

# Zdravotné a experimentálne aspekty – $^{222}\text{Rn}$ a $\text{CO}_2$ v rodinných domoch

Barbora Achbergerová

## Anotácia

---

Využitie dát koncentrácie  $\text{CO}_2$  a objemovej aktivity radónu (OAR) pre potreby posudzovania kvality ovzdušia bolo demonštrované jednoduchou analýzou týchto dát a ich porovnanie s kritickými hodnotami zahrnutými v legislatíve a mimo nej. Boli vytvorené grafy závislostí od meteorologických veličín – atmosférický tlak, vlhkosť vzduchu, teplota; denné vlny a korelácie. Našli sa maximálne dosiahnuté hodnoty a zistili sa, že tieto hodnoty prekračujú limitné alebo odporúčané hodnoty.

**Kľúčové slová:** OAR, koncentrácia  $\text{CO}_2$ , radón

## 1 Úvod

---

V súčasnosti sa venuje veľká pozornosť ochrane zdravia obyvateľstva pred ionizujúcim žiarením. Pričom najväčší podiel k radiačnej záťaži obyvateľstva pochádza od inhalovaného  $^{222}\text{Rn}$  a jeho produktom premeny. Úroveň jeho koncentrácie a koncentrácie  $\text{CO}_2$  vo vonkajšej atmosfére nepredstavuje okamžité ohrozenie pre zdravie obyvateľstva. Podstatné riziko pre obyvateľov tvoria naopak vo vnútornom ovzduší budov, kde ľudia v súčasnosti trávajú najviac svojho času. Preto by sa mala venovať väčšia pozornosť koncentráciám  $^{222}\text{Rn}$  a  $\text{CO}_2$ , ktoré sa kumulujú ovzduší pobytočných priestorov. Veľká koncentrácia týchto dvoch plynov v ovzduší pobytočných priestorov môže viesť k závažným zdravotným problémom. Zdravotné následky vysokej koncentrácie  $\text{CO}_2$  môžu nastať ihneď, ako napríklad ospalosť, nesústredenosť, zvýšenie tep, bolesť hlavy i smrť, alebo i neskôr, ako napríklad strata výkonnosti obyvateľov, zapchatý nos, horšie dýchanie i kašeľ. Zdravotné následky vysokej OAR sa môžu prejaviť o desiatky rokov neskôr v podobe rakoviny pľúc. Za hlavné zdroje  $^{222}\text{Rn}$  a  $\text{CO}_2$  v domoch sa považuje ich exhalácia z pôdy a v prípade radónu i materiálov. Iným zdrojom pre  $\text{CO}_2$  je aj samotné dýchanie. Konkrétne koncentrácie  $^{222}\text{Rn}$  a  $\text{CO}_2$ , ktoré môžeme namerať vo vnútornom ovzduší budov, závisia od teploty, vlhkosti vzduchu, použitého materiálu v stavbe, rýchlosti vetrania miestnosti, atď.

Táto práca sa primárne zaoberá analýzou OAR a koncentrácie  $\text{CO}_2$  v ovzduší vytipovaných domov a ich závislostiam od meteorologických aspektov. V závere sú zhrnuté všetky výsledky.

## 2 Zdravotné aspekty

---

Radón je prírodný rádioaktívny plyn bez vône, chuti, farby a zápachu. Nachádza sa na celom zemskom povrchu. Má protónové číslo 86 a v prírode je zastúpený tromi rádionuklidmi.

$^{222}\text{Rn}$  v pobytočných priestoroch je podľa štúdií druhý najvýznamnejší faktor vzniku rakoviny pľúc po fajčení vo väčšine krajín vrátane Slovenska. Neexistuje žiadna hraničná hodnota koncentrácie  $^{222}\text{Rn}$ , ktorá by nespôsobovala rakovinu. Aj nízke koncentrácie môžu viesť k zvýšeniu rizika vzniku nádorových ochorení.

Slovensko sa riadi podľa § 123 ods. 6 zákon č. 87/2018 Z. z., kde sa uvádza, že: „Referenčná úroveň pre objemovú aktivitu radónu na pracovisku je 300 Bq.m<sup>-3</sup> za kalendárny rok.“ [1].

Z historického hľadiska sa už v 16. stor. našli v Európe evidencie nárastu úmrtnosti spôsobené respiračnými chorobami medzi baníkmi. V 19. stor. prvýkrát zistili, že sa jedná o rakovinu pľúc. V 50. rok. 20. stor. bol  $^{222}\text{Rn}$  konečne potvrdený za zdroj vzniku rakoviny pľúc. Bližšie štúdie vykonané medzi baníkmi potvrdili nárast rizika vzniku rakoviny pľúc medzi fajčiarmi i nefajčiarmi.

$^{222}\text{Rn}$  a jeho produkty premeny sa dostávajú do dýchacieho traktu, kde sa interakciou s pľúcnym tkanivom usadzujú a zachytávajú, čím následne poškodzujú pľúcne tkanivo a môžu spôsobovať rakovinu pľúc. Rakovina spôsobená  $^{222}\text{Rn}$  a jeho produktmi premeny nevzniká okamžite. Doba, za ktorú sa môže začať prejavovať je rádovo 10 až 30 rokov [2].

