

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta *za gradbeništvo  
in geodezijo*



## OŽBEJ VENE

# ANALIZA UČINKOVITOSTI PREZRAČEVANJA STAVB NA OSNOVI MERITEV IN SIMULACIJ KONCENTRACIJ OGLJIKOVEGA DIOKSIDA IN RADONA

## MAGISTRSKA NALOGA

### UNIVERZitetni Študijski Program druge Stopnje gradbeništvo

Ljubljana, 2023



Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta *za gradbeništvo*  
*in geodezijo*



Kandidat:

## OŽBEJ VENE

# ANALIZA UČINKOVITOSTI PREZRAČEVANJA STAVB NA OSNOVI MERITEV IN SIMULACIJ KONCENTRACIJ OGLJIKOVEGA DIOKSIDA IN RADONA

Magistrska naloga št.:

# ANALYSIS OF BUILDING VENTILATION EFFICIENCY BASED ON MEASUREMENTS AND SIMULATIONS OF CARBON DIOXIDE AND RADON CONCENTRATIONS

Graduation thesis No.:

**Mentorica:**

izr. prof. dr. Mateja Dovjak

**Predsednik komisije:**

**Somentorica:**

prof. dr. Janja Vaupotič

**Član komisije:**

Ljubljana, 2023



## STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

<b>UDK:</b>	502.3:613.15(043)
<b>Avtor:</b>	Ožbej Vene
<b>Mentorica:</b>	izr. prof. dr. Mateja Dovjak
<b>Somentorica:</b>	prof. dr. Janja Vaupotič
<b>Naslov:</b>	Analiza učinkovitosti prezračevanja stavb na osnovi meritiv in simulacij koncentracij ogljikovega dioksida in radona
<b>Tip dokumenta:</b>	Magistrska naloga – univerzitetni študij
<b>Obseg in oprema:</b>	46 str., 9 pregl., 28 sl.
<b>Ključne besede:</b>	kakovost notranjega zraka, stanovanjske stavbe, učinkovitost prezračevanja, ogljikov dioksid, radon, meritve, simulacije

### Izvleček:

Kakovost notranjega zraka je odvisna od medsebojnega vpliva značilnosti lokacije, stavbe in stavbnega ovoja, vedenja uporabnikov in učinkovitosti prezračevanja. Glavni namen raziskave je analizirati učinkovitost prezračevanja na osnovi meritiv in nestacionarnih simulacij koncentracij ogljikovega dioksida ( $\text{CO}_2$ ) in radona ( $^{222}\text{Rn}$ ), ki so bile izvedene na dveh primerih ventilacijskih con: soba v enodružinski hiši (DH) in soba v večstanovanjski stavbi (VS). Metoda je vključevala: i) izdelavo modelov DH in VS; ii) izvedbo kontinuirnih meritiv koncentracij  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$  v zraku DH in VS jeseni in pozimi, spremjanje mikroklimatskih razmer in beleženje urnika prezračevanja; iii) nestacionarne simulacije zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja (scenariji 1–6) s programom CONTAM 3.4. (National Institute of Standards and Technology, 2020); iv) oceno učinkovitosti prezračevanja z določitvijo optimalnih stopenj prezračevanja za DH model pri pogoju, da koncentracije oben onesnaževal ne presežejo mejnih vrednosti ( $C_{\text{CO}_2} < 1000 \text{ ppm}$  in  $C_{\text{Rn}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$ ).

Z nestacionarno analizo podatkov smo določili optimalne stopnje prezračevanja, ki zagotavljajo  $C_{\text{Rn}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{\text{CO}_2} < 1000 \text{ ppm}$  za celotno obdobje. Optimalna stopnja prezračevanja v modela DH je jeseni  $1,4 \text{ h}^{-1}$  ( $69,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), pozimi  $1,8 \text{ h}^{-1}$  ( $89,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ); v modelu VS pa  $0,5 \text{ h}^{-1}$  ( $34,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) jeseni. Vrednosti optimalnih stopenj za učinkovito prezračevanje so višje za faktor 2,5–9,0 od priporočenih ali zahtevanih stopenj po nacionalni zakonodaji. Najnižja stopnja prezračevanja za čas zasedenosti prostora z uporabniki je v scenariju 3 ( $0,5 \text{ h}^{-1}$ ;  $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model DH in  $34,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model VS) in vodi v prekoračitev mejnih vrednosti za  $\text{CO}_2$  1000 ppm, in sicer v modelu DH za 8 % časa jeseni (povprečna koncentracija  $621 \pm 242 \text{ ppm}$ ) in 7 % časa pozimi (povprečna koncentracija  $630 \pm 230 \text{ ppm}$ ) ter v modelu VS za 0 % časa jeseni (povprečna koncentracija  $745 \pm 154 \text{ ppm}$ ). Mejna vrednost  $C_{\text{Rn}} 100 \text{ Bq m}^{-3}$  je pri modelu DH jeseni prekoračena za manj kot 1 % časa (povprečna koncentracija  $49 \pm 16 \text{ Bq m}^{-3}$ ), pozimi

pa 8 % časa (povprečna koncentracija  $74 \pm 18 \text{ Bq m}^{-3}$ ). Tudi v modelu VS je jeseni mejna vrednost  $C_{\text{Rn}}$   $100 \text{ Bq m}^{-3}$  prekoračena manj kot 1 % časa (povprečna koncentracija  $35 \pm 15 \text{ Bq m}^{-3}$ ).

Predstavljen pristop analize učinkovitosti prezračevanja je uporaben tudi za stavbe ostalih namembnosti, saj omogoča določitev optimalne stopnje prezračevanja na osnovi vseh vplivnih faktorjev in kazalnikov učinkovitosti prezračevanja.  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$  sta se v naši raziskavi izkazala kot uporabna kazalnika učinkovitosti prezračevanja, ki se dopolnjujeta, saj imata različen izvor (celično dihanje, zemljina), oba pa izkazujeta dnevni in sezonski cikel spremenjanja koncentracije. Celovit pristop analize podatkov z uporabo nestacionarnega modela simulacije, ki upošteva medsebojni vpliv lokacije, zaslove stavbe, specifike uporabnikov (prisotnost v prostoru, aktivnosti) ter cikel spremenjanja koncentracij onesnaževal, vodi v izboljšanje kakovosti notranjega zraka.

## BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

<b>UDC:</b>	502.3:613.15(043)
<b>Author:</b>	Ožbej Vene
<b>Supervisor:</b>	Assoc. Prof. Mateja Dovjak, Ph. D.
<b>Co-advisor:</b>	Prof. Janja Vaupotič, Ph. D.
<b>Title:</b>	Analysis of building ventilation efficiency based on measurements and simulations of carbon dioxide and radon concentrations
<b>Document Type:</b>	Master Thesis – University studies
<b>Notes:</b>	46 p., 9 tab., 28 fig.
<b>Key words:</b>	indoor air quality, residential buildings, ventilation efficiency, carbon dioxide, radon, measurements, simulations

### Abstract:

Indoor air quality depends on the interaction of site, building and building envelope characteristics, occupant behaviour and ventilation performance. The main objective of the study is to analyse the ventilation performance based on measurements and non-stationary simulations of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) and radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) concentrations performed on two example ventilation zones: a room in a single-family house (DH) and a room in a multi-apartment building (VS). The method included: i) modelling of DH and VS; ii) continuous measurements of  $\text{CO}_2$  and  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in the air of DH and VS in autumn and winter, monitoring of microclimatic conditions and recording of the ventilation schedule; iii) non-stationary simulations of the required and recommended ventilation rates (scenarios 1–6) with CONTAM 3.4. (National Institute of Standards and Technology, 2020); iv) evaluation of the ventilation performance by determining the optimal ventilation rates for the DH model, provided that the concentrations of both pollutants do not exceed the limit values ( $C_{\text{CO}_2} < 1000 \text{ ppm}$  and  $C_{\text{Rn}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$ ).

Using non-stationary data analysis, we have determined the optimal ventilation rates to ensure  $C_{\text{Rn}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$  and  $C_{\text{CO}_2} < 1000 \text{ ppm}$  for the whole period. The optimal ventilation rate in the DH model is  $1.4 \text{ h}^{-1}$  ( $69.9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) in autumn,  $1.8 \text{ h}^{-1}$  ( $89.9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) in winter; and  $0.5 \text{ h}^{-1}$  ( $34.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) in autumn in the VS model. The values of the optimal rates for effective ventilation are higher by a factor of 2.5–9.0 than the recommended or required rates under national legislation. The lowest ventilation rate for occupancy times is in Scenario 3 ( $0.5 \text{ h}^{-1}$ ;  $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  for the DH model and  $34.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  for the VS model) and leads to an exceedance of the limit values for  $\text{CO}_2$  of 1000 ppm, for 8 % of the time in the DH model in

autumn (average concentration of  $621 \pm 242$  ppm) and 7 % of the time in winter (average concentration of  $630 \pm 230$  ppm) and for 0 % of the time in the VS model in autumn (average concentration of  $745 \pm 154$  ppm). The  $C_{Rn}$  limit of  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  is exceeded less than 1 % of the time in the DH model in autumn (mean concentration  $49 \pm 16 \text{ Bq m}^{-3}$ ) and 8 % of the time in winter (mean concentration  $74 \pm 18 \text{ Bq m}^{-3}$ ). Also, in the VS model, the  $C_{Rn}$  limit of  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  is exceeded less than 1 % of the time in autumn (mean concentration  $35 \pm 15 \text{ Bq m}^{-3}$ ).

The presented approach for ventilation performance analysis is also applicable to buildings of other uses, as it allows the determination of the optimal ventilation rate based on all influencing factors and ventilation performance indicators.  $\text{CO}_2$  and  $^{222}\text{Rn}$  proved to be useful ventilation performance indicators in our study, which are complementary as they have different origins (cellular respiration, soil), and both show a diurnal and seasonal cycle of concentration variation. An integrated approach to data analysis using a non-stationary simulation model, considering the interaction of location, building design, occupant specificities (occupancy, activities) and the cycle of pollutant concentration changes, leads to an improvement in indoor air quality.

## ZAHVALA

Mentorici izr. prof. dr. Mateji Dovjak in somentorici prof. dr. Janji Vaupotič (Institut "Jožef Stefan") se najlepše zahvaljujem za vso pomoč, trud, vloženo energijo in čas ter podporo pri izvedbi in pisanju magistrske naloge. Meritve smo opravili z raziskovalno opremo iz operacije "Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost RRI prostora – RI-SI-EPOS", sofinancirane s strani Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije ter Evropske unije iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Iskreno bi se zahvalil tudi svoji družini in prijateljem, še posebej mami in očetu, za vso podporo, motivacijo in nesebično pomoč.

»Ta stran je namenoma prazna.«

## KAZALO VSEBINE

<b>STRAN ZA POPRAVKE</b>	<b>I</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b>	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b>	<b>IV</b>
<b>KAZALO VSEBINE</b>	<b>VIII</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC</b>	<b>X</b>
<b>KAZALO SLIK</b>	<b>XI</b>
<b>OKRAJŠAVE</b>	<b>XIV</b>
<b>SIMBOLI</b>	<b>XIV</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 CILJI RAZISKOVALNE NALOGE .....</b>	<b>3</b>
<b>3 METODE DELA .....</b>	<b>4</b>
3.1 Koraki raziskave .....	4
3.2 Izdelava dveh modelov ventilacijskih con .....	5
3.2.1 Opis ventilacijske cone in izbira lokacij – model DH .....	5
3.2.2 Opis ventilacijske cone in izbira lokacij – model VS.....	6
3.3 Meteorološki podatki, zunanje in notranje meritve onesnaževal, temperatura notranjega zraka, urnik prisotnosti in prezračevanja .....	7
3.3.1 Meteorološki podatki .....	7
3.3.2 Temperatura notranjega zraka.....	7
3.3.3 Koncentracija CO <sub>2</sub> in <sup>222</sup> Rn v zunanjem ter notranjem zraku.....	7
3.3.4 Meritve in merilne naprave – model DH .....	7
3.3.5 Urnik prezračevanja – model DH .....	9
3.3.6 Meritve in merilne naprave – model VS .....	12
3.3.7 Urnik prezračevanja – model VS .....	12
3.4 Stacionarne in ne-stacionarne simulacije s programom CONTAM 3.4 .....	14
3.4.1 Modeliranje.....	14
3.4.2 Opis programa .....	14
3.4.3 Onesnaževala .....	15
3.4.4 Odprtine.....	15
3.4.5 Stopnja proizvodnje CO <sub>2</sub> in <sup>222</sup> Rn.....	15
3.5 Nestacionarne simulacije C <sub>CO<sub>2</sub>-s</sub> in C <sub>Rn-s</sub> s programom CONTAM 3.4 in validacija .....	16
3.5.1 Simulacija – model DH.....	16
3.5.2 Simulacija razmer v modelu VS od 3. do 15. oktobra.....	16
<b>4 SCENARIJI PREZRAČEVANJA.....</b>	<b>17</b>

<b>5 ZAKONSKE ZAHTEVE IN PRIPOROČILA.....</b>	<b>18</b>
<b>6 REZULTATI .....</b>	<b>19</b>
6.1 Rezultati – model DH (pomlad) .....	19
6.1.1 Prva faza izračuna – model DH (pomlad).....	19
6.1.2 Druga faza izračuna – model DH (pomlad) .....	20
6.1.3 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $^{222}\text{Rn}$ – model DH (pomlad) .....	22
6.2 Rezultati – model DH (jesen) .....	22
6.2.1 Rezultati izmerjenih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ ter meteoroloških parametrov – model DH (jesen) .....	22
6.2.2 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model DH (jesen) ..	23
6.2.3 Vpliv zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja na koncentracije $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model DH (jesen) .....	25
6.3 Rezultati – model DH (zima).....	26
6.3.1 Rezultati izmerjenih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ ter meteoroloških parametrov – model DH (zima).....	26
6.3.2 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model DH (zima)...	27
6.3.3 Vpliv zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja na koncentracije $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model DH (zima).....	29
6.4 Rezultati – model VS.....	30
6.4.1 Rezultati izmerjenih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ ter meteoroloških parametrov – model VS.....	30
6.4.2 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model VS .....	32
6.4.3 Vpliv zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja na koncentracije $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model VS.....	33
6.4.4 Primerjava stacionarnega z nestacionarnim modelom – model VS .....	36
<b>7 RAZPRAVA.....</b>	<b>38</b>
<b>8 ZAKLJUČEK .....</b>	<b>40</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>43</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Urnik prezračevanja spomladi – model DH .....	9
Preglednica 2: Urnik prezračevanja v jeseni – model DH .....	10
Preglednica 3: Urnik prezračevanja pozimi – model DH .....	11
Preglednica 4: Urnik prezračevanja – model VS .....	13
Preglednica 5: Scenariji prezračevanja – model DH in model VS.....	17
Preglednica 6: Nabor mejnih vrednosti CO <sub>2</sub> v prostoru.....	18
Preglednica 7: Nabor mejnih vrednosti <sup>222</sup> Rn v prostoru .....	18
Preglednica 8: Model DH, prva faza izračuna – primerjava meritev z izračuni.....	20
Preglednica 9: Odstopanja simuliranih vrednosti C <sub>CO<sub>2</sub>-s</sub> [ppm] in C <sub>Rn-s</sub> [Bq m <sup>-3</sup> ] od mejnih vrednosti, za vseh šest scenarijev .....	34

## KAZALO SLIK

Slika 1: Tlorisna skica študentske sobe v družinski hiši (DH).....	5
Slika 2: Tlorisna skica stanovanja v večstanovanjski stavbi (VS) .....	6
Slika 3: Merilnik Radon Scout (Sarad, 2017).....	8
Slika 4: Merilnik Radon Scout Professional (Sarad, 2020) .....	8
Slika 5: Merilnik HOBO MX CO2 Logger (MX1102) (Onset, 2017).....	8
Slika 6: Merilnik AlphaGUARD (Bertin Instruments, 2019) .....	12
Slika 7: Izračun 1 – primerjava izmerjenih koncentracij $^{222}\text{Rn}$ z rezultati prve faze izračuna za model DH, za celotno obdobje od 4. do 11. maja 2021 .....	19
Slika 8: Izračun 2.1 – primerjava izmerjenih koncentracij $^{222}\text{Rn}$ z rezultati druge faze izračuna za model DH, za celotno obdobje od 4. do 11. maja 2021 .....	20
Slika 9: Izračun 2.2 – primerjava izmerjenih koncentracij $^{222}\text{Rn}$ z rezultati druge faze izračuna za model DH, za celotno obdobje od 4. do 11. maja 2021 .....	21
Slika 10: Volumen pretoka zraka za posamezno prezračevanje za model DH, ter izmerjena in simulirana koncentracija $^{222}\text{Rn}$ za obdobje od 4. do 11. maja 2021 .....	21
Slika 11: Izračun 2.3 – primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $^{222}\text{Rn}$ za model DH v obdobju od 4. do 11. maja 2021 .....	22
Slika 12: Jesen – rezultati meritev v DH: a) koncentracije $^{222}\text{Rn}$ v prostoru in temperature zunanjega zraka; b) koncentracije $\text{CO}_2$ v prostoru in temperature zunanjega zraka c) koncentracija $^{222}\text{Rn}$ in $\text{CO}_2$ v prostoru. Prikazani so rezultati za obdobje od 17. do 28. oktobra, ki smo jih uporabili tudi pri simulaciji za jesen .....	23
Slika 13: Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij za model DH: a) $^{222}\text{Rn}$ in b) $\text{CO}_2$ v obdobju od 17. do 28. oktobra 2021 .....	25
Slika 14: Rezultati simuliranih koncentracij za model DH: a) $^{222}\text{Rn}$ in b) $\text{CO}_2$ za 6 različnih scenarijev prezračevanja, v obdobju od 17. do 28. oktobra 2021 .....	25
Slika 15: Optimalna stopnja prezračevanja za model DH v času 17. –28. oktobra ( $1,4 \text{ h}^{-1}$ ) na osnovi mejnih vrednosti $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ in $C_{\text{CO2-s}} = 1000 \text{ ppm}$ (modra črta) .....	26
Slika 16: Zima – rezultati meritev v DH: a) koncentracije radona v prostoru in temperatura zunanjega zraka; b) koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru in temperatura zunanjega zraka; c) koncentracije radona in ogljikovega dioksida v prostoru. Prikazani so rezultati za obdobje od 8. do 19. decembra, ki smo jih uporabili tudi pri simulaciji za zimo .....	27
Slika 17: Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij za model DH: a) $^{222}\text{Rn}$ in b) $\text{CO}_2$ v obdobju od 8. do 19. decembra .....	28
Slika 18: Rezultati simuliranih koncentracij za model DH: a) $^{222}\text{Rn}$ in b) $\text{CO}_2$ za 6 različnih scenarijev prezračevanja, v obdobju od 8. do 19. decembra 2021 .....	29
Slika 19: Optimalna stopnja prezračevanja za model DH ( $1,8 \text{ h}^{-1}$ ) v času 8.–19. decembra na osnovi mejnih vrednosti $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ in $C_{\text{CO2-s}} = 1000 \text{ ppm}$ .....	30

Slika 20: Koncentracije $^{222}\text{Rn}$ v zunanjem zraku ( $C_{\text{Rn-out}}$ ), temperatura zunanjega zraka ( $T_{\text{out}}$ ) za model VS .....	30
Slika 21: Izmerjene koncentracije $^{222}\text{Rn}$ ( $C_{\text{Rn-in}}$ ) v prostoru VS in razlika v temperaturi med notranjim ( $T_{\text{in}}$ ) in zunanjim ( $T_{\text{out}}$ ) zrakom.....	31
Slika 22: Izmerjene koncentracije $\text{CO}_2$ ( $C_{\text{CO}_2}$ ) v prostoru VS.....	32
Slika 23: Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij za model VS: a) $^{222}\text{Rn}$ in b) $\text{CO}_2$ v obdobju od 3. do 5. oktobra 2021 .....	33
Slika 24: Rezultati simuliranih koncentracij za model VS: a) $^{222}\text{Rn}$ in b) $\text{CO}_2$ za 6 različnih scenarijev prezračevanja, v obdobju od 3. do 15. oktobra 2021 .....	34
Slika 25: Optimalna stopnja prezračevanja (DVR) za model VS in čas 3.–15. oktober na osnovi mejnih vrednosti $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ in $C_{\text{CO}_2-s} = 1000 \text{ ppm}$ .....	35
Slika 26: Optimalna stopnja prezračevanja (DVR) za model VS in čas 3.–15. oktober na osnovi mejnih vrednosti $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ in $C_{\text{CO}_2-s} = 800 \text{ ppm}$ .....	36
Slika 27: Stacionarni izračun – optimalna stopnja prezračevanja za model VS ( $0,7 \text{ h}^{-1}$ ) na osnovi mejnih vrednosti $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ in $C_{\text{CO}_2-s} = 800 \text{ ppm}$ . Aktivna proizvodnja $^{222}\text{Rn}$ definirana kot maksimalna vrednost.....	37
Slika 28: Stacionarni izračun – optimalna stopnja prezračevanja za model VS ( $0,7 \text{ h}^{-1}$ ) na osnovi mejnih vrednosti $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ in $C_{\text{CO}_2-s} = 800 \text{ ppm}$ . Proizvodnja $^{222}\text{Rn}$ definirana kot povprečna vrednost.....	37

»Ta stran je namenoma prazna.«

## OKRAJŠAVE

ACH	Izmenjav zraka na uro (angl. <i>air changes per hour</i> )
DH	Družinska hiša
DVR	Načrtovana stopnja prezračevanja (angl. <i>design ventilation rate</i> )
MV	Mejna vrednost
ppm	Število delcev na milijon (angl. <i>parts per million</i> )
SZO	Svetovna zdravstvena organizacija (angl. <i>World Health Organization</i> )
VS	Večstanovanjska stavba

## SIMBOLI

$\text{CO}_2$	Ogljikov dioksid
$^{222}\text{Rn}$	Radon
$C_{\text{Rn-in}}$	Koncentracija radona v notranjem zraku [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]
$C_{\text{Rn-out}}$	Koncentracija radona v zunanjem zraku [ $\text{Bq m}^{-3}$ ]
$C_{\text{CO}_2\text{-in}}$	Koncentracija ogljikovega dioksida v notranjem zraku [ppm]
$C_{\text{CO}_2\text{-out}}$	Koncentracija ogljikovega dioksida v zunanjem zraku [ppm]
$T_{\text{in}}$	Temperatura notranjega zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\text{out}}$	Temperatura zunanjega zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$v_w$	Hitrost vetra [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$p$	Zračni tlak [hPa]
$p_{\text{b-out}}$	Zračni tlak zunaj [hPa]
$p_{\text{b-in}}$	Zračni tlak v prostoru [hPa]
$RH_{\text{in}}$	Relativna vlažnost notranjega zraka [%]
$RH_{\text{out}}$	Relativna vlažnost zunanjega zraka [%]
DVR	Načrtovana stopnja prezračevanja (angl. <i>design ventilation rate</i> ) [ $\text{h}^{-1}$ ]

»Ta stran je namenoma prazna.«



## 1 UVOD

Energetsko učinkovite stavbe z višjo zrakotesnostjo stavnega ovoja in nezadostnim kontroliranim prezračevanjem pogosto vodijo v dovajanje minimalnih možnih volumnov svežega zraka in poslabšanje kakovosti notranjega zraka (Dovjak s sod., 2021). Številne raziskave doma in po svetu opozarjajo, da je kakovost notranjega zraka v prenovljenih energetsko učinkovitih stavbah pogosto slaba (Jiránek in Kacmaríková, 2014; Cucos Dinu s sod., 2015; Fojtíková in Rovenská, 2015; Pressyanov s sod., 2015; Colligan s sod., 2016; Vasilyev s sod., 2017; Baeza s sod., 2018; Pampuri s sod., 2018; Yang s sod., 2019a in 2020b; Dovjak s sod., 2021). Dokazano je, da ima kakovost notranjega zraka vpliv na zdravje, počutje in storilnost (Wyon in Wargocki, 2013). Avtorja Wyon in Wargocki (2013) sta s sistematičnim pregledom literature ter z eksperimenti v šolskih in poslovnih prostorih dokazala, da zdravo in kakovostno notranje okolje lahko izboljša miselne sposobnosti za 21 %, storilnost za 5 % in zniža bolniško odsotnost za 10 %. Na področju učinkovitega prezračevanja je bilo izvedenih veliko raziskav. Metodološki pristopi vključujejo kontinuirne meritve onesnaževal (Colligan s sod., 2016), stacionarne (Hu s sod., 2013) in/ali nestacionarne simulacije prezračevanja (Persily, 1985) ter kombinacijo meritev in simulacij (Wirnsberger s sod., 2019; Muelas s sod., 2022). Kot kazalnik učinkovitega prezračevanja se za meritve in simulacije običajno uporablja ogljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) (Halgamuge s sod., 2009), le manjši delež raziskav pa kot sledilo sočasno obravnava tudi radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) (Frutos s sod., 2015).

