 2020	7,98	239
máj 2019	15,61	263
jún 2019	23,26	185
júl 2019	22,43	240
august 2019	22,84	252
september 2019	16,84	406
október 2019	11,96	493
november 2019	8,06	569
december 2019	3,30	411

Tab. 15: Vypočítané hodnoty koeficientu úmernosti K pre merania v Pataši

Mesiac	**K [Bq/m³(°C)]**
január 2020	21,7
február 2020	2,7
marec 2020	3,5
máj 2019	10,2
jún 2019	-
júl 2019	66,0
august 2019	158,9
september 2019	34,3
október 2019	27,2
november 2019	25,2
december 2019	11,3

Tab. 16: Priemerné mesačné hodnoty vonkajšej teploty a OAR v Dolnom Piali

Mesiac	**Vonkajšia teplota [°C]**	**OAR [Bq/m³]**
január 2020	-1,1	2554
február 2020	4,7	2057
marec 2020	6,4	1667
apríl 2020	11,7	594
máj 2020	13,2	674
jún 2020	18,6	681
júl 2020	20,6	477
august 2019	22,3	367
september 2019	16,6	901
október 2019	4,1	1100
november 2019	8,2	2244
december 2019	2,4	2735

Tab. 17: Vypočítané hodnoty koeficientu úmernosti *K* pre merania v Dolnom Piali

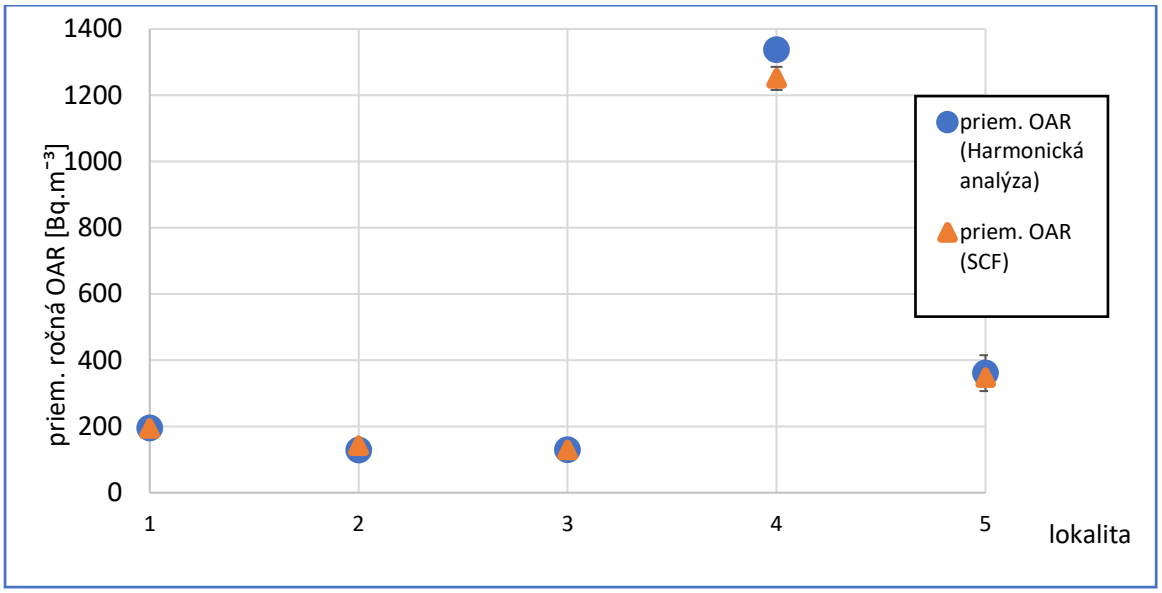
Mesiac	K [Bq/m³(°C)]
január 2020	93,5
február 2020	96,1
marec 2020	81,8
apríl 2020	21,4
máj 2020	33,8
jún 2020	85,0
júl 2020	64,7
august 2019	-
september 2019	93,8
október 2019	40,3
november 2019	133,1
december 2019	119,0

8.3.3 Porovnanie priemerných hodnôt OAR získaných pomocou SKF a harmonickej analýzy

Na určenie správnosti harmonickej analýzy sú priemerné ročné hodnoty OAR porovnávané s hodnotami získanými pomocou sezónnych korekčných faktorov (sezónnym korekčným faktorom sa podrobnejšie venujeme v kap. 9). Výsledky sú zobrazené v tab. 18 a na obr. 35, pričom sú hodnoty v celkom dobrej zhode v rámci intervalu neistôt.

Tab. 18: Priemerné OAR získané pomocou harmonickej analýzy (HA) a sezónnych korekčných faktorov (SKF)

Lokalita	Priemerná OAR získaná pomocou HA [Bq.m³]	Priemerná OAR získaná pomocou SCF [Bq.m³]
Bratislava	195 ± 5	194 ± 14
Studienka	129 ± 7	141 ± 12
Záhorská Bystrica	129 ± 2	129 ± 11
Dolný Pial	1337 ± 13	1251 ± 35
Pataš	361 ± 5	347 ± 19



Obr. 35: *Priemerné OAR získané pomocou harmonickej analýzy (HA) a sezónnych korekčných faktorov (SCF) (zdroj: autor práce)*

8.4. Vyhodnotenie výsledkov

Na základe mapy radónového rizika sme vybrali lokality v západnej a juhozápadnej časti Slovenska, kde je vyšší radónový potenciál a tým pravdepodobnosť zvýšeného výskytu rodinných domov s OAR presahujúcou zákonom stanovenú referenčnú úroveň. . Pomocou vlnového priebehu sezónnych variácií objemovej aktivity radónu a vonkajšej teploty a ich vzájomnej antikorelácie bol nájdený vzťah pre priemernú ročnú hodnotu OAR, vďaka ktorému bolo možné odhadnúť priemernú ročnú aktivitu radónu v domoch.

Spracovanie nameraných údajov priemerných hodnôt OAR spĺňalo predpoklady správania radónu, kde maximálna hodnota OAR bola nameraná počas zimy a minimum bolo namerané v letných mesiacoch. Pomocou daného vzťahu sme tiež zistili koeficient úmernosti počas jednotlivých mesiacov s minimom vo februári a maximom v auguste v Pataši a s minimom v apríli a maximom v novembri v Dolnom Piali.

Prostredníctvom regresnej analýzy sme získali parametre opisujúce vzťah medzi OAR a vonkajšou teplotou, z ktorých sme ďalej určili priemernú aktivitu za rok. Porovnaním priemernej hodnoty OAR za rok získanej z harmonickej analýzy a OAR získanej pomocou sezónnych korekčných faktorov vidíme na niektorých lokalitách (Bratislava, Záhorská Bystrica) pomerne dobrú zhodu (v rámci intervalu neistôt). Koeficient úmernosti počas jednotlivých mesiacov bol určený s minimálnou hodnotou vo februári a maximálnou hodnotou v auguste v Pataši a v Dolnom Piali s minimom v apríli a maximom v novembri.

9 Použitie sezónnych korekčných faktorov pre krátkodobé merania

Vo všeobecnosti platí, že objemová aktivita radónu vykazuje v priebehu roka sezónne variácie, pričom minimálnu hodnotu dosahuje spravidla v lete a maximálnu hodnotu v zimných mesiacoch. Sezónne korekčné faktory (SKF) umožňujú s istou presnosťou odhadnúť priemernú ročnú hodnotu OAR z meraní, ktorých trvanie je podstatne kratšie ako jeden rok. Okrem výkyvov v hodnotách OAR v priebehu roka môžu korekčné faktory pre danú lokalitu alebo oblasť do istej miery postihnúť aj špecifické faktory oblasti, napr. jej geologické charakteristiky.

9.1 Použité metódy

Na monitorovanie radónu s cieľom určiť jeho objemovú aktivitu pomocou harmonickej analýzy sme opätovne využili meracie zariadenie RamaRn, ktorého bližšia charakteristika je uvedená v kap. 8.1.1.

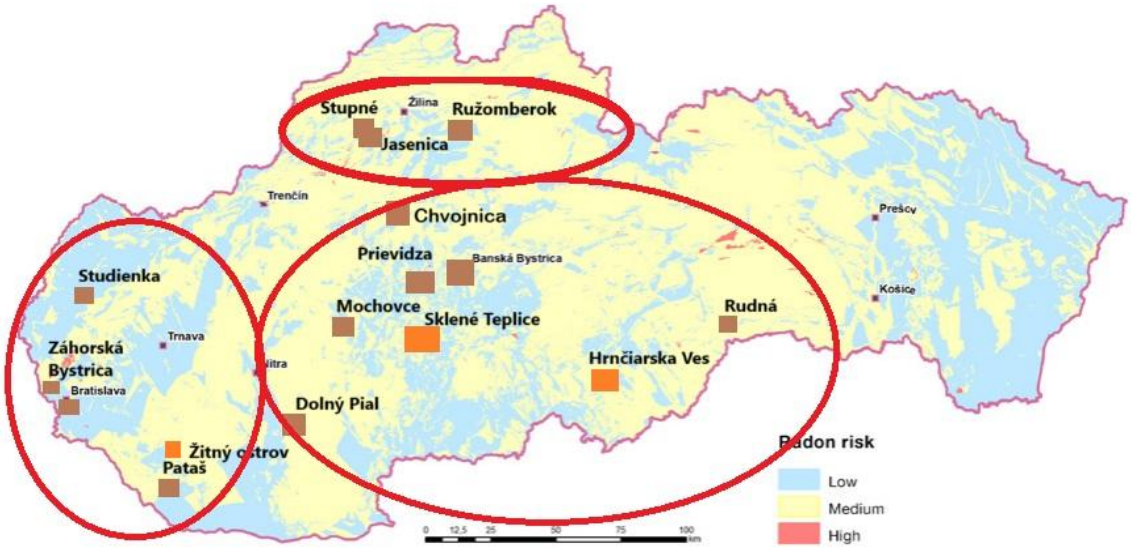
Výpočet sezónnych korekčných faktorov bol založený na práci M. Müllerovej z roku 2021, pričom sme využili získané výsledky hodnôt SKF na porovnanie. Vzťah a charakteristika výskumu je opísaná v kap. 5.

9.2 Pozorované lokality

Merania sa uskutočnili vo vnútorných priestoroch 151 obývaných domov na západe, stredozápade a severozápade Slovenska. Pozorované lokality boli vybrané na základe geologických podmienok a úrovne rizika radónu podľa mapy pôdneho radónového potenciálu. Merania prebiehali ideálne počas obdobia jedného roka (v niektorých prípadoch kratšie ako jeden rok) v trojmesačných intervaloch.

9.3 Spracovanie nameraných údajov

Pozorovanie a analýza sezónnych korekčných faktorov boli uskutočnené v rámci dvoch častí výskumu. Prvotná štúdia (kap. 9.3.1) sa venovala určeniu SKF pre západné Slovensko s rozdelením podľa úrovne radónového potenciálu a v kap. 9.3.2 boli určené SKF podľa štúdie M. Müllerovej (2021) v 151 domov v troch rôznych oblastiach Slovenska.



Obr. 36: *Mapa radónového rizika s vyznačenými lokalitami, kde prebiehali merania (modrá – nízka úroveň radónového; rizika žltá – stredná úroveň radónového rizika; červená – vysoká úroveň radónového rizika) (zdroj: autor práce)*

9.3.1 Použitie sezónneho korekčného faktora

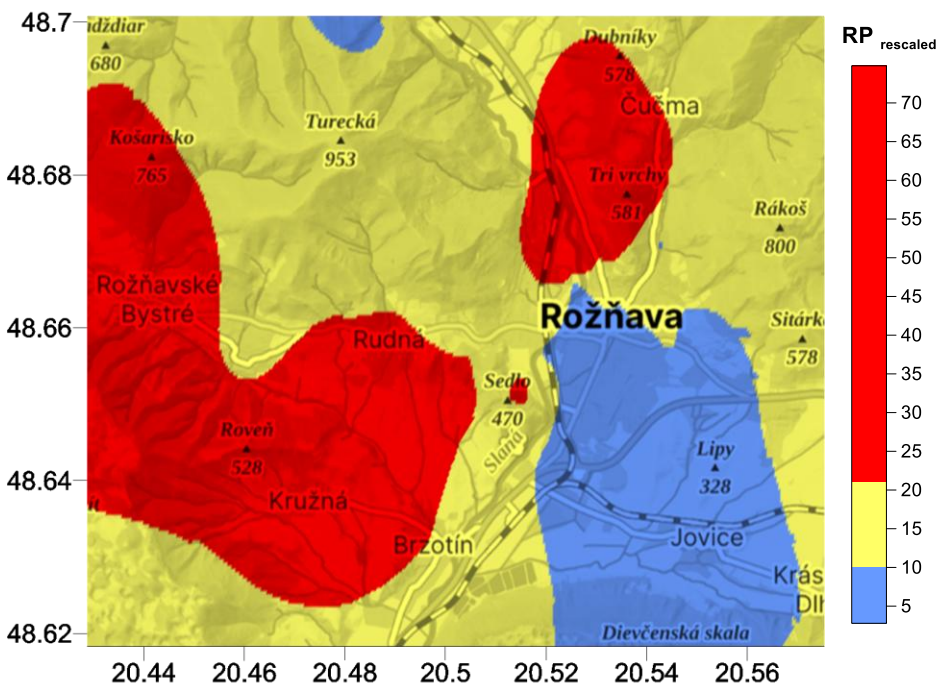
Na Slovensku boli prvé sezónne korekčné faktory (SKF) stanovené v pilotnej štúdií pre západné Slovensko (Müllerová, 2022). Na ich určenie boli použité najmä údaje získané v rámci riešenia V4 projektu: „Harmonization of determining the radiation dose of the population originating from radon, in V4 countries“ (Müllerová, 2014; Müllerová, 2016). V štúdií (Müllerová, 2022) bolo monitorovaných 56 miestností v 33 domoch v priebehu celého roka v 3-mesačných meracích intervaloch. Boli určené predbežné korekčné faktory pre obdobia: jar k_3 = (1,15 ± 0,25), leto k_6 = (1,48 ± 0,31), jeseň k_9 = (0,86 ± 0,18) a zima k_{12} = (0,78 ± 0,17). Ako najvhodnejšie pre určenie priemernej ročnej hodnoty sa ukázali 3-mesačné merania v zimnom období (december-február) a zimný sezónny korekčný faktor.

