

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



TAJDA BOŽIČ

**ANALIZA VPLIVOV TESNOSTI STAVBNEGA
OVOJA IN NARAVNEGA PREZRAČEVANJA NA
KONCENTRACIJO DELCEV V NOTRANJEM
ZRAKU STAVB**

MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE
STOPNJE STAVBARSTVO**

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

TAJDA BOŽIČ

**ANALIZA VPLIVOV TESNOSTI STAVBNEGA
OVOJA IN NARAVNEGA PREZRAČEVANJA NA
KONCENTRACIJO DELCEV V NOTRANJEM
ZRAKU STAVB**

Magistrsko delo št.:

**ANALYSIS OF THE EFFECTS OF AIRTIGHTNESS
AND NATURAL VENTILATION ON THE
CONCENTRATION OF PARTICLES IN THE
INDOOR AIR**

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

izr.prof.dr. Mateja Dovjak

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

prof.dr. Janja Vaupotič

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Mateji Dovjak in somentorici prof. dr. Janji Vaupotič (Institut "Jožef Stefan") za posvečen čas, nasvete in strokovno pomoč pri izdelavi magistrskega dela.

Meritve smo izvedli v okviru raziskovalnega programa P1-0143 in raziskovalnega projekta J1-1716 (Odsek za znanosti o okolju, Institut "Jožef Stefan") z uporabo raziskovalne opreme 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.

Posebej se zahvaljujem tudi staršema, ki sta vedno verjela vame in me podpirala.

Hvala tudi Vidu, ki me je med pisanjem magistrskega dela vzpodbujal in mi stal ob strani.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	697.9:699.872(043.3)
Avtor:	Tajda Božič, dipl. inž. grad. (UN)
Mentor:	izr. prof. dr. Mateja Dovjak, dipl. san. inž.
Somentor:	prof. dr. Janja Vaupotič
Naslov:	Analiza vplivov tesnosti stavbnega ovoja in naravnega prezračevanja na koncentracijo delcev v notranjem zraku stavb
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	84 str., 26 pregl., 29 sl., 3 en., 88 virov
Ključne besede:	delci, Rn, CO₂, stavbni ovoj, zrakotesnost, infiltracija