Ak vychádzame z lineárneho nárastu rizika vzniku rakoviny pľúc o 16% na 100 Bq/m<sup>3</sup>, tak radón spôsobuje v pobytových priestoroch EÚ približne 9% všetkých úmrtí na rakovinu pľúc, a približne 2% všetkých úmrtí na nádorové ochorenia. To znamená približne 20 000 ľudí v Európe zomrie ročne na rakovinu pľúc v dôsledku ožiarenia radónom [2].

Oxid uhličitý je nehorľavý plyn bez farby a zápachu.

CO<sub>2</sub> spôsobuje zadusenie hypoxiou a pôsobí ako toxický plyn. Pri vysokých koncentráciách takmer okamžite spôsobuje bezvedomie, zastavenie dýchania a nakoniec smrť do 1 minúty.

Epidemiologické štúdie zamerané na koncentrácie CO<sub>2</sub> a následné účinky na zdravie v rôznych pobytových prostredia ukázali, že symptómy napr. podráždenie očí, bolesť alebo sucho v hrdle, upchatý nos, nádcha, kýchanie a kašeľ, boli častejšie hlásené jednotlivcami vystavenými koncentráciám vyšším ako 800 ppm ako u tých, ktorí sú vystavení nižším koncentráciám. Koncentrácia CO<sub>2</sub> vyššia ako 1000 ppm bola spojená s vyšším rizikom výskytu rinitídy (kýchanie, nádcha, upchatý nos). Konkrétne hladiny koncentrácie CO<sub>2</sub> väčšie ako 984 ppm boli spojené s nedostatočnou koncentráciou, zatiaľ čo hladina väčšia ako 1500 ppm bola spojená so zvýšenou prevalenciou bolesti hlavy, závratov, točenia hlavy a únavy v porovnaní s hladinou menšou ako 1 000 ppm [3].

Žiadna individuálna štúdia sa nepovažovala za dostatočne silnú na to, aby bola vybraná ako základ pre a odporúčaný limit expozície. Avšak, všetky štúdia naznačujú, že môže existovať limitná hodnota koncentrácie výhodná pre pohodlie (t.j. lepšie vnímanie kvality vnútorného vzduchu) a zdravotné prínosy. Taktiež, že 1000 ppm by sa mohlo považovať za vhodný limit expozície. Táto úroveň je v súlade s normou ASHRAE, ako aj normami z iných krajín [3].

Koncentrácia CO<sub>2</sub> vo vnútornom vzduchu sa často používa ako meradlo vetrania. Zabezpečené dostatočného vetrania pomôže znížiť úroveň koncentrácie CO<sub>2</sub> v domácnosti. Stratégie na zvýšenie vetrania v domácnosti zahŕňa [3]:

1. zvýšenie prirodzeného vetrania otvorením okien (berúc do úvahy okolité prostredie a kvalitu vzduchu v ňom);
2. nastavenie mechanického vetracieho systému na vyššie nastavenie alebo jeho dlhší čas;
3. nechať ventilačný systém pravidelne kontrolovať kvalifikovaným dodávateľom vetrania;
4. spustenie digestora pri varení;
5. pomocou samostatného ventilátora, kvôli uisteniu, že vzduch je distribuovaný po celom dome.

Pokiaľ ide o riadenie zdroja produkcie nového CO<sub>2</sub> v obytných priestoroch, možno ho znížiť týmito spôsobmi [3]:

1. zabezpečenie toho, aby spotrebiče spaľujúce palivo boli v dobrom prevádzkovom stave a riadne odvzdušnené;
2. vyhýbanie sa používaniu neventilovaných spotrebičov spaľujúcich palivo v interiéri;
3. nefajčiť v uzavretých priestoroch;
4. vyhýbanie sa preplneným životným situáciám, ak je to možné.

### 3 Experimentálne aspekty

#### Detektory

Merali sme s tromi rôznymi detektormi.

Na zistenie priemerných hodnôt OAR v ovzduší miestnosti za obdobie troch mesiacov sme využili integrálny detektor RamaRn. Detektor sa skladá z viečka a nádoby – meracej komory.

Na kontinuálne meranie OAR vo vnútri miestnosti sme využili radónový monitor AlphaGUARD firmy Genitron. Monitor zaznamenával priemernú hodnotu OAR, teplotu, tlak a vlhkosť v miestnosti v hodinových intervaloch.

Na kontinuálne meranie koncentrácie CO<sub>2</sub> sme využili Vaisala Carbon Dioxide Meter.

Kontinuálne simultánne meranie prebiehalo v dvoch rodinných domoch. Pričom hlavným zdrojom dát pre štúdium slúžil prvý dom v okrese Pezinok a druhý dom slúžil iba na porovnanie.