$\text{CO}_2$  prištevamo med pomembne onesnaževalce notranjega zraka. Je plin brez barve in vonja, ki je v ozračju prisoten v nizki koncentraciji. Nastaja na tri načine, in sicer pri zgorevanju organskih snovi, kot presnovni produkt pri celičnem dihanju, proizvajajo ga mikroorganizmi pri fermentaciji. Je kazalnik učinkovitosti prezračevanja prostorov in s tem merilo za kakovost notranjega zraka. Njegova koncentracija v zraku je odvisna od obremenitve prostora z uporabniki, velikosti prostora in učinkovitosti prezračevanja (kvalitativnih in kvantitativnih značilnosti prezračevanja). Najpomembnejšo vlogo ima pri tem stopnja izmenjave notranjega zraka z zunanjim (Dovjak s sod., 2022; Kemija, 2008).

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ , Rn) je radioaktivni žlahtni plin, ki nastane iz radija ( $^{226}\text{Ra}$ ) z radioaktivno preobrazbo alfa. Njegov glavni vir je zemeljska skorja, kjer nastaja v zrnih kamnin, prehaja v talni zrak in z difuzijo in advekcijo potuje proti površju ter izhaja na prosto. Na transport vplivajo lastnosti tal (npr. mineralna struktura, velikost in oblika zrn zemljine, vlažnost tal, prepustnost tal) in hidrometeorološki parametri (temperatura, zračni tlak, itd.). Koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  v zunanjem zraku je običajno nizka, do nekaj 10  $\text{Bq m}^{-3}$  (UNSCEAR, 2000; Vaupotič, 2010). Problem predstavlja koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  v notranjem zraku, kjer se kopči in lahko pri slabem prezračevanju doseže visoke vrednosti (običajno nekaj 100  $\text{Bq m}^{-3}$ , lahko tudi več) (Tollefsen s sod., 2011; UNSCEAR, 2000; Vaupotič, 2003). Kljub dobrim lastnostim indikatorja prezračevanja pa je  $^{222}\text{Rn}$  takoj za kajenjem drugi najpogostejsi povzročitelj pljučnega raka (Darby s sod., 2005).

Poznamo štiri vire in načine prehajanja radona v prostor:

- zemljina pod stavbo, v kolikor je stavbni ovoj v stiku s tlemi netesen (Keskikuru s sod., 2001; Zmazek in Vaupotič, 2007),
- gradbeni materiali, v katerih je prisoten radij (npr. elektrofiltrska opeka) (Wilkening, 1990; Keskikuru s sod., 2001),
- pitna voda, v kolikor se pridobiva iz virov podzemne vode, kot so izviri, vodnjaki in vrtine, ki imajo običajno večjo vsebnost radona od površinskih voda (reke, jezera in rezervoarji) (Wilkening, 1990; SZO, 2009),
- zemeljski plin, ki se v zrak spušča z gorenjem.

Prezračevanje predstavlja pomembno področje v procesu graditve stavb, saj so stavbe veliko bolj zrakotesne, kot so bile nekoč. Z dovajanjem nezadostnih količin svežega zraka na uporabnika in povišanimi koncentracijami onesnaževal v notranjem zraku lahko prihaja do negativnih zdravstvenih izidov in nižje storilnosti (Hyewon Lee s sod., 2018; Wyon in Wargocki, 2013), zato je potrebno že v fazi načrtovanja stavbe temu področju posvetiti dovolj pozornosti.

Pri koncentraciji  $^{222}\text{Rn}$  v zraku prostora se pojavlja značilen dnevni cikel (z najvišjimi vrednostmi v zgodnjih jutranjih urah in najnižjimi proti večeru), ki je običajno obratno sorazmeren z zunanjо temperaturo (Buh, 2022). Koncentracija  $\text{CO}_2$  se spreminja predvsem v odvisnosti od prisotnosti uporabnikov prostora in učinkovitosti prezračevanja.

S ciljem dosega dobre kakovosti zraka smo v raziskavi izvedli kombinacijo meritev in nestacionarnih simulacij obeh onesnaževal. Nestacionarno modeliranje, za razliko od stacionarnega, temelji na časovno spremenljajočih robnih pogojih in časovno spremenljajočem načinu uporabe stavb (PURES, 2022). Prednost nestacionarnih analiz od stacionarnih je časovni zajem in spremeljanje vseh pomembnih parametrov, ki vplivajo na prezračevanje. Ti vključujejo tako zunanje meteorološke podatke, velikost prostora, stopnjo prezračevanja kot tudi notranja onesnaževala (stopnja proizvodnje  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$ ). Tako model v čim večji meri približamo realnemu stanju in preučimo vpliv parametrov na koncentracijo  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$ , ki ju v naši raziskavi obravnavamo kot kazalnika učinkovitosti prezračevanja.

Glavni namen naloge je bila analiza učinkovitost prezračevanja na osnovi meritev in simulacij koncentracij  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$ , ki so bile izvedene na izbrani ventilacijski coni v večstanovanjski stavbi (model VS) in družinski hiši (model DH). Pri simulacijah smo uporabili 14 zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja (scenariji 1, 2, 3, 4, 5A\_Cat I-III, 5B\_Cat I-III, 5C\_Cat I-III in 6). Upoštevali smo zakonske zahteve in priporočila za določitev optimalnih stopenj prezračevanja (ang. *design ventilation rate* (DVR)), pri katerih koncentraciji izbranih onesnaževal ne bi presegle mejne vrednosti ( $C_{\text{CO}_2}$  1000 ppm in  $C_{\text{Rn}}$  100 Bq  $\text{m}^{-3}$ ). Za model VS smo izvedli še stacionarno analizo prezračevanja, ki je mnogo bolj preprosta, saj smo želeli ugotoviti, če stacionarna analiza zadošča za določitev optimalnih DVR za obe obravnavani onesnaževali.

## 2 CILJI RAZISKOVALNE NALOGE

### RAZISKOVALNI CILJI:

1. Izdelati modela ventilacijskih con: model DH (študentska soba v družinski hiši) in model VS (soba v večstanovanjski stavbi).
2. V DH in VS izvesti kontinuirne meritve koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn ( $C_{CO_2-m}$  in  $C_{Rn-m}$ ) in temperature ( $T_{in}$ ), pridobiti podatke o izbranih meteoroloških parametrih v zunanjem zraku (zračni tlak, temperatura, smer in hitrost vetra) od ARSO (Agencija RS za okolje) ter beležiti urnik prisotnosti in prezračevanja.
3. Izvesti nestacionarne simulacije koncentracije CO<sub>2</sub> ( $C_{CO_2-s}$ ) in <sup>222</sup>Rn ( $C_{Rn-s}$ ) v programu CONTAM 3.4 (National Institute of Standards and Technology, 2020) in validacije.
4. Oceniti vpliv zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja na koncentracije CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn za model DH in model VS.
5. Določiti optimalne DVR, ki vzdržujejo v modelih DH in VS koncentraciji CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn ves čas pod mejnima vrednostnima (CO<sub>2</sub> < 1000 ppm in <sup>222</sup>Rn < 100 Bq m<sup>-3</sup>).
6. Za model VS izvesti stacionarno analizo in rezultate primerjati z nestacionarno analizo.
7. Na osnovi rezultatov izdelati priporočila za izboljšanje kakovosti notranjega zraka.

### RAZISKOVALNA VPRAŠANJA:

1. Ali zahtevane stopnje prezračevanja omogočajo vzdrževanje koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn pod mejno vrednostjo?
2. Ali je izvedba nestacionarne simulacije  $C_{CO_2-s}$  in  $C_{Rn-s}$  potrebna za določitev optimalnih stopenj prezračevanja, ki zagotavljajo koncentracije CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn pod mejnimi vrednostmi ali zadošča zgolj stacionarna simulacija?

### 3 METODE DELA

#### 3.1 Koraki raziskave

Za raziskavo smo si izbrali dve stanovanjski stavbi. Prva je enodružinska hiša (DH), v kateri smo meritve in simulacije ventilacijske cone naredili za eno izmed sob (študentska soba), druga je večstanovanjsko stavbo (VS), kjer smo kot ventilacijsko cono obravnavali sobo stanovanja.

Študijo smo izvedli v več korakih :

- izdelava modelov ventilacijskih con (model DH in model VS);
- izbira lokacij za izvedbo meritev v notranjem in zunanjem zraku za modela DH in VS;
- izvedba meritev koncentracij  $\text{CO}_2$ ,  $^{222}\text{Rn}$ , sobne temperature ( $T_{\text{in}}$ ) in izbranih meteoroloških parametrov ter beleženje prisotnosti uporabnikov in urnika prezračevanja za modela DH in VS;
- nestacionarno simuliranje koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  v modelu DH (pomlad) s preverjanjem veljavnosti modela z uporabo programa CONTAM 3.4 (National Institute of Standards and Technology, 2020);
- nestacionarno simuliranje izmerjenih koncentracij  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$  v modelu DH (jesen in zima) in modelu VS (zima) z uporabo programa CONTAM 3.4;
- uporaba šestih scenarijev prezračevanja za oba modela (DH in VS) ter določitev optimalnih stopenj prezračevanja (DVR);
- stacionarna simulacija koncentracij  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$  na modelu VS (zima) z uporabo programa CONTAM 3.4 in primerjava z rezultati nestacionarne analize;
- izdelava priporočil, ki zagotavljajo optimalno kakovost zraka v DH in VS.

Vhodne podatke za izdelavo modela DH (oblika in dimenzijske prostora, koncentracije  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$ , sobna temperatura, urnik prezračevanja in zasedenost oz. prisotnost uporabnikov) smo po dogovoru uporabili iz magistrskega dela (Buh, 2022).

### 3.2 Izdelava dveh modelov ventilacijskih con

#### 3.2.1 Opis ventilacijske cone in izbira lokacij – model DH

Pri izdelavi modela DH smo izhajali iz geometrije realnega prostora – študentske sobe v enodružinski hiši v naselju Zadobje (občina Gorenja vas – Poljane). Hiša je bila zgrajena leta 1999, je delno podkletena in ima poleg pritličja še dve nadstropji (K+P+2N). Stavbni ovoj je sestavljen iz opeke (nosilna konstrukcija, NK), polistirena (toplota izolacija, TI) in ometa (hidroizolacija, HI) na zunanjih stenah ter betonske plošče (NK), steklene volne (TI) in strešne kritine (HI) v sestavi strehe.

Soba dimenzij  $4,80 \text{ m} \times 4,52 \text{ m}$  tlorisne površine, z višino 2,37 m se nahaja v drugem nadstropju ter ima, kot je razvidno s spodnje skice, poleg vhodnih vrat v sobo, še okno in balkonska vrata. Točka merilnega mesta, kjer so bili postavljeni vsi merilni instrumenti, je na sliki 1 označena s črno piko (Slika 1).



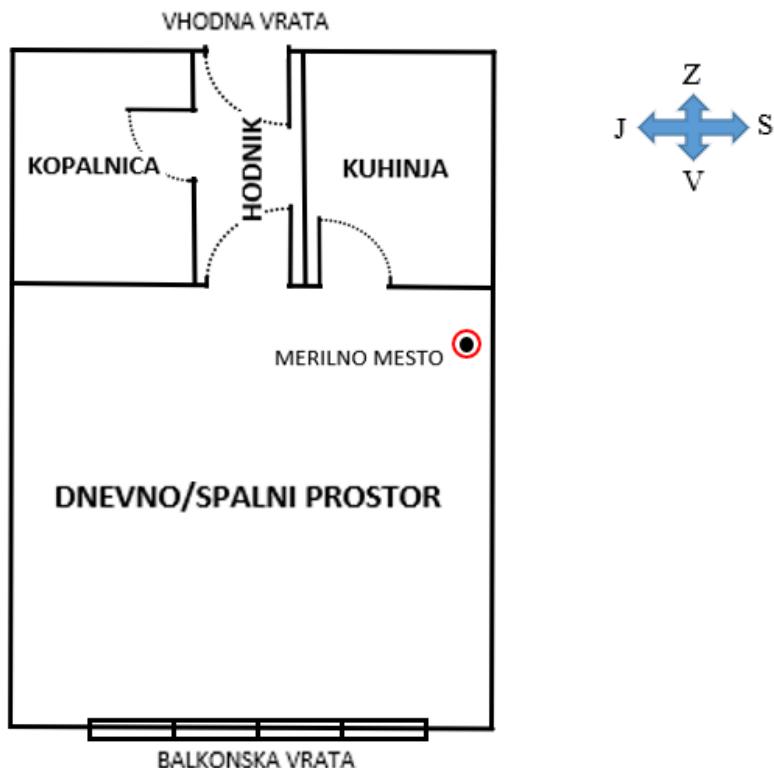
Slika 1: Tlorisna skica študentske sobe v družinski hiši (DH) (rdeč krog označuje merilno mesto)

V modelu DH smo upoštevali naravno prezračevanje skozi balkonska vrata ( $0,63 \text{ m} \times 2,01 \text{ m}$ ) in vhodna vrata v sobo ( $1,00 \text{ m} \times 2,00 \text{ m}$ ). Zaradi netesnosti stavbnega ovoja smo upoštevali tudi prezračevanje v obliki infiltracije skozi stavbni ovoj. Poleg rezultatov meritev v sobi smo uporabili še meteorološke podatke iz najbližje samodejne meteorološke postaje Pasja ravan (zračna razdalja 2,5 km) (ARSO METEO, 2023).

### 3.2.2 Opis ventilacijske cone in izbira lokacij – model VS

Pri izdelavi modela VS smo izhajali iz geometrije realnega stanovanja v večstanovanjski stavbi v Ljubljani (približno 3 km od središča mesta). Večstanovanjska stavba je del večjega naselja stanovanjskih objektov, zgrajenih leta 2002. Vse nosilne stene so grajene iz armiranega betona, debeline 16 cm, na zunanjih stranah so obdelane s fasadnim ometom. Celotno naselje je podkleteno in namenjeno garažnim prostorom. Obravnavano stanovanje se nahaja v najvišjem nadstropju stavbe (3. nadstropje), ki je s prosojnimi zunanjimi elementi (francoska vrata) orientirano proti vzhodu.

Model VS ima  $26,64 \text{ m}^2$  neto tlorisno površino s svetlo višino 2,60 m. Prostornina stanovanja znaša  $69,3 \text{ m}^3$ . S predelnimi stenami je model VS razdeljen na predprostor, kopalnico, kuhinjo in dnevno sobo, kjer smo izvedli meritve. Točka postavitve instrumentov je na sliki 2 označena s črno piko (Slika 2).



Slika 2: Tlorisna skica stanovanja v večstanovanjski stavbi (VS) (rdeč krog označuje merilno mesto)

Model VS je naravno prezračevan skozi eno od dveh francoskih vrat ( $0,60 \text{ m} \times 2,25 \text{ m}$ ) in skozi vhodna vrata ( $1,00 \text{ m} \times 2,00 \text{ m}$ ). Upoštevali smo tudi možno dodatno prezračevanje v obliki infiltracije skozi stavbni ovoj, prezračevanje skozi kuhinjsko napo in kopalniški ventilator. Ogrevanje je centralno (plinski kotel).

Za simulacije smo uporabili rezultate meritev v prostoru in meteorološke podatke, ki smo jih pridobili od meteorološke postaje Bežigrad, Agencije RS za okolje (ARSO METEO, 2023).

### **3.3 Meteorološki podatki, zunanje in notranje meritve onesnaževal, temperatura notranjega zraka, urnik prisotnosti in prezračevanja**

#### **3.3.1 Meteorološki podatki**

Meteorološke podatke za preučevano obdobje smo pridobili s spletno strani ARSO (ARSO, Arhiv meritev). Podatke smo nato uredili po točno določenem vzorcu v ustrezno datoteko, ki jo je program lahko prebral.

#### **3.3.2 Temperatura notranjega zraka**

Temperaturo notranjega zraka smo merili čez celotno obdobje izvajanja meritev koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn in jo uporabili kot vhodni podatek v simulaciji. Temperaturo zraka, podobno kot ostale vrednosti, definiramo v obliki urnika, kjer za vsak dan podajamo urne izmerjene vrednosti. Program nam omogoča izbiro pravokotne ali trapezne oblike med vrednostmi; pri vnašanju vrednosti za temperature smo se odločili za trapezno obliko. Temperatura namreč zvezno narašča ali pada med dvema zaporednima izmerjenima vrednostima.

#### **3.3.3 Koncentracija CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn v zunanjem ter notranjem zraku**

Za model VS smo zunanje in notranje koncentracije CO<sub>2</sub> ter <sup>222</sup>Rn merili sočasno. Za model DH smo merili notranje koncentracije CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn, zunanje pa smo določili glede na spodnjo mejo koncentracij v prostoru, saj so se po določenem času prezračevanja koncentracije v prostoru izenačile z zunanjimi.

Določili smo povprečno vrednost pretoka zraka skozi odprtine za prezračevanje ter jo pretvorili v enote, ki jih uporablja program. Ker program ne omogoča vnosa zunanjih koncentracij onesnaževal (CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn), smo njihov prispevek v modelu določili kot dodatno proizvodnjo onesnaževal v času zračenja.

#### **3.3.4 Meritve in meritne naprave – model DH**

Meritve so vključevale kontinuirno merjenje koncentracije <sup>222</sup>Rn ( $C_{Rn-in}$ ), CO<sub>2</sub> ( $C_{CO2}$ ) in temperature ( $T_{in}$ ) v prostoru. Uporabili smo tri meritnike: 1) meritnik Radon Scout (Sarad, 2017) kontinuirno meri  $C_{Rn-in}$ ,  $T$  in RH v zraku (Slika 3); 2) meritnik Radon Scout Professional (Sarad, 2020) dodatno meri še  $C_{CO2}$  (Slika 4); 3) meritnik HOBO MX CO<sub>2</sub> Logger (MX1102) (Onset, 2017) kontinuirno meri  $C_{CO2}$ ,  $T$  in RH (Slika 5).

Meritnik Radon Scout (Sarad, 2017) deluje na principu pasivnega vzorčenja zraka z difuzijo. Meritnik Radon Scout Professional (Sarad, 2020) deluje na principu Lucasove celice in silicijeve fotopomnoževalke (SiPM). Meritnik HOBO MX CO<sub>2</sub> Logger (MX1102) (Onset, 2017) deluje na principu NDIR. Meritniki so bili nameščeni na omarici, približno 105 cm nad tlemi, približno na sredini med vhodnimi vrati v sobo ter balkonskimi vrati.



Slika 3: Merilnik Radon Scout (Sarad, 2017)



Slika 4: Merilnik Radon Scout Professional (Sarad, 2020)



Slika 5: Merilnik HOBO MX CO2 Logger (MX1102) (Onset, 2017)

Merilniki podajajo izmerjene vrednosti v naslednjih enotah:  $C_{\text{Rn}}$  [ $\text{Bq m}^{-3}$ ];  $C_{\text{CO}_2}$  [ppm],  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $RH$  [%]. Med podatki, pridobljenimi z meteorološke postaje, je tudi  $v_w$ , hitrost vetra [ $\text{m s}^{-1}$ ].

Meritve so potekale v krajših obdobjih (približno 1 mesec) skozi vso leto (pomlad, jesen in zima). V naši raziskavi smo se osredotočili na izbrane dni v posameznem obdobju (pomlad: 4.–11. 5. 2021; jesen: 17.–28. 10. 2021 in zima: 8.–19. 12. 2021), za katere smo pridobili natančne podatke o prezračevanju (Preglednice 1, 2 in 3). Prezračevanje je potekalo z odpiranjem balkonskih vrat velikosti  $2,01 \text{ m} \times 0,63 \text{ m}$ . Rezultati meritev so podrobnejše predstavljeni v poglavju 6.1.1.

### 3.3.5 Urnik prezračevanja – model DH

Analizo smo opravili za tri ločena obdobja, v različnih letnih časih (pomlad, poletje in zima). Vsa so bila krajše od 12 dni, kar je v programu najdaljše obdobje znotraj enega modela. Meritve v prostoru so potekale eno leto. Spodaj so predstavljeni zgolj dnevi, ki smo jih simulirali. Zaradi pogoste odsotnosti uporabnika se je prostor prezračeval zelo redko (0–3 krat na dan) in le nekaj dni v tednu, preko na stežaj odprtih balkonskih vrat. V določenih obdobjih je bilo zračenja manj zaradi zahtev poteka raziskave.

#### 3.3.5.1 Pomlad – model DH

Spomladi smo želeli čim bolj slediti dnevni dinamiki  $^{222}\text{Rn}$  v zaprtem prostoru, zato je bila soba prezračena redkeje. Merili smo zgolj koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  ter za obdobje od 4. do 11. maja 2021 izvedli simulacijo. V modelu sta bili definirani dve različni intenzivnosti prezračevanja:

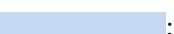
- ➔ 4. maj (torek), 5. maj (sreda), 7. maj (petek) in 9. maj (nedelja): oznaka: ; pogostost prezračevanja:  $1 \times$  na dan.
- ➔ 6. maj (četrtek), 8. maj (sobota), 10. maj (ponedeljek) in 11. maj (torek): oznaka: ; pogostost prezračevanja: brez prezračevanja.