Izvleček

V raziskavi obravnavamo vpliv tesnosti stavbnega ovoja na koncentracijo delcev velikosti od 10 do 1000 nm, ki se v stavbo nekontrolirano infiltrirajo iz zunanjega zraka. Na osnovi gradbeno-tehničnih karakteristik smo izbrali dve stavbi, od katerih ima stavba 1 nižjo zrakotesnost ovoja (S1-NT), stavba 2 pa višjo zrakotesnost ovoja (S2-VT). V vsaki stavbi smo v izbranem testnem prostoru kontinuirno merili številčne koncentracije delcev po en teden v neogrevalni in ogrevalni sezoni. V zunanjem zraku je glavni vir delcev v neogrevalni sezoni promet, v ogrevalni sezoni pa promet in kurišča. Ker sta nas v prostoru zanimali predvsem koncentracija različno velikih delcev zunanjega izvora in hitrost njihove infiltracije, smo notranje izvore delcev zmanjšali na minimum (v prostor je vstopala ena oseba le v času odpiranja in zapiranja okna). Pri vseh enotedenskih meritvah v prostoru smo uporabili enoten način odpiranja in zapiranja okna. Pri vrednotenju podatkov smo se osredotočili na obdobja, ko je bilo okno zaprto, in za ta obdobja izračunali številčne koncentracije delcev (C_N je število delcev v cm^{-3}) štirih frakcij (premer v nm: <100 , $100\text{--}200$, $201\text{--}500$, >500). Dodatno smo v prostoru spremljali še koncentracijo radona (C_{Rn}) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2}), ki sta kazalnika učinkovitosti prezračevanja, ter temperaturo (T_{in}). V neposredni bližini testnega prostora smo v zunanjem zraku sočasno spremljali temperaturo (T_{out}), tlak (p), hitrost vetra (v), padavine (P) in C_{Rn} . Po metodi s sledilnim plinom CO₂ smo izračunali zrakotesnost obeh testnih prostorov. Potrdili smo, da ima stavba 1 manj zrakotesen stavbni ovoj ($N_{inf} = 0,40 \text{ h}^{-1}$) kot stavba 2 ($N_{inf} = 0,23 \text{ h}^{-1}$). V obdobjih, ko je bilo okno zaprto, so povprečne številčne koncentracije delcev naslednje: (i) v S1-NT v neogrevalni sezoni $C_{N<100} = 1276 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 957 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 408 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 6 \text{ cm}^{-3}$ in v ogrevalni sezoni $C_{N<100} = 2622 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 1119 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 309 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 11 \text{ cm}^{-3}$; (ii) v S2-VT v neogrevalni sezoni $C_{N<100} = 2060 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 901 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 311 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 5 \text{ cm}^{-3}$ in v ogrevalni sezoni $C_{N<100} = 4054 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 2558 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 643 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 13 \text{ cm}^{-3}$. V stavbi 1 so koncentracije delcev v ogrevalni sezoni višje kot v neogrevalni sezoni le pri določenih frakcijah, medtem ko so v stavbi 2 v ogrevalni sezoni znatno višje kot v neogrevalni v vseh frakcijah. Iz navedenih rezultatov razberemo tudi, da so v ogrevalni sezoni koncentracije delcev višje v stavbi 2 kot v stavbi 1, kar kaže na dobro infiltracijo delcev tudi skozi bolj zrakotesen ovoj, ki ga ima stavba 2. Izračunali smo hitrost infiltracije in ugotovili, da koncentracija delcev <100 nm najhitreje naraste iz minimalne na maksimalno vrednost (S1-NT: $\Delta t = 3,8\text{--}5,4 \text{ h}$; S2-VT: $\Delta t = 7,3\text{--}3,4 \text{ h}$), kar nakazuje na to, da med vsemi frakcijami najhitreje prehajajo skozi ovoj stavbe. Če smo delcem izpostavljeni daljše obdobje, negativno vplivajo na naše zdravje. Glede na to, da ljudje večino svojega časa preživimo v zaprtih prostorih, je poznavanje koncentracij delcev v zunanjem zraku in razumevanje njihovega prehoda iz zunanjega zraka v notranje okolje skozi ovoj stavbe ključnega pomena pri načrtovanju ukrepov za izboljšanje stanja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 697.9:699.872(043.3)
Author: Tajda Božič, B. Sc.
Supervisor: Assoc. Prof. Mateja Dovjak
Co-supervisor: Prof. Janja Vaupotič
Title: Analysis of the effects of airtightness and natural ventilation on the concentration of particles in the indoor air
Document type: Master's Thesis
Notes: 84 p., 26 tab., 29 fig., 3 eq., 2 ann., 88 ref.
Keywords: particles, Rn, CO₂, building envelope, airtightness, infiltration