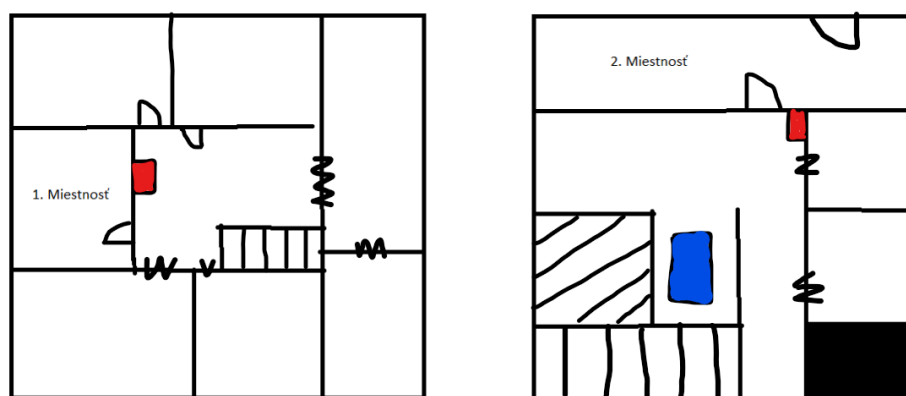
Stopové detektory boli umiestnené v siedmych rôznych typoch domov v dvoch lokalitách. Pričom ani jeden z týchto domov neobsahuje žiadne izolačné bariéry proti prieniku radónu do domu. Prvá lokalita bola v okrese Pezinok v meste Svätý Jur, kde sa uskutočnilo osem meraní v štyroch typoch domov a druhá lokalita bola v okrese Žarnovica v meste Nová Baňa, kde sa uskutočnilo osem meraní v troch typoch domov.

### Kontinuálne simultánne meranie

Prvé simultánne meranie sa uskutočnili v rodinnom dome v okrese Pezinok. Dom bol postavený z tehál a dreva približne v roku 1950, bol nadstavovaný v roku 1990 a zatepľovaný v roku 2010. Takých to domov v tejto lokalite je cca. 75%. Celý dom je podpivničený, bez žiadnej izolačnej bariéry proti prístupu radónu z geologického podlažia a obsahuje prvé poschodie, a povalu.

Merali sme v dvoch miestnostiach. Prvá miestnosť (obytná izba) sa nachádza na prvom poschodí a je ju možno vidieť na obrázku 1 naľavo. Pred miestnosťou sa nachádza kotol na kúrenie (je vyznačený červenou farbou), ktorý bol určený ako možný zdroj CO<sub>2</sub>. V noci miestnosť bola uzavretá od ostatných miestností na tomto podlaží a cez deň otvorená, pričom okná, ktoré boli otvorené v iných miestnostiach cez noc sa zatvorili. Následne sa začalo kúriť.

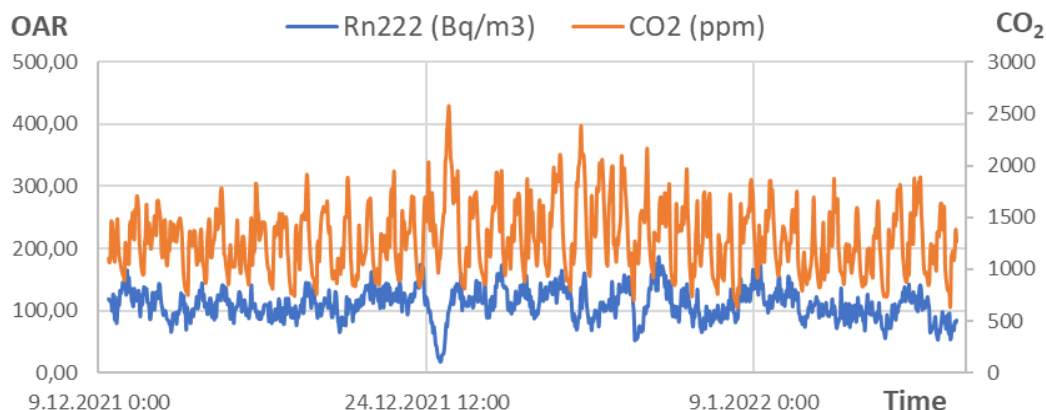
Druhá miestnosť (vináreň), v ktorej sme merali, sa nachádza v pivnici. Obsahuje dvojicu dverí – von a do zvyšku pivnice a je ju možno vidieť na obrázku 1 napravo. Dvere von sú postavené z drevotriesky, takže netesnia kompletne. V pivnici pred vinárňou sa nachádza kotol na ohrev vody (je vyznačený červenou farbou) a vodárnička (je vyznačená modrou farbou), ktoré môžu vplývať na OAR a koncentráciu CO<sub>2</sub> v druhej miestnosti. Ďalší možný vplyv na OAR a koncentráciu CO<sub>2</sub> môže spôsobovať víno a práca s ním. Pri práci s vínom sa otvoria dvere na miestnosti do zvyšku pivnice, kvôli ľahšiemu pohybu.



Obrázok 1: Plán podlaží v dome

V prvej miestnosti sa začalo merať dňa 9.12.2021 a meranie sa skončilo dňa 18.1.2022. Získané údaje koncentrácií  $^{222}\text{Rn}$  a  $\text{CO}_2$  zo simultánneho merania vykazujú denné variácie a určitú závislosť od rôznych vonkajších vplyvov.