Preglednica 1: Urnik prezračevanja spomladi – model DH

Dan v tednu	Datum	PREZRAČEVANJE (odprta balkonska vrata)	Trajanje prezračevanja v urah
torek	04.05.2021 08:39	začetek	1,98
	04.05.2021 10:38	konec	
sreda	05.05.2021 09:07	začetek	1,38
	05.05.2021 10:30	konec	
četrtek	06.05.2021 00:00	brez prezračevanja	
petek	07.05.2021 09:25	začetek	1,13
	07.05.2021 10:33	konec	
sobota	08.05.2021 00:00	brez prezračevanja	
nedelja	09.05.2021 16:00	začetek	2,08
	09.05.2021 18:05	konec	
ponedeljek	10.05.2021 00:00	brez prezračevanja	
torek	11.05.2021 00:00	brez prezračevanja	

### 3.3.5.2 Jesen – model DH

Jeseni smo sočasno izvajali meritve koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn. Intenziteto prezračevanja smo povečali z namenom, da bi znižali koncentracije CO<sub>2</sub>, ki so presegale mejno vrednost 1000 ppm. Simulacija je bila izvedena za obdobje od 17. do 28. oktobra 2021. V modelu so bile definirane štiri različne intenzivnosti prezračevanja:

- ➔ 25. oktober (ponedeljek): oznaka: ; pogostost prezračevanja: 3× na dan,
- ➔ 17. oktober (nedelja): oznaka: ; pogostost prezračevanja: 2× na dan,
- ➔ 18. oktober (ponedeljek), 20.–22. oktober (sreda – petek), 24. oktober (nedelja) ter 27.–28. oktober (sreda – četrtek): oznaka: ; pogostost prezračevanja: 1× na dan,
- ➔ 19. oktober (torek), 23. oktober (sobota) in 26. oktober (torek): oznaka: ; pogostost prezračevanja: brez prezračevanja.

Preglednica 2: Urnik prezračevanja v jeseni – model DH

<b>Dan v tednu</b>	<b>Datum</b>	<b>PREZRAČEVANJE</b> (odprta balkonska vrata)	<b>Trajanje</b> prezračevanja v urah
nedelja	17.10.2021 11:36	začetek	
	17.10.2021 12:14	konec	0,63
ponedeljek	17.10.2021 22:17	začetek	
	17.10.2021 22:25	konec	0,13
torek	18.10.2021 09:23	začetek	
	18.10.2021 09:50	konec	0,45
sreda	19.10.2021 00:00	brez prezračevanja	
sreda	20.10.2021 08:41	začetek	
	20.10.2021 10:22	konec	1,68
četrtek	21.10.2021 20:54	začetek	
	21.10.2021 21:20	konec	0,43
petek	22.10.2021 08:25	začetek	
	22.10.2021 08:45	konec	0,33
sobota	23.10.2021 00:00	brez prezračevanja	
nedelja	24.10.2021 08:03	začetek	
	24.10.2021 08:24	konec	0,35
ponedeljek	25.10.2021 08:20	začetek	
	25.10.2021 08:55	konec	0,58
	25.10.2021 15:31	začetek	
	25.10.2021 16:01	konec	0,50
	25.10.2021 21:45	začetek	
torek	25.10.2021 21:55	konec	0,17
	26.10.2021 00:00	brez prezračevanja	
sreda	27.10.2021 21:20	začetek	
	27.10.2021 21:33	konec	0,22
četrtek	28.10.2021 08:17	začetek	
	28.10.2021 08:59	konec	0,70

### 3.3.5.3 Zima – model DH

Pozimi smo enako kot v jeseni izvajali meritve koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn, prezračevanje pa smo delno načrtovali, za razliko od prezračevanja spomladi in jeseni, ko je bilo to prepričljivo odločitvi uporabnika. Preizkusiti smo želeli učinkovitost posameznih prezračevanj, zato smo pogostost prezračevanja spremenjali. Simulacija je bila izvedena za obdobje od 8. do 19. decembra 2021. V modelu sta bili definirani dve različni pogostosti prezračevanja:

- ➔ 13.–15. december (ponedeljek – sreda): oznaka: [redacted]; pogostost prezračevanja: 2× na dan,
- ➔ 8. december (sreda), 10.–11. december (petek – sobota) in 18.–19. december (sobota – nedelja): oznaka: [blue]; pogostost prezračevanja: 1× na dan,
- ➔ 9. december (četrtek), 12. december (nedelja) in 16.–17. december (četrtek – petek): oznaka: [redacted]; pogostost prezračevanja: brez prezračevanja.

Preglednica 3: Urnik prezračevanja pozimi – model DH

<i>Dan v tednu</i>	<i>Datum</i>	<i>PREZRAČEVANJE</i>	<i>Trajanje</i>
		(odprta balkonska vrata)	prezračevanja v urah
sreda	08.12.2021 09:48	začetek	
	08.12.2021 10:08	konec	0,33
četrtek	09.12.2021 00:00	brez prezračevanja	
petek	10.12.2021 08:06	začetek	
	10.12.2021 08:27	konec	0,35
sobota	11.12.2021 08:52	začetek	
	11.12.2021 09:30	konec	0,63
nedelja	12.12.2021 00:00	brez prezračevanja	
ponedeljek	13.12.2021 08:53	začetek	
	13.12.2021 09:58	konec	1,08
	13.12.2021 22:40	začetek	
	13.12.2021 22:52	konec	0,20
torek	14.12.2021 09:20	začetek	
	14.12.2021 09:30	konec	0,17
	14.12.2021 21:21	začetek	
	14.12.2021 21:31	konec	0,17
sreda	15.12.2021 08:04	začetek	
	15.12.2021 08:16	konec	0,20
	15.12.2021 19:41	začetek	
	15.12.2021 19:51	konec	0,17
četrtek	16.12.2021 00:00	brez prezračevanja	
petek	17.12.2021 00:00	brez prezračevanja	
sobota	18.12.2021 09:05	začetek	
	18.12.2021 09:35	konec	0,50
nedelja	19.12.2021 08:29	začetek	
	19.12.2021 08:45	konec	0,27

### 3.3.6 Meritve in meritne naprave – model VS

Kontinuirne meritve v difuzijskem načinu s pogostostjo zajemanja podatkov enkrat na uro smo izvedli v obdobju med 3. in 15. oktobrom 2021. Izvajali smo jih sočasno na dveh meritnih mestih. Prvo meritno mesto je bila jedilni mizi v dnevni sobi stanovanja. Za merjenje  $C_{\text{Rn-in}}$ ,  $C_{\text{CO}_2}$ ,  $T_{\text{in}}$  in  $RH_{\text{in}}$  smo uporabili meritnik Radon Scout Professional (Sarad, 2020, Slika 4). Drugo meritno mesto je bilo zunaj, kjer smo za meritve  $C_{\text{Rn-out}}$ ,  $T_{\text{out}}$ ,  $RH_{\text{out}}$  in  $p_{\text{out}}$  uporabili meritnik AlphaGUARD (Bertin Instruments, 2019, Slika 6), ki se je nahajal v meteorološki hišici na višini 1,5 m nad tlemi.



Slika 6: Merilnik AlphaGUARD (Bertin Instruments, 2019)

Meritniki podajajo izmerjene vrednosti v naslednjih enotah:  $C_{\text{Rn}}$  [ $\text{Bq m}^{-3}$ ];  $C_{\text{CO}_2}$  [ppm],  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $RH$  [%] in  $p$  (hPa). Med podatki, pridobljenimi z meteorološke postaje, je tudi  $v_w$ , hitrost vetra [ $\text{m s}^{-1}$ ].

### 3.3.7 Urnik prezračevanja – model VS

V urniku prezračevanja stanovanja smo vključili datum, dan, uro in trajanje prezračevanja ter odsotnost uporabnikov. V času izvajanja meritev se je prezračevalo z odpiranjem francoskih vrat ter občasnim odpiranjem vhodnih vrat, ob prihodu ali odhodu iz stanovanja. Kuhinjska napa in ventilator v kopališču se med samim poskusom nista uporabljala.

Za potrebe raziskave smo poskus razdelili na štiri različne nivoje prezračevanja, ki so se razlikovala po pogostosti in trajanju (Preglednica 4).

- ➔ 3.–8. oktober (nedelja – petek) in 10. oktober (nedelja): oznaka: ; pogostost prezračevanja: prilagojena tako, da je bila koncentracije CO<sub>2</sub> ves čas pod 1000 ppm,
- ➔ 11. oktober (ponedeljek): oznaka: ; pogostost prezračevanja: 2× na dan,
- ➔ 12.–14. oktober (torek in četrtek): oznaka: ; pogostost prezračevanja: 1× na dan,
- ➔ 9. oktober (sobota) in 13. oktober (sreda): oznaka: ; pogostost prezračevanja: brez prezračevanja.

Preglednica 4: Urnik prezračevanja – model VS

<i>Dan v tednu</i>	<i>Datum</i>	<i>PREZRAČEVANJE Trajanje (vedno odprto eno prezračevanja krilo balkonskih vrat) v urah</i>	
nedelja	03.10.2021 09:40	začetek	
	03.10.2021 10:00	konec	0,33
	03.10.2021 12:40	začetek	
	03.10.2021 13:20	konec	0,67
	03.10.2021 15:30	začetek	
	03.10.2021 16:50	konec	1,33
	03.10.2021 17:55	začetek	
	03.10.2021 18:50	konec	0,92
	03.10.2021 20:00	začetek	
ponedeljek	03.10.2021 21:15	konec	1,25
	04.10.2021 00:30	začetek	
	04.10.2021 01:50	konec	1,33
	04.10.2021 08:00	začetek	
	04.10.2021 08:35	konec	0,58
	04.10.2021 11:05	začetek	
	04.10.2021 11:55	konec	0,83
	04.10.2021 19:30	začetek	
	04.10.2021 20:25	konec	0,92
torek	05.10.2021 00:58	začetek	
	05.10.2021 01:33	konec	0,58
	05.10.2021 06:20	začetek	
	05.10.2021 06:45	konec	0,42
	05.10.2021 18:40	začetek	
	05.10.2021 19:30	konec	0,83
	05.10.2021 21:00	začetek	
	05.10.2021 21:40	konec	0,67
	06.10.2021 06:50	začetek	
sreda	06.10.2021 07:20	konec	0,50
	06.10.2021 09:35	začetek	
	06.10.2021 09:55	konec	0,33
	06.10.2021 20:05	začetek	
	06.10.2021 20:50	konec	0,75
	07.10.2021 00:35	začetek	
	07.10.2021 01:35	konec	1,00
	07.10.2021 07:15	začetek	
	07.10.2021 07:41	konec	0,43
četrtek	07.10.2021 08:35	začetek	
	07.10.2021 08:46	konec	0,18
	07.10.2021 18:55	začetek	
	07.10.2021 19:50	konec	0,92
	07.10.2021 22:50	začetek	
	07.10.2021 23:20	konec	0,50
	08.10.2021 06:35	začetek	
	08.10.2021 07:10	konec	0,58
	08.10.2021 09:51	začetek	
petek	08.10.2021 10:00	konec	0,15
	09.10.2021 00:00	brez prezračevanja	
sobota	10.10.2021 01:03	začetek	
nedelja			

kuhanje vrata odprta pod nagibom	10.10.2021 02:42	konec	1,65
	10.10.2021 09:30	začetek	
	10.10.2021 10:00	konec	0,50
	10.10.2021 11:50	začetek	
	10.10.2021 12:30	konec	0,67
	10.10.2021 13:00	začetek	
	10.10.2021 13:40	konec	0,67
	10.10.2021 16:32	začetek	
	10.10.2021 17:05	konec	0,55
	10.10.2021 21:06	začetek	
ponedeljek	10.10.2021 21:26	konec	0,33
	10.10.2021 23:28	začetek	
torek	10.10.2021 23:55	konec	0,45
	11.10.2021 06:40	začetek	
	11.10.2021 06:55	konec	0,25
	11.10.2021 09:30	začetek	
odsotnost 10:00 - 18:20	11.10.2021 09:48	konec	0,30
	12.10.2021 07:30	začetek	
	12.10.2021 08:00	konec	0,50
sreda odsotnost 11:15 - 15:55	13.10.2021 00:00	brez prezračevanja	
	14.10.2021 07:15	začetek	
	14.10.2021 07:35	konec	0,33
četrtek odsotnost 17:30 - 19:25			

### 3.4 Stacionarne in nestacionarne simulacije s programom CONTAM 3.4

#### 3.4.1 Modeliranje

Za vsak model smo morali v programu definirati obliko in velikost obravnavane ventilacijske cone, temperaturo zraka v prostoru, aktivno proizvodnjo CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn, velikost odprtin (okna in vrata), ločeno datoteko z vremenskimi podatki, ki smo jo vstavili v program, in potek zunanjih koncentracij skozi analizirano obdobje. Po pridobljenih rezultatih smo izvedli validacijo.

#### 3.4.2 Opis programa

Za simulacije izmerjenih koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn v zraku stanovanja smo uporabljali program CONTAM 3.4 (National Institute of Standards and Technology, 2020), ki je večconski računalniški program, uporaben za analizo kakovosti zraka z učinkovitostjo prezračevanja v zaprtih prostorih. Zasnovan je tako, da nam določi pretok zraka, koncentracije onesnaževal in osebno izpostavljenost v obravnavanih prostorih. Za natančne analize potrebujemo večji nabor podatkov, ki jih moramo predhodno izmeriti ali določiti sami.

Vsako obravnavano cono prezračevanja poenostavimo do te mere, da v programu definiramo tloris obravnavane cone. Določimo notranji volumen s površino in višino prezračevalne cone ter umestimo okna in vrata. Tako imamo osnovo obravnavane enote (ventilacijska cona), ki jo bomo analizirali. V naslednjem koraku začnemo vnašati podatke, ki smo jih pridobili s pomočjo meritev, opravljenih v obravnavani ventilacijski coni in v njeni okolici (sosednji in zunanji prostori).

### 3.4.3 Onesnaževala

Program dopušča določitev konstantnih in spremenljajočih se onesnaževal, ki jih moramo najprej definirati, določiti njihovo začetno vrednost, šele kasneje pa dodamo njihovo proizvodnjo ali pojemanje v prostoru. Molekulska masa  $\text{CO}_2$  znaša  $44 \text{ kg kmol}^{-1}$ , difuzijski koeficient  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  in specifična toplota  $1000 \text{ J (kg K)}^{-1}$ . Molekulska masa  $^{222}\text{Rn}$  znaša  $222 \text{ kg kmol}^{-1}$ , difuzijski koeficient  $5,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  in specifična toplota  $90 \text{ J (kg K)}^{-1}$ . Podatke je potrebno definirati za vsako onesnaževalo posebej.

### 3.4.4 Odprtine

Določitev odprtin je zelo pomembna, saj lahko kasneje definiramo urnik prezračevanja skozi posamezno odprtino ter tako definiramo naravno prezračevanje. Pozorni moramo biti pri izbiri tipa odprtine oz. elementa pretoka zraka (ang. *Airflow Elements*). Vsak pretok zraka je odvisen od elementa pretoka zraka, saj ta opisuje matematično razmerje med pretokom zraka skozi odprtino in padcem tlaka na njegovi poti.

Uporabljali smo modela: 1) One-way Flow using Powerlaw Models, natančneje Orifice Area Data, pri manjših odprtinah in 2) Two-way Flow Models, natančneje One Opening, pri večjih odprtinah (National Institute of Standards and Technology, 2020).

### 3.4.5 Stopnja proizvodnje $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$

V program smo vnesli podatke o začetnih koncentracijah  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$  v prostoru in določili aktivno proizvodnjo. Aktivno proizvodnjo  $\text{CO}_2$  definiramo glede na prisotnosti uporabnikov, njihove aktivnosti in starosti. V študiji smo uporabili podatke za odraslo osebo med delom in spanjem (lažje delo =  $0,0038 \text{ L s}^{-1}$  in spanje =  $0,0027 \text{ L s}^{-1}$ ) (Persily in De Jonge, 2017). Vse vrednosti urnih proizvodjenj smo za vsako onesnaževalo vnesli v model, pri čemer smo sedaj uporabili pravokotno obliko. Stopnja nastajanja radona [ $\text{Bq h}^{-1}$ ] je bila določena v skladu z metodologijo, opredeljeno v Dovjak in sodelavci (2021). Koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  v  $\text{Bq m}^{-3}$  smo pretvorili v stopnjo nastajanja  $^{222}\text{Rn}$  v  $\text{Bq h}^{-1}$  tako, da smo izračunali hitrost vstopa  $^{222}\text{Rn}$  v prostor [ $\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ], ki smo jo pomnožili z volumnom prostora [ $\text{m}^3$ ].

### **3.5 Nestacionarne simulacije $C_{CO_2-s}$ in $C_{Rn-s}$ s programom CONTAM 3.4 in validacija**

#### **3.5.1 Simulacija – model DH**

V programu CONTAM 3.4 smo definirali obliko in velikost posamezne obravnavane cone prezračevanja, ki sta predstavljeni v poglavju 3.2. Definirali smo podatke izmerjenih količin ( $C_{Rn-in}$ ,  $T_{in}$  in  $RH_{in}$ ) v notranjem zraku in zunanjem zraku ( $T_{out}$ ,  $RH_{out}$ ,  $p_{out}$  in  $v_w$ ). V modelu smo definirali začetno vrednost in stopnja proizvodnje  $^{222}Rn$ , na podlagi predhodno izmerjenih notranjih in zunanjih koncentracij.

Vse odprtine v modelu so bile upoštevane kot poti zračnega toka s predpostavljenim naborom koeficientov po NIST (National Institute of Standards and Technology, 2020), upoštevali smo infiltracijo  $0,1 \text{ h}^{-1}$  (ACH) oz.  $5,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

V model smo dodali datoteko z vremenskimi podatki, ki je morala biti zapisana v točno določeni obliki ter shranjena kot besedilni dokument – ANSI.

#### **3.5.2 Simulacija razmer v modelu VS od 3. do 15. oktobra**

Simulacijo smo izvedli v programu CONTAM 3.4 po enakem postopku kot simulacijo za model DH. Definirali smo podatke izmerjenih parametrov v notranjem zraku ( $C_{Rn-in}$ ,  $C_{CO_2}$ ,  $T_{in}$  in  $RH_{in}$ ) in zunanjem zraku ( $C_{Rn-out}$ ,  $T_{out}$ ,  $RH_{out}$ ,  $p_{out}$  in  $v_w$ ). Tudi v tem modelu smo določili začetno vrednost in stopnjo proizvodnje  $^{222}Rn$  na podlagi vnaprej izmerjenih notranjih in zunanjih koncentracij. Odprtine (francoska vrata in vhodna vrata) so bile za naravno prezračevanje upoštevane kot poti zračnega toka s predpostavljenimi koeficienti po NIST (National Institute of Standards and Technology, 2020).

Ustvarili smo datoteko z vremenskimi podatki in po prvi opravljeni analizi opravili izboljšave s prilagoditvijo infiltracije skozi stavbni ovoj in tako povečali ujemanje simuliranih in dejanskih koncentracij  $^{222}Rn$  in  $CO_2$  v prostoru.

#### 4 SCENARIJI PREZRAČEVANJA

Simulacijo smo izvedli za 6 scenarijev prezračevanja, kjer smo spremenjali načrtovano stopnjo prezračevanja (DVR) glede na zakonske zahteve in priporočila.

- SCENARIJI 1, 2, 3 in 4 temeljijo na *zahtevi* Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Uradni list RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ).
- SCENARIJ 5 temelji na podlagi *priporočil* standarda SIST EN 16798-1:2019 – Energijske lastnosti stavb, obravnavali smo vse kategorije I–IV, ki so predstavljene v spodnji tabeli (Preglednica 5), velja za stanovanjske stavbe.
- SCENARIJ 6 temelji na Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah (Uradni list RS, št. 52/10 in 61/17 – GZ) in Tehničnih smernicah za graditev: TSG-1-004:2010, Učinkovita raba energije.

Preglednica 5: Scenariji prezračevanja – model DH in model VS (Dovjak s sod., 2022)

<b>Scenarij</b>	<b>Stopnja prezračevanja (DVR) - model DH</b>	<b>Stopnja prezračevanja (DVR) - model VS</b>
1	10,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,2 ACH)	13,9 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,2 ACH)
2	15,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,3 ACH)	15,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,2 ACH)
3=6	25,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)	34,6 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)
4	30,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,6 ACH)	40,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,6 ACH)
5A_kategorija I-III	25,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)	36,6 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)
	15,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,3 ACH)	23,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,3 ACH)
	10,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,2 ACH)	15,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,2 ACH)
5B_kategorija I-III	25,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)	36,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)
	20,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,4 ACH)	25,2 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,4 ACH)
	10,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,2 ACH)	14,4 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,2 ACH)
5C_kategorija I-III	35,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,7 ACH)	46,9 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,7 ACH)
	30,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,6 ACH)	40,2 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,6 ACH)
	25,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)	33,6 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 ACH)
	15,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,3 ACH)	22,1 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,3 ACH)

## 5 ZAKONSKE ZAHTEVE IN PRIPOROČILA

Izračunane vrednosti koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn za vse SCENARIJE smo primerjali z zakonskimi zahtevami in priporočili (Preglednici 6 in 7).

Preglednica 6: Nabor mejnih vrednosti CO<sub>2</sub> v prostoru (Pravilnik o prezračevanju 2002; Pravilnik o učinkoviti rabi 2010; TSG-1-004: 2010; SIST CR 1752: 1998; EN 15251: 2007; ANSI /ASHRAE Standard 62.1.: 2010; Dovjak s sod., 2022).

Zahteva / priporočilo, referenca	Mejna vrednost CO <sub>2</sub> v prostoru
Zahteva: dovoljena vrednost CO <sub>2</sub> v zraku zaprtih prostorov (Pravilnik o prezračevanju 2002)	1667 ppm
Priporočilo: za načrtovanje in oceno energetske učinkovitosti stavb (EN 15251: 2007)	Kat I: 350 ppm <sup>a</sup> Kat II: 500 ppm <sup>a</sup> <b>Kat III: 800 ppm <sup>a</sup></b> Kat IV: več kot 800 ppm <sup>a</sup>
Priporočilo: (Standard ANSI/ASHRAE 62.1.: 2010)	Največ 2500 ppm <b>Priporočeno manj kot 1000 ppm</b>

**Opomba:** Kat I: Kategorija I predstavlja najvišjo kategorijo kakovosti notranjega okolja in se priporoča za prostore, ki jih zasedajo zelo ranljive osebe, kot so ovrirane osebe, bolni, otroci in starostniki; Kat II: srednja kategorija, ki jo je potrebno uporabiti za nove stavbe in obnove; Kat III: sprejemljiva, zmerna kakovost notranjega okolja, ki se lahko uporablja za obstoječe stavbe; Kat IV: kategorija, ki se ne uvršča med I in III. Uporabi se lahko le izjemoma, za časovno omejeni del leta (EN 15251: 2007).

<sup>a</sup>Vrednost nad koncentracijo v zunanjem zraku.

Preglednica 7: Nabor mejnih vrednosti <sup>222</sup>Rn v prostoru

(Pravilnik o prezračevanju, 2002; Uredba o nacionalnem radonskem programu, 2018; EN 16798-1: 2019; SZO, 2009; Dovjak s sod., 2022).