Abstract

This study analyses the effect of the airtightness of the building envelope on the concentration of aerosol particles between 10 and 1000 nm that uncontrollably infiltrate the building from the ambient air. Two buildings were selected on the basis of their physical characteristics, with Building 1 having lower airtightness (S1-NT) and Building 2 having higher airtightness of the building envelope (S2-VT). In each building, particle number concentrations were measured continuously for one week in the selected test room during the non-heating and heating season. In ambient air, traffic is the primary source of particles in the non-heating season, and traffic and combustion are the primary sources in the heating season. As we were mainly interested in the concentration of differently sized particles of outdoor origin in the room and their infiltration rate, we minimised the indoor sources of particles (one person entered the room only when opening and closing the window). For all one-week measurements in the room, we used the same method of opening and closing the window. For the evaluation of the data, we focused on the periods when the window was closed and calculated particle number concentrations (C_N is the number of particles in cm^{-3}) of the four fractions (diameter in nm: <100, 100–200, 201–500, >500) for these periods. In addition, radon (C_{Rn}) and carbon dioxide (C_{CO_2}) concentrations, which are indicators of ventilation efficiency, and temperature (T_{in}) were monitored in the room. In the immediate vicinity of the test room, temperature (T_{out}), pressure (p), wind speed (v), precipitation (P) and C_{Rn} were monitored simultaneously in the ambient air. The airtightness of the two test rooms was calculated using the CO₂ tracer gas method. We confirmed that Building 1 has a less airtight building envelope ($N_{\text{inf}} = 0.40 \text{ h}^{-1}$) than Building 2 ($N_{\text{inf}} = 0.23 \text{ h}^{-1}$). During periods when the window was closed, the average particle number concentrations are as follows: (i) in S1-NT in the non-heating season $C_{N<100} = 1276 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 957 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 408 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 6 \text{ cm}^{-3}$ and in the heating season $C_{N<100} = 2622 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 1119 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 309 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 11 \text{ cm}^{-3}$; (ii) in S2-VT in the non-heating season $C_{N<100} = 2060 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 901 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 311 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 5 \text{ cm}^{-3}$ and in the heating season $C_{N<100} = 4054 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N101-200} = 2558 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N201-500} = 643 \text{ cm}^{-3}$, $C_{N>500} = 13 \text{ cm}^{-3}$. In Building 1, the particle number concentrations in the heating season are higher than in the non-heating season only for specific fractions, while in Building 2 they are significantly higher in the heating season than in the non-heating season for all fractions. The above results also show us that in the heating season, the particle concentrations are higher in Building 2 than in Building 1, indicating that the particles are well infiltrated also through the more airtight envelope of Building 2. We calculated the infiltration rate and found that the concentration of particles <100 nm increases most rapidly from the minimum to the maximum value (S1-NT: $\Delta t = 3.8\text{--}5.4 \text{ h}$; S2-VT: $\Delta t = 7.3\text{--}3.4 \text{ h}$), indicating that they pass through the building envelope the fastest among all fractions. If exposed to particles for a prolonged period of time, they have a negative impact on our health. Given that people spend most of their time indoors, knowing the concentrations of particles in ambient air and understanding how they move from ambient air to the indoor environment through the building envelope is crucial for planning improvement measures.

KAZALO VSEBINE

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
OKRAJŠAVE/ABBREVIATIONS.....	XI
SIMBOLI/SYMBOLS.....	XII
1 UVOD	1
2 NAMEN IN STRUKTURA	3
3 CILJI IN HIPOTEZE	6
3.1 Raziskovalni cilji	6
3.2 Hipoteze.....	7
4 TEORETIČNI DEL	8
4.1 Prezračevanje stavb	8
4.2 Zrakotesnost stavb in infiltracija oz. eksfiltracija zraka	8
4.2.1 Definicija in vrste infiltracije, eksfiltracije in vplivni faktorji	8
4.2.2 Metode merjenja zrakotesnosti stavbe	10
4.2.3 Zahteve glede zrakotesnosti stavb, oken in vrat v različnih državah	11
4.3 Delci	14
4.3.1 Definicija in razvrstitev delcev	14
4.3.2 Velikost delcev glede na izvor	15
4.3.3 Vstop delcev v stavbe, telo in njihov vpliv na zdravje	15
4.3.4 Mejne vrednosti delcev v zraku	16
4.3.5 Sorodne raziskave delcev	17
4.4 Radon in radonovi produkti.....	21
4.4.1 Definicija in lastnosti radona, njegovih produktov in ravnotežnega faktorja	21
4.4.2 Radon v stavbah in njegov vpliv na zdravje	21
4.4.3 Mejne vrednosti radona v zraku	22
4.5 CO ₂ in Rn kot indikatorja prezračevanja	23
5 EKSPERIMENTALNI DEL	25
5.1 Geografske, geološke in meteorološke značilnosti lokacije	25
5.2 Izbor stavb in prostorov	26
5.2.1 Opis stavbe 1	27
5.2.2 Prikaz kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka	30
5.2.3 Opis stavbe 2	31
5.2.4 Prikaz kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka	33
5.3 Potek meritev	34
5.4 Določanje infiltracije skozi ovoj prostora na osnovi koncentracije CO ₂	35
5.5 Merilna oprema	36
5.5.1 Merilnik SMPS+C	36
5.5.2 Merilnika AlphaGUARD in AlphaPM	37