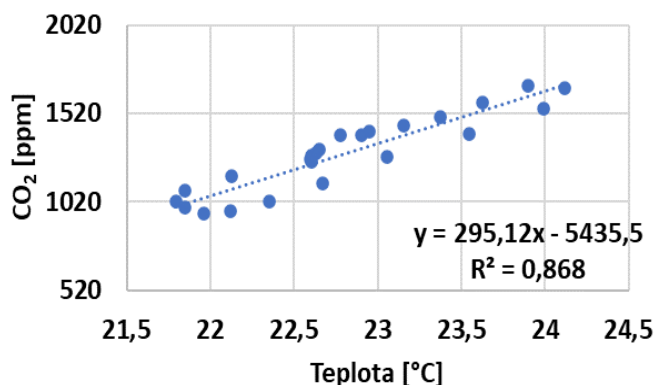
OAR dosiahlo maximá v ranných hodinách, zatiaľ čo koncentrácia  $\text{CO}_2$  dosiahla maximá v poobedných až večerných hodinách. Abnormálne hodnoty v okolí Vianoc boli spôsobené otvoreným oknom (plynný kotol musel nabehnúť viackrát) a piatimi ľuďmi v miestnosti. Teda môžeme povedať, že zdroje radónu a  $\text{CO}_2$  nie sú rovnaké v tejto miestnosti. Po bližšom skúmaní, hlavný zdroj  $\text{CO}_2$  v tejto miestnosti je plynový kotol, ktorý sa zapína na obed alebo poobede a následný pobyt osôb v priestore miestnosti. Bližšie je možno vidieť túto závislosť na grafe 1.



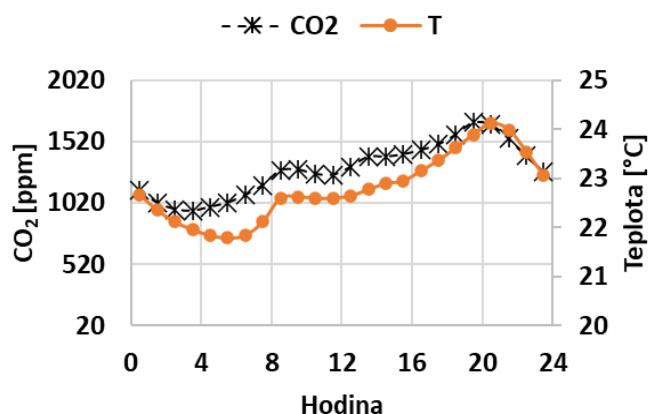
Graf 1: Závislosť OAR a koncentrácie  $\text{CO}_2$  od času

Korelácia medzi OAR a koncentráciou  $\text{CO}_2$  nie je vysoká. Rovnako aj denné vlny medzi OAR alebo koncentráciou  $\text{CO}_2$  a tlakom, vlhkosťou, a teplotou vonku, nie je možné vidieť veľké závislosti. Ich korelácie a antikorelácie nie sú vysoké.

Najväčšiu koreláciu v tejto miestnosti dosahuje koncentrácia  $\text{CO}_2$  a teplota, ktorú je možno vidieť na grafe 2. Na grafe 3, ktorý zobrazuje denné vlny, je možno vidieť spoločný nárast a klesanie koncentrácií  $\text{CO}_2$  a teploty. Maximá boli dosiahnuté vo večerných hodinách okolo 20:00 a minimá medzi 4:00 až 8:00 ráno. Teda hlavné zdroje koncentrácie  $\text{CO}_2$  v tejto miestnosti bude plynový kotol a obyvatelia domu. Nakoľko plynový kotol sa zapína v ranných hodinách a vypína vo večerných, rovnako obyvatelia ráno i večer trávili svoj čas v tejto miestnosti.



Graf 2: Korelácia medzi koncentráciou  $\text{CO}_2$  a teplotou

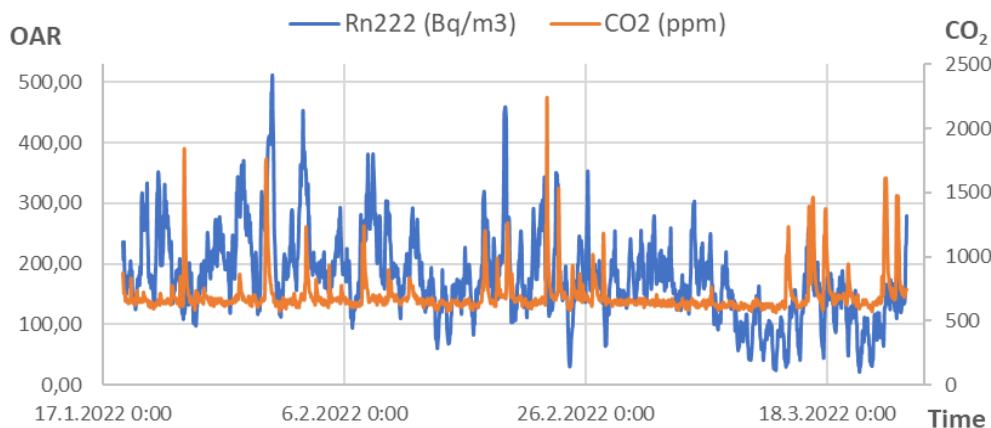


Graf 3: Priemerné denné vlny koncentrácie  $\text{CO}_2$  a teploty

V druhej miestnosti sa začalo merať dňa 18.1.2022 a skončilo dňa 24.3.2022. Získané údaje koncentrácií  $^{222}\text{Rn}$  a  $\text{CO}_2$  zo simultánneho merania vykazujú denné variácie a určitú závislosť od rôznych vonkajších vplyvov, pričom ich spoločné korelácie vykazujú väčšiu závislosť ako pri prvej miestnosti.