V priebehu rokov 2022 až 2023 sme vykonali merania objemovej aktivity radónu v ďalších vytipovaných lokalitách s predikovaným nízkym, stredným a vysokým radónovým potenciálom pôd. Výsledky sme publikovali v článku (Müllerová, 2025) uvedeného v Prílohe č. 1 tejto dizertačnej práce. Celkovo bolo monitorovaných 79 izieb (v 42 domoch) počas celého roka. Vo väčšine domov sezónna variácia radónu dosahovala maximum v jesenných a zimných mesiacoch. Avšak v piatich prípadoch bol ročný priebeh OAR netypický. V jednej miestnosti z dvoch v rámci jedného domu bolo namerané zimné minimum, v dvoch ďalších prípadoch bola v jednej miestnosti z dvoch trojnásobne zvýšená hodnota na jeseň oproti ostatným meracím obdobiam a v jednom prípade v oboch miestnostiach jedného domu, bolo namerané zimné minimum, pričom v ostatných ročných obdobiach bola táto koncentrácia

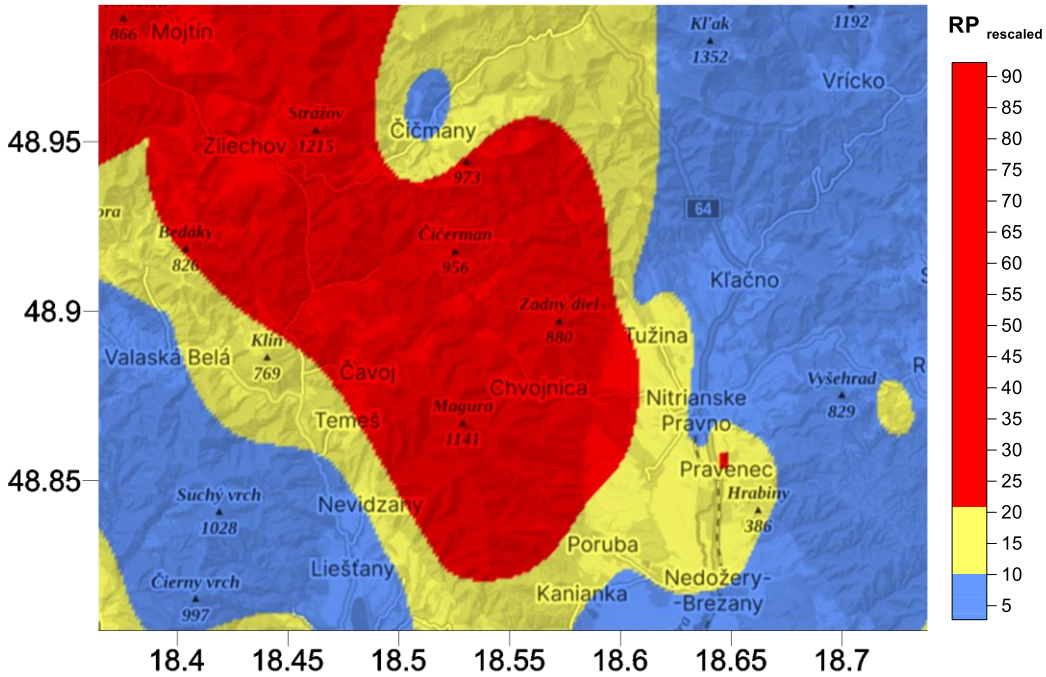
prakticky konštantná. Tieto miestnosti boli vylúčené z ďalších analýz. Na overenie SKF pre nezávislé lokality boli použité údaje zo 74 izieb (41 domov).

Monitorovanie bolo uskutočnené v obciach s predikovaným vysokým radónovým potenciálom: Rudná (obr. 37) a Chvojnica (obr. 38), so stredným radónovým potenciálom: Ponícka Huta a Hiadeľ (obr. 39) a s nízkym radónovým potenciálom: Malachov, Poníky, Kordíky, Riečka, Horná Mičiná a Dúbravica (obr. 39).

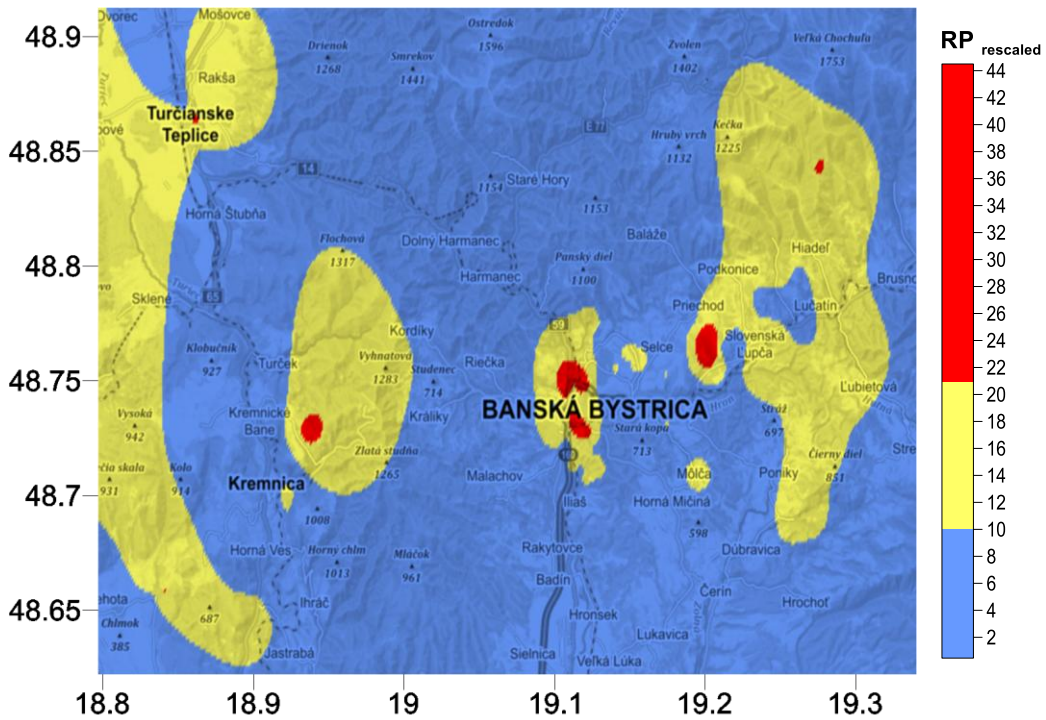
Mapy predikovaného radónového potenciálu (RP) boli vykreslené na základe práce (Neznal, 2004) s modifikovanou stupnicou RP. K tomu boli využité dáta meraní objemovej aktivity ^{222}Rn v pôdnom vzduchu v hĺbke 0,8 m, ako aj plynopriepustnosti pôdy (stanovená zo zrnitostnej analýzy pôdnych vzoriek na základe percentuálneho zastúpenia jemnej frakcie (f < 63 μm)) prevzaté z mapového serveru Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra (Müllerová, 2009; Bulko, 2021). Pre účely stanovenia hodnôt RP boli využité tri diskrétne publikované hodnoty pre nízku ($k = 5{,}2.10^{-14}$ m^2), strednú ($k = 1.10^{-12}$ m^2), resp. vysokú ($k = 4.10^{-11}$ m^2) plynopriepustnosť pôdy (Brandýsová, 2022; Neznal 2004). Pre vizualizáciu máp spojitej distribúcie hodnôt RP bola použitá interpolačná metóda „*kriging*“ v geoštatistickom softvéri *Surfer 12* (Surfer. 2012).



Obr. 37:. *Lokalita merania s predikovaným vysokým radónovým potenciálom – obec Rudná (zdroj: autor práce)*



Obr. 38:. *Lokalita merania s predikovaným vysokým radónovým potenciálom – obec Chvojnica (zdroj: autor práce)*



Obr. 39: *Lokality merania s predikovaným nízkym a stredným radónovým potenciálom (zdroj: autor práce)*

V tab. 19 - 21 sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty objemovej aktivity radónu na základe zimného sezónneho korekčného faktora.

Tab. 19: OAR určená pomocou zimného SKF v lokalitách s nízkym RP

Nameraný priemer	sigma	Dopočet (k12 = 0,78)	sigma
75	30	55	11
106	31	51	11
289	64	179	37
239	44	164	34
236	53	207	43
244	45	230	48
175	45	164	34
183	41	203	42
248	46	218	45
198	43	148	31
74	34	70	15
305	53	320	66
233	41	187	39
256	50	203	42
128	36	117	24
126	38	148	31
139	43	78	16
153	43	86	18
65	31	23	5
60	28	16	3
49	24	27	6
138	40	78	16
203	53	156	32
215	58	203	42
228	49	211	44
175	44	211	44
145	48	117	24
65	31	31	6
113	34	23	5
69	40	35	7
118	35	62	13
264	50	242	50
449	61	476	99
133	40	62	13
91	34	51	11
800	89	780	162
849	95	936	194
128	39	125	26
164	43	187	39
99	36	94	19
86	33	125	26
190	43	203	42
464	59	632	131
210	45	179	37
191	44	164	34
168	41	117	24
214	41	234	49

Tab. 20: OAR určená pomocou zimného SKF v lokalite Rudná

Nameraný priemer	sigma	Dopočet (k12 = 0,78)	sigma
113	33	62	13
95	25	55	11
76	29	51	11
86	28	78	16
155	39	140	29
83	34	39	8
56	29	35	7
133	38	101	21
120	34	125	26
68	31	23	5
199	48	183	38
230	43	242	50
106	29	117	24
243	43	250	52
259	44	254	53
308	44	312	65
321	43	324	67
155	43	172	36
239	35	234	49
148	30	203	42
173	38	109	23
85	30	133	28

Tab. 21: OAR určená pomocou zimného SKF v lokalite Chvojnica

Nameraný priemer	sigma	Dopočet (k12 = 0,78)	sigma
260	57	250	55
284	60	304	66
262	54	327	71
49	24	50	11
108	34	92	20

9.3.2 Sezónny korekčný faktor pre západ, severozápad a stredozápad Slovenska

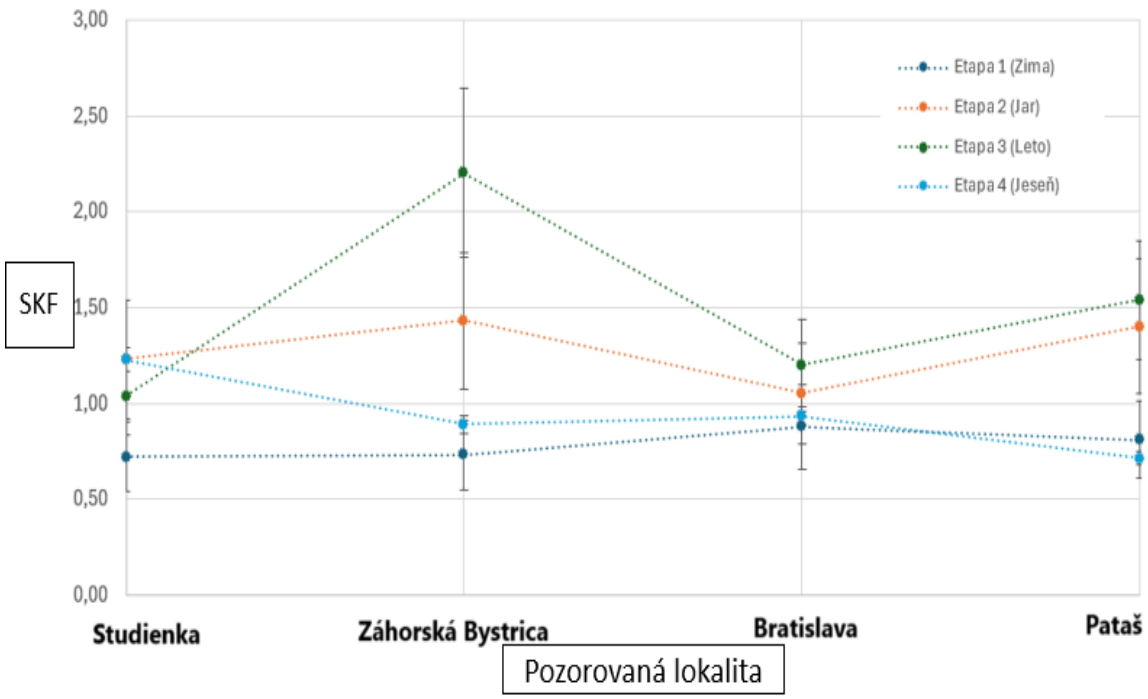
V ďalšom období boli zmerané a doplnené ďalšie lokality Slovenska. Úlohou tejto časti merania objemovej aktivity radónu bolo vypočítať sezónne korekčné faktory pre západnú, severozápadnú a stredozápadnú časť Slovenska a to na základe monitorovania radónu vo vnútorných priestoroch 103 domov počas celého roka. Ak by sme brali do úvahy aj merania, ktoré trvali menej ako rok (v lokalitách Hrnčiarska Ves, Žitný ostrov a Sklené Teplice) tak celkový počet domov, kde sa merania uskutočnili, bol 151.

Priemerná ročná OAR bola vypočítaná pomocou 3-mesačného integrálneho merania OAR a hodnôt sezónnych korekčných faktorov. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté použitím sezónnych faktorov určených pre jarné obdobie s korelačným koeficientom $R^2 = 0,88$. Pri spätnej skúške zistených hodnôt SKF sme mohli vidieť, že namerané a vypočítané priemerné ročné koncentrácie radónu boli vo veľmi dobrej zhode.

Použitie sezónnych korekčných faktorov na odhad priemernej ročnej koncentrácie radónu v týchto domoch môže viesť k podceneniu alebo preceneniu OAR v interiéri, a preto by sa korekčné faktory mali používať s opatrnosťou a celoročné monitorovanie zostáva najpresnejšou metódou na výpočet priemernej ročnej koncentrácie radónu.