Zahteva / priporočilo, referenca	Mejna vrednost <sup>222</sup> Rn v prostoru
Zahteva: dovoljena vrednost <sup>222</sup> Rn v zraku v zaprtih prostorih (Pravilnik o prezračevanju, 2002)	400 Bq m <sup>-3</sup>
Zahteva: referenčna raven za povprečno letno koncentracijo radona v zaprtih bivalnih in delovnih prostorih (Uredba o nacionalnem programu za radon, 2018)	300 Bq m <sup>-3</sup>
Priporočilo: vrednost po smernici SZO (EN 16798-1: 2019; SZO 2009)	<b>100 Bq m<sup>-3</sup></b>

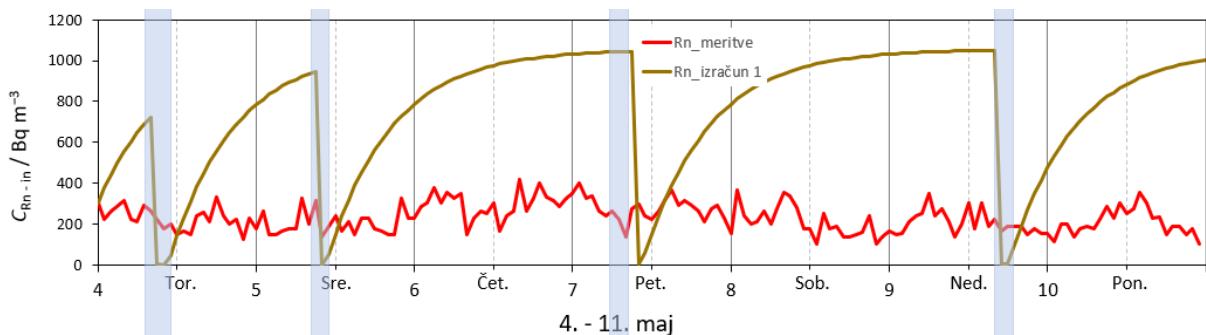
## 6 REZULTATI

Rezultati so razdeljeni na obravnavani ventilacijski coni (model DH in model VS). Za model DH je predstavljenih več faz izračuna, simulacije pa so izvedene za pomlad, jesen in zimo. Simulacije za model VS so izvedene samo za jesen, pri tem smo opravili nestacionarno in stacionarno analizo. Za vsako ventilacijsko cono in obdobje analize predstavljamo naslednje rezultate: (i) izmerjeno koncentracijo CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn, (ii) meteorološke parametre, (iii) primerjavo izmerjenih in simuliranih koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn ter (iv) vpliv zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja na koncentracijo CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn.

### 6.1 Rezultati – model DH (pomlad)

#### 6.1.1 Prva faza izračuna – model DH (pomlad)

Primerjali smo izmerjene urne vrednosti koncentracije <sup>222</sup>Rn z izračunanimi. V prvi fazi izračuna smo predpostavili konstantno stopnjo aktivne proizvodnje radona v vrednosti 5381 Bq h<sup>-1</sup>, ki smo jo določili na osnovi povprečne proizvodnje med meritvami. Opazimo lahko, da se vrednosti zelo razlikujeta (Slika 7) in da je potrebna korekcija modela, kar smo poskušali izboljšati v drugi fazi simulacije.



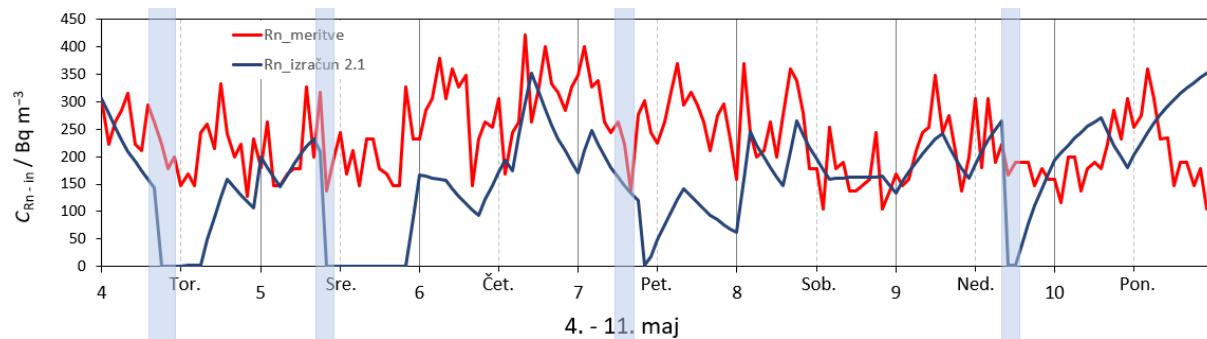
Slika 7: Izračun 1 – primerjava izmerjenih koncentracij <sup>222</sup>Rn z rezultati prve faze izračuna za model DH, za celotno obdobje od 4. do 11. maja 2021. Sivo osenčena območja označujejo prezračevanje. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Preglednica 8: Model DH, prva faza izračuna – primerjava meritve z izračuni

	MERITVE	IZRAČUN	UGOTOVITVE
1. FAZA	Koncentracija $^{222}\text{Rn}$ se spreminja skozi celotno obdobje, ne zgolj v času prezračevanja.	Koncentracija radona strmo pada v času prezračevanja, drugače v splošnem narašča.	1a) Spreminjanje koncentracij v prostoru je lahko posledica netesnosti ovoja stavbe. 1b) Stopnja proizvodnje $^{222}\text{Rn}$ ni konstantna, kot smo predpostavili v 1. fazi.
	Koncentracija $^{222}\text{Rn}$ se ni nikoli znižala pod $100 \text{ Bq m}^{-3}$ .	Ob zadostnem in učinkovitem prezračevanju se je koncentracija $^{222}\text{Rn}$ znižala na $0 \text{ Bq m}^{-3}$ .	2a) Zaradi lažjega izračuna zunanjih koncentracij $^{222}\text{Rn}$ v izračunu še nismo upoštevali. Te se v času prezračevanja pristejejo.

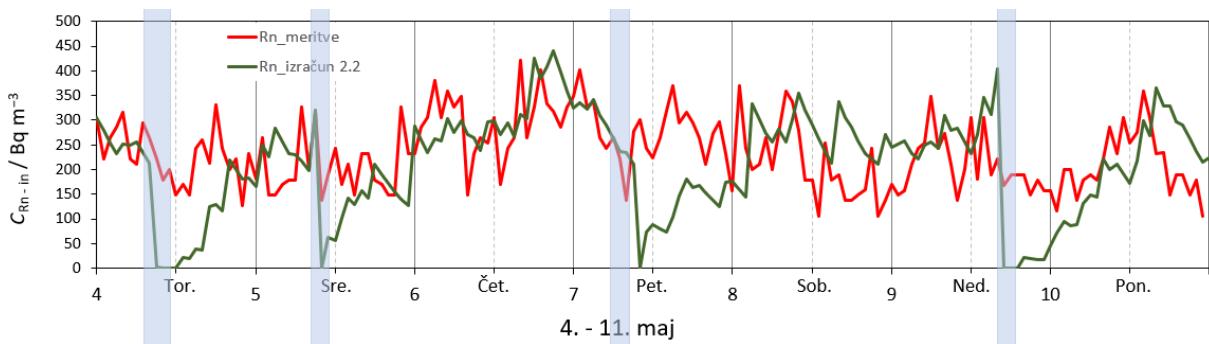
### 6.1.2 Druga faza izračuna – model DH (pomlad)

V drugi fazi izračuna smo izvedli dve izboljšavi modela, ki smo jih kot omejitev zaznali v prvi fazi. Namesto konstantne vrednosti stopnje proizvodnje  $^{222}\text{Rn}$  smo za vsak dan določili 1–3 ekstremne vrednosti (min in max) ter nato izračunali stopnjo proizvodnje  $^{222}\text{Rn}$  med posameznimi minimalnimi in maksimalnimi vrednostmi ( $\frac{\text{MAX} - \text{MIN}}{\Delta t} \times V$ ).



Slika 8: Izračun 2.1 – primerjava izmerjenih koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  z rezultati druge faze izračuna za model DH, za celotno obdobje od 4. do 11. maja 2021. Sivo osenčena območja označujejo prezračevanje. V mrežnih polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Z izračunom faze 2.1 smo zvišali ujemanje z meritvami in ga v naslednjem koraku še izboljšali (Slika 8). Aktivno proizvodnjo  $^{222}\text{Rn}$  smo določili za vsako uro posebej, tako kot smo izvajali tudi meritve. To smo v modelu definirali tako, da smo za aktivno proizvodnjo  $^{222}\text{Rn}$  določili najvišjo vrednost, potem pa v urniku za vsako uro posebej definirali delež aktivne proizvodnje, glede na najvišjo vrednost.

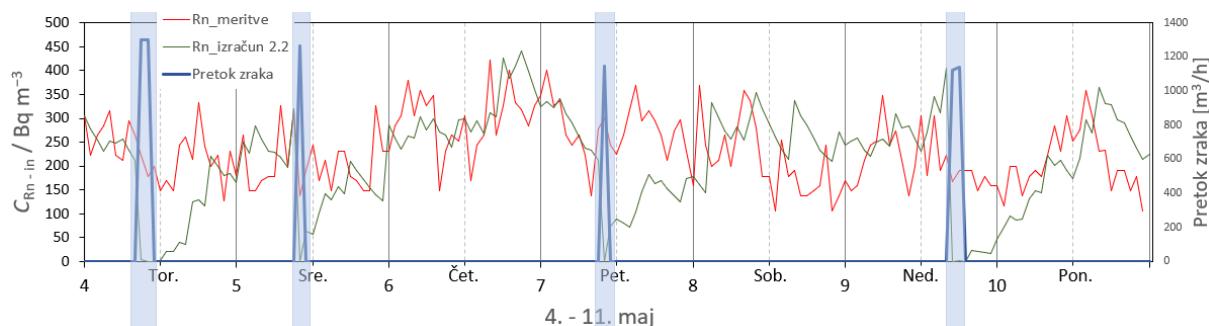


Slika 9: Izračun 2.2 – primerjava izmerjenih koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  z rezultati druge faze izračuna za model DH, za celotno obdobje od 4. do 11. maja 2021. Sivo osenčena območja označujejo prezračevanje. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Kot zelo pomemben faktor večjega ujemanja meritev z izračuni se je izkazala spremenljiva stopnja proizvodnje  $^{222}\text{Rn}$ , ki smo jo določali za enourne intervale.

Na osnovi meritev smo izračunali enourne priraste in izgube koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  ter v modelu upoštevali zgolj priraste v obliki stopnje proizvodnje  $^{222}\text{Rn}$  (ang. *generation rate*,  $\text{Bq h}^{-1}$ ), izgube nastanejo pri prezračevanju oz. izmenjavi notranjega zraka z zunanjim, kar je lahko tudi posledica netesnosti stavbnega ovoja. Ujemanje rezultatov je bilo v splošnem dobro, razen v času aktivnega prezračevanja (odprt balkonska vrata). Tako smo prišli do ugotovitve, da je težava v definiranju zunanjih koncentracij  $^{222}\text{Rn}$ .

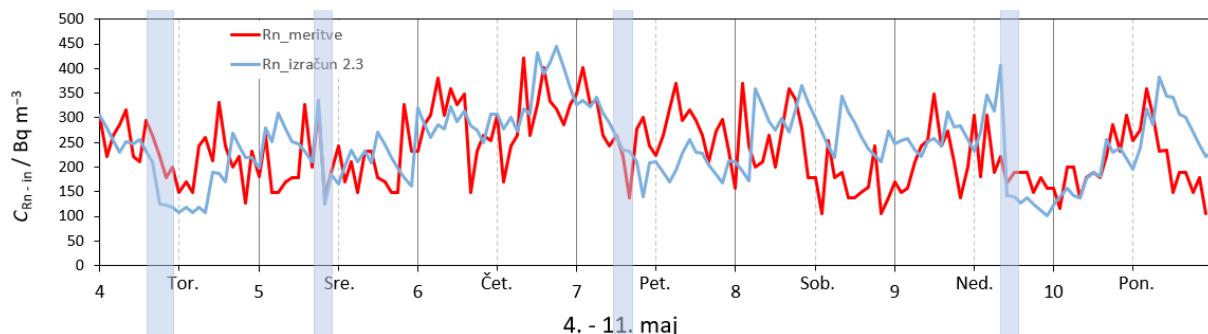
Iz simulacije smo odčitali volumen pretoka zraka v posameznem prezračevanju ter tako z aktivno proizvodnjo  $^{222}\text{Rn}$  ročno definirali koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$ , ki je v zunanjem zraku in ob prezračevanju vstopa v prostor. Tako smo dosegli, da koncentracija ne pada več na 0  $\text{Bq m}^{-3}$ , ampak se v primeru, ko je prezračevanje zadostno, izenači z zunanjо vrednostjo.



Slika 10: Volumen pretoka zraka za posamezno prezračevanje za model DH, ter izmerjena in simulirana koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  za obdobje od 4. do 11. maja 2021. Sivo osenčena območja označujejo prezračevanje. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Povprečen pretok zraka je znašal  $1211 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , kar pomeni, da se je zrak v prostoru zamenjal v 2,5 min. oz. se je v času prezračevanja zamenjal tudi do 25-krat.

### 6.1.3 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $^{222}\text{Rn}$ – model DH (pomlad)



Slika 11: Izračun 2.3 – primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  za model DH v obdobju od 4. do 11. maja 2021. Sivo osenčena območja označujejo prezračevanje. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

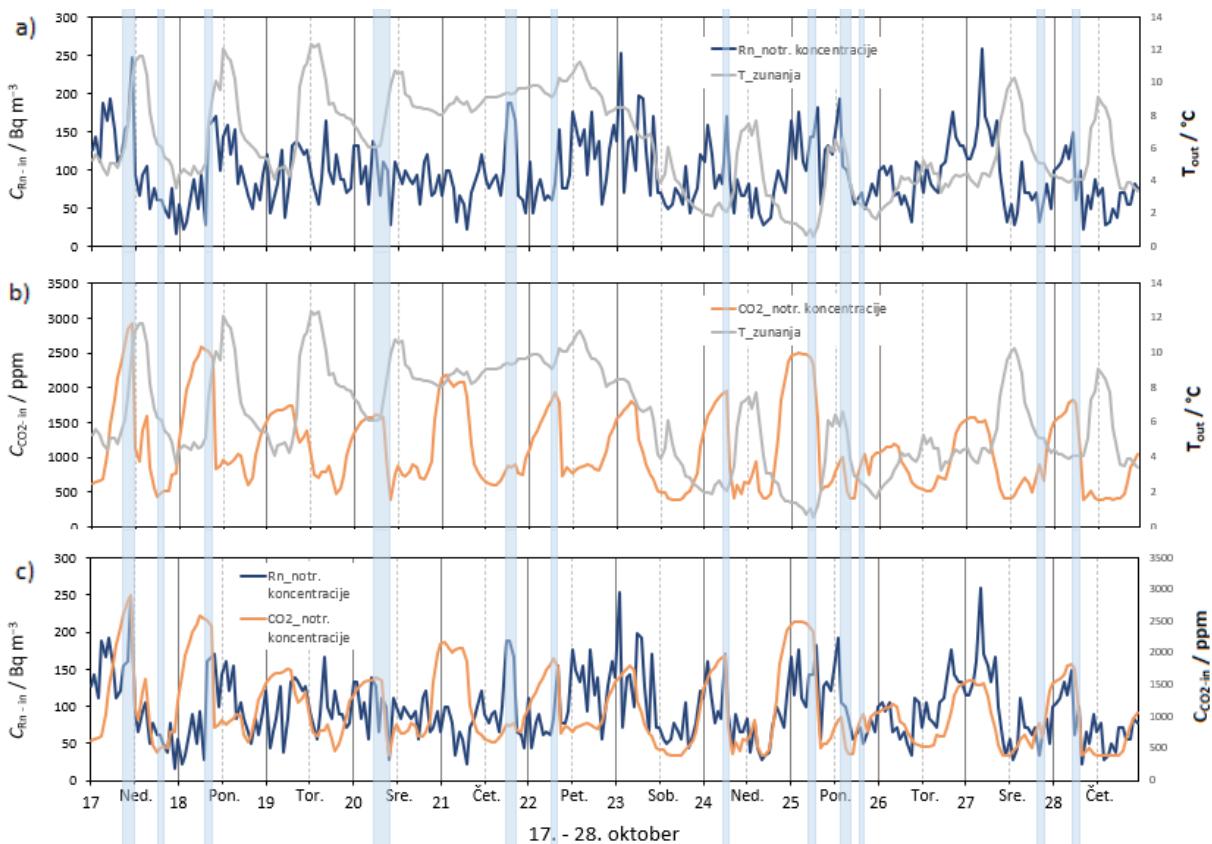
Na sliki 11 je prikazana primerjava izmerjenih in simuliranih vrednosti koncentracij radona ( $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$ ). Opazimo dobro ujemanje koncentracije ( $C_{\text{Rn-m}}$  med 105 in 422  $\text{Bq m}^{-3}$ ,  $C_{\text{Rn-s}}$  med 101 in 445  $\text{Bq m}^{-3}$ ) ter podoben kontinuirni potek krivulj. Povprečna razlika med izmerjenimi in simuliranimi vrednostmi znaša 130  $\text{Bq m}^{-3}$ . V času prezračevanja simulirane vrednosti res padejo pod izmerjene, a nikoli pod vrednost zunanjih koncentracij. To pomeni, da je model primerljiv realnemu stanju.

## 6.2 Rezultati – model DH (jesen)

### 6.2.1 Rezultati izmerjenih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ ter meteoroloških parametrov – model DH (jesen)

Na sliki 12 so prikazani rezultati meritev, ki smo jih opravili v jesenskem obdobju. Slika 12a kaže koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  v prostoru ( $C_{\text{Rn-m}}$ ) in temperaturo zunanjega zraka  $T_{\text{out}}$ . Opazimo lahko, da se poteka krivulj dobro ujemata, kar pomeni, da  $T_{\text{out}}$  vpliva na koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  v prostoru. Pojavlja se značilen dnevni cikel, kjer je koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  najvišja v zgodnjih jutranjih urah in nato pade proti večeru (Kikaj s sod., 2023). Ker gre za starejšo hišo, ki ima nižjo zrakotesnost stavbnega ovoja, je vpliv  $T_{\text{out}}$  na koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  v prostoru večji, saj zunanji zrak z nižjo koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  laže prehaja v prostor.  $T_{\text{out}}$  in  $C_{\text{Rn-m}}$  sta obratno sorazmerni, kar pomeni, da koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  pada, ko raste temperatura v zunanjem zraku. Povprečna koncentracija  $^{222}\text{Rn}$ , v času od 17. do 28. oktobra, je znašala v prostoru 96  $\text{Bq m}^{-3}$ , medtem ko je bila povprečna temperatura zunanjega zraka 6  $^{\circ}\text{C}$ .

Slika 12b kaže koncentracijo  $\text{CO}_2$  v prostoru ( $C_{\text{CO2-m}}$ ) in temperaturo zunanjega zraka ( $T_{\text{out}}$ ). Glede na to, da se  $^{222}\text{Rn}$  in  $\text{CO}_2$  kopičita zelo podobno (slika 12c), smo tudi pri primerjavi rezultatov  $C_{\text{CO2-m}}$  in  $T_{\text{out}}$  ugotovili zelo podobna trenda krivulj kot pri primerjavi  $C_{\text{Rn-m}}$  z  $T_{\text{out}}$ . Pri tem pa opažamo, da so zgoraj omenjeni trendi pri  $C_{\text{CO2-m}}$  še nekoliko bolj izraziti. Povprečna vrednost  $C_{\text{CO2-m}}$ , v času od 17. do 28. oktobra, je v prostoru znašala 1124 ppm.



Slika 12: Jesen – rezultati meritev v DH: a) koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  v prostoru in temperature zunanjega zraka; b) koncentracije  $\text{CO}_2$  v prostoru in temperature zunanjega zraka c) koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  in  $\text{CO}_2$  v prostoru. Prikazani so rezultati za obdobje od 17. do 28. oktobra, ki smo jih uporabili tudi pri simulaciji za jesen. Sivo osenčena območja označujejo prezračevanje. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Iz rezultatov meritve takoj razberemo, da sta mejni koncentraciji ( $^{222}\text{Rn}$  100  $\text{Bq m}^{-3}$ ;  $\text{CO}_2$  1000 ppm) precej časa preseženi ( $\geq 48\%$ ), kar pomeni, da prezračevanje ni bilo zadostno. Da bi dosegli kakovosten zrak v prostoru, kjer koncentraciji  $^{222}\text{Rn}$  in  $\text{CO}_2$  nikoli ne bi presegli mejne vrednosti, bi morali pogostost in trajanje prezračevanja povečati.

### 6.2.2 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model DH (jesen)

Na sliki 13a je prikazana primerjava izmerjenih ( $C_{\text{Rn-m}}$ ) in simuliranih ( $C_{\text{Rn-s}}$ ) koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  v modelu DH jeseni. Ujemanje  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  je v času prezračevanja dobro, slabše pa je v obdobjih brez prezračevanja. Čez celotno analizno obdobje se  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  razlikujeta v povprečju za 45  $\text{Bq m}^{-3}$ . Iz poteka krivulj vidimo, da sta koncentraciji primerljivi, do večjih razlik prihaja zgolj v obdobjih brez prezračevanja. Tako na primer v času brez prezračevanja  $C_{\text{Rn-m}}$  pada tudi za okrog 200  $\text{Bq m}^{-3}$ , kar je verjetno posledica povečane infiltracije zraka skozi stavbni ovoj.