Závislosť OAR a koncentrácie  $\text{CO}_2$  od času je možné vidieť na grafe 4. Ich údaje tvoria jemnú antikoreláciu. Ich spoločný zdroj je vzduch (zmes radónu a  $\text{CO}_2$ ) nasávaný z geologického podložia do miestnosti. Medzi ďalšie zdroje patrí plynový kotol a vodárnička v inej časti pivnici, ktoré sa tvária ako hlavné zdroje  $\text{CO}_2$ .

Abnormálne hodnoty na konci meracej doby bolo spôsobené osobami pracujúcimi s vínami v miestnosti. Koncentrácie  $\text{CO}_2$  sa počas tejto doby zvýšili a korelácia medzi OAR a koncentráciou  $\text{CO}_2$  sa znížila.



Graf 4: Závislosť OAR a koncentrácie  $\text{CO}_2$  od času

Vysokú antikoreláciu v tejto miestnosti je možno vidieť medzi OAR a teplotou v miestnosti a koreláciu medzi koncentráciou  $\text{CO}_2$  a teplotou.

Aktívne nasávanie pôdneho vzduchu spôsobené podtlakom v dome je vytvoreným najmä v dôsledku rozdielu vnútorných a vonkajších teplôt. Teda maximá OAR a koncentrácie  $\text{CO}_2$  v miestnosti by mali nastať, keď tento rozdiel je najväčší. Avšak graf denný vln a korelácie túto skutočnosť nedokázal potvrdiť, v dôsledku toho, že teplota v tejto miestnosti je takmer konštantná a korelácia medzi vonkajšou teplotou a koncentraciami je príliš nízka.

Teda presiahnuté limitné hodnoty tu môžeme vidieť v prvej miestnosti pri koncentrácií  $\text{CO}_2$  a v druhej miestnosti pri koncentrácií  $\text{CO}_2$  i OAR. V prvej miestnosti maximá OAR nepresiahli  $200 \text{ Bq/m}^3$

a maximum koncentrácie CO<sub>2</sub> presiahlo 2 500 ppm. Zatiaľ, čo v druhej miestnosti maximum, OAR presiahlo 500 Bq/m<sup>3</sup> a CO<sub>2</sub> presiahlo 2 200 ppm.

Ďalší dom, v ktorom sme kontinuálne merali koncentrácie <sup>222</sup>Rn a CO<sub>2</sub> sa nachádzal v Studienke. Pričom obsahoval iba prízemie a nebol podpivničený. Tieto dáta slúžili primárne na porovnanie s rodinným domom v okrese Pezinok.

Korelácia medzi OAR a koncentráciou CO<sub>2</sub> nebola vysoká, ale nebola nízka natoľko, že by sa dala zanedbať. Maximá OAR dosahovala počas prvej polovici dňa, zatiaľ čo, maximá koncentrácia CO<sub>2</sub> dosahovala počas poobedných hodín. Avšak poklesy a stúpania obidvoch hodnôt boli približne rovnakom čase.

Ostatné korelácie boli minimálne alebo takmer nulové. Najmenšie korelácie boli dosiahnuté medzi tlakom a koncentráciou CO<sub>2</sub>.

OAR dosiahla maximálnu hodnotu v tomto dome rovnú 216 Bq/m<sup>3</sup>. Zatiaľ čo koncentrácia CO<sub>2</sub> dosiahla maximálnu hodnotu rovnú 957 ppm. Žiadna z týchto hodnôt nepresahuje limitnú hodnotu, i keď OAR presahuje „bezpečnú“ hodnotu 200 Bq/m<sup>3</sup>. Pri tejto hodnote pravdepodobnosť výskytu rakoviny stúpol približne 32%.

### Štúdium správania sa OAR v rôznych typoch domov

Ďalšia časť sa venuje analýze výsledkov stopových detektorov RamaRn v rozličných typoch domov, ktoré merajú priemernú hodnotu OAR v miestnosti. Stopové detektory boli umiestnené v domoch na dobu približnú troch mesiacov a ich následné výsledky a neistoty vyhodnotené v špecializovaných laboratóriách. Prvé štyri domy sa nachádzajú v okrese Pezinok a ďalšie tri domy v Novej Bani.

V prvom dome sa meralo v štyroch miestnostiach, pričom dvoch z nich sa meralo kontinuálne – prvé poschodie, prízemie, pivnica vináreň a pivnica (bývalá) uhliareň. Stopové detektory namerali OAR 100±38 Bq/m<sup>3</sup> pre prvé poschodie, 180±60 Bq/m<sup>3</sup> pre prízemie, 195±35 Bq/m<sup>3</sup> pre vináreň a 190±40 Bq/m<sup>3</sup> pre uhliareň. Priemery OAR z kontinuálnych meraní nám určili hodnoty 110,44±16,51 Bq/m<sup>3</sup> pre prvé poschodie a 178,45±22,39 Bq/m<sup>3</sup> pre vináreň. Pri porovnaní hodnoty z kontinuálneho merania so stopovými detektormi, ich hodnoty sa takmer zhodujú ak uvažujeme neistoty. Najväčšie priemerné hodnoty boli namerané v pivnici a najmenšie na prvom poschodí. Rozdiel medzi týmito podlažiami je 90±39 Bq/m<sup>3</sup>, ak uvažujeme o stopových detektorov a 68±19,45 Bq/m<sup>3</sup>, ak uvažujeme kontinuálne detektory.