Západná časť Slovenska

V rámci západnej časti Slovenska je zistený najnižší priemerný sezónny korekčný faktor v zime s hodnotou 0,8 a najvyššia hodnota bola zistená počas leta s priemerom 1,5. Keďže sezónne variácie OAR predpokladajú maximum práve v zime a minimum v lete, sú sezónne korekčné faktory kvôli ich nepriamej úmernosti s OAR určené v dobrej zhode s odhadom. Sezónne korekčné faktory pre lokality Studienka, Záhorská Bystrica, Bratislava a Pataš sú znázornené na obr. 40 a uvedené v tab. 22.



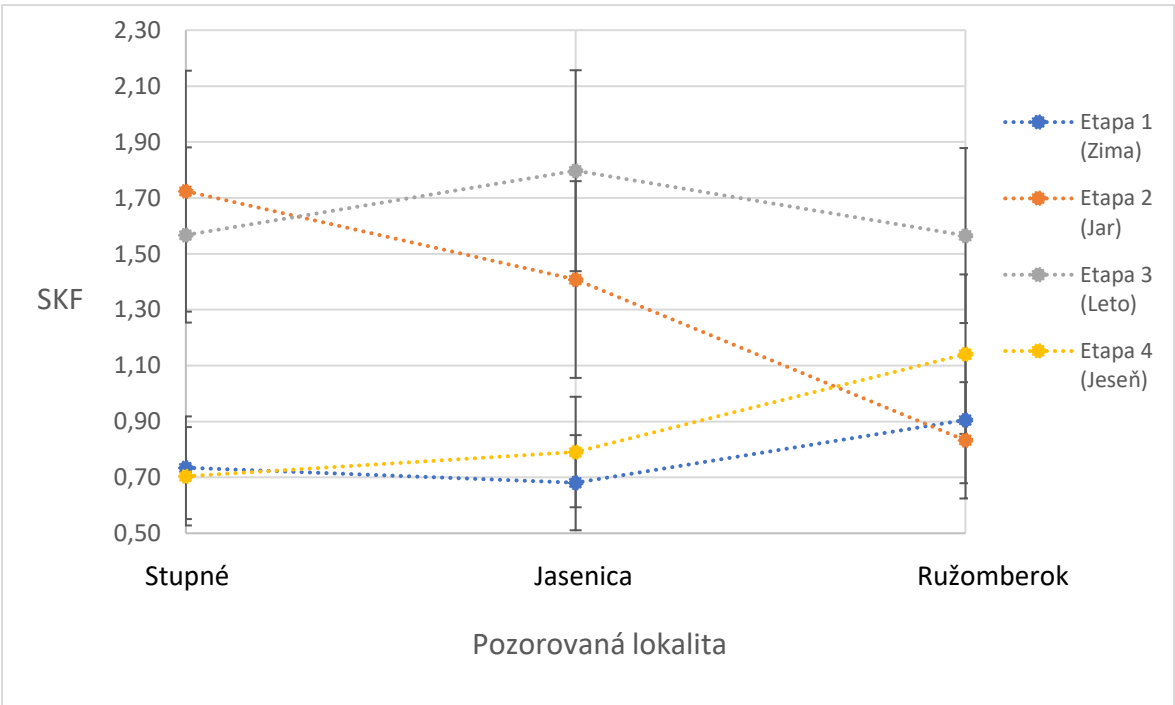
Obr. 40: *Grafické zobrazenie vypočítaných SKF pre vybrané mestá v severozápadnej časti Slovenska (zdroj: autor práce)*

Tab. 22: Vypočítané sezónne korekčné faktory pre vybrané lokality v západnej časti Slovenska

	Studienka	Záhorská Bystrica	Bratislava	Pataš
Zima	0,72 ± 0,15	0,73 ± 0,16	0,88 ± 0,18	0,81 ± 0,17
Jar	1,23 ± 0,26	1,43 ± 0,31	1,05 ± 0,23	1,40 ± 0,3
Leto	1,04 ± 0,22	2,2 ± 0,47	1,20 ± 0,25	1,54 ± 0,32
Jeseň	1,23 ± 0,26	0,89 ± 0,18	0,93 ± 0,19	0,71 ± 0,15

Severozápadná časť Slovenska

V severozápadnej časti je nájdené minimum a maximum rovnako ako v západnej časti – v lete 0,77 a počas zimy 1,6. Obe hodnoty opätovne korešpondujú s predpokladmi a priemerné sezónne korekčne faktory pre lokality Stupné, Jasenica a Ružomberok sú znázornené na obr. 41 a uvedené v tab. 23.



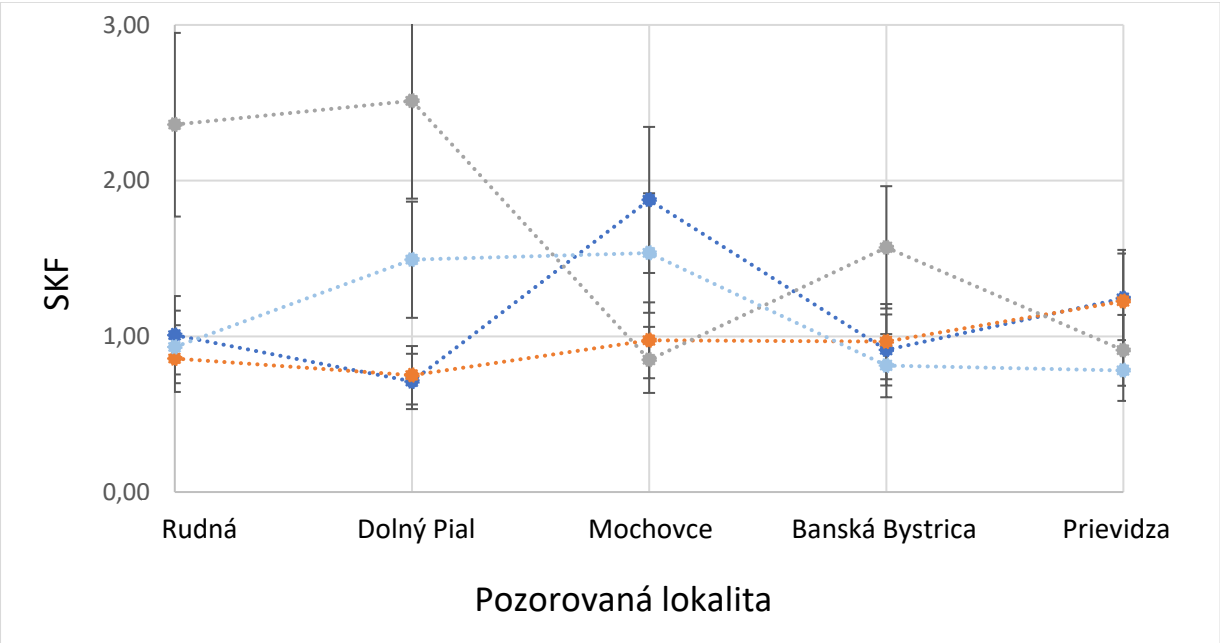
Obr. 41: *Grafické zobrazenie vypočítaných SKF pre vybrané mestá v severozápadnej časti Slovenska (zdroj: autor práce)*

Tab. 23: Vypočítané sezónne korekčné faktory pre vybrané lokality v severozápadnej časti Slovenska

	Stupné	Jasenica	Ružomberok
Zima	0,73 ± 0,16	0,68 ± 0,14	0,91 ± 0,19
Jar	1,72 ± 0,37	1,41 ± 0,3	0,83 ± 0,17
Leto	1,57 ± 0,32	1,80 ± 0,6	1,57 ± 0,32
Jeseň	0,70 ± 0,15	0,79 ± 0,17	1,14 ± 0,24

Stredozápadná časť Slovenska

Na stredozápade Slovenska sme vykonávali pozorovania v lokalitách Rudná, Dolný Pial, Mochovce, Banská Bystrica a Prievidza, s výsledkami zobrazenými na obr. 42 a uvedenými v tab. 24. Najvyššia hodnota SKF bola síce zistená v období leta, avšak priemerné minimum bolo na jar. Priemerná hodnota SKF v zime, ktorú sme očakávali ako najnižšiu, dosiahla hodnotu 1,15, teda druhú najvyššiu.



Obr. 42: *Grafické zobrazenie vypočítaných SKF pre vybrané mestá v stredozápadnej časti Slovenska (zdroj: autor práce)*

Tab. 24: Vypočítané sezónne korekčné faktory pre vybrané mestá v stredozápadnej časti Slovenska

	Rudná	**Dolný Pial**	**Mochovce**	**Banská Bystrica**	**Prievidza**
Zima	1,01 ± 0,21	0,71 ± 0,15	1,88 ± 0,4	0,91 ± 0,19	1,13 ± 0,24
Jar	0,86 ± 0,18	0,75 ± 0,16	0,97 ± 0,2	0,97 ± 0,2	1,05 ± 0,23
Leto	2,36 ± 0,51	2,51 ± 0,53	0,85 ± 0,18	1,57 ± 0,61	1,15 ± 0,14
Jeseň	0,93 ± 0,2	1,49 ± 0,31	1,54 ± 0,32	0,81 ± 0,17	1,01 ± 0,21

Pri podrobnejšom pohľade môžeme vidieť, že najnižšie SKF sa pre jednotlivé lokality vyskytovali v rôznych ročných obdobiach. Po vylúčení atypického SKF v Mochovciach je minimum priemeru SKF napočítané pre zimné obdobie.

9.3.3 Porovnanie priemerných hodnôt sezónnych korekčných faktorov vo vybraných lokalitách

V súvislosti s vyhodnotením vypočítaných SKF boli výsledky ďalej porovnané so sezónnymi korekčnými faktormi určenými z roku 2021, kde boli uskutočnené integrálne merania v 33 domoch, resp. v 56 miestnostiach so stredným radónovým rizikom (Müllerová, 2021). Výsledky sú porovnávané s hodnotami získanými v príslušných ročných obdobiach a graficky znázornené na obr. 43 až 46 (obr. 43: zima, obr. 44: jar, obr. 45: leto a obr. 46: jeseň). Číselné údaje na vodorovnej osi zodpovedajú nasledujúcim lokalitám:

1 – Banská Bystrica,

2 – Studienka,

3 – Záhorská Bystrica,

4 – Mochovce

5 – Bratislava,

6 – Pataš,

7 – Ružomberok,

8 – Dolný Pial,

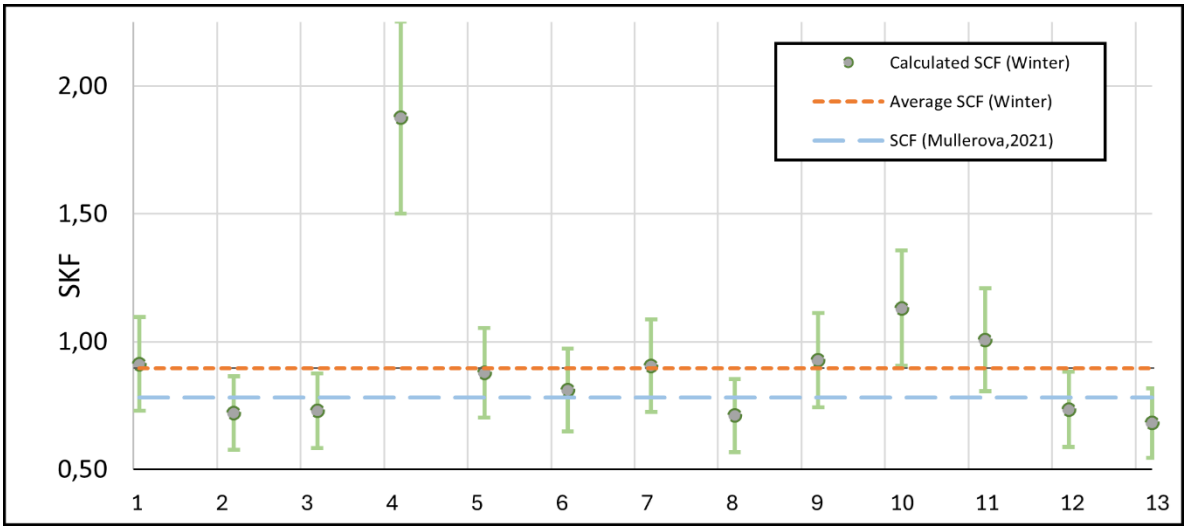
9 – Veľký Ďur,

10 – Prievidza,

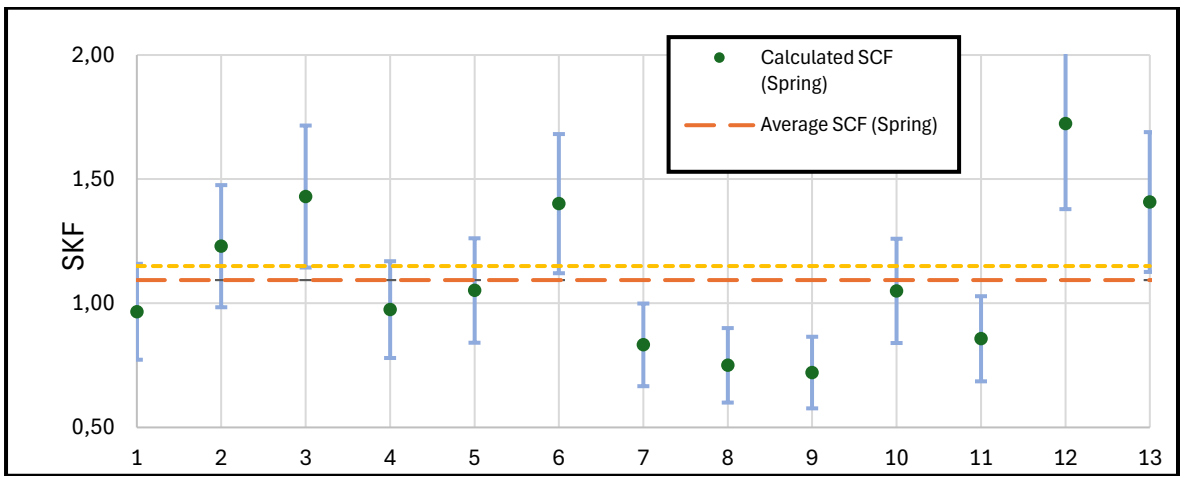
11 – Rudná,

12 – Stupné,

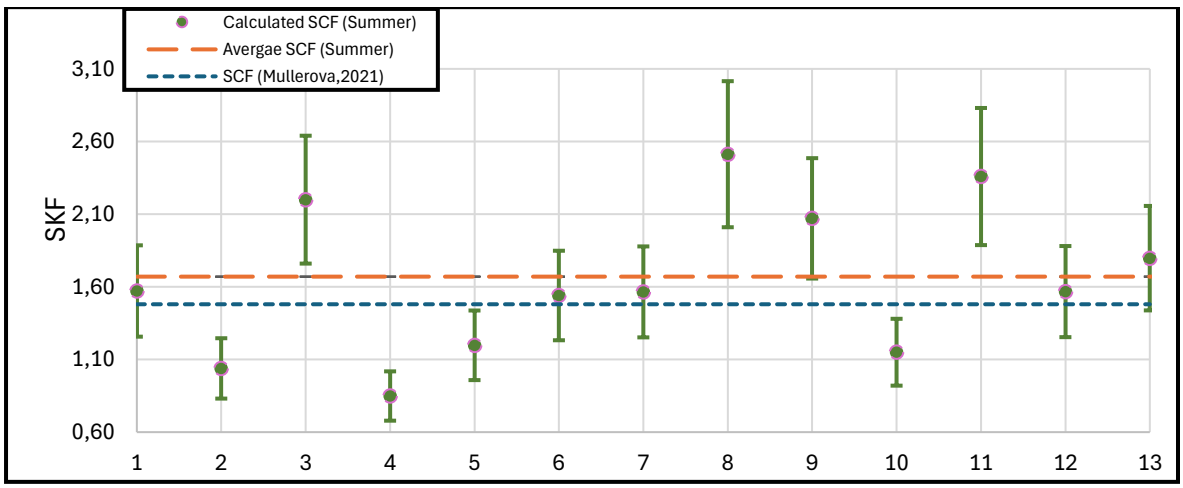
13 – Jasenica



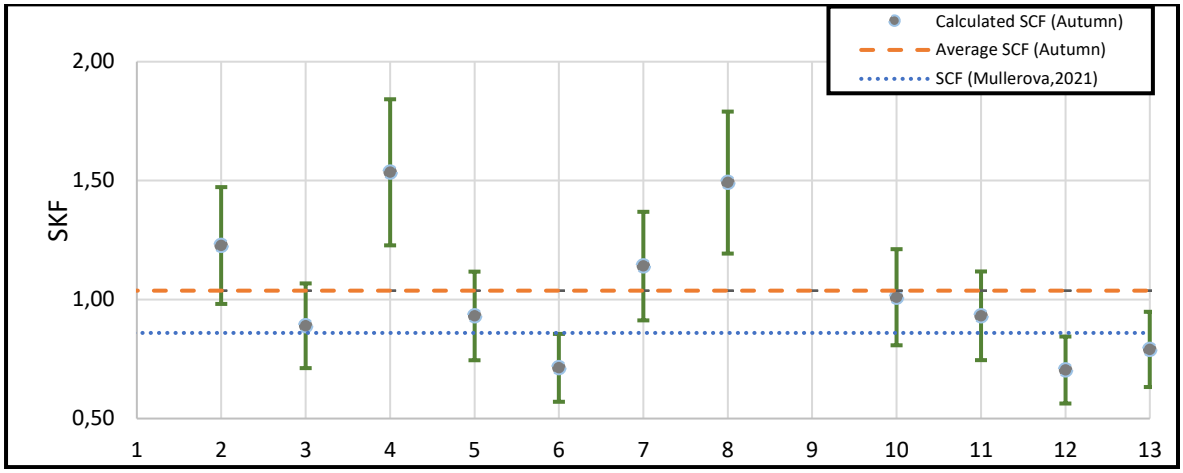
Obr. 43: *Grafické zobrazenie porovnania vypočítaných SKF, priemernej hodnoty SKF a SKF podľa článku (Müllerová, 2021) v zime (zdroj: autor práce)*



Obr. 44: *Grafické zobrazenie porovnania vypočítaných SKF, priemernej hodnoty SKF a SKF podľa článku (Müllerová, 2021) na jar (zdroj: autor práce)*



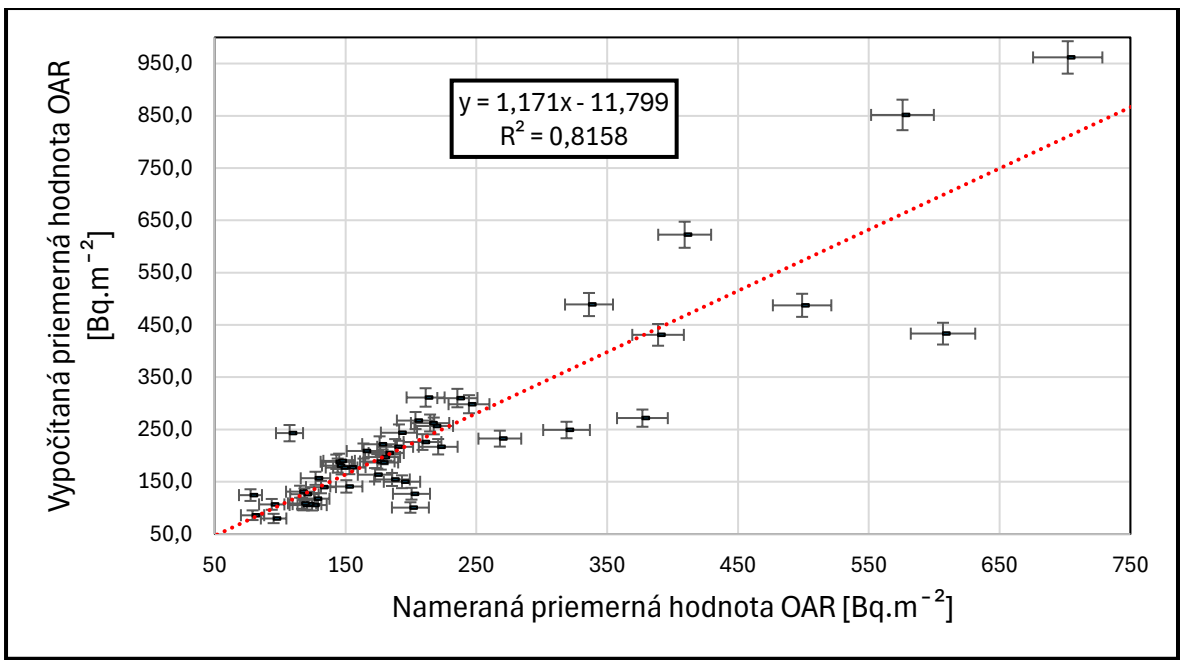
Obr. 45: *Grafické zobrazenie porovnania vypočítaných SKF, priemernej hodnoty SKF a SKF podľa článku (Müllerová, 2021) v lete (zdroj: autor práce)*



Obr. 46: *Grafické zobrazenie porovnania vypočítaných SKF, priemernej hodnoty SKF a SKF podľa článku (Müllerová, 2021) na jeseň (zdroj: autor práce)*

Spätná skúška vypočítanej hodnoty SKF pomocou nameraných dát OAR

Na základe určenia sezónnych korekčných faktorov pre jednotlivé lokality je možné vykonať spätnú skúšku správnosti, kde prostredníctvom SKF boli vypočítané priemerné OAR pre ročné obdobia pre všetky miestnosti s korelačným koeficientom $R^2 = 0{,}82$. Výsledky takejto skúšky sú znázornené na obr. 47 a uvedené v tab. 25, z ktorých môžeme vidieť najvyššiu mieru korelácie počas zimy a na jar (0,96 a 0,95) a najnižšiu počas období jeseň a leto (0,8 a 0,8).



Obr. 47: *Grafické zobrazenie vypočítanej a nameranej priemernej hodnoty OAR a korelácie medzi nimi (zdroj: autor práce)*

Tab. 25: Korelačné koeficienty medzi vypočítanými a nameranými priemernými hodnotami OAR

Ročné obdobie	Korelačný koeficient R^2
Zima	0,96
Jar	0,95
Leto	0,80
Jeseň	0,80
Priemerná hodnota za rok	**0,90**

9.3.4 Odhad hodnôt objemovej aktivity radónu pri krátkodobých meraniach s využitím sezónnych korekčných faktorov

Pri meraniach, ktoré netrvali celoročne sme využili vypočítané SKF lokalít, ktoré sa nachádzali geograficky najbližšie. Pomocou týchto hodnôt SKF sme tak boli schopní určiť objemovú aktivitu radónu v období, v ktorom sa meranie neuskutočnilo a dané výsledky tak pridať do štatistiky meraní.

Hrnčiarska Ves

V lokalite Hrnčiarska Ves sa meranie konalo len počas zimného obdobia, teda naším cieľom bolo nájsť objemovú aktivitu radónu pre ostatné 3 ročné obdobia (jar, leto a jeseň). Najvýhodnejšie lokalizované miesto s úplnými výsledkami bola Rudná, takže na výpočet OAR boli použité práve tieto hodnoty SKF (tab. 26).

Tab. 26: Vypočítaná OAR pre neúplné merania OAR v lokalite Hrnčiarska Ves

Ročné obdobie	OAR [$Bq.m^{-2}$]
Zima	426
Jar	500
Leto	182
Jeseň	460
Priemerná OAR	**429**

Žitný ostrov

Žitný ostrov disponoval taktiež iba s jednoetapovým meraním počas zimy, takže s využitím nájdených SKF pre blízku lokalitu Pataš sme boli schopní vypočítať OAR pre ďalšie tri ročné obdobia, rovnako ako v prípade Hrnčiarskej Vsi. Vypočítané hodnoty sú uvedené v tab. 27.

Tab. 27: Vypočítaná OAR pre neúplné merania OAR v lokalite Žitný ostrov

Ročné obdobie	OAR [Bq.m^{-2}]
Zima	185
Jar	107
Leto	97
Jeseň	210
Priemerná OAR	**150**

Sklené Teplice

Takmer celoročné monitorovanie radónu bolo uskutočnené v lokalite Sklené Teplice, pričom z dôvodu odmietnutia spolupráce obyvateľmi, bolo meranie pozastavené počas tretej etapy – na jeseň. Z tohto dôvodu sme na výpočet priemernej OAR v zimnom období využili hodnoty SKF pre Prievidzu. Výsledky sú uvedené v tab. 28 a hodnoty SKF určené pre mesto Prievidza sú v tab. 24.

Tab. 28: Vypočítaná OAR pre neúplné merania OAR v lokalite Sklené Teplice

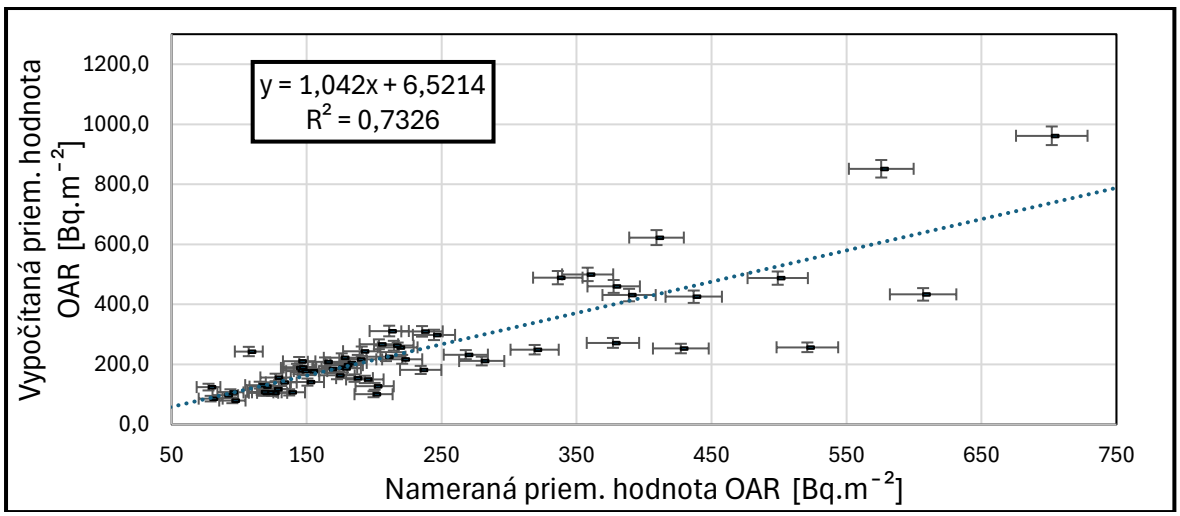
Ročné obdobie	OAR [Bq.m^{-2}]
Zima	257
Jar	253
Leto	211
Jeseň	1148
Priemerná OAR	**309**

Spätná skúška vypočítanej hodnoty SKF pomocou dát OAR z neúplných meraní

Ak pri spätnej skúške zistených hodnôt SKF berieme do úvahy aj neúplne merania v lokalitách Hrnčiarska Ves, Žitný ostrov a Sklené Teplice s výpočtami OAR, tak sa korelačný koeficient zníži na hodnotu $R^2 = 0{,}73$. Výsledky pre jednotlivé ročné obdobia sú uvedené v tab. 29, kde najvyššia miera korelácie je počas zimy a na jar (0,88 a 0,86) a najnižšia cez leto a jeseň (0,81 a 0,82).

