



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Matúš Krajčík

Autoreferát dizertačnej práce

Vplyv vetrania s rekuperáciou tepla na redukciu interiérovej koncentrácie radónu

na získanie akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe: 3659 Teória a konštrukcie pozemných stavieb

v študijnom odbore: stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Bratislava 2024



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre konštrukcií pozemných stavieb Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Matúš Krajčík**
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Katedra technológie stavieb
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Dr. Ing. arch. Roman Rabenseifer**
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Katedra technológie stavieb
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa..... o.....h na Katedre konštrukcií pozemných stavieb Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Radlinského 11 v miestnosti č.

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty

Obsah:

1. Úvod.....	4
2. Analýza vplyvu vetrania na znižovanie interiérových koncentrácií radónu.....	4
3. Ciele, tézy a metódy práce.....	5
4.1 Cieľ práce.....	5
4.2 Tézy práce.....	6
4.3 Hypotézy práce.....	6
4. Experimentálna a návrhová časť.....	7
4.1 Formálny opis experimentu.....	7
4.2 Skúmaný priestor.....	7
4.3 Vetracia jednotka.....	8
4.4 Prístrojové vybavenie pre výskum.....	8
4.5 Priebeh meraní.....	9
5. Výsledky meraní.....	9
5.1 Meranie č.1.....	9
5.2 Meranie č.2.....	10
5.3 Meranie č.3.....	11
5.4 Porovnanie koncentrácie radónu a CO ₂ v monitorovanom priestore.....	13
5.5 Vplyv poveternostných podmienok na interiérovú koncentráciu radónu.....	15
6. Záver.....	18
7. Prínosy pre vedu a prax.....	19
7.1 Prínosy práce pre vedeckú oblasť.....	19
7.2 Praktické prínosy práce.....	20
Vybraný zoznam použitej literatúry.....	21

1. Úvod

Vo vnútornom prostredí budov môže väčšina ľudí stráviť až 90 % svojho života, či už je to v škole, v práci alebo doma. Preto je jedným z hlavných aspektov, ktorý vplyva na naše zdravie, kvalita vnútorného vzduchu. Pri navrhovaní budov sa v súčasnosti zohľadňujú tieto základné kritéria: energetická náročnosť, ekonomika prevádzky a kvalita vnútorného prostredia. Európska komisia prijala smernice o energetickej hospodárnosti a energetickej efektívnosti, slúžiace na znižovanie potreby energie existujúcich aj novopostavených budov. Po roku 2016 je možné stavať iba budovy s ultra nízkou potrebou energie a od začiatku roku 2021 sú to len budovy s takmer nulovou potrebou energie. Stále sa zvyšujúci dôraz na energetickú hospodárnosť častokrát negatívne ovplyvňuje prvky vnútorného prostredia budov. Pri návrhu budov sa často zanedbáva potreba dostatočného vetrania, nevyužívajú sa takmer žiadne vetracie systémy, resp. sa používajú také, ktoré nezabezpečia požiadavky na vetranie stanovené normou. Cieľom vetrania je eliminácia kontaminantov, tvorba dobrej kvality vnútorného vzduchu a redukcia zdravotných problémov privádzaním a obehom čerstvého vzduchu v interiéri. Medzi zdravie ohrozujúce látky hromadiace sa v interiéroch budov patrí aj radón. Jeho vysoké koncentrácie vo vnútornom prostredí sú pre zdravie človeka veľmi nebezpečné. Bolo preukázaných viacero situácií, kedy dochádzalo k zvyšovaniu koncentrácie radónu najmä v čase, keď bolo vetranie interiéru obmedzené. Dosiagnúť pre užívateľa prijateľné vnútorné prostredie s nízkymi koncentraciami radónu je možné dostatočným vetraním.

Práca skúma vplyv vetrania s rekuperáciou tepla na znižovanie interiérovej koncentrácie radónu. Zameriava sa najmä na porovnávanie vetracích režimov, ktoré spôsobujú tlakové rozdiely medzi interiérom a exteriérom, pričom cieľi na určenie najvhodnejšej varianty pre zdravé vnútorné prostredie.

2. Analýza vplyvu vetrania na znižovanie interiérových koncentrácií radónu

Opatrenia na úsporu energie zvyčajne menia priepustnosť obvodového plášťa budovy a následne znižujú rýchlosť výmeny vzduchu [1], [2]. Ako bolo v úvode uvedené, radón v budovách má obrovský vplyv na zdravie obyvateľov. Dramatické účinky vystavenia radónu na ľudské zdravie sú dobre známe a zdokumentované [3]. Neexistuje rozpoznateľná

úroveň, pod ktorou expozícia radónu nepredstavuje žiadne riziko, a väčšina prípadov zhubných nádorov pľúc vyvolaných radónom je spôsobená skôr nízkymi a strednými koncentraciami radónu ako vysokými koncentraciami radónu, pretože všeobecne je menej ľudí vystavených vysokým koncentraciám radónu v interiéroch. Podľa talianskej štúdie [1] koncentrácie radónu v budovách závisia od rôznych faktorov, ako je napríklad množstvo uránu produkujúceho radón v horninách a pôdach, priepustnosť pôd, cesty dostupné na jeho infiltráciu do budov a rýchlosť výmeny medzi vnútorným a vonkajším vzduchom. Infiltráciu a difúziu radónu z pôdy do vnútorného vzduchu podporuje diferenčný tlak spôsobený teplotnými rozdielmi medzi vonkajším a vnútorným vzduchom, ktorý je sám o sebe významne ovplyvnený stupňom tesnosti obvodového plášťa budovy.

Výskum uskutočnený vo viacpodlažných budovách [4] zdôrazňuje, že v budovách postavených podľa nových požiadaviek na energetickú účinnosť presahuje koncentrácia radónu priemernú úroveň oveľa častejšie ako v budovách skôr postavených. Autori výskumu dávajú dôraz na skutočnosť, že nízka miera ventilácie vedie k vyššej koncentrácii radónu v interiéroch.

Nárast počtu domov, ktoré prešli obnovou obvodového plášťa za účelom šetrenia energie, nepriaznivo vplýva na zdravie obyvateľstva. Inštalácia vetracích systémov na zlepšenie vetrania pomôže znížiť ďalšiu záťaž, ale iba, ak dôjde k zníženiu energetickej účinnosti súvisiacej s vetraním. Systémy mechanického vetrania so spätným získavaním tepla môžu znížiť hladinu radónu a riziko vzniku zhubných nádorov pľúc pri zachovaní výhod energetickej účinnosti, ale v prípade zlyhania týchto systémov existuje riziko výrazného nepriaznivého vplyvu na zdravie [5]. Zníženie vetrania spôsobené zvyšovaním tesnosti obvodového plášťa zlepši energetickú účinnosť, môže však zároveň spôsobiť zvýšenie ožiarenia obyvateľov v interiéroch budov. Je potrebné starostlivo vyhodnotiť dôsledky zmien vetrania, aby sa zabezpečilo, že nežiaduce nepriaznivé vplyvy na kvalitu vnútorného ovzdušia nebudú ohrozovať želané prínosy energetickej účinnosti [6].

3. Ciele, tézy a metódy práce

4.1 Cieľ práce

Primárnym cieľom práce je zistiť vplyv lokálnej vetracej jednotky so spätným získavaním tepla na znižovanie koncentrácie radónu v monitorovanom priestore a tým dokázať, že tieto zariadenia neslúžia len ako prostriedok na úsporu energie, ale sú aj účinným nástrojom na znižovanie radónového zaťaženia v budovách.

Súčasne je cieľom nájsť vhodné nastavenie objemu privádzaného a odvádzaného vzduchu rekuperačnou jednotkou, aby interiérové koncentrácie zostali na čo najnižšej úrovni.