Druhý dom sa nachádza na kraji mesta Svätý Jur, blízkosti rezervácie Šúr a je obklopený vinohradmi. Bol postavený na začiatku tohto storočia, pričom využíva studňu ako zásobáreň vody a drevo na vykurovanie, je zateplený a nepodpivničený. Dom sa skladá z troch miestností, pričom dvoch sa neustále býva. Meralo sa v dvoch miestnostiach neustáleho pobytu – spáľňa spojená s obývačkou a kuchyňa spojená s jedálňou. Výsledné priemerné hodnoty OAR sú 250±40 Bq/m<sup>3</sup> pre kuchyňu spojenú s jedálňou a 260±80 Bq/m<sup>3</sup> pre obývačku spojenú so spáľňou. Malý rozdiel vo výsledných hodnotách bez ohľadu na neistoty môžeme vysvetliť vysokou výmenou vzduchu medzi týmito miestnosťami. Tieto dve miestnosti sa nachádzajú vedľa seba a sú oddelené len dverami, ktoré sú otvorené cez zimné obdobie kvôli kúreniu. Vysoké priemerné hodnoty v tomto dome, môžu byť pripísané spôsobu využívania domu. Namerané hodnoty v druhom dome sú väčšie ako v prvom dome s najmenším rozdielom 55 Bq/m<sup>3</sup> medzi OAR bez ohľadu na neistoty vo výpočtoch.

Tretí dom sa nachádza v historickom centre mesta Svätý Jur a bol postavený približne v roku 1800 zo všetkých materiálov, ktoré sa v tej dobe používali (tehly, betón, hlina, ...). Dom nebol zateplený ani podpivničený. Dom obsahuje tri miestnosti, pričom sa meralo v jedálni, ktorá je oddelená od ostatných miestností dverami. Nameraná hodnota OAR je 160±40 Bq/m<sup>3</sup>. Výsledná hodnota je menšia od druhého domu a prvého domu, keď berieme do úvahy iba údaje z miestností v kontakte s podlažím bez ohľadu na neistoty.

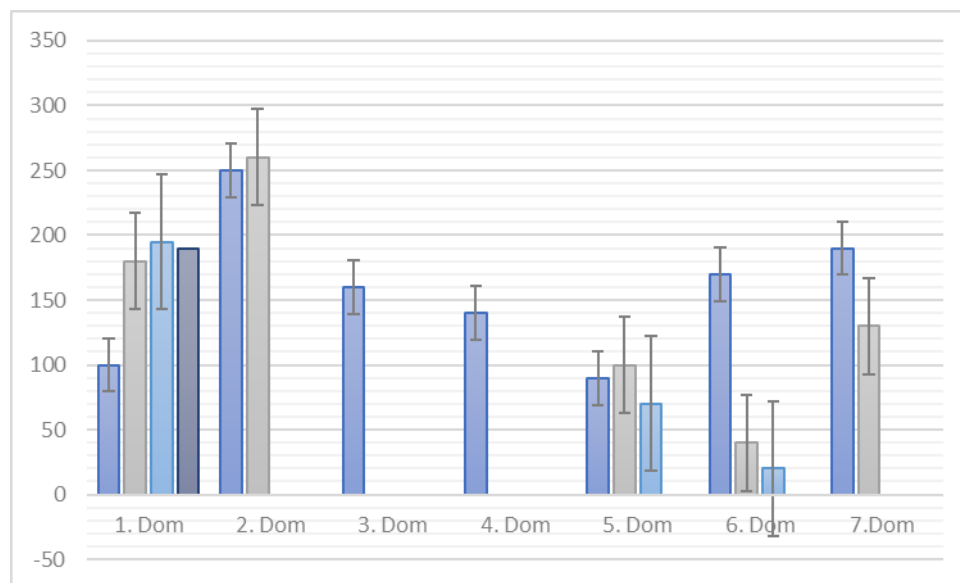
Štvrtý dom bol postavený približne v roku 1940. Je spolovice podpivničený a z jednej strany zateplený. Dom obsahuje tri miestnosti, ktoré sú oddelené od seba dverami. My sme merali v miestnosti, ktorá bola zateplená a nepodpivničená. Nameraná hodnota OAR v tejto miestnosti bola 140±40 Bq/m<sup>3</sup>. Ide o najmenšiu priemernú hodnotu OAR v lokalite mesta Svätý Jur, keď berieme do úvahy iba údaje z miestností v kontakte s podlažím bez ohľadu na neistoty.

Piaty rodinný dom obsahuje tri podlažia a bol postavený okolo roku 1968. Tento dom je možno vidieť na obrázku 14. Meralo sa v troch miestnostiach – pivnica (postavená z kamenných kvádrov), prvé poschodie (škvarobetón) a druhé poschodie (tehla). Hodnoty OAR boli pre pivnicu  $90\pm 40$  Bq/m<sup>3</sup>, prvé poschodie  $100\pm 35$  Bq/m<sup>3</sup> a druhé poschodie  $70\pm 30$  Bq/m<sup>3</sup>. Vyššie hodnoty na prvom poschodí mohli nastať kvôli zlému tesneniu. Všetky dvere v miestnostiach na prvom poschodí boli počas merania otvorené, pričom obidve podlažia sú oddelené iba zle tesniacimi dverami. Preto môžeme skonštatovať, že prebiehala vysoká výmena vzduchu medzi týmito podlažiami, ktorá mohla zapríčiniť vyššie koncentrácie radónu na prvom poschodí ako na prvom podlaží – v pivnici.