5.5.3	Merilnik Radon Scout Professional.....	38
5.5.4	Merilnik HOBO MX CO ₂ Logger.....	39
6	REZULTATI ZRAKOTESNOSTI	40
6.1	Zrakotesnost stavbnega ovoja prostora v stavbi 1 (S1-NT).....	40
6.2	Zrakotesnost stavbnega ovoja prostora v stavbi 2 (S2-VT).....	41
7	REZULTATI IZMERJENIH PARAMETROV V NEOGREVALNI SEZONI.....	42
7.1	Odprta in zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)	42
7.2	Zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)	45
7.3	Odprta in zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)	50
7.4	Zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)	52
8	REZULTATI IZMERJENIH PARAMETROV V OGREVALNI SEZONI.....	56
8.1	Odprta in zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)	56
8.2	Zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)	58
8.3	Odprta in zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)	61
8.4	Zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)	63
9	PRIMERJAVA REZULTATOV.....	68
10	DISKUSIJA	73
11	PRIPOROČILA ZA NARAVNO PREZRAČEVANJE, OMEJITVE RAZISKAVE IN NADALJNJE DELO	75
12	ZAKLJUČEK	76
VIRI		78

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz raziskovalnega dela.	5
Slika 2: Infiltracija in eksfiltracija zraka skozi stavbni ovoj zaradi različnih vplivov (RDH Building Engineering Ltd, 2013).	9
Slika 3: Prikaz velikostne razporeditve delcev ($1\mu\text{m} = 1000\text{ nm}$) (Kelley, 2020).	14
Slika 4: Doseg delcev različnih velikosti v telesu (Danel, 2019).	16
Slika 5: Vstop radona v stavbo (Natural Resources Canada, 2008).	22
Slika 6: Lokacija obeh stavb (Google Maps, 2022).	25
Slika 7: Geološka zgradba tal (Geološki zavod Slovenije, 2022).	26
Slika 8: Stavba 1 (S1-NT).	27
Slika 9: Tlorisna skica (levo) in fotografija sobe 1 (desno) v S1-NT.	28
Slika 10: Skica kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka skozi stavbni ovoj sobe 1 v S1-NT.	30
Slika 11: Stavba 2 (S2-VT).	31
Slika 12: Tlorisna skica (levo) in fotografija sobe 2 (desno) v S2-VT.	32
Slika 13: Skica kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka skozi zunanji ovoj sobe 2 v S2-VT.	34
Slika 14: Merilnik SMPS+C 5400.	37
Slika 15: Merilnik AlphaGUARD z merilno enoto AlphaPM.	38
Slika 16: Merilnik Radon Scout Professional.	39
Slika 17: Merilnik HOBO MX CO2 Logger.	39
Slika 18: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms^{-1}), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm^{-3}), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_{N} , cm^{-3}) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v neogrevalni sezoni stavbe 1 (S1-NT).	44
Slika 19: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v neogrevalni sezoni.	46
Slika 20: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v neogrevalni sezoni.	48
Slika 21: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms^{-1}), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm^{-3}), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_{N} , cm^{-3}) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v neogrevalni sezoni stavbe 2 (S2-VT).	51
Slika 22: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v neogrevalni sezoni.	53
Slika 23: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v neogrevalni sezoni.	55

Slika 24: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms ⁻¹), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm ⁻³), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_{N} , cm ⁻³) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v ogrevalni sezoni stavbe 1 (S1-NT).	57
Slika 25: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v ogrevalni sezoni.	58
Slika 26: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v ogrevalni sezoni.	60
Slika 27: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms ⁻¹), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm ⁻³), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_{N} , cm ⁻³) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v ogrevalni sezoni stavbe 2 (S2-VT).	62
Slika 28: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v ogrevalni sezoni.	64
Slika 29: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v ogrevalni sezoni.	66