Tab. 29: Korelačné koeficienty medzi vypočítanými a nameranými priemernými hodnotami OAR z tab. 25 s údajmi z lokalít Hrnčiarska Ves, Žitný ostrov a Sklené Teplice

Ročné obdobie	Korelačný koeficient R^2
Zima	0,86
Jar	0,88
Leto	0,81
Jeseň	0,82
Priemerná hodnota za rok	**0,86**



Obr. 48: *Grafické zobrazenie vypočítanej a nameranej priemernej hodnoty OAR v lokalitách Hrnčiarska Ves, Žitný ostrov a Sklené Teplice a korelácie medzi nimi (zdroj: autor práce)*

9.4 Vyhodnotenie výsledkov

V prvej časti výskumu bol overený zimný sezónny korekčný faktor k_{12}, ktorý bol stanovený v pilotnej štúdii pre rodinné domy na Slovensku. Overenie prebehlo na súbore nových údajov získaných monitorovaním objemovej aktivity rádonu (OAR) v interiéri v 74 miestnostiach. Zároveň bola analyzovaná závislosť výsledkov od typu horninového radónového potenciálu (RP) v jednotlivých lokalitách. Medzi rôznymi typmi pôdneho RP sa neprejavili žiadne štatisticky významné rozdiely v korelácii medzi meranými a vypočítanými hodnotami ročnej OAR.

Ďalšie overenie korekčného faktora bolo realizované na údajoch získaných spriemerovaním hodnôt OAR z dvoch miestností v rámci jedného domu. Aj v tomto prípade bola zistená veľmi dobrá zhoda medzi meranými a modelovanými ročnými priemermi. Do analýzy boli zahrnuté aj domácnosti, v ktorých sa v jednej z miestností vyskytoval atypický priebeh sezónnych zmien OAR. Z ďalšej analýzy

bol vyradený iba jeden dom, v ktorom sa v oboch miestnostiach súčasne vyskytovala netypická sezónna variabilita OAR. V takýchto prípadoch by aplikácia zimného sezónneho korekčného faktora k_{12} mohla viesť k výraznému podhodnoteniu ročného priemeru OAR. Preto je potrebné korekčné faktory aplikovať s náležitou opatrnosťou.

Zistenia zároveň poukazujú na význam použitia minimálne dvoch detektorov v jednom monitorovanom objekte. Spriemerovanie výsledkov z viacerých miestností prispieva k zníženiu potenciálneho skreslenia, ktoré by mohlo vzniknúť pri vyhodnocovaní údajov z jednotlivých miestností samostatne. Výsledky štúdie naznačujú, že zimný sezónny korekčný faktor je možné uplatniť v rôznych regiónoch Slovenska. Vypočítaná ročná objemová aktivita radónu následne zodpovedá skutočne nameraným hodnotám v rámci stanovených neistôt.

Na základe monitorovania radónu vo vnútorných priestoroch 103 domov (spolu s lokalitami Hrnčiarska Ves, Žitný Ostrov a Sklené Teplice to spolu predstavovalo 151 domov) sme vypočítali sezónne korekčné faktory pre západnú, severozápadnú a stredozápadnú časť Slovenska (kap. 9.3.2 až 9.3.4). Hodnoty sezónnych korekčných faktorov sme získali pomocou 3-mesačného integrálneho merania OAR a ročného priemeru OAR. Vo všeobecnosti by mali byť SKF maximálne v letnom období (práve kvôli minimálnej hodnote OAR) a minimálne počas zimy (s maximálnou hodnotou OAR). Práve vďaka tomuto predpokladu sme mohli odhadnúť vierohodnosť získaných hodnôt SKF.

Najlepšia zhoda medzi meranými a modelovanými ročnými priemermi OAR (bez použitia údajov z neúplných meraní) bola dosiahnutá pri použití sezónnych korekčných faktorov pre zimné obdobie (0,96) a na jar (0,95). Počas leta a na jeseň bola určená korelácia s hodnotou 0,8 (tab. 30).

Korekčné faktory boli následne aplikované na lokality s neúplnými meraniami (Hrnčiarska Ves – jar, leto a jeseň, Žitný ostrov – jar, leto a jeseň, Sklené Teplice – jeseň) s cieľom overiť ich vhodnosť. Výsledky ukázali veľmi dobrú zhodu medzi meranými a vypočítanými hodnotami ročnej OAR, kde najvyššia korelácia bola na jar (0,88) a najnižšia v lete (0,81) (tab. 30), pričom v porovnaní s tab. 25 môžeme vidieť nárast korelácie počas leta a jesene o 1 – 2 %.

Tab. 30: Korelačné koeficienty medzi vypočítanými a nameranými priemernými hodnotami OAR z kap. 9.3.3 a 9.3.4

Ročné obdobie	Korelačný koeficient R^2
Zima (úplné merania)	0,96
Jar (úplné merania)	0,95
Leto (úplné merania)	0,80
Jeseň (úplné merania)	0,80
Priemerná hodnota za rok	**0,90**

Zima (úplné + neúplné merania)	0,86
Jar (úplné + neúplné merania)	0,88
Leto(úplné + neúplné merania)	0,81
Jeseň (úplné + neúplné merania)	0,82
Priemerná hodnota za rok	**0,86**

Výsledky uskutočnených analýz jednoznačne potvrdzujú vhodnosť a spoľahlivosť použitia sezónnych korekčných faktorov pre zimné obdobie odhadovaní ročnej priemernej objemovej aktivity radónu (OAR) v rodinných domoch na Slovensku.

Taktiež bola potvrdená dobrá zhodnosť korekčných faktorov s neúplnými údajmi geograficky blízkymi lokalitami na Slovensku, čo naznačuje ich potenciálne využitie aj v iných regiónoch s porovnateľnými geologickými a stavebnými podmienkami.

Aj keď aplikácia sezónnych korekčných faktorov musí byť vykonaná s ohľadom na možné výnimky – ako napr. domy s letným maximom OAR – vo väčšine prípadov poskytuje použitie sezónnych korekčných faktorov relevantné a dostatočne presné výsledky v rámci akceptovateľnej neistoty.

Celkovo výsledky tejto štúdie podporujú využívanie sezónneho korekčného faktora ako praktického nástroja pri skracovaní doby merania, bez výraznej straty presnosti odhadu ročnej expozície obyvateľstva voči radónu v interiéroch budov.

Záver

Dizertačná práce ponúka prehľad o správaní radónu vo vnútornej atmosfére so zámerom prispieť k metodike určenia priemernej objemovej aktivity radónu na základe krátkodobých meraní a tak pomôcť znížiť možné radiačné riziko pochádzajúce z prírodného ionizujúceho žiarenia. Prostredníctvom analýzy jednotlivých meteorologických vplyvov je snahou zovšeobecniť poznatky o variáciách rýchlostí prísunu radónu do miestnosti a v budúcnosti tak prispieť k vzniku modelu koncentrácie radónu v uzavretých priestoroch. Hlavná motivácia pri určovaní ročných priemerných hodnôt OAR spočíva v znížení doby merania a tak aj nákladov na meranie, práve prostredníctvom sezónnych korekčných faktorov, kde sú postačujúce krátkodobé merania.

Teoretická časť sa začína uvedením do radónovej problematiky, kde sú zhrnuté základné informácie o radóne, jeho chemické a fyzikálne vlastnosti a dcérske produkty alfa premeny. Druhá kapitola sa venuje radónu vo vonkajšej a vnútornej atmosfére, kde sú priblížené zdroje prísunu radónu do miestnosti a následne možnosti transportu radónu vo vnútri priestoru. V tretej kapitole práca opisuje význam pozorovania radónu, v akých odvetviach je takto zameraný výskum dôležitý a napokon aké spôsoby sa využívajú na ohodnotenie jeho objemovej aktivity. Po krátkom predstavení motivácie nášho výskumu radónu v domoch je v štvrtej kapitole stručne zhrnutých niekoľko štúdií, ktoré sa venujú radónovej diagnostike vnútorných priestorov. Jednotlivé výskumné skupiny opisujú faktory ovplyvňujúce zvýšenú objemovú aktivitu radónu v domoch, ktorá je zodpovedná za vzniknuté radiačné riziko obyvateľov domácnosti. Poukazujú taktiež na najdôležitejšie zdrojové miesta zvýšenej aktivity ^{222}Rn a spolu s jeho mechanizmom pohybu teoreticky alebo empiricky odvodzujú výpočtové modely OAR v domoch. Ich cieľom je čo najpresnejšie predpovedať transport radónu a jeho odstraňovanie v interiéri a určiť tak jeho sezónne a denné variácie. Piata kapitola je úzko prepojená s predchádzajúcou, pričom určenie priemernej OAR počas roku sa vykonáva pomocou sezónnych korekčných faktorov, s cieľom skrátiť trvanie monitorovanie radónu v domoch.

Experimentálna časť predloženej práce sa odvíja od teoretického úvodu, pričom sa začína monitorovaním radónu v miestnosti mestského úradu v závislosti od meteorologických parametrov. Pomocou získaných údajov bolo možné skúmať sezónne a denné variácie OAR a tak ohodnotiť rozdiely v priemerných hodnotách koncentrácie radónu, pričom najnižšie priemerné hodnoty boli namerané v mesiacoch január, február a marec a najvyššia hodnota bola získaná v novembri. Nízke amplitúdy denných variácií boli pozorované v období december až apríl a vysoké amplitúdy variácií vykazovali mesiace jún až september.

Objemová aktivita radónu je vo všeobecnosti rozdielna pri meraniach počas pracovnej doby, voľných dní alebo všetkých dní. Celková maximálna hodnota OAR bola v ranných hodinách a s minimom vo večernom čase, no počas pracovných dní bolo maximum v neskorých hodinách až v noci a minimálna OAR bola v pracovnom čase dôsledkom využívania priestoru, tzn. vetrania. Ohodnotenie rozdielu priemerných hodnôt v rámci jednotlivých dní bolo uskutočnené niekoľkými metódami (percentuálne, pomocou efektívnej dávky a prostredníctvom relatívnej amplitúdy).

Najvyššie percentuálne nadhodnotenie pri porovnávaní OAR v pracovných dňoch a počas všetkých dní bolo zistené v mesiaci jún (105%), najnižšia hodnota (12%) bola dosiahnutá vo februári. Zhrnutie nadhodnocovania koncentrácie radónu v podobe efektívnej dávky preukázalo taktiež najväčší rozdiel v mesiaci jún, kde sa E_f počas všetkých dní rovnala 0,27 mSv, pričom s OAR počas pracovnej doby dosahovala dávka hodnotu len 0,13 mSv. Relatívne amplitúdy OAR počas víkendov sa pohybovali v intervale 0,79 až 0,92 a teda v porovnaní s pracovnými dňami (0,24 až 0,70) boli približne konštantné.

Pomocou analýzy nárastových kriviek boli zistené veľmi nízke hodnoty ventilačnej rýchlosti, rýchlosť prísunu radónu do miestnosti vykazovala sezónne variácie s maximom v septembri a minimom v januári. Výsledkom pozorovaní a príslušnej analýzy OAR v závislosti od gradientu teploty bola zistená veľmi dobrá priemerná korelácia na úrovni ~0,92. Pri výbere pracovných dní bola získaná priemerná antikorelácia na úrovni ~0,21. Rozdiel v hodnotách bol pravdepodobne spôsobený pri pracovnej dobe vplyvom vetrania (využívania priestoru) a pri všetkých dňoch sa OAR zvyšuje prostredníctvom nasávania radónu napr. z podložia kvôli vzniknutému podtlaku. Na podrobnejšie skúmanie priemerných hodnôt rýchlosti prísunu radónu do miestnosti a jeho ventilačnej rýchlosti je potrebné vykonať experiment vo viacerých miestnostiach pracoviska a s jeho pravidelným užívaním, pričom bude možné presnejšie určiť minimálnu aktivitu A_0. V budúcnosti bude vhodné uskutočniť ďalšie merania a analýzy v danej budove.

Kapitola 8 opisuje harmonickú analýzu objemovej aktivity radónu vo vnútornom ovzduší v sledovaných lokalitách na západnom a juhozápadnom Slovensku, ktorá poskytla kvantitatívne nástroje na popis sezónnych variácií tejto veličiny v závislosti od vonkajšej teploty. V rámci práce boli spracované údaje z piatich lokalít (Bratislava, Studienka, Záhorská Bystrica, Dolný Pial a Pataš), pričom sa preukázala výrazná sezónnosť v objemovej aktivite radónu s maximami počas zimného obdobia a minimami v letných mesiacoch. Tieto sezónne výkyvy boli vo väčšine prípadov v silnej antikorelácii s vonkajšou teplotou, s výnimkou lokality Studienka, kde sa antikorelácia jednoznačne neprejavila, pravdepodobne v dôsledku individuálnych podmienok stavby alebo užívania priestoru.

Na základe harmonickej analýzy boli pre jednotlivé lokality určené parametre (amplitúda, fáza a perióda), ktoré opisujú priebeh objemovej aktivity radónu počas roka. Následne bol odvodený

koeficient úmernosti ako funkcia rozdielu mesačných hodnôt OAR od ročného minima a príslušného prírastku vonkajšej teploty. Výsledky ukázali zreteľnú periodickosť tejto závislosti, pričom extrémne hodnoty koeficientu sa vyskytli v rôznych mesiacoch pre jednotlivé lokality (napr. minimum vo februári a maximum v auguste pre Pataš, respektíve minimum v apríli a maximum v novembri pre Dolný Pial).

Porovnaním ročných priemerov OAR získaných pomocou harmonickej analýzy a tradičných sezónnych korekčných faktorov bola vo viacerých prípadoch (napr. Bratislava, Záhorská Bystrica) preukázaná veľmi dobrá zhoda v rámci intervalu neistoty. Tieto výsledky potvrdzujú, že harmonická analýza môže byť účinným doplnkovým nástrojom na odhadovanie dlhodobých hodnôt OAR najmä v prípadoch, kde sú dostupné merania s vyššou časovou rozlišovacou schopnosťou.

V rámci poslednej časti výskumu (kap. 9) bola overená použiteľnosť sezónnych korekčných faktorov (SKF) na odhad ročnej priemernej objemovej aktivity radónu (OAR) v obytných budovách na Slovensku, predovšetkým v prípadoch, keď nie je možné uskutočniť celoročné meranie. Monitorovanie prebiehalo vo vybraných lokalitách západného, severozápadného a stredozápadného Slovenska, kde bola zaznamenaná výrazná sezónna variabilita OAR so zimným maximom a letným minimom.