Pre splnenie hlavného cieľa boli stanovené aj tieto parciálne ciele:

- 1) Prispieť k výstupom a publikáciám, ktoré by rozšírili povedomie o potrebe a možnostiach protiradónových opatrení aj v tejto oblasti.
- 2) Porovnaním priebehu koncentrácie oxidu uhličitého a koncentrácie radónu v monitorovanom priestore overiť možnosť predikcie radónového zaťaženia formou simulácie priebehu koncentrácie CO₂ vo vnútornom prostredí
- 3) Namerané hodnoty koncentrácie radónu porovnať s poveternostnými podmienkami a zistiť vplyv počasia na priebeh interiérových koncentrácií.

4.2 Tézy práce

- Analýza súčasného stavu problematiky protiradónovej ochrany
- Analýza súčasného stavu problematiky vetrania budov
- Rešerš a zhrnutie publikácií zaoberajúcich sa radónovou ochranou.
- Syntéza poznatkov o vplyve vetrania na zníženie koncentrácie radónu v interiéri.
- Vedecký experiment pre overenie (verifikáciu) hypotéz, založený na meraní koncentrácie radónu a oxidu uhličitého v priestore využívajúcom vetranie s rekuperáciou tepla.
- Vyhodnotenie a posúdenie nameraných hodnôt koncentrácie radónu, oxidu uhličitého a klimatických parametrov.
- Celkové vyhodnotenie cieľov dizertačnej práce, prínos pre prax a vedeckú oblasť.

4.3 Hypotézy práce

Z analýzy problematiky znižovania koncentrácie radónu v interiéroch budov pomocou vetrania vyplýva, že vetranie všeobecne pomáha eliminovať vysoké koncentrácie radónu. Dôležité je však správne nastavenie a používanie vetracích systémov. Ich nesprávne používanie, môže síce zabezpečiť normou stanovenú požadovanú výmenu vzduchu, ale vplyv na redukciu vnútorných koncentrácií radónu môže byť negatívny. V rámci výskumu

boli vyslovené nasledovné hypotézy, ktorých verifikácia pomôže lepšie pochopiť problematiku radónovej ochrany pomocou vetrania:

1. Dostatočná výmena vzduchu pomáha pri znižovaní radónu v interiéroch za predpokladu vhodného nastavenia vetracieho zariadenia.
2. Hodnoty koncentrácie oxidu uhličitého je možné použiť na predikciu interiérovej koncentrácie radónu.
3. Bežné zmeny poveternostných podmienok spôsobujú výrazné výkyvy interiérovej koncentrácie radónu.

Tieto predpoklady a tvrdenia je možné preukázať alebo vyvrátiť na základe meraní koncentrácie radónu v priestoroch, ktoré na vetranie používajú mechanické systémy so spätným získavaním tepla.

4. Experimentálna a návrhová časť

4.1 Formálny opis experimentu

Experiment skúma priebeh interiérovej koncentrácie radónu vzhľadom na zmeny nastavenia intenzity privádzaného a odvádzaného vzduchu pomocou lokálneho vetracieho zariadenia so spätným získavaním tepla. To znamená, že počas meraní sa menili vzhľadom na objem privádzaného a odvádzaného vzduchu tlakové pomery a skúmali sa 4 režimy: vypnuté vetracie zariadenie so spätným získavaním tepla, vytvorenie pretlaku oproti vzduchu v exteriéri, vytvorenie podtlaku oproti vzduchu v exteriéri a vyrovnanie tlakov s exteriérovým vzduchom.

4.2 Skúmaný priestor

Meraná miestnosť sa nachádza na prízemí trojpodlažnej administratívnej budovy, pričom je orientovaná smerom na východ. Konštrukcia budovy je vyhotovená z tzv. Siporex pórobetónových panelov, ktoré sa vyrábali z kremičitého piesku. Objekt bol postavený v 70. rokoch minulého storočia, ale pred pár rokmi prešla administratívna budova kompletnou obnovou obvodového plášťa. V rámci obnovy došlo ku kompletnej výmene okenných konštrukcií, aplikácii kontaktného zatepl'ovacieho systému na fasádu budovy a taktiež k zatepleniu a zaizolovaniu plochých striech.

4.3 Vetracia jednotka

Miestnosť, v ktorej prebiehal výskum, využíva na vetranie lokálnu rekuperačnú jednotku Prana 150. Ide o dvojcestnú rekuperáciu s nezávislým nastavením objemu privádzaného a odvádzaného vzduchu. Toto zariadenie je určené na vetranie menších priestorov, ktorých podlahová plocha nepresahuje 60 m², pričom dokáže v priebehu hodiny v miestnosti vymeniť vzduch v objeme 100 m³.

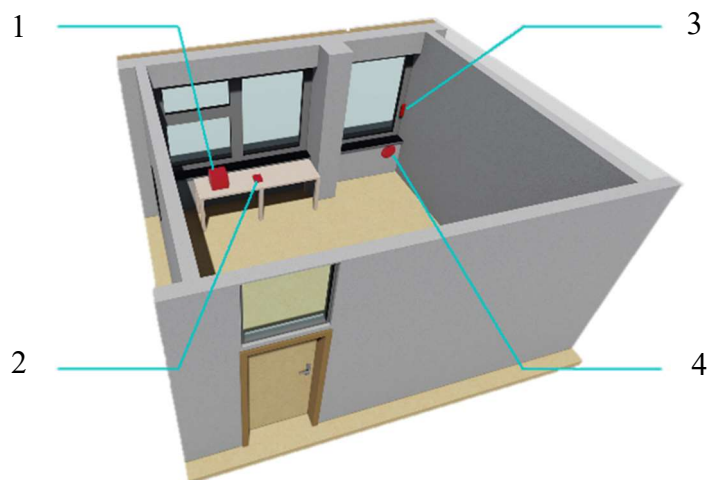
Rekuperáčna jednotka je umiestnená v obvodovej stene, do ktorej bol vytvorený výtáním potrebný otvor prechádzajúci aj cez kontaktný zatepľovací systém a tak spája vetranú miestnosť s exteriérom. Na obrázku 4.1 je znázornená inštalácia tejto jednotky.



Obrázok 4.1: Inštalácia vetracieho zariadenia do otvoru v obvodovej steny (autor)

4.4 Prístrojové vybavenie pre výskum

Umiestnenie jednotlivých meracích zariadení používaných pri výskume a vetracieho zariadenia s rekuperáciou tepla v monitorovanej miestnosti je znázornené na obrázku 4.2.



Obrázok 4.2: Umiestnenie prístrojov využívaných v rámci výskumu v meranej miestnosti: 1 - Alphagard, 2 – Testo 400, 3 – meteostanica, 4 – Prana 150 (autor).