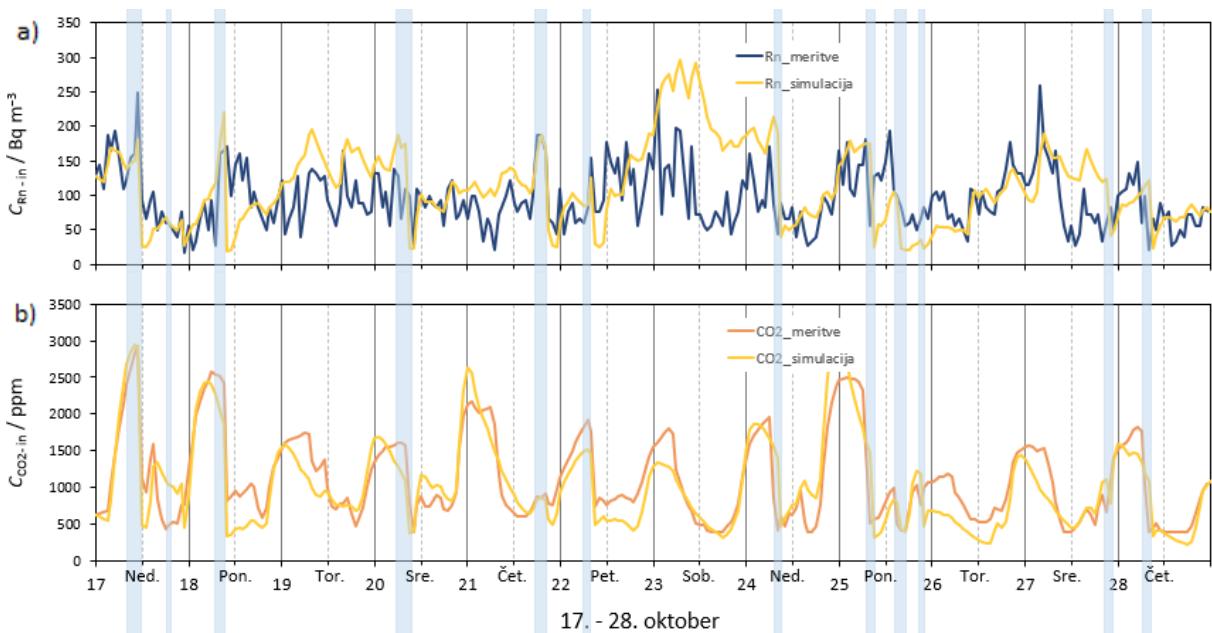
V prvem delu analize (nedelja, 17. oktobra), ko je bilo prezračeno dvakrat, je povprečna razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  22  $\text{Bq m}^{-3}$ . V drugem delu (ponedeljek, 18. oktobra), ko je bilo prezračeno enkrat, je povprečna razlika 40  $\text{Bq m}^{-3}$ . Razlika je nekoliko večja kot v prvem delu analize (22  $\text{Bq m}^{-3}$ ), vendar

še vedno manjša od razlike za celotno analizo ( $45 \text{ Bq m}^{-3}$ ). V torek (19. oktober), ko ni bilo prezračeno, razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  znaša v povprečju  $52 \text{ Bq m}^{-3}$ . V obdobju, 20.–22. oktober, (sreda – petek) se je dnevno prezračilo enkrat, vendar je med prezračevanjem v sredo in četrtek minilo kar 34,5 ur. To je privedlo do večje razlike med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$ , ki je v povprečju znašala  $35 \text{ Bq m}^{-3}$ . V soboto, 23. oktobra, zopet ni bilo prezračeno, zato je prišlo še do nekoliko večje razlike,  $41 \text{ Bq m}^{-3}$ . V nedeljo, 24. oktobra, je bilo prezračeno enkrat, razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  je v povprečju znašala  $15 \text{ Bq m}^{-3}$ . Naslednji dan (ponedeljek, 25. oktobra) se je prezračilo trikrat, razlika je znašala  $16 \text{ Bq m}^{-3}$ . Sledil je še en dan brez prezračevanja (torek, 26. oktobra), s povprečno razliko  $7 \text{ Bq m}^{-3}$ . V zadnjem delu analize (27.–28. oktobra) se je prezračilo enkrat dnevno, povprečna razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  je  $41 \text{ Bq m}^{-3}$ . V celotnem obdobju so povprečne vrednosti  $C_{\text{Rn-m}}$  za 19,8 % višje od  $C_{\text{Rn-s}}$ .

Izmerjene ( $C_{\text{CO}_2\text{-m}}$ ) in simulirane ( $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$ ) koncentracije CO<sub>2</sub> so prikazane na sliki 13b. Povprečne razlike med  $C_{\text{CO}_2\text{-m}}$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$  po posameznih obdobjih so naslednje:

- 17. oktober (prezračeno  $2\times$  na dan) 308 ppm
- 18. oktober (prezračeno  $1\times$  na dan) 293 ppm
- 19. oktober (brez prezračevanja) 224 ppm
- od 20. do 22. oktobra (prezračeno  $1\times$  na dan) 241 ppm
- **23. oktober (brez prezračevanja) 154 ppm**
- 24. oktober (prezračeno  $1\times$  na dan) 353 ppm
- 25. oktober (prezračeno  $3\times$  na dan) 294 ppm
- **26. oktober (brez prezračevanja) 307 ppm**
- od 27. do 28. oktobra (prezračeno  $1\times$  na dan) 185 ppm.

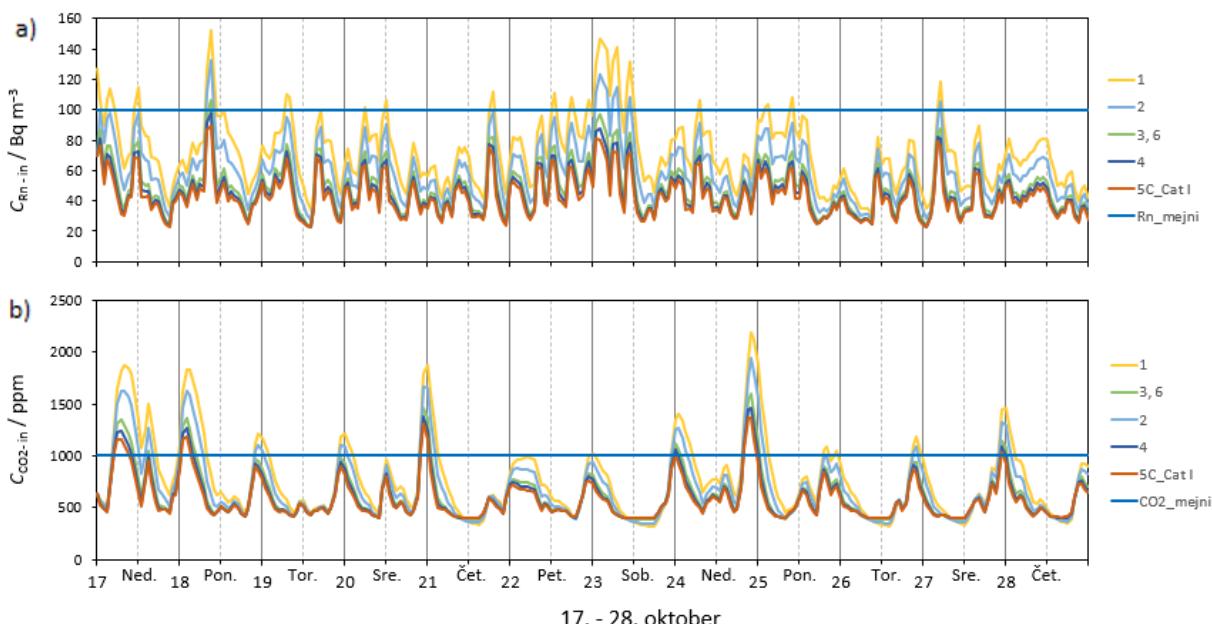
Zanimiv rezultat primerjave povprečnih razlik med  $C_{\text{CO}_2\text{-m}}$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$  je predvsem zaradi velike in majhne razlike, ki sta bili obe izračunani na dan brez prezračevanja (krepko označeno zgoraj). V celotnem obdobju so vrednosti  $C_{\text{CO}_2\text{-m}}$  povprečno 30,5 % nižje od vrednosti  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$ , kar pomeni, da se kar za 10,7 % bolje ujemajo rezultati meritev in simulacij za CO<sub>2</sub>.



Slika 13: Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij za model DH: a)  $^{222}\text{Rn}$  in b)  $\text{CO}_2$  v obdobju od 17. do 28. oktobra 2021. V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena črta pa poldne.

### 6.2.3 Vpliv zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja na koncentracije $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model DH (jesen)

Obravnavali smo 6 različnih, zakonsko zahtevanih in/ali priporočenih scenarijev prezračevanja, ki so podrobnejše predstavljeni v poglavju SCENARIJI PREZRAČEVANJA (Preglednica 5). Na sliki 14 so združeni rezultati simulacij za vse scenarije in obe onesnaževalci ( $C_{\text{Rn-s}}$  in  $C_{\text{CO2-s}}$ ). Zaradi boljše preglednosti rezultatov smo za 5. scenarij prezračevanja predstavili zgolj scenarij 5C\_Cat I, saj so bile ostale kategorije zajete že v preostalih scenarijih.

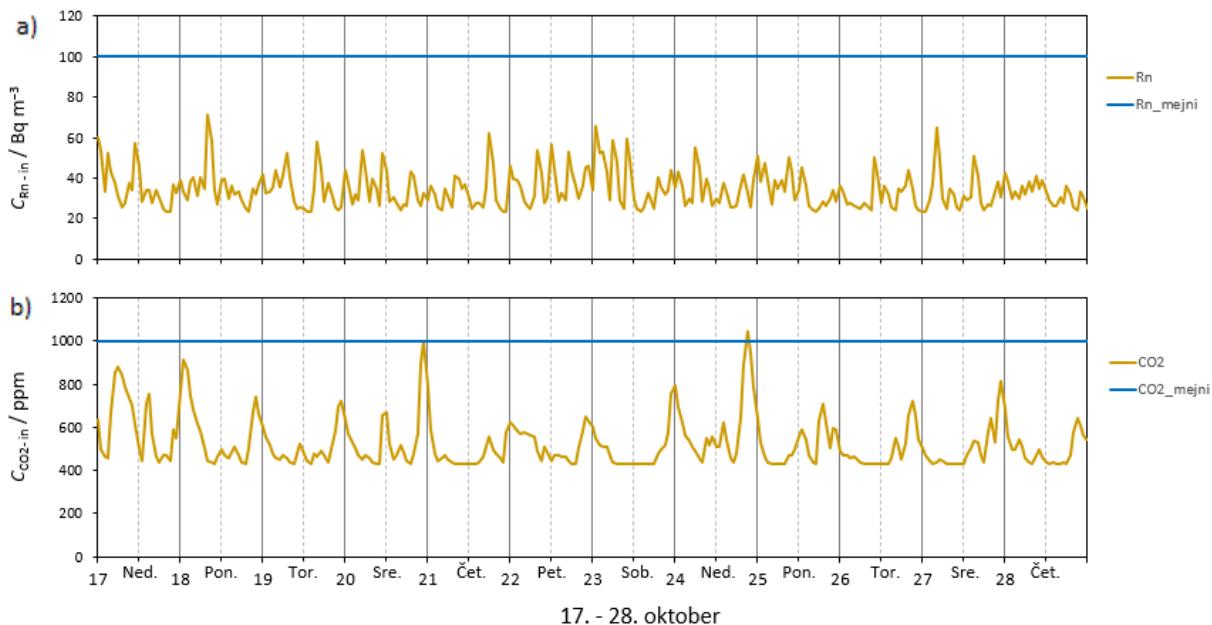


Slika 14: Rezultati simuliranih koncentracij za model DH: a)  $^{222}\text{Rn}$  in b)  $\text{CO}_2$  za 6 različnih scenarijev prezračevanja, v obdobju od 17. do 28. oktobra 2021. Modre črte označujejo mejne vrednosti

posameznega onesnaževala (zahtevane ali priporočene). V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Za najboljši scenarij se je izkazal scenarij 5C\_Cat I, ki ga priporoča standard EN 16798-1. Gre za prezračevanje s stopnjo  $0,7 \text{ h}^{-1}$ , kar v našem primeru predstavlja količino zraka  $35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . V tem primeru je  $C_{\text{Rn-s}}$  skozi celotno obdobje pod mejno koncentracijo  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ ,  $C_{\text{CO2-s}}$  je v 6 % časa prekoračil mejno vrednost 1000 ppm. Za najslabši scenarij se je izkazal 1. scenarij, ki ga kot minimalno vrednost prezračevanja zahteva nacionalna zakonodaja, s prezračevanjem  $0,2 \text{ h}^{-1}$  za čas odsotnosti, kar v obravnavanem primeru predstavlja pretok zraka  $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .  $C_{\text{CO2-s}}$  presega mejno vrednost v 21 % časa,  $C_{\text{Rn-s}}$  pa 13 % časa.

V zaključku analize smo s poskušanjem prišli do optimalne stopnje prezračevanja, kjer smo zagotovili  $C_{\text{Rn-s}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{\text{CO2-s}} < 1000 \text{ ppm}$  skozi celotno obdobje analize. Ugotovili smo, da bi morali zagotoviti pretok zraka  $69,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $1,4 \text{ h}^{-1}$ ), s čimer bi se koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  znižala skoraj za polovico, torej na okrog  $50 \text{ Bq m}^{-3}$ . Rezultati optimalnega prezračevanja so prikazani na sliki 15.



Slika 15: Optimalna stopnja prezračevanja za model DH v času 17. –28. oktobra ( $1,4 \text{ h}^{-1}$ ) na osnovi mejnih vrednosti  $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{\text{CO2-s}} = 1000 \text{ ppm}$  (modra črta). V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa opoldne.

### 6.3 Rezultati – model DH (zima)

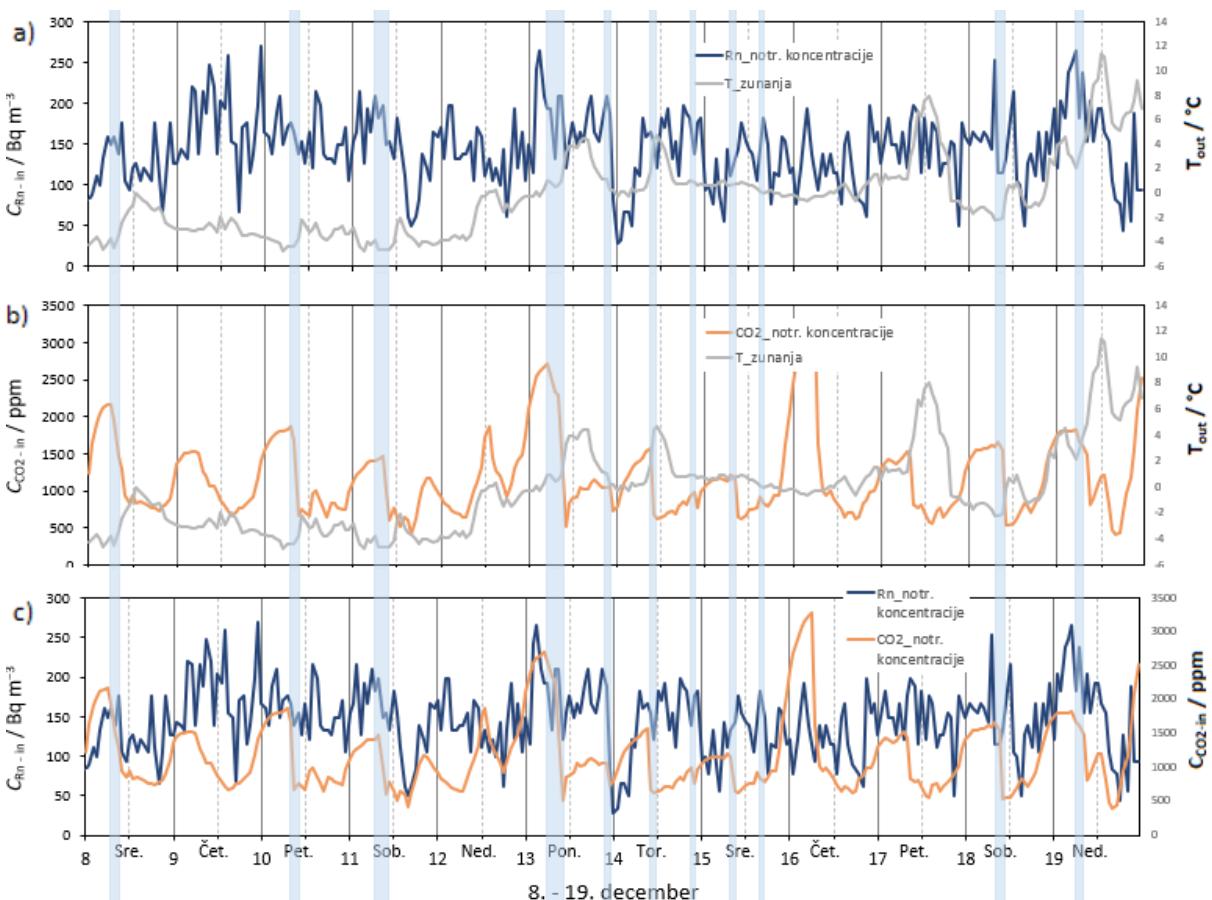
#### 6.3.1 Rezultati izmerjenih koncentracij CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn ter meteoroloških parametrov – model DH (zima)

Na sliki 16 so prikazani rezultati meritev, ki smo jih opravili v zimskem obdobju za model DH. Slika 16a kaže koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  ( $C_{\text{Rn-m}}$ ) in temperaturo zunanjega zraka ( $T_{\text{out}}$ ). Običajen dnevni trend spremenjanja obeh krivulj (najvišja  $C_{\text{Rn-m}}$  v zgodnjih jutranjih urah in najnižja popoldne ter obratno za  $T_{\text{out}}$ ) je pozimi veliko manj očiten kot spomladi ali jeseni (Kikaj s sod., 2023). Povprečna  $C_{\text{Rn-m}}$ , v času

od 8. do 19. decembra 2021, je znašala  $146 \text{ Bq m}^{-3}$ , povprečna zunanjega temperatura pa  $-0,2^\circ\text{C}$ .  $C_{\text{Rn-m}}$  je kar 86 % časa (248 ur) presegale mejno vrednost  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Slika 16b kaže koncentracije ogljikovega dioksida ( $C_{\text{CO}_2-\text{m}}$ ) in temperaturo zunanjega zraku ( $T_{\text{out}}$ ). Ponoči je  $C_{\text{CO}_2-\text{m}}$  naraščala in dosegla najvišjo vrednost zgodaj zjutraj, po prezračenju prostora se je hitro znižala. Čeprav je glavni vir  $\text{CO}_2$  v prostoru človek (celično dihanje), pa lahko tudi v tem primeru vidimo soodvisnost s  $T_{\text{out}}$ . Povprečna  $C_{\text{CO}_2-\text{m}}$  je znašala 1185 ppm, vrednosti so 52 % časa (150 ur) presegale mejno vrednost 1000 ppm.

Na sliki 16c sta koncentraciji  $^{222}\text{Rn}$  in  $\text{CO}_2$ . Ker je  $C_{\text{Rn-m}}$  odraz prehajanja radona iz talnega zraka v stavbo ter prezračevanja,  $C_{\text{CO}_2-\text{m}}$  pa predvsem prisotnosti v prostoru in prezračevanja, sta lahko poteka krivulj podobna ali pa tudi različna.



Slika 16: Zima – rezultati meritev v DH: a) koncentracije radona v prostoru in temperatura zunanjega zraka; b) koncentracije ogljikovega dioksida v prostoru in temperatura zunanjega zraka; c) koncentracije radona in ogljikovega dioksida v prostoru. Prikazani so rezultati za obdobje od 8. do 19. decembra, ki smo jih uporabili tudi pri simulaciji za zimo. Sivo osenčena območja označujejo prezračevanje. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa opoldne.

### 6.3.2 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model DH (zima)

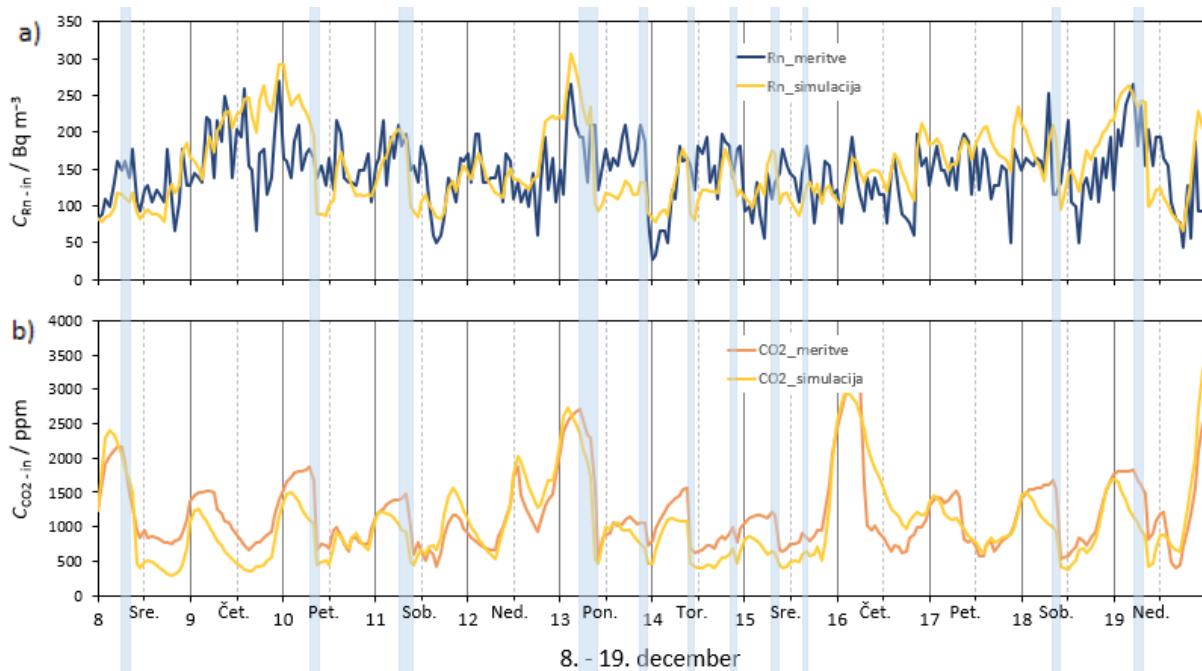
Na sliki 17a je prikazana primerjava izmerjenih ( $C_{\text{Rn-m}}$ ) in simuliranih ( $C_{\text{Rn-s}}$ ) koncentracij  $^{222}\text{Rn}$ . Opazimo dobro ujemanje, ki je boljše kot spomladi in jeseni. Povprečna razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  za

celotno obdobje znaša  $38 \text{ Bq m}^{-3}$ . Po posameznih obdobjih pa so razlike predvsem odraz pogostosti prezračevanja in so naslednje (povprečja za navedena obdobja):

- 8. december (prezračeno 1× na dan):  $30 \text{ Bq m}^{-3}$
- 9. december (brez prezračevanja):  $47 \text{ Bq m}^{-3}$
- od 10. do 11. decembra (prezračeno 1× na dan):  $37 \text{ Bq m}^{-3}$
- 12. december (brez prezračevanja):  $31 \text{ Bq m}^{-3}$
- od 13. do 15. december (prezračeno 2× na dan):  $40 \text{ Bq m}^{-3}$
- od 16. do 17. december (brez prezračevanja):  $31 \text{ Bq m}^{-3}$
- od 18. do 19. december (prezračeno 1× na dan):  $47 \text{ Bq m}^{-3}$

Izmerjene in simulirane koncentracije ogljikovega dioksida ( $C_{\text{CO}_2\text{-m}}$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$ ) so prikazane na sliki 17b, kjer se krivulji, podobno kot pri  $^{222}\text{Rn}$ , dobro ujemata. Povprečne razlike med  $C_{\text{CO}_2\text{-m}}$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$  za posamezna obdobja so naslednje:

- 8. december (prezračeno 1× na dan): 330 ppm
- 9. december (brez prezračevanja): 386 ppm
- od 10. do 11. decembra (prezračeno 1× na dan): 235 ppm
- 12. december (brez prezračevanja): 182 ppm
- od 13. do 15. december (prezračeno 2× na dan): 285 ppm
- od 16. do 17. december (brez prezračevanja): 284 ppm
- od 18. do 19. december (prezračeno 1× na dan): 301 ppm.