Overenie zimného sezónneho korekčného faktora, stanoveného v predchádzajúcich štúdiách, potvrdilo jeho vhodnosť na odhad ročných priemerov OAR vo väčšine sledovaných lokalít. Výsledky analýz ukázali veľmi dobrú zhodu medzi modelovanými a reálne meranými hodnotami ročnej OAR, pričom najvyššie korelačné koeficienty boli dosiahnuté pre zimné a jarné obdobie (R^2 = 0,96 a 0,95). Po aplikácii SKF na lokality s neúplnými meraniami boli zaznamenané podobne vysoké hodnoty korelácie (napr. R^2 = 0,88 na jar), čo poukazuje na vhodnosť použitia metódy aj v podmienkach obmedzených dát.

Preukázalo sa, že využitie viacerých detektorov v jednej domácnosti výrazne znižuje riziko skreslenia spôsobeného atypickým sezónnym priebehom v jednej miestnosti. V prípadoch, kde bol takýto priebeh prítomný v oboch miestnostiach súčasne, sa však ukázalo, že použitie SKF môže viesť k podstatnému podhodnoteniu OAR. To zdôrazňuje potrebu opatrnosti pri interpretácii výsledkov a odporúča doplnenie krátkodobých meraní o stavebnú a prevádzkovú charakteristiku budovy.

Zároveň bolo zistené, že sezónne korekčné faktory vykazovali konzistentnosť naprieč lokalitami s odlišným geologickým podložím, čo naznačuje ich širšiu použiteľnosť v rôznych regiónoch Slovenska s podobnými klimatickými a stavebnými podmienkami. Tieto zistenia poskytujú oporu pre implementáciu sezónnych korekčných faktorov ako efektívneho nástroja pri skracovaní doby monitorovania bez zásadného zníženia presnosti odhadu ročnej expozície obyvateľstva radónu.

Celkovo výsledky tejto práce podporujú uplatnenie sezónnych korekčných faktorov, najmä pre zimné obdobie, ako spoľahlivého a praktického prístupu k optimalizácii hodnotenia radónového rizika

v interiéroch budov na Slovensku. Dôležitým zistením je aj miera variácie SKF v závislosti od typu objektu, spôsobu vetrania a geologického podložia. V objektoch so zvýšenou prirodzenou ventiláciou bol pozorovaný menší sezónny rozdiel v koncentráciách radónu, čo naznačuje, že efektívne vetranie môže významne znížiť sezónne výkyvy a v pasívnych stavbách s nízkou výmenou vzduchu boli zaznamenané výrazne vyššie hodnoty SKF. Tieto výsledky podporujú potrebu korekčných faktorov pre rôzne typy budov a klimatických oblastí, ako aj nevyhnutnosť dlhodobého monitorovania radónu pre spoľahlivé hodnotenie expozície obyvateľstva.

Zoznam použitej literatúry

1. Abbady, A., Abbady, A. G. E. a Rolf, M. (2004). Indoor radon measurement with the Lucas cell technique. Applied Radiation and Isotopes.
2. Abdalla, A. M., Ismail, A. M. a Madyi, A. A. Al. (2020). Soil Radon Detectiom Using Active Scintillation Cell. Journal of Radiation Research and Applied Sciences.
3. Arvela, H., et al. (1989). K. A Model for Indoor Radon Variations. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety SF-O0101. Helsinki, Finland.
4. Arvela, H. et al. (2015). Effect of Soil Moisture on Seasonal Variation in Indoor Radon Concentration: Modelling and measurements in 326 Finnish Houses. Radiation Protection Dosimetry Advance pp. 1-14.
5. Algin, E., Asici, C., Sogukpinar, H., & Akkurt, N. (2019). A case study on the use of seasonal correction factors for indoor radon measurements. Radiation Protection Dosimetry, 187(2), 187–194. https://doi.org/10.1093/rpd/ncy161
6. Baltrėnas, P., Grubliauskas, R., & Danila, V. (2020). Seasonal Variation of Indoor Radon Concentration Levels in Different Premises of a University Building. Sustainability, 12(15), 6174. https://doi.org/10.3390/su12156174
7. Baskaran, M. (2016). Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies. Springer International Publishing Switzerland. ISBN 978-3-319-21328-6. s. 8-21.
8. Baysson, H., Billon, S., Laurier, D., Rogel, A., & Tirmarche, M. (2003). Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France. Radiation Protection Dosimetry, 104(3), 245–252. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006188
9. Belete, G. D., & Shiferaw, A. M. (2022). A Review of Studies on the Seasonal Variation of Indoor Radon-222 Concentration. Oncology Reviews, 16, 10570. https://doi.org/10.3389/or.2022.10570
10. Bem, H. (2017). Fast Determination of Indoor Radon (222Rn) Concentration Using Liquid Scintillation Counting. J. Radioanal. Nucl. Chem.
11. Brandýsová, A., Bulko, M., Holý, K., Müllerová, M., Masarik, J. (2022). Radon-prone areas in Slovakia predicted by rescaled radon potential maps. Radiat Prot Dosimetry. https://doi.org/10.1093/rpd/ncac131
12. Buchancová, J. et al. (2003). Pracovné lekárstvo a toxikológia. Martin, Vydavateľstvo Osveta, spol. s r. o.. 1133 s. ISBN 80-8063-113-1.

13. Bulko, M., Holý, K., Brandýsová, A., Müllerová, M., Masarik, J. (2021). Study of the possibility of using radon potential maps for identification of areas with high indoor radon concentration. J Radioanal Nucl Chem. DOI: https://doi.org/10.1007/s10967-021-07673-4
14. Burke, Ó., Long, S., Murphy, P., Organo, C., Fenton, D., & Colgan, P. A. (2010). Estimation of seasonal correction factors through Fourier decomposition analysis—a new model for indoor radon levels in Irish homes. Journal of Radiological Protection, 30(3), 433–443. https://doi.org/10.1088/0952-4746/30/3/002
15. Cabáneková, H., Nikodemová, D. (2013). Usmerňovanie ožiarenia obyvateľstva radónom v pobytových priestoroch. Slovenská zdravotnícka univerzita v Bratislave.
16. Chau, N. D. (2008). Measurement of Radon Concentration in the Air by PicoRad Detectors. Nukleonika.
17. Crawford, J. (2013). Estimating the Near-surface Daily Fine Aerosol Load Using Hourly Radon-222 Observations. Atmospheric Pollution Research 4.
18. Crockett, R. G. M. et al. (2016). Significant annual and sub-annual cycles in indoor radon concentrations: seasonal variation and correction. Department of Environmental and Geographical Sciences, School of Science and Technology, University of Northampton, Spojené Kráľovstvo.
19. Dicu, T., Burghele, B. D., Botoș, M., Cucoș, A., Dobrei, G., Florică, Ș., Grecu, Ș., Lupulescu, A., Pap, I., Szacsvai, K., Țenter, A., & Sainz, C. (2021). A new approach to radon temporal correction factor based on active environmental monitoring devices. Scientific Reports, 11, 9925. https://doi.org/10.1038/s41598-021-88904-2
20. Ďurčík, M., Havlík, F., Vičanová, M. Nikodemová, D. (1996). Stanovenie radónového rizika v materských a základných školách. Bezpečná práca, roč.27, č.4., str.152-156.
21. El-Taher, A. (2018). An Overview of Instrumentation for Meausring Radon in Environmental Studies. J. Rad. Nucl. Appl. 3, No. 3.
22. European Commission, Council Directive 2013/59 Euratom of 5 December 2013 laying down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation (2014). Official Journal of the European Union L13, Volume 57, ISSN 1977-0677.
23. Field, R. W., & Kross, B. C. (1996). Iowa survey of radon knowledge, attitudes, and practices. Health Physics, 70(4), 571–576. https://doi.org/10.1097/00004032-199604000-00008
24. Froňka, A. (2015). Pokročilé metody radonové diagnostika budov, dizertačná práca. Fakulta jaderná a fyzikálne inženýrská ČVUT, Praha.

25. Gillmore, G. K., Phillips, P. S., & Denman, A. R. (2005). The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: a case study approach. Journal of Environmental Radioactivity, 84(3), 469–479. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.05.004
26. Groves-Kirby, CH. J., et al. (2015). A critical analysis of climatic influences on indoor radon concentrations: Implications for seasonal correction 148 (16-26).
27. ICRP. (1993). Protection against radon-222 at home and at work. A report of a task group of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP. 1993;23(2):1-45. PMID: 8179237.
28. Jelle, B. P. (2012). Development of a model for radon concentration in indoor air. Science of the Total Environment 416 343–350.
29. Jelle, B. P. et al. (2010). Implementation of radon barriers, model development and calculation of radon concentration in indoor air. Journal of Building Physics. Trondheim, Nórsko.
30. Kertes, A. S. (1979). Solubility Data Series. Pergamon Press Ltd, Anglicko. ISBN 0-08-022352-4. s. 227-258.
31. Krewski, D., Lubin, J. H., Zielinski, J. M., Alavanja, M., Catalan, V. S., Field, R. W., Klotz, J. B., Létourneau, E. G., Lynch, C. F., Lyon, J. L., Sandler, D. P., Schoenberg, J. B., Steck, D. J., Stolwijk, J. A., Weinberg, C., & Wilcox, H. B. (2005). Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. Epidemiology, 16(2), 137–145. https://doi.org/10.1097/01.ede.0000152522.80261.e3
32. Kumar, A. (2018). Assessment of indoor radon, thoron concentrations, and their relationship with seasonal variation and geology of Udhampur district. Jammu & Kashmir, India.
33. Miles, J. C. H., Green, B. M. R., Lomas, P. R., & Cliff, K. D. (1988). Seasonal variation of radon concentrations in UK homes. Radiation Protection Dosimetry, 24(1–4), 455–459. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080273
34. Moravcsik, A. (2015). Radón v ovzduší rodinných domov, jeho variácie a metódy merania, dizertačná práca. Bratislava.
35. Müllerová, M. (2009). Fyzikálne aspekty radónovej diagnostiky pobytových priestorov. Bratislava: Dizertačná práca, KJFB FMFI UK.
36. Müllerová, M., Bulko, M., Holý, K. (2006). Variation of ^{222}Rn Activity Concentration in Workplace. Acta Facultatis Ecologiae, 14, Suppl. 1: 65-71. Zvolen.
37. Müllerová, M., et al. (2021). Estimation of seasonal correction factor for indoor radon concentration in Slovakia: a preliminary survey. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. Budapešť.

38. Müllerová, M., Mrusková, L., Holý, K., Smetanová, I., Brandýsová, A. (2022) Estimation of seasonal correction factor for indoor radon concentration in Slovakia: a preliminary survey, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. DOI: https://doi.org/10.1007/s10967-021-08139-3
39. Müllerová, M., Kozak, K., Kovács, T., Csordás, A., Grzadziel, D., Holý, K., Mazur, J., Moravcsík, A., Neznal, M., Neznal, M., Smetanová, I. (2014). Preliminary results of indoor radon survey in V4 countries. Radiat. Prot. Dosim. https://doi.org/10.1093/rpd/ncu081
40. Müllerová, M., Kozak, K., Kovács, T., Smetanová, I., Csordás, A., Grzadziel, D., Holý, K., Mazur, J., Moravcsík, A., Neznal, M., Neznal, M. (2016). Indoor radon survey in Visegrad countries. Appl Radiation and Isotopes https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.01.010
41. Müllerová, M., Smetanová, I., Brandýsová, A., Benková, V., Csicsay, K. Verification of seasonal correction factor for indoor radon concentration in Slovakia. (2025). Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 334:153–158 https://doi.org/10.1007/s10967-024-09722-
42. Nero, A. V., & Nazaroff, W. W. (1984). Characterizing the source of radon indoors. Radiation Protection Dosimetry, 7(1–4), 23–39. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a082767
43. Neznal, M., Neznal, M., Matolín, M., Barnet, I., & Miksova, J. (2004). The new method for assessing the radon risk of building sites. Czech Geological Survey Special Papers, 16, 1–48.
44. Park, J. H., Lee, C. M., Lee, H. Y., & Kang, D. R. (2018). Estimation of Seasonal Correction Factors for Indoor Radon Concentrations in Korea. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15(10), 2251. https://doi.org/10.3390/ijerph15102251
45. Rahman, S., Mati, N., & Matiullah, G. B. M. (2007). Seasonal indoor radon concentration in the NorthWest Frontier Province and federally administered tribal areas—Pakistan. Radiation Measurements, 42(2), 304–310. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.07.002
46. Ramsay, W. a Collie, J. N. (1904). The Spectrum of the Radium Emanation. Proc. R. Soc. Lond.73. s. 470–476.
47. Semkow, T. M. (1994). Efficiency of the Lucas Scintillation Cell. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 353.
48. Sethy, N. K., Jha, V. N., Ravi, P. M. a Tripathi, R. M. (2014). A Simple Method for Calibration of Lucas Scintillation Cell Counting System for Measurement of 226Ra and 222Rn. Journal of Radiation Research and Applied Sciences.
49. SGI DS: General maps of natural radioactivity [online]. Bratislava: State Geological Institute of Dionýz Štúr (2009) Available on the internet: http://apl.geology.sk/radio

50. Steinitz, G. (2014). Sub-daily Periodic Radon Signals in a Confined Radon System. Journal of Environmental Radioactivity 134, 2014.
51. Surfer. (2012). User's guide, golden software.
52. Swakon, J., Kozak, K., Paszkowski, M., Mazur, J., Janik, M., et al. (2005). Radon Concentration in Soil Gas around Local Disjunctive Tectonic Zones in the Krakow Area. Journal of Environmental Radioactivity.
53. Unscear. (1988). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Publication Sales No. E.88.IX.7.
54. Unscear. (1982). Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. New York: United Nations.
55. Unscear. (1993). Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York: United Nations.
56. Wojcik, M. (1994) A High-sensitivity Scintillation Chamber for Radon in Gas. Nuclear Instruments and Methonds in Physics Research a 353.
57. World Health Organisation. (2009). Handbook on Indoor Radon. Geneve, 2009.
58. Zhou, Q., et al. (2018). Prediction of Radon Removal Efficiency for a Flow-through Activated Charcoal System and 222Radon Mitigation Characteristics. Radiation Measurements.