Šiestym domom je celoročne obývaná drevenica postavená v roku 2005 a obsahuje tri podlažia. Meralo sa v troch miestnostiach – pivnica (postavená z kameňa), prízemie (drevo) a podkrovie (drevo). Namerané hodnoty OAR boli pre pivnicu  $170\pm 35$  Bq/m<sup>3</sup>, prízemie  $40\pm 30$  Bq/m<sup>3</sup> a podkrovie menšie než 20 Bq/m<sup>3</sup>. Teda relatívne vysoké OAR bolo namerané v pivnici a relatívne nízke hodnoty na prízemí a prvom poschodí. Avšak takéto hodnoty boli očakávané, nakoľko ide celkom o novú stavbu a dobre užívanú.

Siedmy dom je rekreačný a obsahuje dve podlažia. Bol postavený v roku 1898, rekonštruovaný v roku 2020 a zateplený. Použitý materiál bol hlavne drevo a hlinený podsyp podlahy. Meralo sa dvoch miestnostiach – prízemie a podkrovie, ktoré sú vyznačené červenou šípkou na obrázku 16. Namerané hodnoty na prízemí boli  $190\pm 30$  Bq/m<sup>3</sup> a podkroví  $130\pm 40$  Bq/m<sup>3</sup>. Tieto hodnoty súhlasili s našimi očakávaniami z dôvodu priameho styku s podlažím, pričom vyššie hodnoty v podkroví súvisia s vysokou výmenou vzduchu medzi podlažiami.

Pre lepšiu viditeľnosť boli údaje vložené do grafu 5.



Graf 5: Priemerné hodnoty OAR zo stopových detektorov v Bq/m<sup>3</sup>

Výsledné priemerné hodnoty OAR zo stopových detektorov v lokalite Pezinok nepresahujú žiadne limitné hodnoty. I keď priemerné hodnoty OAR z druhého domu vykazujú vysokú hodnotu, ktorá sa však môže pripísať využívaniu domu. Taktiež najväčšie hodnoty okrem tohto domu, boli zaznamenané v pivnici a na prízemí rodinného domu, v ktorom sme merali kontinuálne, ak neberieme do úvahy neistoty.

Z troch domov v Novej Bani, v ktorých bola OAR meraná, najväčšie hodnoty OAR boli namerané poslednom siedmom dome. Dom oproti ostatným bol starší a zateplený, teda nemuselo dochádzať k vysokej výmene vzduchu. Avšak oproti domu postavenému v roku 1800 vo Svätom Jure, jeho hodnoty OAR na prízemí sú stále vyššie. Na príčine mohlo zateplenie, iné podlažie pod domom alebo iný variant, o ktorom sme neuvažovali alebo nevedeli.

Ak porovnávame priemerné hodnoty OAR všetkých domov z miestností s priamym kontaktom s podlažím a bez ohľadu na neistoty, najväčšie priemerné hodnoty OAR boli namerané vo Svätom Jure v druhom dome a najmenšie v piatom dome. Oproti ostatným domom, druhý dom využíval drevo na kúrenie a vlastnú studňu ako zásobáreň vody, čo mohlo spôsobiť najväčšie priemerné hodnoty OAR, ktoré sme namerali. Najmenšia hodnota OAR v miestnosti s priamym kontaktom s podlažím v piatom dome mohla byť spôsobená a teda vysvetlená vysokou rýchlosťou výmeny vzduchu s vyššími podlažiami.

Ak porovnávame priemerné hodnoty OAR všetkých domov zo všetkých miestností bez ohľadu na neistoty, najväčšie hodnoty OAR boli namerané stále v druhom dome a najmenšie v šiestom dome. Nízka koncentrácia radónu v šiestom dome na druhom poschodí môže byť spôsobená výmenou vzduchu s vonkajšou atmosférou. Šiesty dom je postavený hlavne z dreva, ktoré nie je vysoko izolačné. Preto nastávajú vysoké rozdiely v OAR medzi podlažiami v tomto dome. Len medzi pivnicou a prízemím ide o  $130 \text{ Bq/m}^3$ . Priemerná hodnota OAR na prvom poschodí tohto domu, bude vysoko závislá na koncentrácii radónu vo vonkajšej atmosfére.

Na grafe 5 je možné vidieť všetky údaje zo stopových detektorov zo všetkých domov so štandardnou odchýlkou. Ak berieme do úvahy túto odchýlku, najväčšie priemerné hodnoty OAR budú v druhom dome a najmenšie v šiestom dome na vyšších podlažiach. Po druhom dome s najväčšími hodnotami nasleduje prvý dom, siedmy dom, šiesty dom (podlažie s priamym kontaktom s podlažím), tretí dom, štvrtý dom a nakoniec piaty dom.

Taktiež z grafu 5 je možno vidieť rozdiely v priemerných hodnotách OAR medzi podlažiami. Najväčšie rozdiely sú v šiestom dome, medzi prvým a druhým podlažím. Nasleduje prvý dom s rozdielom hodnôt medzi tretím a druhým podlažím. Ďalej nasleduje siedmy dom a nakoniec piaty dom. Tieto rozdiely boli s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené výmenou vzduchu medzi podlažiami alebo s vonkajšou atmosférou. Teda môžeme povedať, že najväčšia výmena vzduchu prebieha v šiestom dome a najmenšia v piatom dome.