4.5 Priebeh meraní

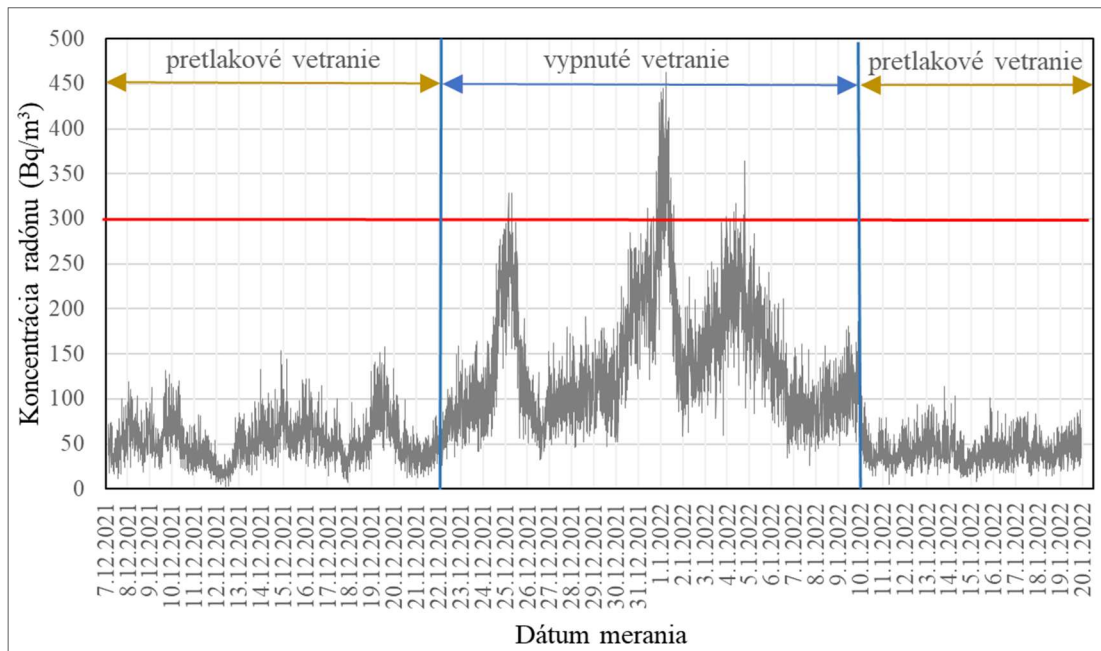
Experiment pozostával s viacerých dlhodobých meraní, ktoré sa uskutočnili v rôznych ročných obdobiach. Všetky prebiehali v monitorovanom priestore, ktorý je bližšie špecifikovaný v kapitole 4.2. V rámci experimentu sa skúmali možnosti rôzneho nastavenia tohto vetracieho zariadenia. Zariadenie umožňuje regulovať objem privádzaného vzduchu aj objem odvádzaného vzduchu. Oba objemy je možné nastaviť na stupnici v rozmedzí 0-9. Týmto spôsobom je možné nastaviť tlakový rozdiel vznikajúci vplyvom vetrania. V rámci výskumu to umožňovalo sledovať 3 základné režimy nastavenia vetracieho zariadenia. Pri pretlakovom vetraní bolo vetracie zariadenie nastavené v pomere 9:1 (9 - objem privádzaného vzduchu, 1 – objem odvádzaného vzduchu). Pri podtlakovom vetraní bolo vetracie zariadenie nastavené naopak a to v pomere 1:9. Pri rovnotlakovom vetraní sa sledovali dva prípady a to nastavenie v pomere 9:9 a tiež v pomere 4:4.

5. Výsledky meraní

5.1 Meranie č.1

Na začiatku merania bolo vetracie zariadenie nastavené v pretlakovom režime. Týmto spôsobom fungovalo do 22. decembra 2021, kedy sa o 15:00 vetracie zariadenie vyplo. Opätovné spustenie vetracieho zariadenia bolo po 20 dňoch 10. januára 2022 o 10:00 a až do skončenia meraní fungovalo opäť v pretlakovom režime. Priebeh koncentrácie radónu počas prvej časti merania je zobrazený v grafe 5.1.

Z nameraných hodnôt možno konštatovať, že hodnoty interiérovej koncentrácie radónu sa výrazne zvýšili pri vypnutí vetracieho zariadenia. V tomto intervale bola šesť dní prekročená hodnota 300 Bq/m^3 , pričom najvyššia nameraná hodnota bola 463 Bq/m^3 . Počas prevádzky vetracieho zariadenia bola najvyššia nameraná hodnota vnútornej koncentrácie radónu 158 Bq/m^3 . To predstavuje takmer trojnásobné zvýšenie koncentrácie pri vypnutí ventilačného zariadenia.

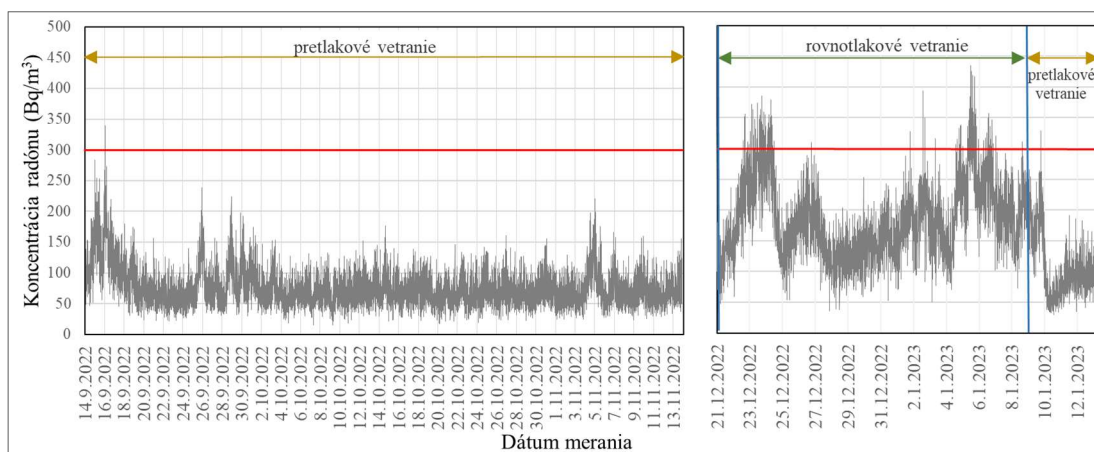


Graf 5.1: Priebeh nameraných hodnôt interiérovej koncentrácie radónu počas prvej časti merania (autor).

Podobný nárast bol zaznamenaný aj pri ostatných parametroch. Nárast však nebol zaznamenaný len pri maximálnych hodnotách, ale aj pri ostatných. Medián nameraných hodnôt koncentrácie sa po vypnutí ventilácie zvýšil o 178 %. Bol nameraný priemerný nárast o 190 % a tretí kvartil nameraných hodnôt vzrástol až o 202 %. Medián bol o niečo nižší ako priemer, čo naznačuje prítomnosť niektorých extrémnych hodnôt.

5.2 Meranie č.2

Z priebehu interiérovej koncentrácie radónu znázornenom na grafe 5.2 je zrejmé, že pri zmene vetracieho režimu došlo k výraznému nárastu interiérovej koncentrácie. V úvode druhej časti meraní bolo vetracie zariadenie nastavené v pretlakovom režime. Hodnoty koncentrácie radónu v monitorovanom priestore boli počas tohto obdobia pomerne konštantné. Výnimkou bolo niekoľko dní, kedy koncentrácia radónu výraznejšie stúpala. Neskôr sa nastavenie vetracieho zariadenia zmenilo do rovnotlakového režimu, čo sa prejavilo výrazným nárastom interiérovej koncentrácie radónu.



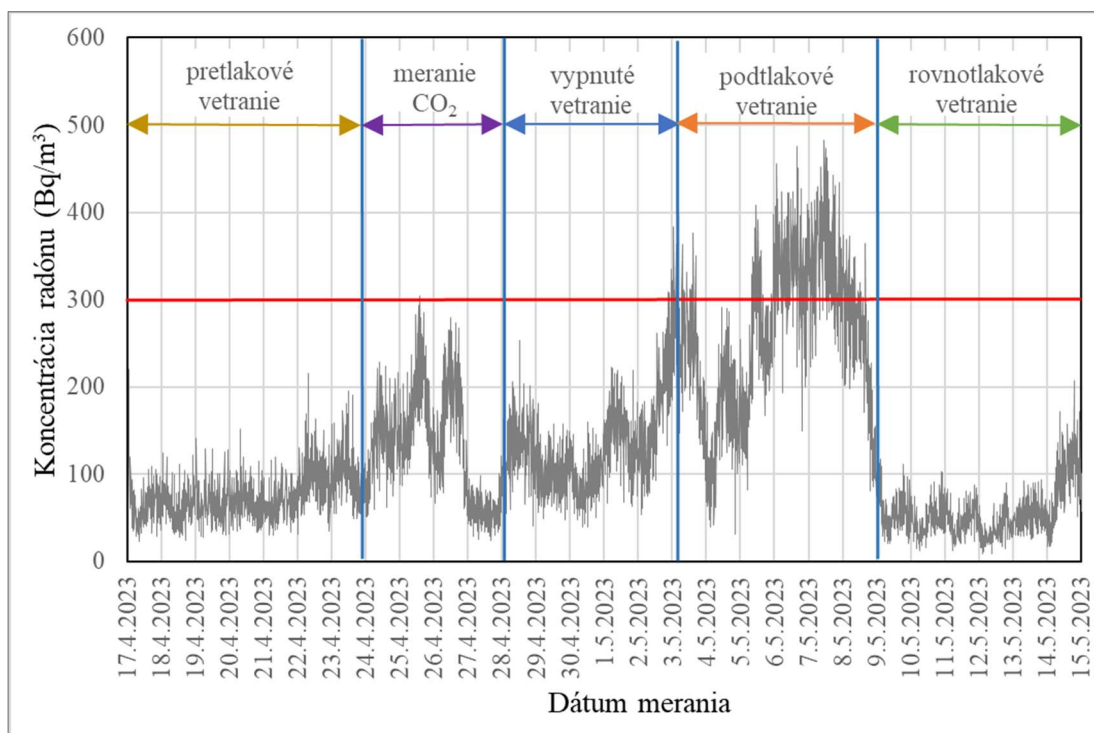
Graf 5.2: Priebeh nameraných hodnôt interiérovej koncentrácie radónu počas druhej časti merania (autor).