Internetové zdroje:

59. Education.jlab. The Element Radon, [online]. [cit.14.3.2021]. Dostupné na internete: https://education.jlab.org/itselemental/ele086.html
60. Ingrees. (2017). Video: Cesty šírenia radónu v budovách, [online]. 2017. Dostupné na internete: http://www.ingrees.eu/en/video-cesty-sirenia-radonu-v-budovach/
61. Metadata Berkley. (2008). Nuclear Forensic Search Project, [online]. 2008. Dostupné na internete: https://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html
62. Miranda Chemistry. (2019). An Introduction to the Electronic Structure of Atoms and Molecules, [online]. 2019. [cit.9.3.2021]. 2019. Dostupné na internete: http://miranda.chemistry.mcmaster.ca/esam/
63. Sujchbo.cz. (2017). RamaRn – pasivní detektory radonu, [online]. 2017. [cit.1.2.2025]. Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i. Dostupné na internete: https://www.sujchbo.cz/pracoviste-ustavu/odbor-jaderne-ochrany/specificke-cinnosti-odboru/ramarn-pasivni-detektory-radonu/#parametry

64. Usepa. (2012). A Citizen´s Guide to Radon, [online]. 2012. [cit.14.2.2021]. Dostupné na internete: https://www.epa.gov/radon/citizens-guide-radon-guide-protecting-yourself-and-your-family-radon

65. Ujd.gov.sk (2025). Základné údaje o rádioaktivite a jej účinkoch na zdravie, obyvateľstvo a životné prostredie [online]. 2025. [cit.1.2.2025]. Dostupné na internete: https://www.ujd.gov.sk/jadrovy-program/zakladne-udaje-o-radioaktivite/

Publikačná činnosť

1. BENKOVÁ, V. MÜLLEROVÁ, M. Variácie radónu na pracovisku s vysokou koncentráciou radónu. Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava, 2022. p. 275. ISBN 978-80-8147-127-8.
2. MÜLLEROVÁ, M. BENKOVÁ, V. HOLÝ, K. Poznatky získané z celoročného kontinuálneho monitorovania ^{222}Rn v ovzduší pracovisku verejnej správy, Kniha abstraktov. XLIII. Dni radiačnej ochrany v Starej Lesnej. Stará Lesná, 2022. ISBN 978 -80 -89702 -98 -5.
3. Müllerová, M., Smetanová, I., Brandýsová, A., Benková, V., Csicsay, K.: Verification of seasonal correction factor for indoor radon concentration in Slovakia. In: Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 334 (1), 2025, s. 153-158, DOI 10.1007/s10967-024-09722-0.

Príloha

https://doi.org/10.1007/s10967-024-09722-0

Verification of seasonal correction factor for indoor radon concentration in Slovakia

Monika Müllerová[1] · Iveta Smetanová[2] · Alžbeta Brandýsová[1] · Viktória Benková[1] · Kristian Csicsay[2]

Received: 4 June 2024 / Accepted: 17 August 2024 / Published online: 5 September 2024
© The Author(s) 2024

Abstract
The results of a pilot study performed on data from selected dwellings in Slovakia suggested that the best agreement between measured and calculated annual mean indoor radon activity concentration (RAC) were obtained by using seasonal correction factors (SCF) determined for winter season. In this paper, SCF was applied on results obtained during a new, independent radon survey conducted in homes during years 2022–2023. In this study, 79 rooms were monitored throughout the year in four cycles based on 3 month indoor radon measurements. The preliminary results show a good agreement between measured and calculated annual mean RAC.

Keywords Indoor radon · Seasonal correction factors · Track detector · Verification · Soil radon potential

Introduction

To estimate the annual dose due to radon inhalation, it is necessary to know the annual mean of indoor radon activity concentration (RAC) in buildings. Indoor RAC varied during a year, usually showing seasonal variations with a maximum in the late autumn and winter months and a minimum in the summer months. Due to practical reasons it is not always possible to measure indoor radon levels for a 12 month period; the monitoring in dwellings is usually carried out for a time period lasting from 1 week up to 3 months. On the base of this data annual indoor RAC should be assessed, however, the concentration determined this way do not represent the annual average. Therefore, seasonal correction factors (SCF) are necessary to convert the results of short-term monitoring to representative annual mean indoor RAC.

✉ Monika Müllerová
mullerova@fmph.uniba.sk

[1] Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Mlynská Dolina F-1, 841 04 Bratislava, Slovak Republic

[2] Division of Geophysics, Earth Science Institute, Slovak Academy of Sciences, Dúbravská Cesta 9, P.O. Box 106, 840 05 Bratislava, Slovak Republic

Many studies worldwide are dedicated to determine SCF for given countries [1–9]. The first correction factors were calculated by Wrixon et al. [10] in United Kingdom.
Several studies [1, 2, 11, 12] recommended that SCF should be determined directly for the regions where it will be applied. SCF obtained in different regions or countries should be avoided, due to differences in local geology, climate conditions or building materials.
In Slovakia the first SCF were estimated in a pilot study using the results obtained during a radon survey in dwellings situated in the western part of Slovakia, conducted in the framework of the Visegrad countries project ‘Harmonization of determining the radiation dose of the population

originating from radon, in V4 countries' [13, 14]. In survey [15], 56 rooms in 33 houses were monitored over a period of 1 year in 3 months intervals and SCF for each season were determined: spring $k_3 = (1.15 \pm 0.25)$, summer $k_6 = (1.48 \pm 0.31)$, autumn $k_9 = (0.86 \pm 0.18)$ and winter $k_{12} = (0.78 \pm 0.17)$. The best agreement between measured and calculated annual mean of indoor RAC was found using SCF k_{12} for winter season (December–February) [15].

Present paper is focused on verification of the first seasonal correction factor k_{12} determined for Slovakia using data obtained during the independent radon survey carried out in Slovak dwellings. The results of monitoring in localities with different type of soil radon potential are compared.

Localities and methods

During the years 2022 and 2023, new indoor RAC monitoring campaigns were performed, in total of 79 rooms (in 42 houses) were investigated during a whole year. Only permanently inhabited houses were included in the survey.

Indoor RAC monitoring was carried out in localities with high soil radon potential (RP): Rudná (Fig. 1 left) and Chvojnica (Fig. 1 right), medium soil RP (Fig. 2): Ponická Huta and Hiadeľ and low soil RP (Fig. 2): Malachov, Poniky, Kordíky, Riečka, Horná Mičiná and Dúbravica villages.

Measured localities are depicted on Fig. 3. Localities from pilot study are marked by black circles, from present study by grey squares.

Maps of predicted soil RP were elaborated on the base of Neznal et al. [16] with modified scale of RP. The boundary value for medium and high soil RP was changed from RP = 35 to RP = 21 [17]. Data from soil RAC measurements obtained at a depth of 0.8 m and soil gas permeability, determined by grain size analyses based on the percentage representation of the fine fraction (f < 63 μm), are available at the map server of the State geological institute of Dionýz Štúr [18].

Three values of soil gas permeability were used for the determination of soil RP: low ($k = 5.2.10^{-14}$ m^2), medium

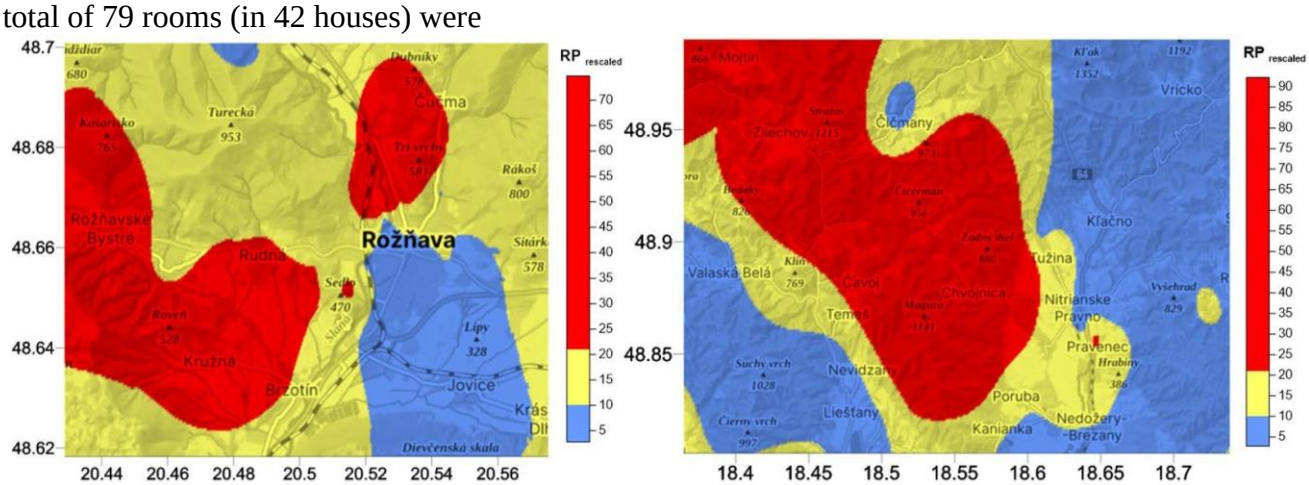
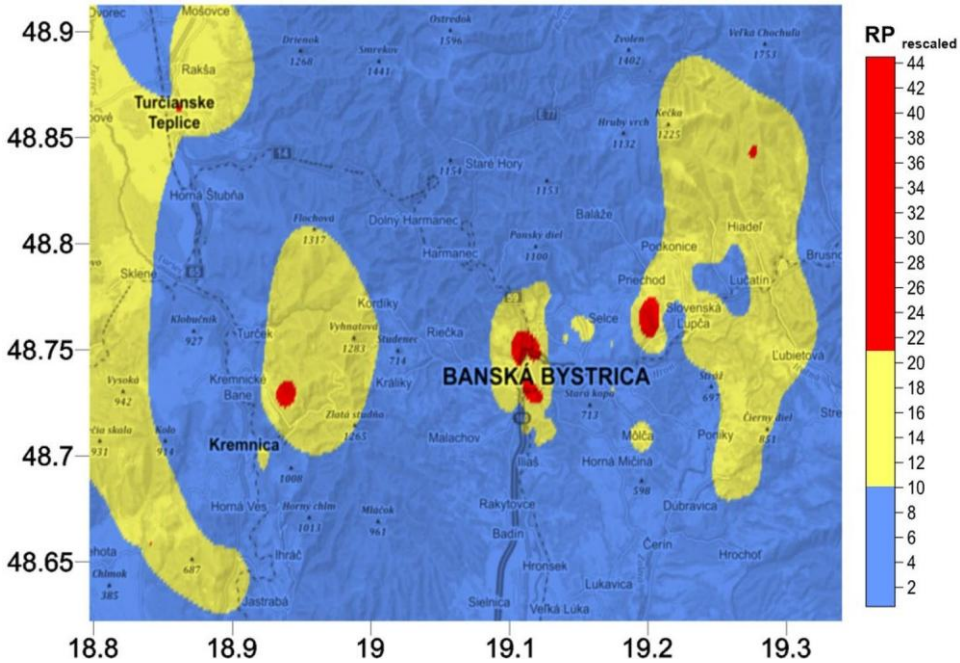


Fig. 1 Localities with predicted high soil radon potential—Rudná (left), Chvojnica (right)

Fig. 2 Localities with predicted medium and low soil radon potential



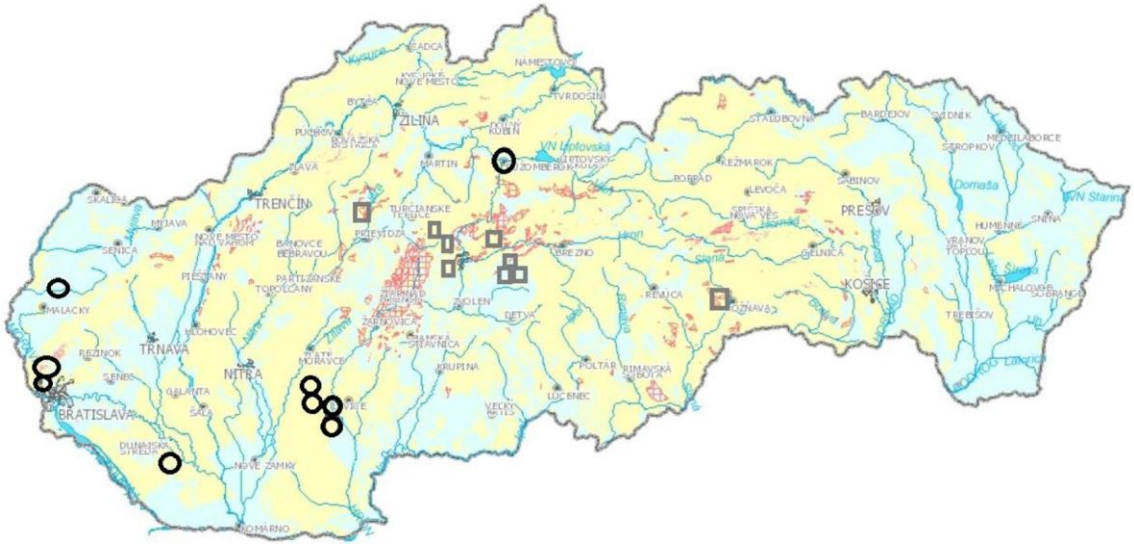


Fig. 3 Location of studied areas. Localities from pilot study are marked by black circles, from present study by grey squares

($k = 1.10^{-12}$ m^2), and high ($k = 4.10^{-11}$ m^2) [16, 19]. To visualize the RP maps, the kriging interpolation method in the geostatistical software Surfer 11 was used [20].

Passive alpha track detector RAMARN [21] (National Institute for Nuclear, Chemical and Biological Protection, Czech Republic) was used for indoor RAC monitoring. The detector consists of a plastic diffusion chamber about 0.5 L in volume. Kodak LR-115 film is situated in the lower part of the diffusion chamber.

Four sets of detectors, changed after 3 months of exposure, were used during the year-long survey, to see the annual variation of indoor radon. The spring period lasted from March to May, the summer from June to August, the autumn from September to November and the winter from December to February. In each monitored building, two detectors were placed in the rooms situated solely on the ground floor, where the inhabitants spend most of their time.