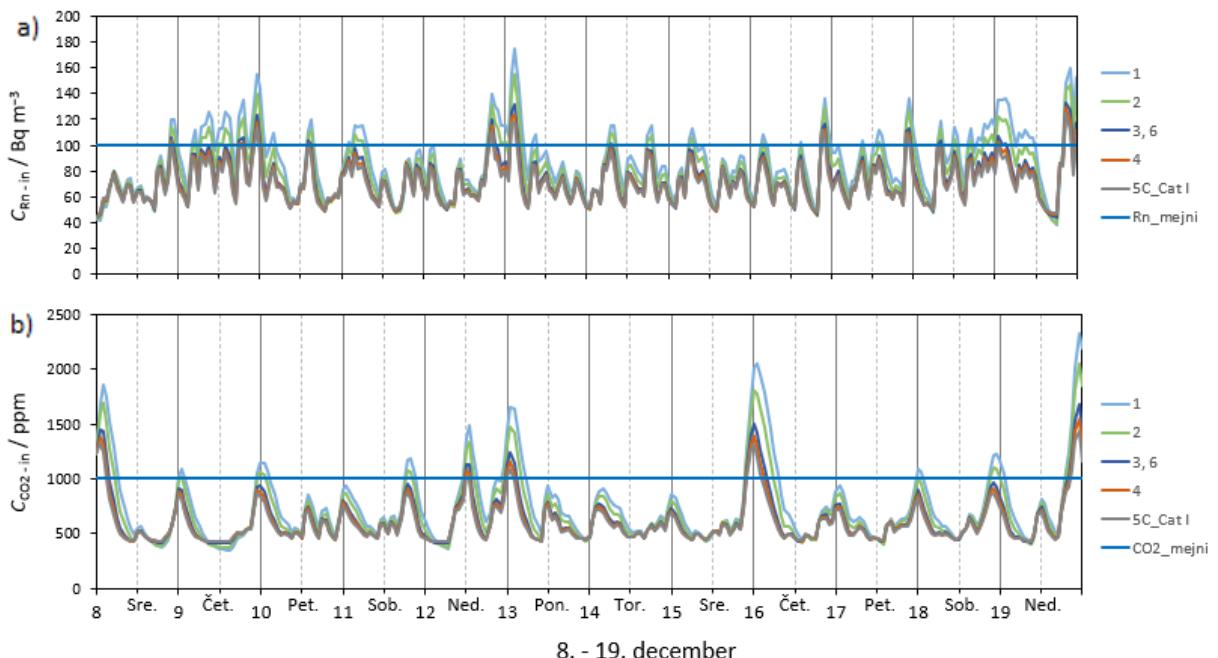
Slika 17: Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij za model DH: a)  $^{222}\text{Rn}$  in b)  $\text{CO}_2$  v obdobju od 8. do 19. decembra. Modre črte označujejo mejne vrednosti posameznega onesnaževala (zahtevane ali priporočene). V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena črta pa poldne.

### 6.3.3 Vpliv zahtevanih in priporočenih stopnji prezračevanja na koncentracije CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn – model DH (zima)

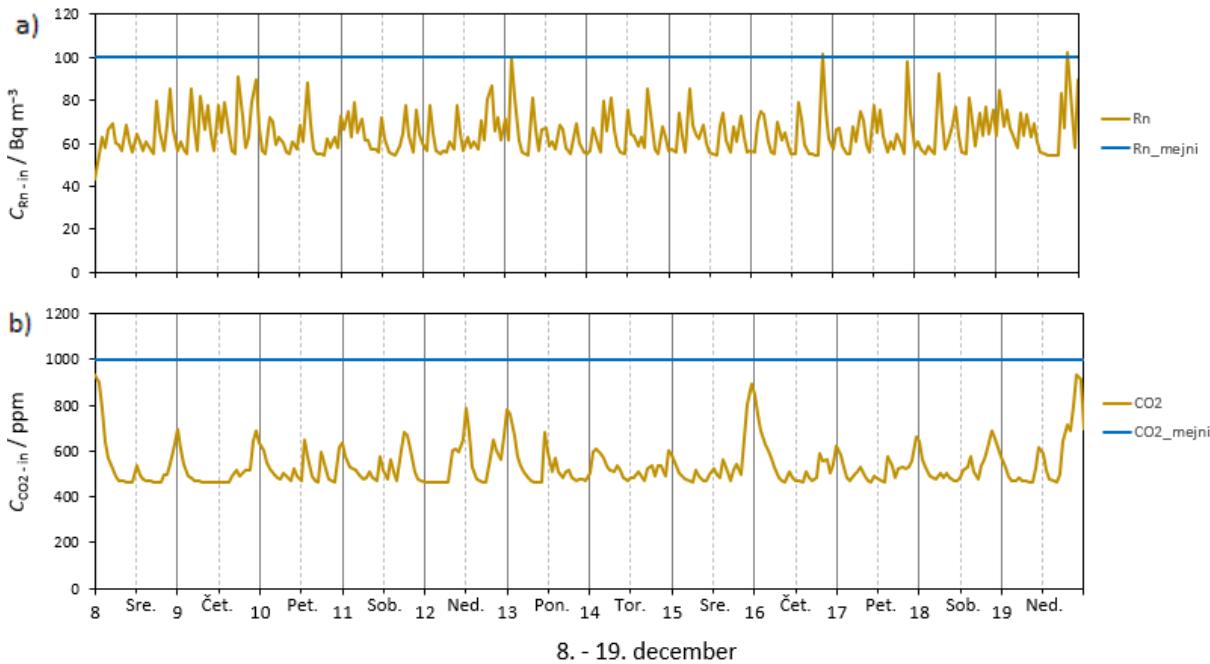
Obravnavali smo 6 različnih, zakonsko zahtevanih in/ali priporočenih, scenarijev prezračevanja, ki so podrobneje predstavljeni v poglavju SCENARIJI PREZRAČEVANJA (Preglednica 5). Na sliki 18 so združeni rezultati simulacij vseh scenarijev za  $C_{\text{Rn-s}}$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$ . Zaradi boljše preglednosti smo za 5. scenarij prezračevanja predstavili zgolj scenarij 5C\_Cat I, saj so ostale kategorije zajete že v preostalih scenarijih.

Po pričakovanju se je kot najboljši izkazal scenarij 5C\_Cat I, ki ga priporoča standard EN 16798-1. Gre za prezračevanje stopnje  $0,7 \text{ h}^{-1}$ , kar v našem primeru predstavlja volumen zraka  $35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .  $C_{\text{Rn-s}}$  prekorači mejno koncentracijo  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  za  $4\%$  časa (12 ur),  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$  pa prekorači mejno vrednost  $1000 \text{ ppm}$  za  $6\%$  časa (16 ur). Za najslabši scenarij se je izkazal 1. scenarij, ki ga kot minimalno vrednost prezračevanja zahteva nacionalna zakonodaja, s prezračevanjem  $0,2 \text{ h}^{-1}$  za čas odsotnosti, kar v obravnavanem primeru predstavlja pretok zraka  $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Koncentracije obeh onesnaževal bi veliko časa presegale mejno vrednost, in sicer  $C_{\text{Rn-s}}$   $30\%$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$   $18\%$  časa.

Na koncu analize smo prišli do optimalne stopnje prezračevanja, pri kateri smo zagotovili  $C_{\text{Rn-s}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}} < 1000 \text{ ppm}$  skozi celotno obdobje analize. Ugotovili smo, da bi morali zagotoviti pretok zraka  $89,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  ( $1,8 \text{ h}^{-1}$ ). Rezultati optimalnega prezračevanja so prikazani na sliki 19.



Slika 18: Rezultati simuliranih koncentracij za model DH: a)  $^{222}\text{Rn}$  in b)  $\text{CO}_2$  za 6 različnih scenarijev prezračevanja, v obdobju od 8. do 19. decembra 2021. Modre črte označujejo mejne vrednosti posameznega onesnaževala (zahtevane ali priporočene). V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

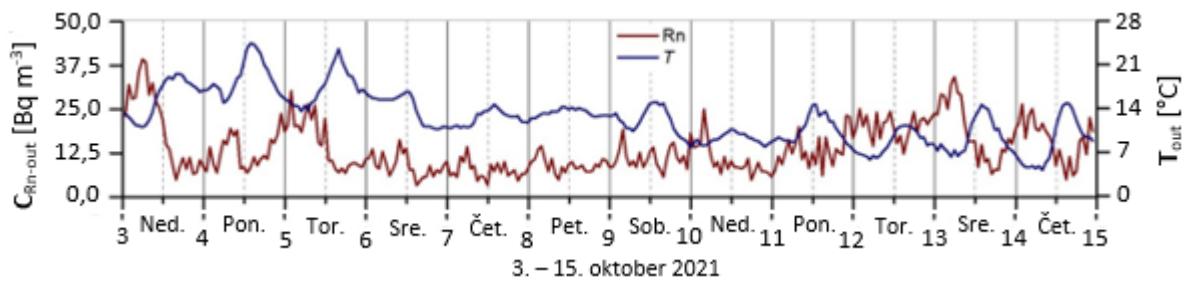


Slika 19: Optimalna stopnja prezračevanja za model DH ( $1,8 \text{ h}^{-1}$ ) v času 8.–19. decembra na osnovi mejnih vrednosti  $C_{Rn-s} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{CO2-s} = 1000 \text{ ppm}$ . V mrežnih črta polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

## 6.4 Rezultati – model VS

### 6.4.1 Rezultati izmerjenih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ ter meteoroloških parametrov – model VS

Na slikah 20, 21 in 22 so predstavljeni rezultati meritev koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  in  $\text{CO}_2$  za celotno obdobje od 3. do 15. oktobra 2021. Slika 20 kaže koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  v zunanjem zraku ( $C_{Rn-out}$ ) in temperaturo zunanjega zraka ( $T_{out}$ ).  $C_{Rn-out}$  se giblje od 3,3 do 39,0  $\text{Bq m}^{-3}$ . Opazen je trend z najvišjimi koncentracijami zgodaj zjutraj in najnižjimi popoldne, ki pa ni vedno zelo izrazit. Vidna je tudi obratna sorazmernost  $C_{Rn-out}$  in  $T_{out}$ , in sicer v večini primerov  $C_{Rn-out}$  pada, ko  $T_{out}$  zraste.



Slika 20: Koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  v zunanjem zraku ( $C_{Rn-out}$ ), temperatura zunanjega zraka ( $T_{out}$ ) za model VS. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne (Dovjak s sod., 2022).

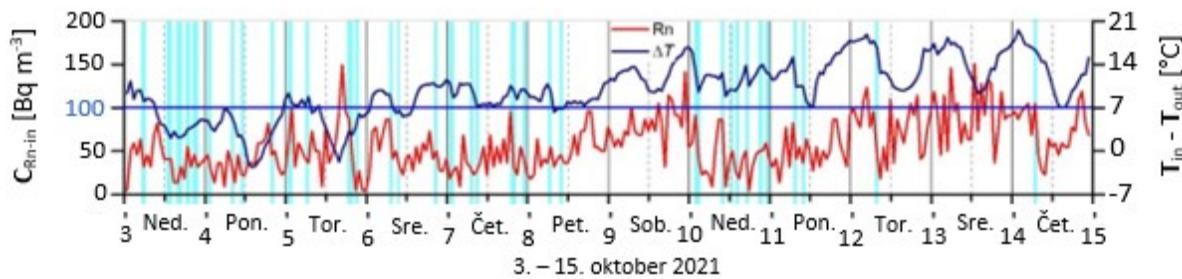
Slika 21 kaže koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  v prostoru ( $C_{Rn-in}$ ) in razliko v temperaturi med notranjim ( $T_{in}$ ) in zunanjim ( $T_{out}$ ) zrakom ( $T_{in}-T_{out}$ ) za model VS. Ko se razlika veča, se poviša trend naraščanja  $C_{Rn-in}$

(Dovjak s sod., 2022). Zaradi razmeroma nizkih koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  v prostoru, od 5 do 151  $\text{Bq m}^{-3}$ , in manjše občutljivosti instrumenta (merilna negotovost  $\pm 32\%$ ) urne vrednosti koncentracij precej nihajo (Slika 21; rdeča krivulja). Rešitev bi bila v podaljšanju časa zajemanja podatkov (1-krat na 3 ure namesto 1-krat na uro), s čimer bi dobili manjše nihanje med posameznimi vrednostmi (poglajeno krivuljo), vendar za eno tretjino manj podatkov in s tem manj informacij spremiščanju koncentracije  $^{222}\text{Rn}$ , predvsem pa bi težko sledili prezračevanju prostora.

Na osnovi rezultatov meritev smo za model VS ovrednotili vplive prezračevanja na koncentracije  $^{222}\text{Rn}$ , ki jih podajamo kot povprečne vrednosti, glede na stanje v neprezračenem prostoru:

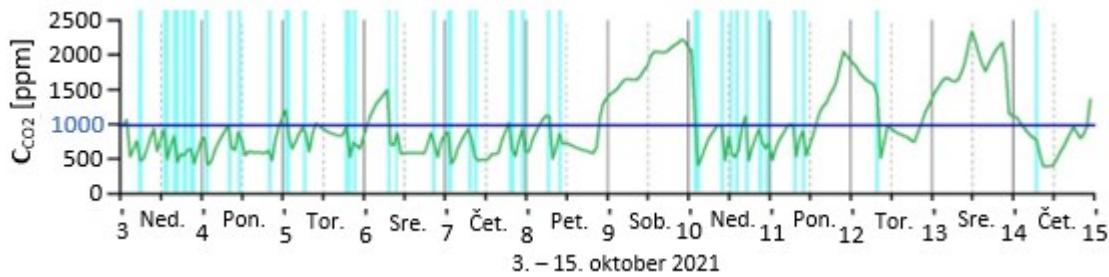
neprezračevano	$= 87 \text{ Bq m}^{-3}$
prezračeno 1–2× na dan	$= 66 \text{ Bq m}^{-3}$ (25 % zmanjšanje glede na neprezračevano)
pogosto prezračeno (večkrat na dan)	$= 45 \text{ Bq m}^{-3}$ (50 % zmanjšanje glede na neprezračevano)

Iz tega je razvidno, kako pomembno je pogosto prezračevanje, še posebej v zelo zrakotesnih stavbah ter v stavbah z velikim številom uporabnikov.



Slika 21: Izmerjene koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  ( $C_{\text{Rn-in}}$ ) v prostoru VS in razlika v temperaturi med notranjim ( $T_{\text{in}}$ ) in zunanjim ( $T_{\text{out}}$ ) zrakom. Turkizno osenčena območja označujejo obdobja prezračevanja, modra črta pa mejno koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  v skladu s priporočili SZO. V mrežnih črtah polna navpična črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne (Dovjak s sod., 2022).

Sliki 22 kaže potek krivulje koncentracije  $\text{CO}_2$  v odvisnosti od prezračevanja (osenčena obdobja turkizne barve). Vidimo, da je  $\text{CO}_2$  učinkovit indikator prezračevanja, saj pri pogostem prezračevanju ostaja koncentracija razmeroma nizka (pod 1000 ppm), ko ne prezračujemo, pa hitro naraste (tudi nad 2000 ppm), kar smo opazili tudi pri radonu. Skozi celotno obdobje meritev se koncentracija giblje v razponu od okrog 500 do 2340 ppm, s povprečno vrednostjo 1010 ppm.



Slika 22: Izmerjene koncentracije  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2}$ ) v prostoru VS. Turkizno osenčena območja označujejo obdobja prezračevanja, modra črta pa mejno vrednost  $\text{CO}_2$  v skladu s priporočili ANSI/ASHRAE. V mrežnih polnih navpičnih krivuljih je označeno polnoč, prekinjena pa poldne.

#### 6.4.2 Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model VS

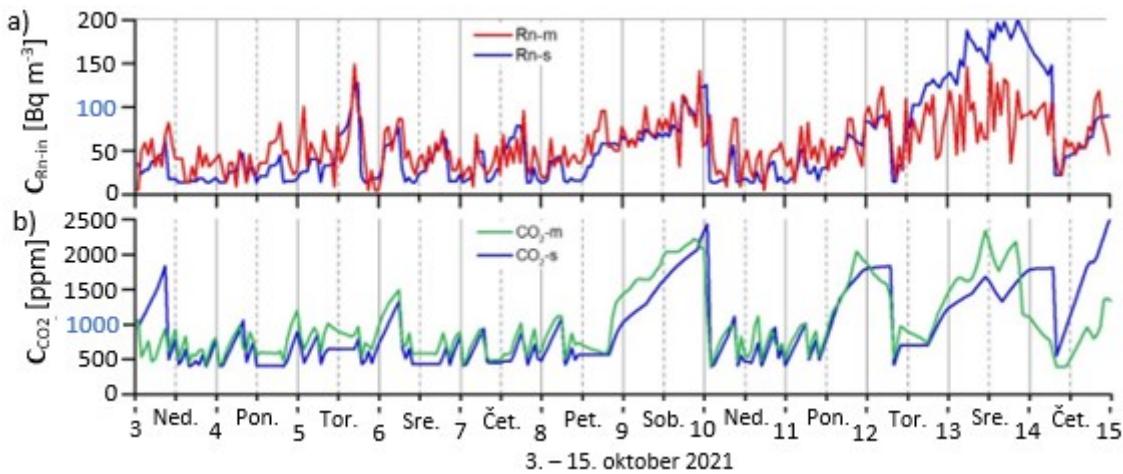
Na sliki 23a je prikazana primerjava izmerjenih ( $C_{\text{Rn-m}}$ ) in simuliranih ( $C_{\text{Rn-s}}$ ) koncentracij  $^{222}\text{Rn}$  za model VS. Opazimo podoben trend obeh krivulj. V prvem delu (3.–8. oktobra), ko je bil prostor prezračevan večkrat na dan, je povprečna razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$   $12 \text{ Bq m}^{-3}$ . V drugem delu (9. oktober, sobota), ko ni bilo prezračevano, je bilo ujemanje najboljše, povprečna razlika znaša  $1 \text{ Bq m}^{-3}$ . Naslednji dan (nedelja, 10. oktobra) je bilo prezračevanje zopet pogosto, povprečna razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  je zopet višja, in sicer  $21 \text{ Bq m}^{-3}$ . V zadnjem delu (11.–12. oktobra in 14. oktobra), ko je bilo prezračevanje enkrat ali dvakrat na dan, je povprečna razlika med  $C_{\text{Rn-m}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  od  $9$  do  $14 \text{ Bq m}^{-3}$ . Zanimiva je primerjava koncentracij za sredo, 13. oktobra, ko ponovno ni bilo prezračevano, ampak je bilo odstopanje krivulj največje. Povprečna razlika znaša  $79 \text{ Bq m}^{-3}$ , kar je povsem nasprotno od prvega dne, ko tudi ni bilo prezračevano (sobota, 9. oktobra).

Predvsem na začetku, ko so bile  $C_{\text{Rn-m}}$  nižje in se je prezračevalo večkrat na dan, lahko opazimo, da so  $C_{\text{Rn-s}}$  v času prezračevanja padle precej hitreje, kot se je to zgodilo dejansko v primeru izmerjenih koncentracij. To bi lahko pomenilo, da pretok zraka skozi okna v resnici ni bil tako velik, kot ga je izračunal program.

Izmerjene ( $C_{\text{CO}_2-\text{m}}$ ) in simulirane ( $C_{\text{CO}_2-\text{s}}$ ) koncentracije  $\text{CO}_2$  so prikazane na sliki 23b, kjer se krivulji, podobno kot pri  $^{222}\text{Rn}$ , zelo dobro ujemata. Povprečne razlike med  $C_{\text{CO}_2-\text{m}}$  in  $C_{\text{CO}_2-\text{s}}$  za posamezna obdobja so naslednje:

- od 3. do 8. oktobra (pogosto prezračevanje):  $151 \text{ ppm}$ , brez nočnega časa, ko je bila opažena velika razlika
- 9. oktobra (brez prezračevanja):  $252 \text{ ppm}$
- 10. oktobra (pogosto prezračevanje):  $107 \text{ ppm}$
- 11. oktobra (redko prezračevanje):  $107 \text{ ppm}$
- 12. oktobra (redko prezračevanje):  $51 \text{ ppm}$
- 13. oktobra (brez prezračevanja):  $281 \text{ ppm}$
- 14. oktobra (redko prezračevanje):  $837 \text{ ppm}$ .

Opazimo lahko, da se  $^{222}\text{Rn}$  in  $\text{CO}_2$  akumulirata podobno. Razliko vidimo le pri koncentraciji  $\text{CO}_2$ , ki je precej višja zaradi večje stopnje proizvodnje v manjšem volumenu prostora. Prekoračene so vse zahtevane in priporočene mejne vrednosti.

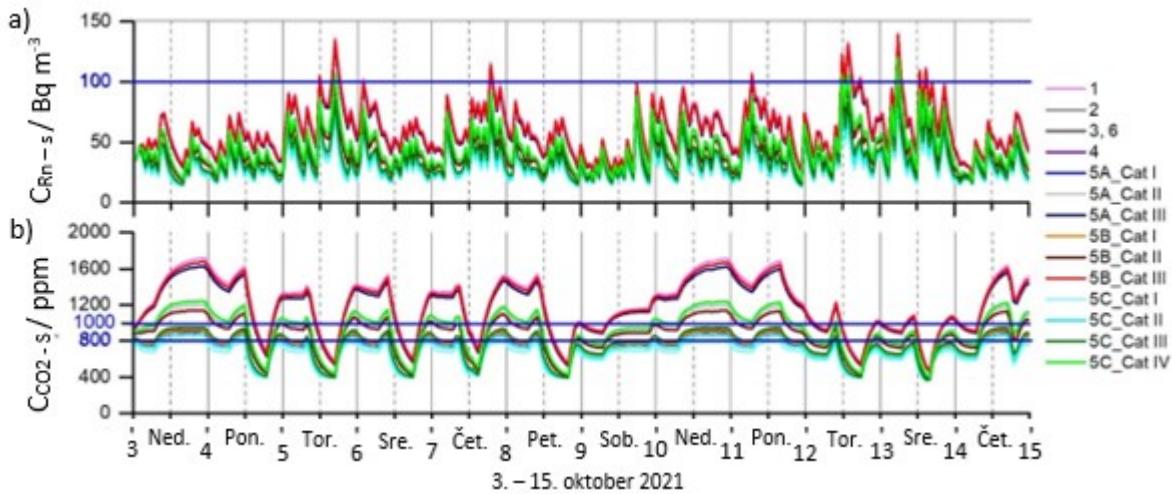


Slika 23: Primerjava izmerjenih in simuliranih koncentracij za model VS: a)  $^{222}\text{Rn}$  in b)  $\text{CO}_2$  v obdobju od 3. do 5. oktobra 2021. V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne (Dovjak s sod., 2022).

Zaradi boljše preglednosti slike 23 nismo osenčili z obdobji prezračevanja. Ta so navedena v razlagah slik 21 in 22 ter povzeta iz preglednice 4.

#### 6.4.3 Vpliv zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja na koncentracije $\text{CO}_2$ in $^{222}\text{Rn}$ – model VS

Obravnavali smo 6 različnih, zakonsko zahtevanih in/ali priporočenih, scenarijev prezračevanja, ki so podrobnejše predstavljeni v poglavju SCENARIJI PREZRAČEVANJA (Preglednica 5). Na sliki 24 so združeni rezultati simulacij za vse scenarije za obe onesnaževali ( $C_{\text{Rn-s}}$  in  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$ ).



Slika 24: Rezultati simuliranih koncentracij za model VS: a)  $^{222}\text{Rn}$  in b)  $\text{CO}_2$  za 6 različnih scenarijev prezračevanja, v obdobju od 3. do 15. oktobra 2021. Modre črte označujejo mejne vrednosti posameznega onesnaževala (zahtevane ali priporočene). V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne (Dovjak s sod., 2022).