Rovnotlakový režim vetrania bol v prevádzke 20 dní, pričom z toho až počas 11 dní prekročila koncentrácia radónu referenčnú úroveň 300 Bq/m^3 . Najvyššia nameraná hodnota bolo 435 Bq/m^3 . Medián nameraných hodnôt koncentrácie sa po vypnutí ventilácie zvýšil o 151 %, pričom podobný nárast bol aj pri ostatných parametroch.

5.3 Meranie č.3

Tretia časť meraní začala 17. apríla 2023 s nastavením vetracieho zariadenia do pretlakového režimu s pomerom privádzaného a odvádzaného vzduchu 9:1. Takto nastavené vetracie zariadenie bolo v prevádzke do 24. apríla 2023. V intervale od 24. apríla do 28. apríla prebiehalo súčasne s meraním interiérovej koncentrácie radónu v monitorovanom priestore aj meranie oxidu uhličitého. Od 28. apríla 2023 prebiehalo meranie pri vypnutom vetracom zariadení až do 3. mája 2023. Nasledovalo obdobie s vetraním v podtlakovom režime s pomerom privádzaného a odvádzaného vzduchu 1:9, ktoré trvalo do 9. mája 2023. V závere bolo vetracie zariadenie nastavené do rovnolakového režimu až do ukončenia meraní, ktoré bolo 15. mája. Priebeh interiérovej koncentrácie radónu počas tohto obdobia zobrazuje graf 5.3.

Pretlakové vetranie v prvom týždni meraní preukázalo podobné hodnoty interiérovej koncentrácie radónu ako pri prvých dvoch etapách meraní. Priemerná hodnota koncentrácie radónu bola 74 Bq/m^3 . V závere hodnoty mierne stúpali, pričom maximálna nameraná hodnota bola 220 Bq/m^3 .



Graf 5.3: Priebeh nameraných hodnôt interiérovej koncentrácie radónu počas tretej časti merania (autor).

Vypnutie vetracieho zariadenia spôsobilo nárast interiérovej koncentrácie radónu. Priemerné hodnoty vzrástli oproti pretlakovému vetraníu o 81%. Ku koncu merania začala koncentrácia radónu v monitorovanom priestore výraznejšie stúpať, pričom došlo v posledný deň k prekročeniu referenčnej úrovne 300 Bq/m³. Maximálna nameraná hodnota bola pritom v tento deň až 384 Bq/m³.

Na rozdiel od prvých dvoch meraní, sa v tomto prípade meralo aj pri podtlakovom vetraní. Tento typ vetrania však spôsobuje vytvorenie podtlaku v interiéri a následné zvýšenie prísunu radónu z pôdneho vzduchu. Tento efekt podtlakového vetrania sa prejavil aj v našom prípade, čo môžeme vidieť aj na priebehu koncentrácie radónu. Počas tohto týždňa bola nameraná najvyššia hodnota interiérovej koncentrácie za celú dĺžku meraní a to 482 Bq/m³. Zároveň iba jeden deň v týždni neprekročila koncentrácia radónu referenčnú úroveň 300 Bq/m³. Priemerná hodnota koncentrácie radónu v monitorovanom priestore bola počas podtlakového vetrania 259 Bq/m³. Hodnota 3. kvartilu taktiež prekročila referenčnú úroveň a to o 25 Bq/m³.

Na poslednú časť merania sa nastavenie vetracieho zariadenia zmenilo do rovnnotlakového režimu. V porovnaní s meraním č.2 v zimnom období, kedy boli zaznamenané vysoké koncentrácie radónu, v tomto prípade rovnnotlakové vetrania pomohlo

udržať hodnoty interiérovej koncentrácie radónu na nízkej úrovni. Spomedzi všetkých režimov meraní č. 3 to boli najnižšie hodnoty. Priemerná nameraná hodnota bola 55 Bq/m^3 . Zaujímavá je hodnota 1.kvartilu interiérovej koncentrácie radónu, ktorá bola len 8 Bq/m^3 . Maximálna nameraná hodnota pri rovnotlakovom vetraní bola 208 Bq/m^3 .

5.4 Porovnanie koncentrácie radónu a CO_2 v monitorovanom priestore

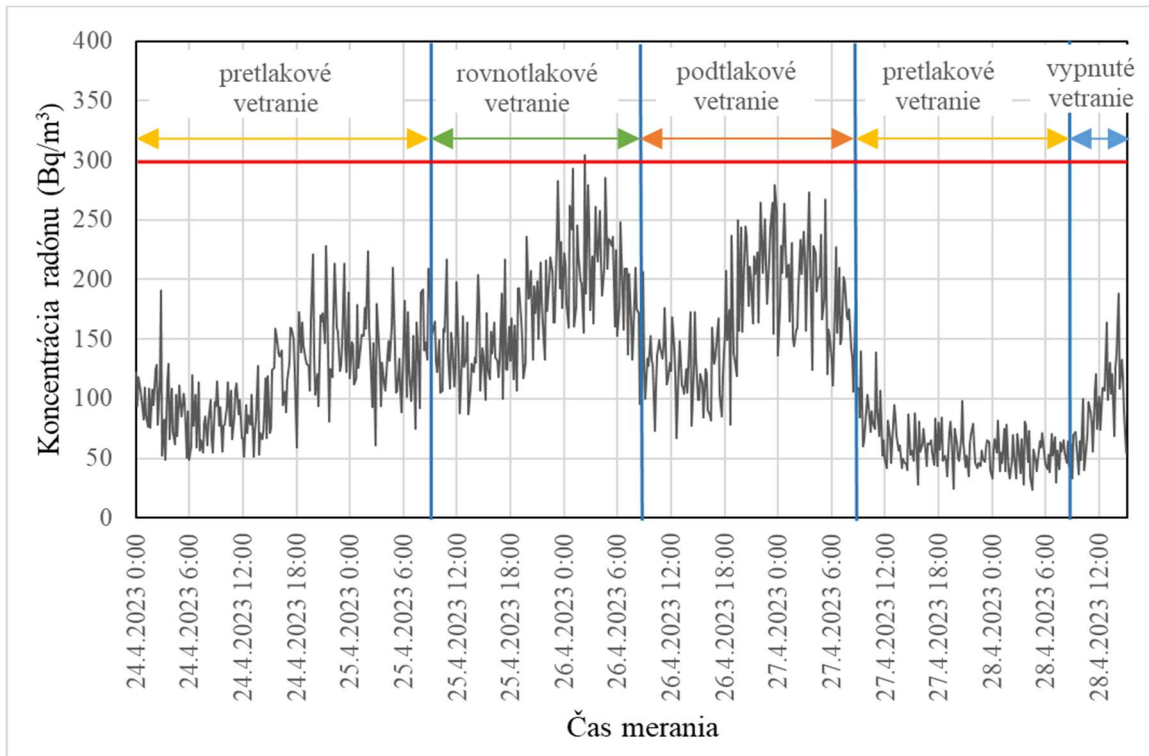
Koncentrácia oxidu uhličitého je pomerne ľahko merateľná a preto sa často používa na hodnotenie kvality vnútorného vzduchu. Znížiť koncentrácie oxidu uhličitého v interiéri je možné pomocou vhodného vetrania, rovnako ako v prípade koncentrácie radónu. Cieľom tohto merania je porovnanie priebehu koncentrácie radónu a oxidu uhličitého.