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava zahtev za zrakotesnost stavb v različnih državah (Limb, 2001; Leprince et al., 2017; TSG-1-004:2010; TSG-1-004:2022; Ricketts et al., 2013).....	11
Preglednica 2: Primerjava kriterijev za zrakotesnost oken in vrat med državami (Limb, 2001; Schittich, 2007; TSG-1-004:2010; TSG-1-004:2022).....	13
Preglednica 3: Velikost delcev različnih izvorov (Morawska et al., 2008; Vu et al., 2015; Wallace et al., 2004; Bolling Kochbach et al., 2009).	15
Preglednica 4: Priporočene in mejne vrednosti PM v zunanjem zraku (WHO, 2021; Evropska direktiva 2008/50/ES; EPA, 2012).	17
Preglednica 5: Dovoljenje in priporočene koncentracije radona v notranjem zraku (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Ur.l. RS, št. 42/02; Uredba o nacionalnem radonskem programu, Uradni list RS, št. 18/18, 86/18 in 152/20; Direktiva sveta 2013/59/Euratom, 2013; WHO, 2010; EPA, 2021).	23
Preglednica 6: Osnovni podatki o stavbi 1 (S1-NT) (TSG-V-006:2022).....	27
Preglednica 7: Osnovni podatki o prostoru (sobi 1) v S1-NT.	28
Preglednica 8: Konstrukcijski sklopi sobe 1, ki mejijo na zunanost v S1-NT.	29
Preglednica 9: Sistemi ogrevanja, hlajenja, prezračevanja v S1-NT.....	29
Preglednica 10: Osnovni podatki o stavbi 2 (S2-VT) (TSG-V-006:2022).....	31
Preglednica 11: Osnovni podatki o prostoru (soba 2) v S2-VT.	32
Preglednica 12: Konstrukcijski sklopi sobe 2, ki mejijo na zunanost v S2-VT.	33
Preglednica 13: Sistemi ogrevanja, hlajenja, prezračevanja v S2-VT.....	33
Preglednica 14: Obdobje izvajanja meritev v S1-NT (soba 1) in S2-VT (soba 2) v neogrevalni in ogrevalni sezoni	34
Preglednica 15: Časovnica odprtih in zaprtih obdobj v sobi v času merjenja.....	35
Preglednica 16: Vhodni podatki ter izračunana N_{inf} in Q_{inf} za prostor (soba 1) v stavbi 1 (S1-NT).....	40
Preglednica 17: Vhodni podatki ter izračunana N_{inf} in Q_{inf} za prostor (soba 2) v stavbi 2 (S2-VT).....	41
Preglednica 18: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).....	47
Preglednica 19: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).....	49
Preglednica 20: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).....	54
Preglednica 21: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).....	55
Preglednica 22: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).....	59

Preglednica 23: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).....	60
Preglednica 24: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).....	65
Preglednica 25: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).....	67
Preglednica 26: Zbirna preglednica karakteristik lokacije in stavbe, ki vplivajo na koncentracijo delcev v zaprtih obdobjih v neogrevalni in ogrevalni sezoni v obeh stavbah.....	72

OKRAJŠAVE/ABBREVIATIONS

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> – Ameriško združenje inženirjev za ogrevanje, hlajenje in klimatizacijo
EEA	<i>European Environment Agency</i> – Evropska agencija za okolje
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> – Ameriška agencija za varstvo okolja
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> – Ogrevanje, prezračevanje in klimatizacija
PM	<i>Particulate matter</i> – Trdni delec
REHVA	<i>Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations</i> – Zveza evropskih združenj za ogrevanje, prezračevanje in klimatizacijo
WHO	<i>World Health Organization</i> – Svetovna zdravstvena organizacija
YLD	<i>Years lived with a disability</i> – Leta življenja z invalidnostjo
YLL	<i>Years of life lost</i> – Izgubljena leta življenja

SIMBOLI/SYMBOLS

CO_2	Ogljikov dioksid
C_{CO_2}	Koncentracija CO_2 [ppm]
C_{in}	Koncentracija CO_2 v notranjem zraku [ppm]
C_{out}	Koncentracija CO_2 v zunanjem zraku [ppm]
C_{Rn}	Koncentracija radona [Bqm^{-3}]
C_{m}	Masna koncentracija delcev [μgm^{-3}]
C_{N}	Številčna koncentracija delcev [cm^{-3}]
d	Premer delca [nm]
d_{GM}	Geometrični srednji premer delcev [nm]
F	Ravnotežni faktor med radonovimi kratkoživimi produkti in radonom [/]
N_{inf}	Število izmenjav zraka z infiltracijo skozi ovoj prostora [h^{-1}]
n_{50}	Stopnja tesnosti stavbe (Število izmenjav zraka pri tlačni razliki 50 Pa) [h^{-1}]
p	Zračni tlak [hPa]
P	Količina padavin [mm]
Q_{inf}	Količina zraka, ki se izmenja z infiltracijo skozi ovoj prostora [m^3h^{-1}]
q_{50}	Stopnja infiltracije pri tlaku 50 Pa [$\text{m}^3(\text{h}.\text{m}^2)^{-1}$]
$\text{Rn}, {}^{222}\text{Rn}$	Radon
RnP	Radonovi kratkoživi produkti
SF_6	Žveplov heksafluorid
t	Čas [h]
T_{in}	Temperatura notranjega zraka [$^{\circ}\text{C}$]
T_{out}	Temperatura zunanjega zraka [$^{\circ}\text{C}$]
v	Hitrost vetra [ms^{-1}]
V_{neto}	Neto volumen prostora [m^3]