Pomocou nameraných priemerných hodnôt OAR môžeme teda povedať, že najzdravší dom na bývanie je piaty dom a šiesty dom, ak by obyvatelia bývali iba na vyšších podlažiach.

## Záver

V tejto práci sme sa primárne venovali analýze OAR a koncentrácii  $\text{CO}_2$  vo vzduchu v bytových priestoroch vytípaných domoch. Spracovali, zanalyzovali a prediskutovali sme experimentálne výsledky, ktoré sme namerali. Zaoberali sme sa kontinuálnym simultánnym meraním v dvoch rodinných domoch. Snažili sme sa poukázať na zdroje a závislosti týchto dvoch veličín. Údaje sme porovnali medzi domami. Taktiež sme poukázali na maximálne dosiahnuté hodnoty OAR a koncentrácie  $\text{CO}_2$ , a či presiahli limitné hodnoty stanovené v legislatíve alebo odporúčané hodnoty. V poslednej časti sme sa zaoberali štúdiom správania sa OAR v rôznych typoch domov. Porovnali sme priemerné hodnoty OAR získané z kontinuálneho merania s hodnotami nameranými stopovými detektormi v prvom dome a následne tie porovnali s priemernými hodnotami OAR zo stopových detektorov v domoch v rovnakej lokalite a inej lokalite. Poukázali sme na súvislosti a rozdiely medzi hodnotami.

Vysoký podiel na radiačnej záťaži obyvateľstva v bytových priestoroch má radón. Zvýšenej koncentrácií  $\text{CO}_2$  a jej súvislostiam s OAR sa venuje minimálna pozornosť. Keďže podlažie tvorí dominantný zdroj  $^{222}\text{Rn}$ , ale aj  $\text{CO}_2$  v bytových priestoroch, práve na túto skutočnosť treba upriamiť najväčšiu pozornosť. Pri plánovaní stavieb treba vykonať radónový prieskum stavebného pozemku a už v existujúcich stavbách radónovú diagnostiku vnútorných bytových priestorov. V prípade prekročenia limitných hodnôt je nevyhnutné pristúpiť k realizácii určitých protiradónových opatrení. V prípade prekročenia limitných hodnôt koncentrácie  $\text{CO}_2$  je najjednoduchšie zmaximalizovať vetranie v miestnostiach so zvýšenou hodnotou, a to pomocou okien alebo ventilátorov.

Táto práca mala upozorniť a oboznámiť s touto problematikou. Poukázať na skutočné hodnoty pri rôznych domoch, ku ktorým sa následne môžu porovnať iné (ďalšie) domy.



## 4 Literatúra

---

- [1] “Zbierka zákonov Slovenskej republiky, 87/2018 Z. z.” 2018
- [2] Rnd. Helena Cabánková and D. RNDr Denisa Nikodemová, “USMERŇOVANIE OŽIARENIA OBYVATEĽSTVA RADÓNOM V POBYTOVÝCH PRIESTOROCH” - *Slovenská zdravotnícka univerzita v Bratislave*.
- [3] B. Belhadj and F. Kaabi, 1. Auflage Vom Verlag als Druckwerk on demand und/oder als E-Book angeboten – “Residential Indoor air quality guidelines – Carbon Dioxide”. Mathématiques Cours et Exercices Corrigés.

### English Abstract:

---

The paper presents the results of long-term simultaneous measurement of  $^{222}\text{Rn}$  and  $\text{CO}_2$  in the indoor air of two family house's in the district of Pezinok and Studienka. AlphaGUARD was used for continuous  $^{222}\text{Rn}$  measurement and continuous  $\text{CO}_2$  measurement was performed with a Vaisala Carbon Dioxide Meter GM70. To compare the accuracy of the  $^{222}\text{Rn}$  concentration determination, we used RamaRn track detectors, from which we obtained one average value of RAC - the radon activity concentration (and uncertainty) per room.

The obtained data of  $^{222}\text{Rn}$  and  $\text{CO}_2$  concentrations from the simultaneous measurement show daily variations and a certain dependence on various external influences, such as the ventilation rate of the measured room. In the first monitored house, we measured the maximum RAC value exceeding  $500 \text{ Bq/m}^3$  in the 2nd room. The values in the 1st room did not exceed  $200 \text{ Bq/m}^3$ . The track detectors measured the RAC of  $100 \text{ Bq/m}^3$  in the first room and  $195 \text{ Bq/m}^3$  in the second. These data are in good agreement with the average RAC values obtained from continuous measurements. The specific values of  $\text{CO}_2$  concentration also increased due to the different ways of using the house. The measured maximum  $\text{CO}_2$  value exceeded  $2,500 \text{ ppm}$  in the 1st room, and in the 2nd room, the maximum  $\text{CO}_2$  value exceeded  $2,000 \text{ ppm}$ .

Experimental data and results from simultaneous continuous detectors in practical part of this paper were compared with trace detectors and with each other. Their dependencies, sources, meteorological variables - atmospheric pressure, humidity, temperature; day waves and correlations were determined. We found the maximum achieved values of the radon activity concentration and carbon dioxide concentrations and we found out whether these values do not exceed the limit or recommended values.