Počas merania sa postupne vystriedali jednotlivé režimy vetracieho zariadenia. V prvý deň merania bolo 24. apríla nastavené vetranie v pretlakovom režime, ako aj počas predošlých meraní v pomere 9:1. Nasledujúci deň sa ráno zmenilo nastavenie vetrania do rovnotlakového režimu v pomere 9:9. Ďalšie ráno sa zmenil režim na podtlakové vetranie. Počas štvrtého dňa sa vzhľadom na užívanie monitorovaného priestoru zopakovalo pretlakové vetranie a na posledný deň sa ráno vetracie zariadenie vyplo. Vývoj koncentrácie radónu počas tohto merania zobrazuje graf 5.4.

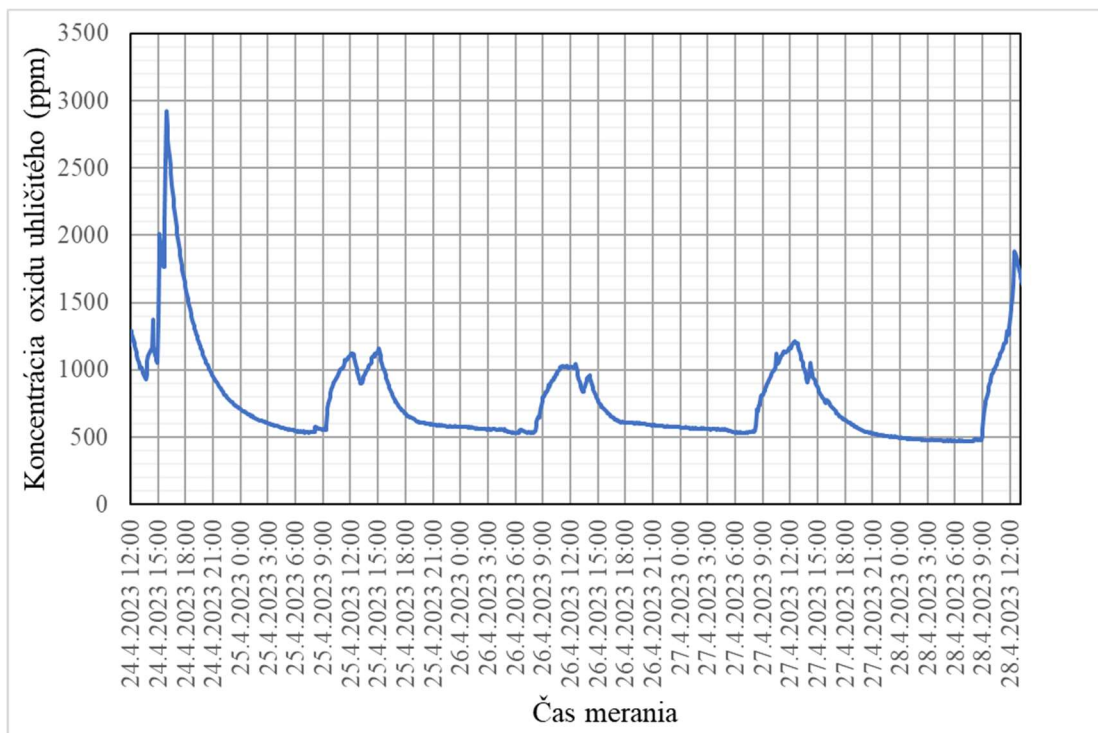
Pri pretlakovom režime vetrania boli dosiahnuté najnižšie hodnoty interiérovej koncentrácie radónu, pričom priemerná hodnota bola 62 Bq/m^3 . Počas rovnotlakového a podtlakového vetrania boli hodnoty vyššie a to v priemere 185 Bq/m^3 , respektíve 167 Bq/m^3 pri podtlakovom vetraní.

Prvý deň merania sa v monitorovanom priestore vyskytlo naraz viacero osôb, čo znamenalo oproti ostatným dňom výrazné zvýšenie zdroja CO_2 . Z toho dôvodu sa meranie pri pretlakovom režime zopakovalo. Vývoj koncentrácie oxidu uhličitého počas merania zobrazuje graf 5.5.

Najvyššia hodnota koncentrácie oxidu uhličitého bola zaznamenaná v prvý deň, keď sa v monitorovanom priestore nachádzalo viacero osôb. Z toho dôvodu sa tento deň neporovnával s ostatnými. Vyššia hodnota bola dosiahnutá aj v posledný deň, kedy bolo vetracie zariadenie vypnuté. Zvyšné tri dni, kedy sa vystriedali jednotlivé režimy vetrania, mala koncentrácia oxidu uhličitého podobný vývoj počas dňa.



Graf 5.4: Priebeh nameraných hodnôt interiérovej koncentrácie radónu v čase súčasného merania CO_2 (autor).



Graf 5.5: Priebeh nameraných hodnôt koncentrácie CO_2 (autor).

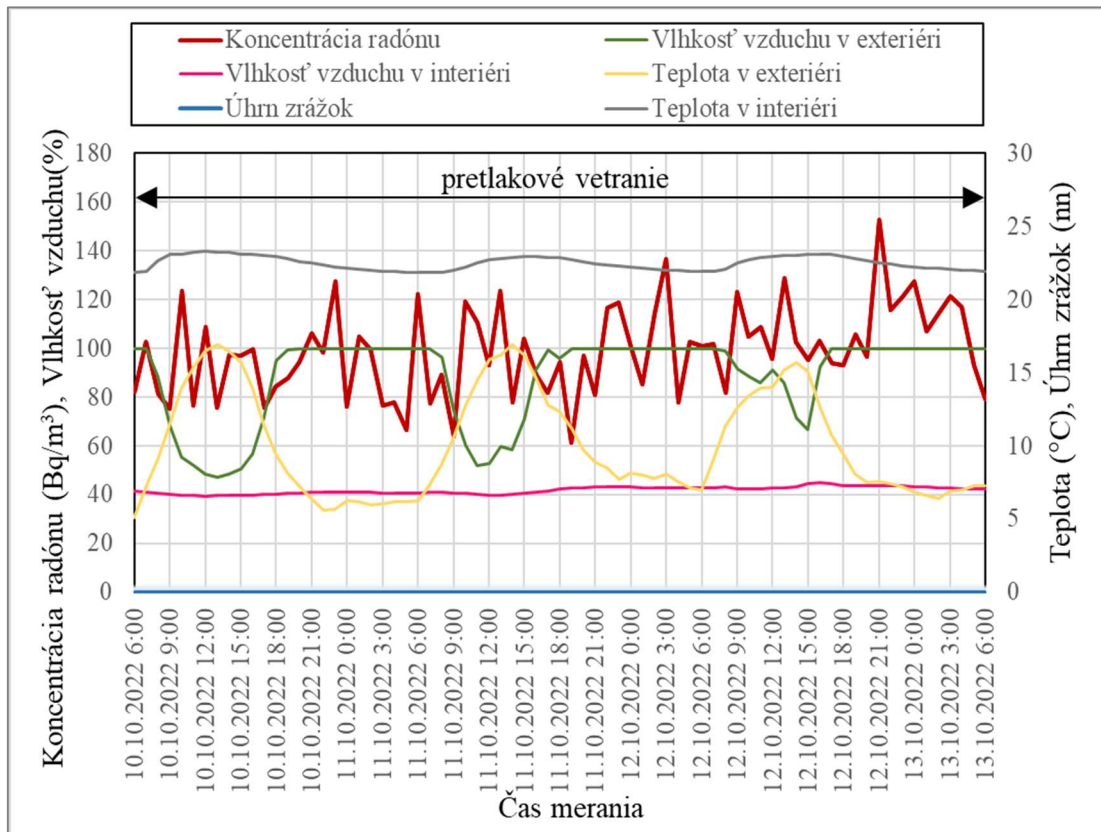
Z nameraných hodnôt koncentrácie oxidu uhličitého vyplýva, že najnižšie hodnoty boli dosiahnuté v prípade, keď sa z miestnosti odvádzalo viac vzduchu. Podtlakové vetranie

pomáhalo najviac znižovať koncentráciu oxidu uhličitého. Najvyššia nameraná hodnota CO₂ v tento deň bola 1041 ppm. Opačný prípad bol pri pretlakovom vetraní, keď sa odvádza znečistený vzduch v najmenšom množstve. V tento deň vystúpila hodnota koncentrácie CO₂ na hodnotu 1211 ppm.