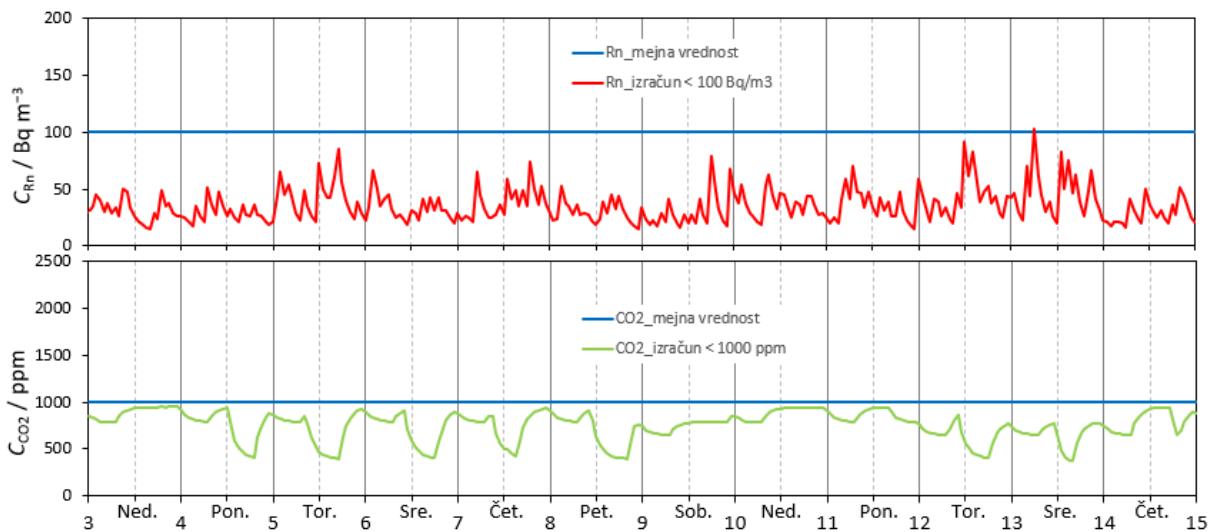
V preglednici 9 so predstavljena odstopanja  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$  in  $C_{\text{Rn-s}}$  (izražena v urah in % simuliranega časa, skupaj 288 ur) od mejnih vrednosti (100  $\text{Bq m}^{-3}$  za  $^{222}\text{Rn}$  in 1000 ppm ter 800 ppm za  $\text{CO}_2$ ).

Preglednica 9: Odstopanja simuliranih vrednosti  $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$  [ppm] in  $C_{\text{Rn-s}}$  [ $\text{Bq m}^{-3}$ ] od mejnih vrednosti, za vseh šest scenarijev (Dovjak s sod., 2022)

Scenarij	Stopnja prezračevanja (DVR)	Trajanje $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$ nad 1000 ppm		Trajanje $C_{\text{CO}_2\text{-s}}$ nad 800 ppm		Trajanje $C_{\text{Rn-s}}$ nad 100 $\text{Bq m}^{-3}$	
		[h]	[%]	[h]	[%]	[h]	[%]
1	13,9 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,2 ACH)	185	64	237	82	10	4
2	15,0 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,2 ACH)	176	61	267	93	6	2
3=6	34,6 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,5 ACH)	0	0	93	32	0	0
4	40,0 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,6 ACH)	0	0	60	21	0	0
5A_kategorija	36,6 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,5 ACH)	0	0	83	29	0	0
I-III	23,4 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,3 ACH)	87	30	169	59	2	1
	15,0 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,2 ACH)	176	61	218	76	6	2
5B_kategorija	36,0 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,5 ACH)	0	0	81	28	0	0
I-III	25,2 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,4 ACH)	61	21	159	55	1	0,4
	14,4 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,2 ACH)	188	65	226	79	8	3
5C_kategorija	46,9 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,7 ACH)	0	0	0	0	0	0
I-III	40,2 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,6 ACH)	0	0	61	21	0	0
	33,6 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,5 ACH)	0	0	133	46	0,5	0,2
	22,1 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,3 ACH)	117	41	163	57	2	0,7

Za najboljši scenarij, z vidika časa, ko so koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  in  $\text{CO}_2$  pod mejnimi vrednostmi, se je izkazal scenarij 5C\_Cat I. Priporoča ga standard EN 16798-1, kjer gre za 0,7 izmenjav zraka na uro (ACH), kar v našem primeru pomeni volumen zraka  $46,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .  $C_{\text{Rn-s}}$  in  $C_{\text{CO2-s}}$  sta bila skozi celotno simulacijo pod mejnimi vrednostmi ( $100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $800 \text{ ppm}$ ). Najslabša sta 1. in 2. scenarij, kjer smo pri prvem zagotovili  $0,2 \text{ h}^{-1}$  (ACH) izmenjav zraka na uro ( $10,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model DH in  $13,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model VS), pri drugem pa  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  na osebo ( $0,3 \text{ h}^{-1}$  za model DH in  $0,2 \text{ h}^{-1}$  za model VS). Oba scenarija predstavljata zahtevani vrednosti po nacionalni zakonodaji. V preglednici 9 lahko opazimo, da je bila mejna vrednost  $\text{CO}_2$   $1000 \text{ ppm}$  presežena v obeh primerih približno 60 % časa, mejna vrednost  $800 \text{ ppm}$  pa kar 82 oz. 93 % časa. Po drugi strani koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  niso presegale mejne vrednosti  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  več kot 10 ur oz. 4 % časa.

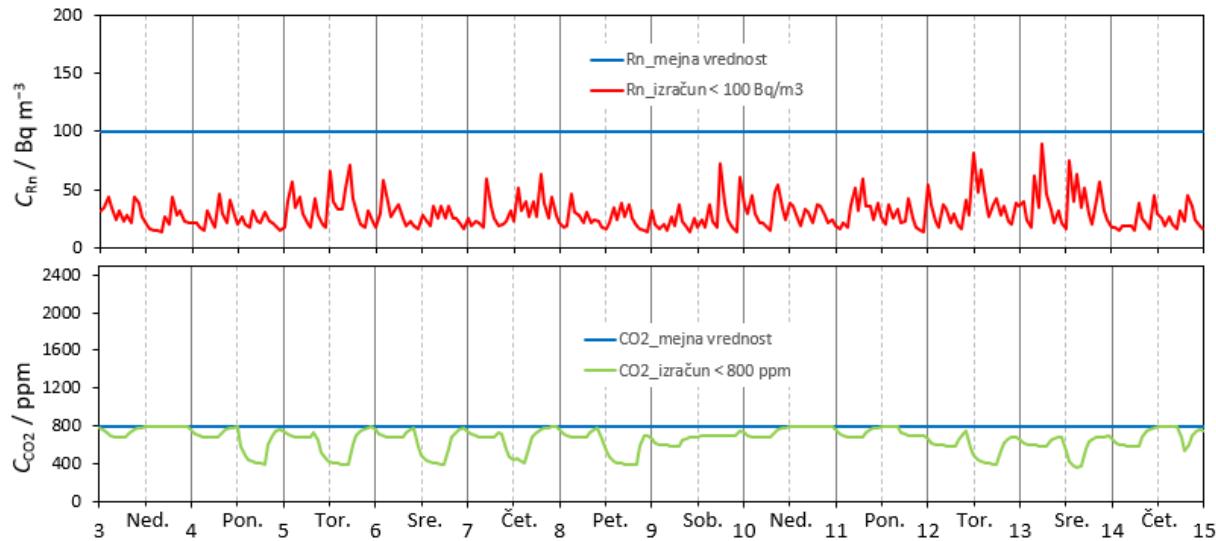
V zadnjem koraku raziskave smo želeli ugotoviti, kakšna je optimalna stopnja prezračevanja, pri kateri bi zagotovili skozi celotno obdobje analize koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  pod  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  in koncentracijo  $\text{CO}_2$  pod  $1000 \text{ ppm}$  oz. pod  $800 \text{ ppm}$ . V kombinaciji z napravo za vračanje toplote bi zagotovili učinkovito prezračevanje ter varčevanje z energijo (ogrevanje, hlajenje itd.) hkrati.



3. - 15. oktober

Slika 25: Optimalna stopnja prezračevanja (DVR) za model VS in čas 3.-15. oktober na osnovi mejnih vrednosti  $C_{\text{Rn-s}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{\text{CO2-s}} = 1000 \text{ ppm}$ . V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Ugotoviti smo želeli optimalno stopnjo prezračevanja pri pogojih  $C_{\text{Rn-s}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{\text{CO2-s}} < 1000 \text{ ppm}$ , če prostore prezračimo vsaj 1-krat na dve uri ( $0,5 \text{ h}^{-1}$  ACH). Takšno prezračevanje še lahko zagotovimo z naravnim prezračevanjem, vendar zelo težko, če za odpiranje oken oz. odprtin za prezračevanje ne uporabljam mehanskih sistemov za odpiranje in zapiranje.



3. - 15. oktober

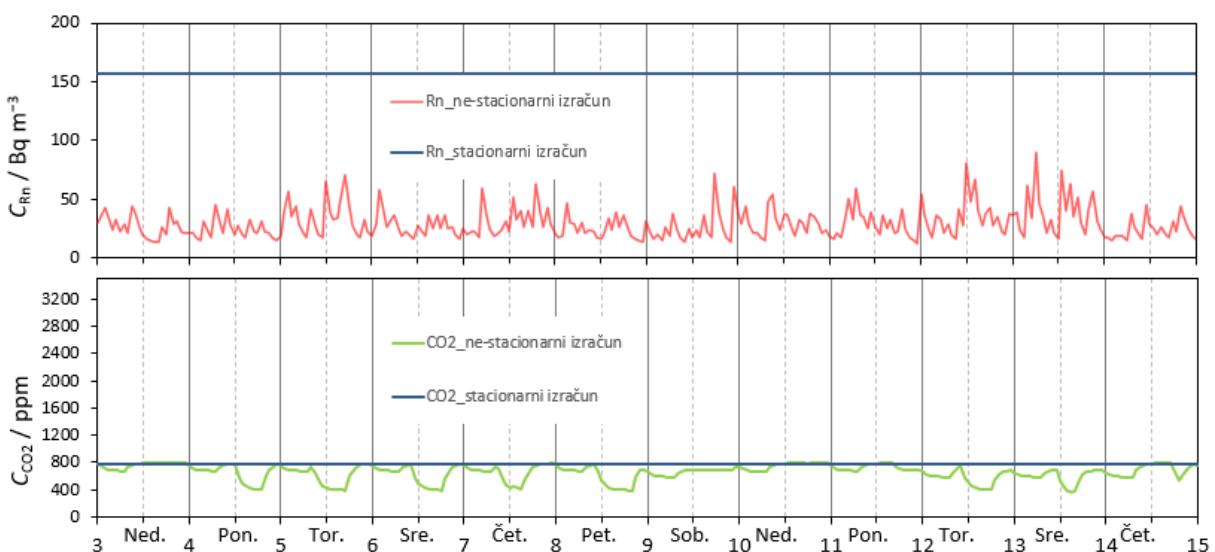
Slika 26: Optimalna stopnja prezračevanja (DVR) za model VS in čas 3.–15. oktober na osnovi mejnih vrednosti  $C_{Rn-s} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{CO2-s} = 800 \text{ ppm}$ . V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.

Pri strožjem kriteriju prezračevanja, kjer smo poskusili zagotoviti  $C_{Rn-s} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{CO2-s} < 800 \text{ ppm}$ , smo prišli do ugotovitve, da je potrebno prostore prezračiti približno 1-krat na 1,5 ure ( $0,7 \text{ h}^{-1}$  ACH). Takšno prezračevanje zagotovimo s scenarijem 5C\_Cat I, ki se je izkazal za najboljši in hkrati optimalen scenarij prezračevanja.

#### 6.4.4 Primerjava stacionarnega z nestacionarnim modelom – model VS

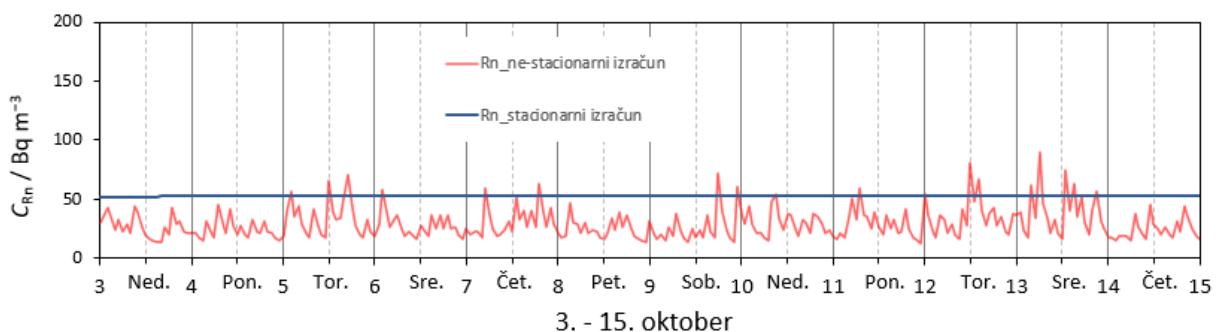
V stacionarnem modelu so bili za razliko od nestacionarnega modela upoštevani naslednji konstantni parametri:  $T_{out} = 9,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{in} = 22,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $C_{CO2-out} = 400 \text{ ppm}$ ,  $C_{Rn-out} = 13,7 \text{ Bq m}^{-3}$ ,  $p_{b-out} = 97498 \text{ Pa}$ ,  $p_{b-in} = 101325 \text{ Pa}$ . Aktivno proizvodnjo CO<sub>2</sub> smo določili enako, kot je definirano v poglavju 3.4.5, za <sup>222</sup>Rn pa smo definirali dve različni vrednosti: najvišjo in povprečno vrednost proizvodnje <sup>222</sup>Rn (vstopa v prostor), v obdobju med 3. in 15. oktobrom.

Za optimalno načrtovano stopnjo prezračevanja, ki zagotavlja  $C_{CO2-s} < 800 \text{ ppm}$  skozi celotno obdobje analize, se je izkazalo prezračevanje  $0,7 \text{ h}^{-1}$  ( $48,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ). Pri <sup>222</sup>Rn smo določili dve optimalni načrtovani stopnji prezračevanja, ki zagotavljata  $C_{Rn-s} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$ , odvisno od tega ali upoštevamo maksimalno ( $1,2 \text{ h}^{-1}$ ;  $82,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) ali povprečno ( $0,7 \text{ h}^{-1}$ ;  $48,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) proizvodnjo <sup>222</sup>Rn.



3. - 15. oktober

Slika 28: Stacionarni izračun – optimalna stopnja prezračevanja za model VS ( $0,7 \text{ h}^{-1}$ ) na osnovi mejnih vrednosti  $C_{Rn-s} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{CO2-s} = 800 \text{ ppm}$ . Aktivna proizvodnja  $^{222}\text{Rn}$  definirana kot maksimalna vrednost. V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa poldne.



Slika 27: Stacionarni izračun – optimalna stopnja prezračevanja za model VS ( $0,7 \text{ h}^{-1}$ ) na osnovi mejnih vrednosti  $C_{Rn-s} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{CO2-s} = 800 \text{ ppm}$ . Proizvodnja  $^{222}\text{Rn}$  definirana kot povprečna vrednost. V mrežnih črtah polna črta označuje polnoč, prekinjena pa opoldne.

Rezultati stacionarnega modela VS, kjer je aktivna proizvodnja  $^{222}\text{Rn}$  definirana kot povprečna vrednost analiziranega obdobja, se ujemajo z rezultati nestacionarne analize. V obeh primerih smo dobili optimalno načrtovano stopnjo prezračevanja  $0,7 \text{ h}^{-1}$  ( $48,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ). Če je prezračevalni sistem nastavljen na konstantni pretok, je smiselna in zadostna izvedba prezračevanja na osnovi stacionarnih izračunov za obe onesnaževali. V primeru namestitve naprednega prezračevanja, ki je opremljen s senzorskim sistemom kakovosti zraka, in se DVR spreminja glede na vhodne podatke in spremenljiv trend onesnaževal, bi za načrtovanje in delovanje sistema predlagali nestacionarno analizo. Spreminjanje pretoka glede na dejanske potrebe se odraži v kakovostnem okolju in nižji rabi energije (Dovjak s sod. 2022; Dovjak s sod., 2020).

## 7 RAZPRAVA

V številnih študijah se je izkazalo, da je CO<sub>2</sub> dober pokazatelj kakovosti notranjega zraka, ki se v povišanih koncentracijah pojavlja predvsem zaradi nezadostnega prezračevanja. V raziskavah na stanovanjskih stavbah avtorji opozarjajo na problem povišanih koncentracij CO<sub>2</sub> predvsem v spalnicah in otroških sobah. Kotol s sod. (2014) je v presečni študiji na 79. grenlandskih stanovanjih v mestu Sisimiut ugotovil, da je kar 73 % stanovanj nezadostno prezračevanih ( $C_{CO2-m} > 1000$  ppm) ter da so imela mlajša stanovanja (zgrajena po letu 1990) slabšo kakovost zraka kot starejša. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi pri naših meritvah. Koncentracija CO<sub>2</sub> je v DH znašala povprečno 1185 ppm v jeseni in 1190 ppm pozimi, v VS pa 1012 ppm. Poleg CO<sub>2</sub> pa avtorji (Cucos s sod., 2015; Vasilyev s sod., 2017; Pampuri s sod., 2018; Yang s sod., 2019) opozarjajo tudi na problem povišanih koncentracij <sup>222</sup>Rn, še posebej po energetski sanaciji v stanovanjskih stavbah z nezadostnim prezračevanjem. García-Tobar (2018) je predlagal metodologijo za oceno ravni <sup>222</sup>Rn v stanovanjskih stavbah z uporabo programa CONTAM, kjer izračuni temeljijo na predhodnih meritvah. Pregled raziskav je pokazal, da je bila problematika slabe kakovosti notranjega zraka v raziskavah obravnavana z meritvami ali simulacijami le enega onesnaževala. Študije, ki hkrati obravnavajo CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn, so redke, zlasti pri kritični analizi DVR. V naši študiji smo analizirali vpliv zahtevanih in priporočenih DVR na koncentracijo CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn s šestimi sklopi scenarijev.

Kot najboljši scenarij, s katerim vzdržujemo simulirane koncentracije CO<sub>2</sub> ( $C_{CO2-s}$ ) skoraj skozi celotno obdobje pod priporočenimi vrednostmi ( $C_{CO2-s} < 1000$  ppm), je 5C\_Cat I (0,7 h<sup>-1</sup>; 35 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> za model DH in 46,9 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> za model VS), ki ga priporoča standard EN 16798-1 (ISO, 2019). V primeru modela DH za zimo se je izkazalo, da bi bile  $C_{CO2-s}$  5 % časa višje od priporočene vrednosti, s povprečno vrednostjo  $596 \pm 187$  ppm, v jeseni pa 6 % časa, s povprečno vrednostjo  $581 \pm 195$  ppm. V primeru modela VS smo vzdrževali  $C_{CO2-s} < 1000$  ppm čez celotno obdobje analize, s povprečno vrednostjo  $656 \pm 121$  ppm. Za najslabša scenarija sta se izkazala scenarij 1 (0,2 h<sup>-1</sup>; 10 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> za model DH in 13,9 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> za model VS), ki ga zahteva Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb za čas nezasedenosti, in scenarij 3 (0,5 h<sup>-1</sup>; 25 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> za model DH in 34,6 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> za model VS) za čas zasedenosti (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, 2002).

Prednost uporabe dveh onesnaževal (v našem primeru CO<sub>2</sub> in <sup>222</sup>Rn) je ta, da se rezultati dobro dopolnjujejo. Velikokrat se zgodi, da so koncentracije enega od onesnaževal bolj kritične, zato je strožji kriterij zagotoviti koncentracije obeh onesnaževal nižje od zahtevanih in priporočenih ( $C_{CO2-s} < 800$  ppm in  $C_{CO2-s} < 1000$  ppm) kot samo enega. Hkrati je to dvojna kontrola, saj v primeru morebitne napake pri enem to lažje opazimo in v naslednjem koraku popravimo model.

Nestacionarna analiza je sicer veliko zahtevnejša in počasnejša, pa vendar nam daje natančnejše rezultate, saj lahko v modelih zajamemo vse vplivne parametre. Kljub temu da se je izkazala tudi stacionarna analiza za učinkovito, se v natančnejših analizah, z zelo spremenljivimi parametri, ki

definirajo ventilacijsko cono, obrestuje, če vložimo več truda in naredimo nestacionarno analizo, še posebej, če nameravamo stavbo opremiti z naprednimi prezračevalnimi sistemi. Iz rezultatov nestacionarnih simulacij je razvidno veliko več kot iz stacionarnih. Spremljamo lahko nihanja koncentracije onesnaževal v odvisnosti od prezračevanja, zunanje temperature, razlike notranje in zunanje temperature, zračnega tlaka itd. Tako lahko boljše načrtujemo potrebne ukrepe za izboljšanje notranjega zraka.

Za namen zagotavljanja optimalne kakovosti notranjega zraka so potrebni celoviti ukrepi, ki vključujejo tako izboljšave na področju zakonodaje, zaslove stavb in prezračevanja ter metodologije (simulacije, meritve).

#### ZAKONODAJA:

- Zahteve in priporočila so izhodišče za določanje načrtovanih stopenj prezračevanja v stavbi. Obstojče zahteve in priporočila bi bilo potrebno dodatno preučiti glede na zadnje stanje stavbnega ovoja, tehnologijo, kakovost zunanjega zraka in življenjski stil uporabnikov. Upoštevati je potrebno tudi dejstvo, da so zahtevane in priporočene količine določene kot minimalne zadostne količine (ISO, 2019).
- Uvedba obveznega izvajanja meritvev in simulacij, vsaj v stavbah z večjim številom ranljivih uporabnikov.

#### ZASNOVA STAVBE IN PREZRAČEVANJA:

- Z vidika nižje rabe energije in prehoda onesnaževal iz zunanjega okolja v notranjostje zasnova zrakotesnih objektov dobrodošla. Potrebno pa je zagotoviti zadosten volumen zraka za prezračevanje.
- Naravno prezračevanje mora biti čim bolj pogosto in v intervalih od 15 do 20 min, kar zmanjša koncentracije onesnaževal približno za 50 % (Buh, 2022).
- Stopnja prezračevanja, v primeru mehanskega prezračevanja, naj se določi na podlagi meritvev in simulacij, saj v nasprotnem obstaja možnost nezadostnega prezračevanja. V naši raziskavi smo ugotovili, da se ta lahko zelo razlikuje v odvisnosti od lokacije, zasedenosti in zaslove stavbe ter od letnega časa.
- Zasnovi stavbe in prezračevanja morata biti povezani in strmeti k zagotavljanju kakovosti notranjega okolja.

#### METODOLOGIJE (simulacije, meritve):

- Na začetku uporabe stavb je priporočena izvedba meritvev s pomočjo katerih lažje spremljamo in ocenimo kakovost notranjega zraka. V primerih, ko se ugotovi, da je ta slaba, se to poskuša odpraviti z večjo stopnjo prezračevanja. Natančnost meritvev izboljšajo predvsem dober merilnik in znani pogoji izvajanja meritvev (urnik zasedenosti, prezračevanje, aktivnosti v prostoru itd.).

- Simulacije omogočajo predhodne analize in s tem preventivno preprečitev slabe kakovosti zraka oz. notranjega okolja na splošno. Dobrodošla je tudi njihova uporaba v kombinaciji z meritvami, kjer lahko preverimo ustreznost naravnega ali mehanskega prezračevanja ter določimo optimalno stopnjo prezračevanja.