The mean annual indoor radon concentration (C_a) can be estimated using a formula:

$C_a = k_{12} \cdot C_{12}$ (1) where k_{12} is the correction factor for the month in which the exposure of the detector started (December) and C_{12} is the mean quarterly radon activity concentration for winter monitoring period.

Results and discussion

In the majority of monitored houses indoor RAC reached its maximum in autumn and winter months. However, atypical seasonal variation was found in 5 cases. In one house a winter minimum was found in one of two monitored rooms. In other two houses autumn indoor RAC was three times higher than in a rest of a year in one of the monitored room and in another house winter minimum appeared in both rooms, while indoor RAC in other seasons stayed almost constant. These rooms were therefore excluded from further analysis. In total, the data collected from 74 rooms (41 houses) were used for verification of SCF.

Investigated houses were situated in localities with all three types of the soil RP: high (27 rooms), medium (10 rooms) and low (37 rooms). Because the statistical sample in medium soil RP was very low, these rooms were included into the dataset with high soil RP. Figures 4 and 5 show a good agreement between measured and calculated annual mean indoor RAC, using seasonal correction factor k_{12}, for rooms situated in all three types of the soil RP. Indoor RAC in houses situated in localities with high and medium soil RP ranged from (50 ± 20) to (460 ± 60) Bq m^{-3}, in areas with low soil RP it varied between (50 ± 20) and (850 ± 100) Bq m^{-3}.

Detailed investigation of indoor RAC in five rooms excluded from the original dataset showed, that in three of them seasonal variation differed from the variation registered in another monitored room situated in the same house. In those three rooms the applying of the winter

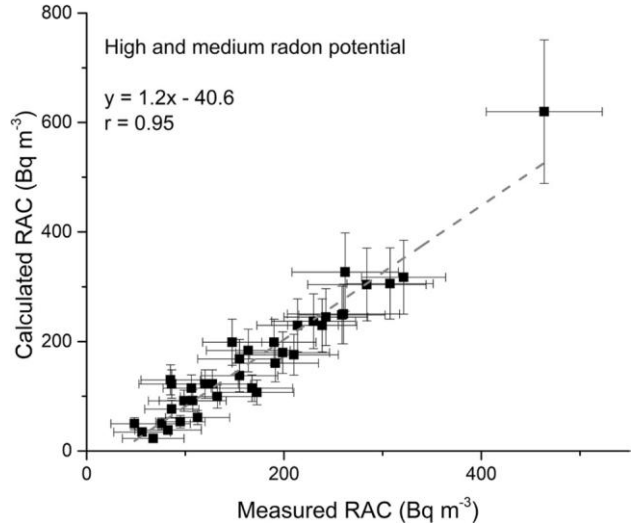
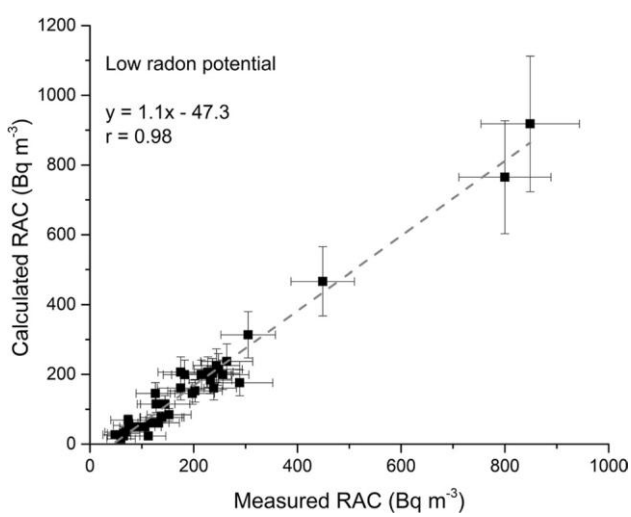
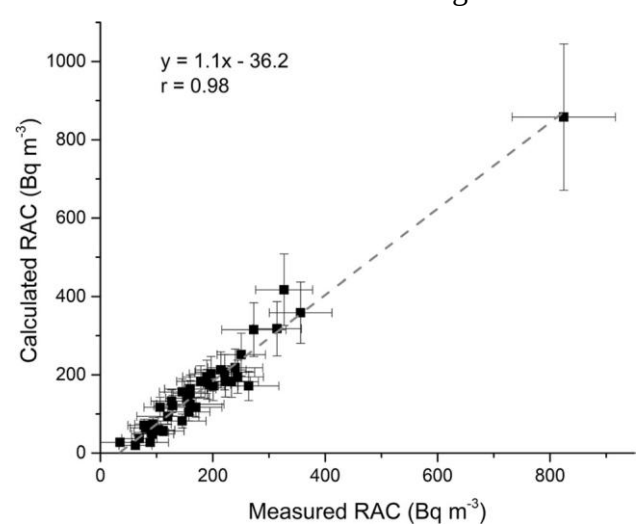


Fig. 4 The verification of seasonal correction factor (k_{12}) in rooms situated in areas with high and medium soil radon potential

Fig. 5 The verification of seasonal correction factors (k_{12}) in rooms situated in areas with low soil radon potential





correction factor led to an underestimation of the calculated annual indoor RAC up to 45%. Therefore, for all houses involved in this survey, indoor RAC measured in both rooms were averaged for each season. Annual indoor RAC measured in both rooms was averaged and this annual mean value for a single house was compared with calculated using k_{12} applied on averaged indoor RAC measured in winter season. Annual indoor RAC for each room was calculated as the average from four quarterly measurements (during the spring, summer, autumn and winter) in this room. Figure 6 depicts a comparison between measured and calculated indoor RAC in 41 houses. In this case, averaged annual mean RAC ranged from (35 ± 20) to (820 ± 90) Bq m^{-3}.

Their correlation is very good and similar to that obtained in SCF verification in a pilot study [15]. Thus, only one house remained excluded from the original dataset, in which seasonal variation of indoor RAC was atypical in both rooms (Fig. 7). Applying of winter SCF in this house resulted in an underestimation of the annual mean of indoor RAC up to 64%. Therefore a detailed continuous monitoring is necessary to find out why the annual radon variation was atypical.

Fig. 6 The verification of seasonal correction factors (k_{12}) for houses with indoor RAC determined as an average of measurements in two monitored rooms

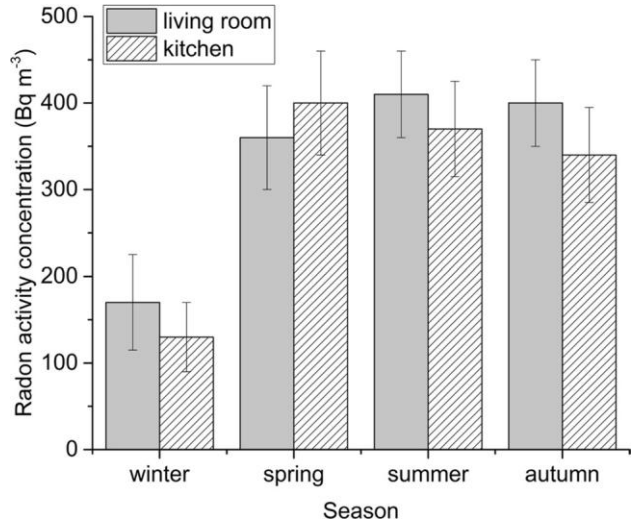


Fig. 7 Atypical seasonal variation of indoor RAC registered in both rooms in one of the investigated houses

Conclusions

In this paper the winter seasonal correction factor k_{12} determined in a pilot study for houses in Slovakia was verified on new data obtained from indoor radon monitoring in 74 rooms and the dependence of the results on different type of soil RP was investigated. No difference in correlations between measured and calculated annual indoor RAC for all types of soil RP was observed.

Verification of SCF was than performed on data obtained by averaging of indoor RAC measured in both rooms of a single house and the correlation between measured and calculated annual mean of indoor RAC was also very good. Furthermore, in this case also houses with an atypical course of RAC in one of the monitored rooms were included. Only one house with atypical seasonal radon variation in both rooms was excluded from analyses. In this case using winter seasonal correction factor (k_{12}) for annual mean radon concentration assessment may result in high underestimation of indoor RAC, therefore, correction factors should be used carefully. It is also important to place at least two detectors in a single monitored house. Averaging the results obtained for both rooms can help to reduce erroneous results that would arise from using measurements from each room separately. The results suggest that the seasonal correction factor for the winter period can be used for houses in different locations in Slovakia, and the obtained calculated year-round RAC will correspond to the real measured values within the uncertainty.

Acknowledgements Authors are grateful to the house owners for their participation in the radon surveys.

Funding Open access funding provided by The Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic in cooperation with Centre for Scientific and Technical Information of the Slovak Republic. This work was supported by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic and Slovak Acamedy of Science (VEGA Project No. 1/0019/22 and No. 1/0086/22) and the Slovak Research and Development Agency (project No. APVV-21-0356).

Data availability Detailed data used for analysis in this manuscript will be available in prepared PhD. thesis of Viktória Benková.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no conflict of interest.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

References

1. Baysson H, Billon S, Laurier D, Rogel A, Tirmarche M (2003) Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France. Radiat Prot Dosim. https:// doi. org/ 10. 1093/ oxfor djour nals. rpd. a0061 88
2. Kozak K, Mazur J, KozŁowska B, Karpińska M, Przylibski TA, Mamont-Cieśla K, Grządziel D, Stawarz O, Wysocka M, Dorda J, Żebrowski A, Olszewski J, Hovhannisyan H, Dohojda M, KapaŁa J, Chmielewska I, KŁos B, Jankowski J, Mnich S, KoŁodziej R (2011) Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. Appl Radiat Isot. https:// doi. org/ 10. 1016/j. aprad iso. 2011. 05. 018
3. Crockett RGM, Groves-Kirkby CJ, Denman AR, Phillips PS (2018) Significant annual and sub-annual cycles in indoor radon concentrations: seasonal variation and correction. In: Gillmore GK, Perrier FE, Crockett RGM (eds) Radon, Health and Natural Hazards. Geological Society, London. https:// doi. org/ 10. 1144/ SP451.2
4. IAEA (2013) Analytical quality in nuclear applications. IAEA/ AQ/33
5. Pinel J, Fearn T, Darby SC, Miles JCH (1995) Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom. Radiat Prot Dosim. https:// doi. org/ 10. 1093/ oxfor djour nals. rpd. a0826 06
6. Krewski D, Mallick R, Zielinski JM, Létourneau EG (2005) Modeling seasonal variation in indoor radon concentrations. J Expos Sci Environ Epidemiol. https:// doi. org/ 10. 1038/ sj. jea. 75003 97
7. Park JH, Lee CM, Lee HY, Kang DR (2018) Estimation of seasonal correction factors for indoor radon concentrations in Korea. Int J Environ Res Public Health. https://d oi.org/1 0 .3390 /i jerph15102 25 1
8. Rahman S, Mati N, Matiullah GBM (2007) Seasonal indoor radon concentration in the NorthWest Frontier province and federally administered tribal areas—Pakistan. Radiat Meas. https:// doi. org/ 10. 1016/j. radme as. 2007. 07. 002
9. Algin E, Asici C, Sogukpinar H, Akkurt N (2019) A case study on the use of seasonal correction factors for indoor radon measurements. Radiat Prot Dosim. https:// doi. org/ 10. 1093/ rpd/ ncy161
10. Wrixon AD, Green BMR, Lomas PR, Miles JCH, Cliff KD, Francis EA, Driscoll CMH, James AC, O'Riordan MC (1988) Natural radiation exposure in UK dwellings. National radiological protection board R190.
11. Gillmore GK, Phillips PS, Denman AR (2005) The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: a case study approach. J Environ Radioact. https://d oi.org/1 0 . 1016/j. jenvr ad. 2005. 05. 004
12. Burke Ó, Long S, Murphy P, Organo C, Fenton D, Colgan PA (2010) Estimation of seasonal correction factors through Fourier decomposition analysis—a new model for indoor radon levels in Irish homes. J Radiol Prot. https:// doi. org/ 10. 1088/ 0952- 4746/ 30/3/ 002
13. Müllerová M, Kozak K, Kovács T, Csordás A, Grzadziel D, Holý K, Mazur J, Moravcsík A, Neznal M, Neznal M, Smetanová I (2014) Preliminary results of indoor radon survey in V4 countries. Radiat Prot Dosim. https:// doi. org/ 10. 1093/ rpd/ ncu081
14. Müllerová M, Kozak K, Kovács T, Smetanová I, Csordás A, Grzadziel D, Holý K, Mazur J, Moravcsík A, Neznal M, Neznal M (2016) Indoor radon survey in Visegrad countries. Appl Radiat Isot. https:// doi. org/ 10. 1016/j. aprad iso. 2016. 01. 010
15. Müllerová M, Mrusková L, Holý K, Smetanová I, Brandýsová A (2022) Estimation of seasonal correction factor for indoor radon concentration in Slovakia: a preliminary survey. J Radioanal Nucl Chem. https:// doi. org/ 10. 1007/ s10967- 021- 08139-3
16. Neznal M, Neznal M, Matolín M, Barnet I, Miksova J (2004) The new method for assessing the radon risk of building sites. Prague: Czech Geological Survey
17. Bulko M, Holý K, Brandýsová A, Müllerová M, Masarik J (2021) Study of the possibility of using radon potential maps for identification of areas with high indoor radon concentration. J Radioanal Nucl Chem. https:// doi. org/ 10. 1007/ s10967- 021- 07673-4
18. SGI DS: General maps of natural radioactivity [online]. Bratislava: State Geological Institute of Dionýz Štúr (2009) Available on the internet: http:// apl. geolo gy. sk/ radio
19. Brandýsová A, Bulko M, Holý K, Müllerová M, Masarik J (2022) Radon-prone areas in Slovakia predicted by rescaled radon potential maps. Radiat Prot Dosimetry. https:// doi. org/ 10. 1093/ rpd/ ncac1 31

20. SURFER (2012) User's guide, golden software
21. Thinová L, Burian I (2008) Effective dose assessment for workers in caves in the Czech Republic: experiments with passive radon detectors. Radiat Prot Dosime. https:// doi. org/ 10. 1093/ rpd/ ncn118

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.