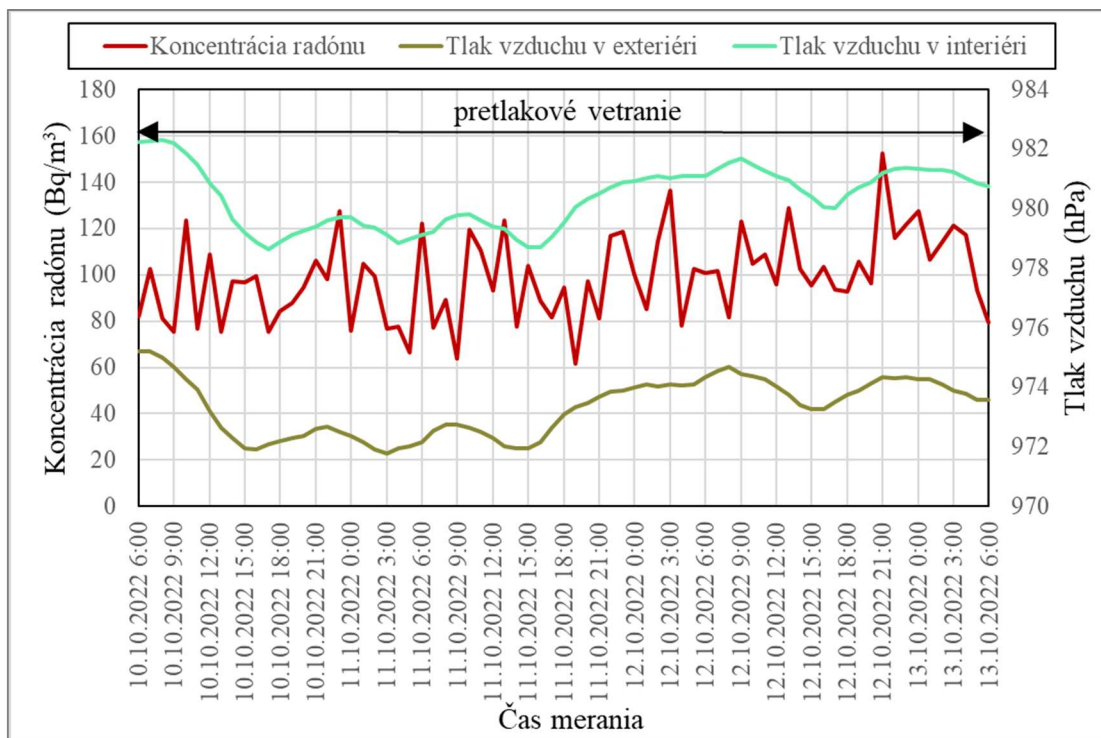
Vývoj koncentrácie oxidu uhličitého bol počas týchto dní podobný. V ranných hodinách boli hodnoty nízke a držali sa pod úrovňou 600 ppm. Následne po príchode osoby do monitorovaného priestoru začala koncentrácia stúpať až do momentu obednej prestávky, kedy osoba opustila monitorovaný priestor. Počas tejto prestávky vplyvom vetrania hodnoty koncentrácie klesli. Po návrate osoby do monitorovaného priestoru opäť začala koncentrácia stúpať až do konca pracovnej doby kedy osoba opustila miestnosť. Následne koncentrácia klesala až do ďalšieho rána kedy sa cyklus opakovával. Priebeh koncentrácie radónu sa vyvíjal opačne ako pri CO₂. Počas dňa boli hodnoty koncentrácie radónu nižšie a až následne vo večerných hodinách stúpali. V prípade spustenia pretlakového vetrania sa hodnoty koncentrácie radónu do pár hodín znížili na priemernú úroveň 50 Bq/m³ a na tejto hodnote sa držali aj v nočných hodinách až do ďalšieho dňa, kým nenastalo vypnutie vetracieho zariadenia.

5.5 Vplyv poveternostných podmienok na interiérovú koncentráciu radónu

Predošlé pozorovania radónu v monitorovanom priestore preukázali vplyv poveternostných podmienok na úroveň interiérovej koncentrácie radónu. Počas všetkých troch etáp meraní boli preto zaznamenávané aj klimatické parametre, aby bolo možné zistiť vplyv týchto parametrov na koncentráciu radónu v monitorovanom priestore. Konkrétne boli zaznamenané hodnoty exteriérového tlaku vzduchu, exteriérovej teploty, exteriérovej vlhkosti a tiež úhrn zrážok. Okrem toho bola zaznamenávaná aj interiérová teplota, vlhkosť a tiež tlak vzduchu v interiéri. Graf 5.6 a 5.7 zobrazujú priebeh koncentrácie radónu a klimatických parametrov počas typických pracovných dní jesenného obdobia. Tieto dni boli zaznamenávané v rámci merania č. 2, pričom bolo vetracie zariadenie v pretlakovom režime. Pretlakové vetranie dokázalo udržiavať interiérovú koncentráciu radónu na konštantnej úrovni 60-140 Bq/m³. Poveternostné podmienky boli typické pre dané obdobie roka a nijak neprispievali k zvyšovaniu interiérovej koncentrácie radónu.



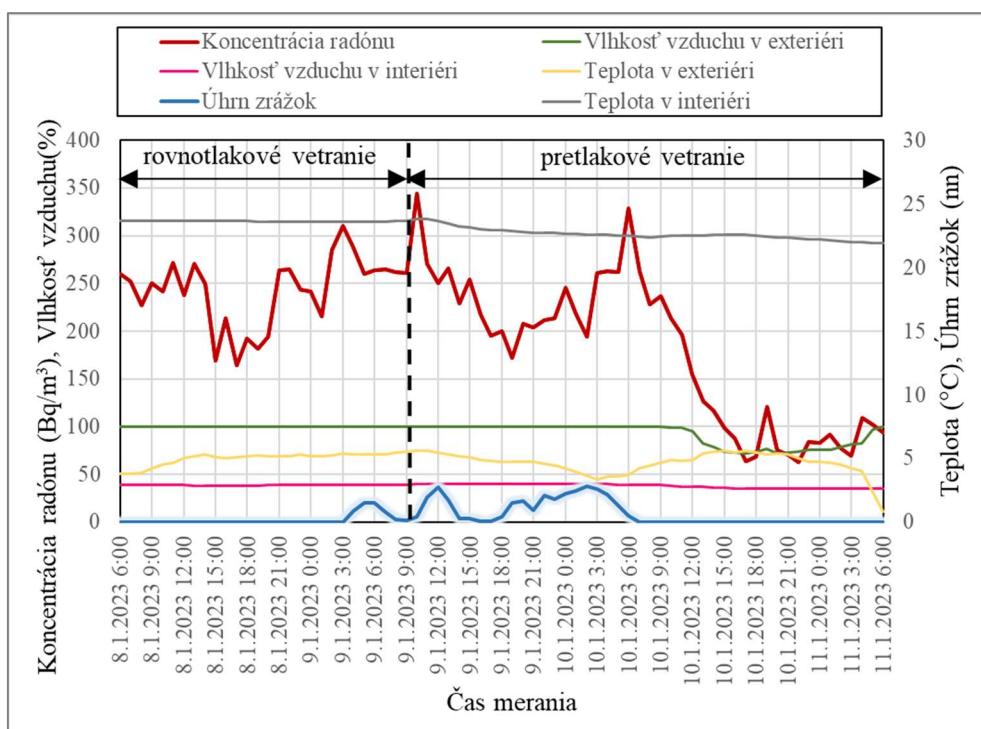
Graf 5.6: Porovnanie priebehu interiérovej koncentrácie radónu a vybraných klimatických parametrov v dňoch 10.-13. október 2022 (autor).