## 8 ZAKLJUČEK

Izdelali smo dva modela ventilacijskih con, in sicer za sobo v enodružinski hiši (DH) in sobo v stanovanju večstanovanjske stavbe (VS). Za oba modela (DH in VS) smo najprej preko daljšega obdobja v različnih letnih časih izvajali kontinuirne meritve koncentracij radona ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $C_{\text{Rn-m}}$ ) in ogljikovega dioksida ( $\text{CO}_2$ ,  $C_{\text{CO2-m}}$ ) ter meteoroloških parametrov v notranjem in zunanjem zraku. Nato smo z uporabo nenstacionarnih simulacij v programu CONTAM 3.4. (National Institute of Standards and Technology, 2020) najprej simulirali koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  ( $C_{\text{Rn-s}}$ ) in  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO2-s}}$ ) na osnovi izmerjenih vrednosti, nato pa izvedli še simulacije zahtevanih in priporočenih stopenj prezračevanja za scenarije 1–6. Na modelu VS smo za primerjavo v istem programu izvedli tudi stacionarno simulacijo. Rezultati meritve in simulacij so privedli do zaključkov, ki jih navajamo v nadaljevanju.

Nestacionarne simulacije za modela DH in VS so pokazale, da se je kot najboljši scenarij vedno izkazal scenarij 5C\_Cat I, ki ga priporoča standard EN 16798-1, s prezračevanjem  $0,7 \text{ h}^{-1}$  ( $35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model DH in  $46,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model VS). V primeru modela DH za zimo se je izkazalo, da bi bile  $C_{\text{CO2-s}}$  5 % časa višje od priporočene mejne vrednosti ( $C_{\text{CO2}} = 1000 \text{ ppm}$ ), s povprečno koncentracijo  $596 \pm 187 \text{ ppm}$ , v jeseni pa 6 % časa, s povprečno koncentracijo  $581 \pm 195 \text{ ppm}$ . V primeru modela VS smo vzdrževali  $C_{\text{CO2-s}} < 1000 \text{ ppm}$  čez celotno obdobje analize, s povprečno koncentracijo  $656 \pm 121 \text{ ppm}$ . Za najslabši scenarij se je izkazal scenarij 1 ( $0,2 \text{ h}^{-1}$ ;  $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model DH in  $13,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  za model VS), ki ga zahteva "Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb". Ta določa, da v času odsotnosti ljudi v prostorih, ki so namenjeni za delo in bivanje, ni potrebno zagotoviti enake izmenjave zraka kot v njihovi prisotnosti. Zagotoviti in vzdrževati je potrebno izmenjavo zraka najmanj  $0,2 \text{ h}^{-1}$ , za odstranitev emisij stavbe in preprečitev drugih škodljivosti (npr. pojav kondenzacije). Scenarij 3, ki enako kot scenarij 1, temelji na zahtevi Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb ter določa, da je v času prisotnosti ljudi v prostorih stavbe potrebno zagotoviti pretok zraka vsaj  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , kar za model DH predstavlja pretok zraka  $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  in za model VS  $34,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Pri obeh modelih so bile  $C_{\text{CO2-s}}$ , v primeru scenarija 1, veliko časa višje od priporočenih vrednosti, in sicer pri modelu DH je bila jeseni priporočena mejna koncentracija ( $C_{\text{CO2}}=1000 \text{ ppm}$ ) presežena 21 % časa, s povprečno vrednostjo  $781 \pm 383 \text{ ppm}$ , pozimi 18 % časa, s povprečno vrednostjo  $758 \pm 354 \text{ ppm}$ , v primeru modela VS pa kar 88,6 % časa, s povprečno vrednostjo  $1213 \pm 308 \text{ ppm}$ . Tudi za  $C_{\text{Rn-s}}$  se je kot najboljši izkazal scenarij 5C\_Cat I, s stopnjo prezračevanja  $0,7 \text{ h}^{-1}$ , kjer mejna vrednost ( $C_{\text{Rn}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ ) pri modelu DH jeseni ni bila presežena, povprečna vrednost  $43 \pm 13 \text{ Bq m}^{-3}$ , pozimi pa presežena 4 % časa, s povprečno

vrednostjo  $71 \pm 15 \text{ Bq m}^{-3}$ . Za najslabši se je izkazal 1. scenarij, s stopnjo prezračevanja  $0,2 \text{ h}^{-1}$ , kjer je bila mejna vrednost ( $C_{\text{Rn}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ ) pri modelu DH v jeseni prekoračena 13 % časa, s povprečno vrednostjo  $72 \pm 23 \text{ Bq m}^{-3}$ , pozimi pa 30 % časa, s povprečno vrednostjo  $88 \pm 25 \text{ Bq m}^{-3}$ . Za najslabši scenarij v času zasedenosti se je izkazal 3. scenarij s stopnjo prezračevanja  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , kjer je bila mejna koncentracija ( $C_{\text{CO}_2} = 1000 \text{ ppm}$ ) prekoračena 8 % časa, s povprečno vrednostjo  $621 \pm 242 \text{ ppm}$  v modelu DH jeseni in 7 % časa, s povprečno vrednostjo  $630 \pm 230 \text{ ppm}$  v modelu DH pozimi ter 0 % časa, s povprečno vrednostjo  $745 \pm 154 \text{ ppm}$  v modelu VS v jeseni, mejna vrednost ( $C_{\text{Rn}} = 100 \text{ Bq m}^{-3}$ ) pa 0 % časa, s povprečno vrednostjo  $49 \pm 16 \text{ Bq m}^{-3}$  v modelu DH jeseni in 8 % časa, s povprečno vrednostjo  $74 \pm 18 \text{ Bq m}^{-3}$  v modelu DH pozimi ter 0 % časa, s povprečno vrednostjo  $35 \pm 15 \text{ Bq m}^{-3}$  v modelu VS jeseni.

Z nestacionarno analizo podatkov smo ugotovili, kakšne so optimalne stopnje prezračevanja, ki zagotavljajo  $C_{\text{Rn-s}} < 100 \text{ Bq m}^{-3}$  in  $C_{\text{CO}_2-s} < 1000 \text{ ppm}$  za celotno obdobje analize. V modelu DH je optimalna stopnja prezračevanja jeseni  $1,4 \text{ h}^{-1}$  ( $69,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), pozimi pa  $1,8 \text{ h}^{-1}$  ( $89,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), kar je do okrog 9-krat višja stopnja prezračevanja, kot so vse priporočene in zahtevane vrednosti. Na osnovi rezultatov, ki smo jih dobili za model VS, smo ocenili vpliv prezračevanja na povprečno koncentracijo  $^{222}\text{Rn}$  glede na neprezračeno stanje. V primeru prezračevanja 1–2-krat na dan se koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  zmanjša za približno 25 %, v primeru pogostega prezračevanja (večkrat na dan) pa tudi do 50 %.

Rezultati stacionarne analize modela VS, kjer je aktivna proizvodnja  $^{222}\text{Rn}$  definirana, kot povprečna vrednost analiziranega obdobja, se ujemajo z rezultati nestacionarne analize. V obeh primerih smo dobili optimalno načrtovano stopnjo prezračevanja  $0,7 \text{ h}^{-1}$  ( $48,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ). Če je prezračevalni sistem nastavljen na konstantni pretok, je smiselno in zadostno izvesti preverjanje na osnovi stacionarnih izračunov za oba onesnaževala. V primeru namestitve naprednega prezračevanja, ki je opremljeno s senzorskim sistemom kakovosti zraka, in se DVR spreminja, glede na vhodne podatke in spremenljiv trend onesnaževal, bi za načrtovanje in delovanje sistema predlagali nestacionarno analizo.

V Sloveniji in po svetu se zaradi vedno višjih življenjskih stroškov veliko pozornosti posveča zmanjšanju rabe energije, zanemarja pa se zagotavljanje kakovostnega notranjega okolja, kar postaja pereč problem. Z namenom, da bi dosegli dobro kakovost zraka, moramo stavbe redno in učinkovito prezračevati. Predstavljen pristop analize učinkovitosti prezračevanja je uporaben tudi za stavbe ostalih namembnosti, saj omogoča določitev optimalne stopnje prezračevanja na osnovi vseh vplivnih faktorjev in kazalnikov učinkovitosti prezračevanja.  $\text{CO}_2$  in  $^{222}\text{Rn}$  sta se v raziskavi izkazala za uporabna in zanesljiva kazalnika učinkovitosti prezračevanja, saj imata drugačen izvor (uporabnik, zemljina), oba izkazujeta dnevni in sezonski trend (ki je lahko podoben ali različen) in se zato dopolnjujeta. Upoštevanje medsebojnega vpliva lokacije, zasnove stavbe, specifik uporabnikov (zasedenost, aktivnosti) in spremeljanje trenda spremenjanja onesnaževal, lahko vodi v bolj kakovosten zrak v stavbah.

Rezultati so bili objavljeni v dveh delih:

- (i) članek z naslovom "Analysis of ventilation efficiency as simultaneous control of radon and carbon dioxide levels in indoor air applying transient modelling" v recenzirani znanstveni reviji International Journal of Environmental Research and Public Health in
  - (ii) recenziran objavljeni abstract z naslovom "Transient modelling of carbon dioxide and radon levels in indoor air for analysis of ventilation efficiency" na srečanju International Hybrid Workshop Between the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of the University of Ljubljana and PHIS, the IDEC Institute, Hiroshima University.
1. DOVJAK, Mateja, VENE, Ožbej, VAUPOTIČ, Janja. Analysis of ventilation efficiency as simultaneous control of radon and carbon dioxide levels in indoor air applying transient modelling. International Journal of Environmental Research and Public Health. [Online ed.]. Febr. 2022, vol. 19, iss. 4, art. 2125, [20] f., ilustr. ISSN 1660-4601. <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/4/2125/htm>, <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=135018>, <https://plus.si.cobiss.net/opac7/bib/97826563>, <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=135018>, DOI: [10.3390/ijerph19042125](https://doi.org/10.3390/ijerph19042125). [COBISS.SI-ID 97826563],
  2. VENE, Ožbej, VAUPOTIČ, Janja, DOVJAK, Mateja. Transient modelling of carbon dioxide and radon levels in indoor air for analysis of ventilation efficiency. V: DOVJAK, Mateja (ur.), FUJIYOSHI, So (ur.). Interactions between physical parameters, chemical pollutants, and microbes in the built environment : International Hybrid Workshop Between the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of the University of Ljubljana and PHIS, The IDEC Institute, Hiroshima University: [being] (12th Special Seminar on The IDEC Institute, 5th PHIS Seminar): 9th January 2023: [book of peer-reviewed papers]. Ljubljana: Faculty of Civil and Geodetic Engineering; Hiroshima: PHIS, The IDEC Institute, 2023. Str. [18]. ISBN 978-961-6884-81-5.  
<https://www.dropbox.com/s/3vp34zv2p60ix3f/1stIntWorkshopULPHISBookAbst.pdf?dl=0>.  
[COBISS.SI-ID 150691843]

## VIRI

ANSI/ASHRAE Standard 62.1 – 2010. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. [http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2016/04/ASHRAE-62\\_1-2010.pdf](http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2016/04/ASHRAE-62_1-2010.pdf) (Pridobljeno 07. 06. 2023.)

ARSO METEO. 2022. Arso vreme. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje.  
<https://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet/#webmet=vUHcs9WYkN3LtVGdl92LhBHcvcXZi1WZ09Cc1p2cvAncvd2LyVWYs12L3VWY0hWZy9SaulGdugXbsx3cs9mdl5WahxHf> (Pridobljeno 20. 8. 2022.)

ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.  
<https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashraestandards> (Pridobljeno 13. 12. 2022.)

Baeza, A.; García-Paniagua, J.; Guillén, J.; Montalbán, B. 2018. Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: a case study. Sci. Total Environ. 610–611, 258–266.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.056>.

Bertin Technologies., 2019. AlphaGUARD User Manual. <https://www.laurussystems.com/wpcontent/uploads/USER-MANUAL-ALPHAGUARD-2019.pdf> (Pridobljeno 11. 2. 2023.)

Bezek, M., 2013. Vloga nano aerosolov v dozimetriji radona. Doktorska disertacija. Ljubljana, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana (samozaložba M. Bezek).

Buh, T. 2022. Optimizacija naravnega prezračevanja v enodružinski hiši s povišano koncentracijo radona. Magistrska naloga. Nova Gorica. Univerza v Novi Gorici. Fakulteta za znanosti o okolju.

Colligan, B.; Le Ponner, E.; Mandin, C. 2016. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. J. Environ. Radioact. 165, 124–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.09.013>.

Cucos Dinu, A.; Cosma, C.; Dicu, T.; Begy, R.; Moldovan, M.; Papp, B.; Nită, D.; Burgele, B.; Sainz, C. 2012. Thorough investigations on indoor radon in Băița, a radon-prone area (Romania). Sci. Total Environ. 431, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.013>.

Darby, S.; Hill, D.; Auvinen, A.; Barros-Dios, J. M.; Baysson, H.; Bochicchio, F.; Deo, H.; Falk, R.; Forastiere, F.; Hakama, M.; Heid, I.; Kreienbrock, L.; Kreuzer, M.; Lagarde, F.; Mäkeläinen, I.; Muirhead, C.; Oberaigner, W.; Pershagen, G.; Ruano-Ravina, A.; Ruosteenoja, E.; Schaffrath Rosario, A.; Tirmarche, M.; Tomášek, L.; Whitley, E.; Wichmann, H.E.; Doll, R. 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, British Medical Journal, 330(7485): 223–226.

Dovjak, M.; Kukec, A. 2019. Creating healthy and sustainable buildings : an assessment of health risk factors. Cham: Springer Open, cop. 2019. XVIII, 160 str., ilustr. ISBN 978-3-030-19411-6.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-19412-3>, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-19412-3>, doi: 10.1007/978-3-030-19412-3.

Dovjak, M.; Slobodnik, J.; Krainer, A. 2020. Consequences of energy renovation on indoor air quality in kindergartens. Building simulation, 13: 691–708. ISSN 1996-8744.  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12273-020-0613-6.pdf>, DOI: [10.1007/s12273-020-0613-6](https://doi.org/10.1007/s12273-020-0613-6).

Dovjak, M.; Virant B.; Krainer A.; Šijanec Zavrl M.; Vaupotič J. 2021. Determination of optimal ventilation rates in educational environment in terms of radon dosimetry. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 234: 113742. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113742> (Pridobljeno 2. 4. 2023.)

Dovjak, M.; Vene, O.; Vaupotič, J. 2022. Analysis of Ventilation Efficiency as Simultaneous Control of Radon and Carbon Dioxide Levels in Indoor Air Applying Transient Modelling. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19: 2125. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042125> (Pridobljeno 2. 4. 2023.)

EN 15251: 2007. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. [https://shop.standards.ie/en-ie/standards/en-15251-2007-326401\\_saig\\_cen\\_cen\\_752114/](https://shop.standards.ie/en-ie/standards/en-15251-2007-326401_saig_cen_cen_752114/)

Fojtíková, I.; Rovenská, K.N. 2015. Methodology for measurement in schools and kindergartens: experiences. Radiat. Protect. Dosim. 164 (4), 612–617. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv340>.

Frutos, B.; Olaya, M.; Martín-Consuegra, F.; Alonso, C. 2015. Radon concentration control by ventilation, and energy efficiency improvement.

[https://www.researchgate.net/publication/312603921\\_RADON CONCENTRATION CONTROL\\_BY VENTILATION AND ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT](https://www.researchgate.net/publication/312603921_RADON_CONCENTRATION_CONTROL_BY_VENTILATION_AND_ENERGY EFFICIENCY_IMPROVEMENT)

García-Tobar, J. 2018. A comparative study of indoor radon levels between two similar dwellings using CONTAM Software. Environments, 5: 59.

Halgamuge, M.N.; Chan, T.K.; Mendis, P. 2009. Ventilation efficiency and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration. DOI: [10.2529/PIERS090220144640](https://doi.org/10.2529/PIERS090220144640).

Hu, T.; Yoshire, R. 2013. Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban area at pedestrian level. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167610512002656> (Pridobljeno 19. 04. 2023.)

Hyewon, L.; Woojae, M.; Byeong-Ho, J.; Hong, C.; Byung, W. J.; Ho, K. 2018. Short- and long-term exposure to ambient air pollution and circulating biomarkers of inflammation in non-smokers: A hospital-based cohort study in South Korea.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160412018305166>

ISO (International Organisation for Standardization). EN 16798-1. Energy performance of buildings. Ventilation for buildings. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Module M1-6; ISO: Geneva, Switzerland, 2019.

Jiránek, M.; Kácmáriková, V. 2014. Dealing with the increased radon concentration in thermally retrofitted buildings. Radiat. Protect. Dosim. 160 (1–3), 43–47. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu104>.

Kemija, 2008. Zbirka: Tematski leksikon. Tržič: Učila International: 442 str.

Keskikuru, T.; Kokotti, H.; Lammi, S.; Kalliokoski, P. 2001. Effect of various factors on the rate of radon entry into two different types of houses. Building and Environment, 36: 1091–1098. DOI: [10.1016/S0360-1323\(00\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00077-9).

Kikaj, D.; Chambers, S.D.; Crawford, J.; Kobal, M.; Gregorić, A.; Vaupotič, J. 2023. Investigating the vertical and spatial extent of radon-based classification of the atmospheric mixing state and impacts on seasonal urban air quality, Science of the Total Environment, 872: 162126.

Vene, O. 2023. Analiza učinkovitosti prezračevanja . . . koncentracij ogljikovega dioksida in radona. Mag. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program druge stopnje Gradbeništvo.

---

Kotol, M.; Rode, C.; Clausen, G.; Nielsen, T.R. 2014. Indoor environment in bedrooms in 79 Greenlandic households. *Building and Environment*, 81: 29–36.

Lee H.; Myung W.; Cheong, Hae-Kwan; Yi, Seung-Muk; Hong, Yun-Chul; Cho, Sung-II; Kim, H. 2018. Ambient air pollution exposure and risk of migraine: Synergistic effect with high temperature. *Environment International*, 121: 283–391.

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0160412018312704?token=0A12D91F99CB3D27ADBC2D70B12CDB64D232A69601390AA902F81478960A1441A1AAAFAC7D828370DAAF3484D30DCA0A&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230330152338> (Pridobljeno 30. 3. 2023.)

Muelas, Á.; Remacha, P.; Pina, A.; Tizné, E.; El-Kadmíri, D.; Ruiz, A.; Aranda, D.; Ballester, J. 2022. Analysis of different ventilation strategies and CO<sub>2</sub> distribution in a naturally ventilated classroom. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231022002412>

National Institute of Standards and Technology, 2020. CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1887r1>

Onset. HOBO MX1102 CO<sub>2</sub>/Temp/RH Data Logger. User's Manual. 2017. <https://www.onsetcomp.com/manual/mx1102/> (Pridobljeno 9. 4. 2023.)

Pampuri, 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. *Sustainable Cities and Society*, 42: 100–106.

Persily, A.; de Jonge, L. 2017. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27: 868–879. [Carbon dioxide generation rates for building occupants - Persily - 2017 - Indoor Air - Wiley Online Library](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2796.12610) (Pridobljeno 16. 04. 2023.)

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (Uradni list RS, št. 70/22 in 161/22). <http://www.pisrs.si/Pis.web/preledPredpisa?id=PRAV14331>

Pressyanov, D.; Dimitrov, D.; Dimitrova, I.; 2015. Energy-efficient reconstructions and indoor radon: the impact assessed by CDs/DVDs. *J. Environ. Radioact.* 143, 76–79. <https://doi.org/10.1016/j.jenrad.2015.02.016>.

Sarad, Radon Scout, User Manual, Version 3/2017.

Sarad, Radon Scout Professional, User Manual, Version 19-03-2020.

SIST CR 1752: 1998. Prezračevanje zgradb – Merila za projektiranje notranjega okolja. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/6412/4833deb2f5b34c748ab9a48ade63f630/SIST-CR-1752-1999.pdf>

Tehnična smernica TSG-1-004:2010, Učinkovita raba energije, str. 16–18, 2010. [https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/TSG-1-004\\_2022\\_ure.pdf](https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/TSG-1-004_2022_ure.pdf)

Tollefsen, T.; Gruber, V.; Bossew, P.; De Cort, M. 2011. Status of the European indoor radon map. *Radiation Protection Dosimetry*, 145(2–3): 110–116.

UL RS (Uradni list RS, št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1, 61/17 – GZ in 199/21 – GZ-1). Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb <http://www.pisrs.si/Pis.web/preledPredpisa?id=PRAV4223> (Pridobljeno 16. 04. 2023.)

UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation United Nation, New York.

Vene, O. 2023. Analiza učinkovitosti prezračevanja . . . koncentracij ogljikovega dioksida in radona. Mag. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program druge stopnje Gradbeništvo.

Uredba o nacionalnem radonskem programu (Uradni list RS, št. 18/18, 86/18 in 152/20).  
<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7606>

Vasilyev, A.; Yarmoshenko, I.; Zhukovsky, M. 2017. Radon safety in terms of energy efficiency classification of buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 72: 012020.

Vaupotič, J.; Kobal, I.; M.J., Križman. 2010. Background outdoor radon levels in Slovenia. Nukleonika, 55(4): 579–582.

Vaupotič, J. 2003. Indoor radon in Slovenia. Nuclear Technology & Radiation Protection, 18(2): 36–43.

Wargocki, P. 2013. Productivity and health effects of high indoor air quality. In Reference module in earth systems and environmental sciences.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012409548901993X?via%3Dihub>,  
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01993-X>. (Pridobljeno 23. 8. 2020.)

SZO (Svetovna zdravstvena organizacija). 2009. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. (Zeeb, H., Shannoun, F.) Geneva. 122 str.

Wilkening M. 1990. Studies in Environmental Science 40: Radon in the Environment. 1st edition. Amsterdam, the Netherlands, Elsevier Science Publishers: 137 str.

Wirnsberger, M.; Buttinger, F.; Krause, H. 2019. Technical University of Applied Sciences Rosenheim. Ventilation Efficiency of Push-Pull Ventilation Systems in Residential Buildings – CFD Simulation and Validation of the Model with Measurements, In: A Research Apartment  
[http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019\\_211281.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_211281.pdf) (Pridobljeno 19. 04. 2023.)

Wyon, D.F.; Wargocki, P. 2013. Effects of indoor environment on performance. ASHRAE Journal, 46–50.

[https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA\\_Journal/REHVA\\_Journal\\_2013/RJ\\_issue\\_4/p.6/06-10-RJ1304\\_web.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2013/RJ_issue_4/p.6/06-10-RJ1304_web.pdf) (Pridobljeno 11. 3. 2023.)

Yang, S.; Pernot J.G.; Jörin, C.H.; 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. Atmosphere, 10: 777.

Yang, S., Pernot, J.G., Jörin, C.H., Jörin, C.H., Niculita-Hirzel, H., Perret, V., Licina, D., 2020. Energy, indoor air quality, occupant behavior, self-reported symptoms and satisfaction in energy-efficient dwellings in Switzerland. Build. Environ. 171, 106618.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106618>.

Zmazek, B.; Vaupotič, J. 2007. Coping with a radon problem in a private house. Building and Environment, 42: 3685–3690.