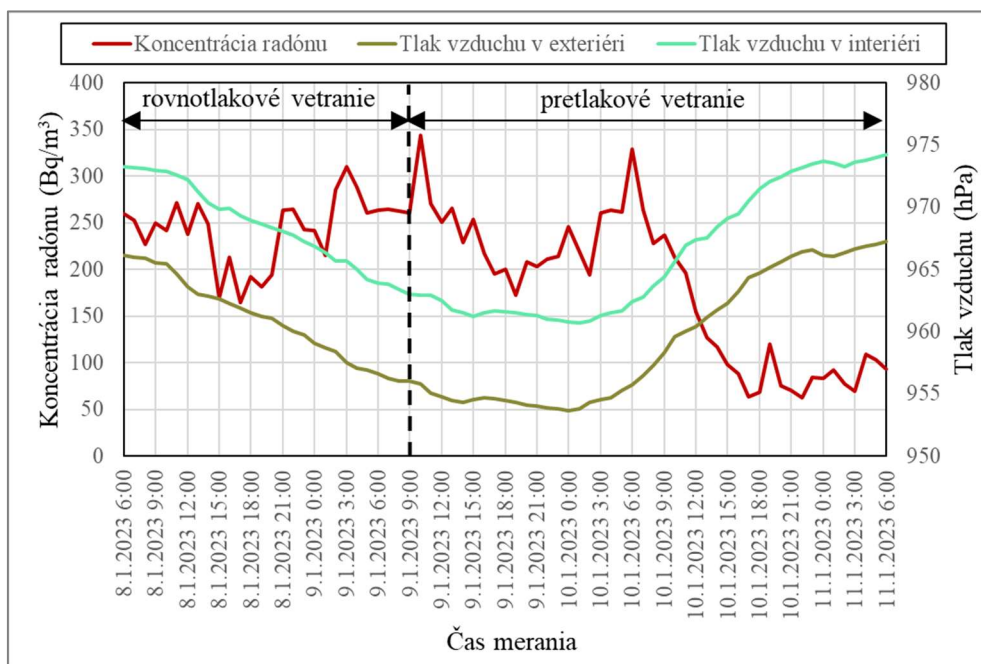
Graf 5.7: Porovnanie priebehu interiérovej koncentrácie radónu s interiérovým a exteriérovým tlakom vzduchu v dňoch 10.-13. október 2022 (autor).

Pre preukázanie vplyvu klimatických parametrov boli na základe priebehu koncentrácie radónu vytypované niektoré neštandardné hodnoty, ktoré sa líšia od hodnôt v ostatných dňoch. V ďalšej časti sú tieto hodnoty graficky porovnané s klimatickými parametrami pre zistenie vzájomných súvislostí.

Ako prvý bude porovnaný deň 9. január 2023 z merania č.2, kedy bolo zmenené nastavenie vetracieho zariadenia do pretlakového režimu, s následným oneskoreným poklesom interiérovej koncentrácie radónu. Graf 5.8 a 5.9 zobrazuje porovnanie koncentrácie radónu a klimatických parametrov v týchto dňoch. V čase vypnutia prevládalo daždivé počasie, o čom svedčí vysoká vlhkosť a aj úhrn zrážok. Ukončenie dažďa bolo sprevádzané aj očakávaným poklesom interiérovej koncentrácie radónu, ktoré malo nastať z dôvodu zmeny vetrania. Graf 8.26 porovnáva koncentráciu radónu s interiérovým a exteriérovým tlakom vzduchu. Časopriestorové zmeny tlaku vzduchu majú v podstate neperiodický charakter, čo spôsobuje takmer neustály pohyb tlakových útvarov, pričom jeho zmeny bývajú pozvoľné [7]. Pre vývoj počasia je dôležitejší priebeh tlaku než jeho absolútna hodnota. Stúpanie tlaku vzduchu býva predzvesťou zlepšenia počasia, naopak pri poklese tlaku vzduchu možno očakávať zhoršenie počasia [8]. Tento jav sa prejavil aj v našom prípade, kedy s poklesom tlaku vzduchu prišli zrážky.



Graf 5.8: Porovnanie priebehu interiérovej koncentrácie radónu a vybraných klimatických parametrov v dňoch 8.-11. január 2023 (autor).



Graf 5.9: Porovnanie priebehu interiérovej koncentrácie radónu s interiérovým a exteriérovým tlakom vzduchu v dňoch 8.-11. január 2023 (autor).

6. Záver

Návrh úsporného vetrania zohráva pri projektovaní budov dôležitú úlohu. Hoci vetranie s rekuperáciou tepla vyžaduje často značné vstupné náklady, v konečnom dôsledku pomáha pri znižovaní potreby primárnej energie a taktiež zvyšuje kvalitu vnútorného prostredia budov. Z výsledkov výskumu vyplýva, že pri správnom používaní dokáže tento spôsob vetrania taktiež pozitívne vplývať na znižovanie interiérovej koncentrácie radónu v budovách. Vo výskume boli porovnávané rôzne režimy vetrania z pohľadu tlakových pomerov medzi privádzaným a odvádzaným vzduchom, ktoré je možné nastavovať pri bežnej prevádzke vetracieho zariadenia. Merania v režime podtlakového vetrania preukázali jeho negatívny vplyv na vývoj interiérovej koncentrácie radónu. Vytvorenie podtlaku v monitorovanom priestore spôsobilo výrazne zvýšenie interiérovej koncentrácie radónu, nad odporúčané hodnoty. Hodnoty boli dokonca vyššie ako mimo prevádzky vetracieho zariadenia. Rovnotlakové vetranie v letnom období preukázalo pozitívny vplyv na zníženie koncentrácie radónu v monitorovanom priestore, v zimnom období sa však jeho efekt na znižovanie interiérovej koncentrácie nepreukázal. Najväčší účinok na zníženie interiérovej koncentrácie radónu preukázalo vetracie zariadenie v režime pretlakového vetrania. Tento spôsob vetrania bol účinný v letnom aj zimnom období, pričom dokázal udržiavať koncentrácie radónu dlhodobo na nízkej úrovni. Niektoré menšie zvýšenia koncentrácie

radónu boli dôsledkom zmeny počasia. Pozoruhodná bola taktiež rýchlosť poklesu koncentrácie radónu následne po zmene nastavenia vetracieho zariadenia do pretlakového režimu, pričom dokázali hodnoty koncentrácie v priebehu niekoľkých hodín klesnúť pod hranicu 100 Bq/m^3 .

Časť dizertačnej práce sa taktiež venovala meraniu oxidu uhličitého v monitorovanom priestore. Cieľom bolo zistenie vývoja koncentrácie radónu a oxidu uhličitého počas dňa s predpokladom na využiteľnosť pri počítačových simuláciách budov v prípade podobnosti priebehov. Tento predpoklad sa nepotvrdil, nakoľko sa jednotlivé priebehy vzájomne líšili. Kým hodnoty koncentrácie oxidu uhličitého boli najvyššie počas poludňajších hodín, koncentrácia radónu bola v tom čase najnižšia a naopak stúpala v nočných hodinách. Pri pretlakovom vetraní bola nameraná najvyššia koncentrácia oxidu uhličitého a pri podtlakovom vetraní naopak tá najnižšia. S koncentráciou radónu to bolo pri zmenách vetracích režimov presne naopak.

Záverečná časť dizertačnej práce skúma vplyv poveternostných podmienok na priebeh koncentrácie radónu v monitorovanom priestore. Z prezentovaných výsledkov je zrejmé, že zmeny počasia majú výrazný dopad na interiérovú koncentráciu radónu. Zvyšovanie koncentrácie radónu v monitorovanom priestore súviselo najmä s poklesom exteriérového tlaku vzduchu a s úhrnom zrážok. Koncentrácia radónu stúpala do niekoľkých hodín od zrážkovej činnosti. Tento jav taktiež súvisí s priepustnosťou základovej pôdy. Pri daždi dochádza k zaplaveniu pórov v podlaží, čo zabraňuje odvetrávaniu radónu do vonkajšieho ovzdušia a spôsobuje zvýšenie koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu a v konečnom dôsledku aj v interiéri budov.

7. Prínosy pre vedu a prax

7.1 Prínosy práce pre vedeckú oblasť

Získané poznatky dizertačnej práce môžu byť využité pri ďalších vedeckých prácach zaoberajúcich sa problematikou radónovej ochrany. Prezentované výsledky otvárajú možnosti pre ďalší výskum v oblasti vetrania alebo aj v rámci ostatných nápravných radónových opatrení. Ďalšie práce v tejto oblasti by pomohli porovnať účinnosť jednotlivých radónových opatrení, prípadne ich kombinácií. Zaujímavé by bolo taktiež nadviazať na získané informácie počítačovou simuláciou, ktorou by bolo možné predikovať hodnoty interiérovej koncentrácie radónu. Z vyššie uvedených zistení je zrejmé, že pri počítačových simuláciách vnútorného prostredia budov nie je možné nahrádzať modely objemovej

aktivity radónu v priestore modelom koncentrácie a šírenia sa oxidu uhličitého (CO₂). Tento predpoklad sme chceli overiť, vzhľadom na to, že sme doteraz nenašli vhodný softvér na modelovanie koncentrácie radónu v stavebných objektoch, kdežto koncentrácie CO₂ je možné simulovať, napr. v programoch TRNSYS alebo Energy Plus, v rámci modelovania vetrania. Radón a oxid uhličitý sú rôzne látky s odlišnými vlastnosťami a správaním sa v prostredí. Ich modelovanie by si vyžadovalo odlišný prístup, čo by už výrazne presiahlo možnosti tejto práce. Medzi hlavné vedecké prínosy práce možno teda zaradiť vyvrátenie hypotézy o podobnosti priebehu koncentrácie radónu a CO₂ a jeho využitia. Dôležitým prínosom je tiež preukázanie vplyvu poveternostných podmienok na koncentrácie radónu v interiéri budov.

Získané výsledky by mohli byť využité aj v rámci pedagogického procesu napr. vo forme prednášok v predmete Špeciálne konštrukcie pozemných stavieb, ktorý sa zaoberá okrem iného aj kvalitou vnútorného prostredia budov.

7.2 Praktické prínosy práce

Z uvedených záverov a nameraných výsledkov vyplýva, že vetranie s rekuperáciou tepla je možné využívať aj ako vhodné protiradónové opatrenie. Dôležité je však správne nastavenie vetracieho zariadenia v pomere privádzaného a odvádzaného vzduchu. Ako najvhodnejší spôsob prevádzky vetracieho zariadenia sa osvedčilo pretlakové vetranie. Tieto zistenia je možné využívať pri navrhovaní protiradónových opatrení pre novostavby a taktiež pre existujúce budovy, kde nie je možné aplikovať metódy radónových bariér alebo odvetrávania podlžia, či už je to z realizačných alebo ekonomických dôvodov. Pri projektovaní budov s takmer nulovou potrebou energie je takmer nemožné dosiahnuť požadované výsledky bez vetrania s rekuperáciou tepla. Je dôležité poznať funkciu týchto zariadení na znižovanie interiérovej koncentrácie radónu, nakoľko ich využívanie pri súčasnom dôraze na znižovanie potreby energie v budovách bude omnoho intenzívnejšie. Vetranie s rekuperáciou tepla je vhodné dopĺňať iným pasívnym spôsobom ochrany ako je napríklad radónová izolácia. Porucha vetracieho zariadenia alebo výpadok elektrickej energie, môže totiž do niekoľkých hodín spôsobiť nárast interiérovej koncentrácie radónu do nebezpečne vysokých hodnôt.

Vybraný zoznam použitej literatúry

- [1] POMPURI, L., CAPUTO, P., VALSANGIACOMO, C. 2018. Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions, In: *Sustainable Cities and Society* [online]. 2018, vol. 42, s. 100-106, Dostupné na internete: <<https://repository.supsi.ch/9590/1/Effects%20of%20buildings%E2%80%99%20refurbishment%20on%20indoor%20air%20quality.%20Results%20of%20a%20wide%20survey%20on%20radon%20concentrations%20before%20and%20after%20energy%20retrofit%20interventions%20SCaS.pdf>>. ISSN 2210-6707.
- [2] YANG, S., GOYETTE PERNOT, J., HAGER JÖRIN, C., NICULITA-HIRZEL, H., PERRET, V., LICINA, D. 2019. Radon Investigation in 650 Energy Efficient Dwellings in Western Switzerland: Impact of Energy Renovation and Building Characteristics. In *Atmosphere* [online]. 2019, vol. 10, no. 12. Dostupné na internete: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/10/12/777>>.
- [3] HAJO, Z., SHANNOUN, F. 2009. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. [online]. Ženeva: WHO Press, 2009, 110 s. Dostupné na internete: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>>. ISBN 978 92 4 154767 3.
- [4] VASILYV, A.V., YARMOSHENKO, I.V., ZHUKOVSKY, M.V. 2015. Low air exchange rate causes high indoor radon activity concentration in energy-efficient buildings. In *Radiation Protection Dosimetry, Ekaterinburg* [online]. 2015, s. 601-605. Dostupné na internete: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25977350/>>.
- [5] KRAJČÍK, M., ĎUREC, F., MAHAS, N. 2023. Reduction of indoor radon concentration in a room using heat recovery ventilation. In *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal* [online]. 2023, vol. 32, no. 4, p. 468–478. Dostupné na internete: <<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/cej/article/view/8701/7070>>
- [6] MCGRATH, J.A., AGHAMOLAEI, R., O'DONNELL, J., BYRNE, M.A. 2021. Factors influencing radon concentration during energy retrofitting in domestic buildings: A computational evaluation, In *Building and Environment* [online]. 2021, vol. 194, p. 231-245. Dostupné na internete:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321001232>>. ISSN 0360-1323.

- [7] VYSOUDIL, M. 2013. *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie*: vysokoškolské skriptá pre študentov Univerzity Palackého v Olomouci [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta, Dostupné na internete: <<https://geography.upol.cz/soubory/studium/e-ucebnice/978-80-244-3893-1.pdf>>. ISBN 978-80-244-3893-1.
- [8] Základy meteorológie [online]. Dostupné na internete: <https://www.unipo.sk/public/media/files/docs/fz_katedry/svk/meteo3.pdf>.

Zoznam publikačnej činnosti

Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

KRAJČÍK, M., ĎUREC, F., MAHAS, N. 2023. Reduction of indoor radon concentration in a room using heat recovery ventilation. In *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal* [online]. 2023, vol. 32, no. 4, p. 468–478. Dostupné na internete: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/cej/article/view/8701/7070>

Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

HOLEČKA, M., JAMNICKÝ, M., KRAJČÍK, M., RABENSEIFER, R. 2021. Extensive Roof Greenery as a Response to Heat Islands: Some Problems. In *Slovak Journal of Civil Engineering. Bratislava*. [online]. 2021, vol. 29, no. 4. p. 327-333. ISSN 1210-3896. Dostupné na internete: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/sjce-2021-0022>

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

KRAJČÍK, M. 2022. Meranie interiérovej koncentrácie radónu v miestnosti využívajúcej vetranie so spätným získavaním tepla. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering*. Bratislava: SPEKTRUM STU, 2022, p. 327-333. ISBN 978-80-227-5251-0.

KRAJČÍK, M. 2021. Vplyv výmeny vzduchu v budovách na koncentráciu radónu v interiéri. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering*. Bratislava: SPEKTRUM STU, 2021, p. 340-345. ISBN 978-80-227-5150-6.

KRAJČÍK, M. 2020. Využitie vetrania ako opatrenia na zníženie koncentrácie radónu v budovách. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering*. Bratislava: SPEKTRUM STU, 2020, p. 380-386. ISBN 978-80-227-5052-3.