1 UVOD

Graditev energetsko učinkovitih stavb je pomemben ukrep za omilitev energetske krize, saj gradbeniški sektor, vključno s stavbami, v svetovnem merilu porabi 36 % končne energije, v Evropi 40 % (EC, 2020). Energetsko učinkovite stavbe so med uporabniki zelo zaželeni, saj imajo v ogrevalni sezoni manjše toplotne izgube, v neogrevalni sezoni pa manjše toplotne dobitke. S tem uporabnikom stavbe zagotavljajo nižje stroške ogrevanja in hlajenja. Poleg tega jim nudijo tudi stabilno toplotno okolje s konstantnimi temperaturami znotraj cone udobja. K energetski učinkovitosti stavb bistveno prispeva visoka zrakotesnost stavbnega ovoja. Stavbni ovoj je sestavljen iz transparentnih (okna, vrata) in netransparentnih (tla, streha, zunanje stene) elementov stavbe, ki mejijo na zunanost. To pomeni, da je stavbni ovoj glavni vmesnik med zunanjim in notranjim okoljem. Ravno zato mora biti zasnovan in izveden tako, da omogoča učinkovito upravljanje in regulacijo energetskih (toplota, svetloba, zvok) in snovnih tokov (voda, onesnaževala) in informacij (Krainer, 1993). Stavbni ovoj in s tem tudi njegova zrakotesnost se med stavbami razlikuje glede na leto izgradnje, uporabljene materiale in tehnologije ter natančnost izvedbe. V preteklosti zahtev glede zrakotesnosti stavb ni bilo, sedaj pa jih v Sloveniji za novogradnje predpisuje Tehnična smernica o učinkoviti rabi energije (TSG-1-004: 2022). Zrakotesnost ovoja predstavlja količino zraka, ki nenadzorovano uhaja skozi različne rege in špranje v konstrukciji. Takšnemu nekontroliranemu prehodu zraka v stavbo pravimo infiltracija, obratnemu procesu pa eksfiltracija. Kritična mesta, kjer najpogosteje prihaja do neželenih špranj, so križanja konstrukcijskih sklopov s stavbnim pohištvo ter preboji zaradi različnih inštalacij.

Z infiltracijo skozi kritična mesta v stavbnem ovojju ter s prezračevanjem skozi okna iz zunanjega v notranji zrak vstopijo tudi onesnaževala. Eno izmed bolj škodljivih onesnaževal so delci. Največji delež delcev v zunanjem zraku nastane pri izgorevanju goriv (bencin, dizel) motornih vozil, obrabi pnevmatik vozil in izgorevanju premoga, kurilnega olja ali biomase za namen obratovanja industrije ali ogrevanja objektov (WHO, 2013). Leta 2020 je bilo 96 % prebivalcev Evropske unije, ki živijo v urbanem okolju, izpostavljeno višji koncentraciji finih delcev ($PM_{2,5}$ – delci s premerom do $2,5 \mu m$), kot jih priporoča Svetovna zdravstvena organizacija (WHO, 2021). Istega leta je izpostavljenost delcem $PM_{2,5}$ v Evropski uniji terjala 238000 prezgodnjih smrti ter 175702 let življenja z invalidnostjo (YLD), natančneje s kronično obstruktivno pljučno boleznijo. V Sloveniji je v letu 2020 izpostavljenost finim delcem $PM_{2,5}$ povzročila 1300 prezgodnjih smrti, na 100000 prebivalcev pa smo izgubili 569 let življenja (YLL) (EEA, 2022). Onesnaženost zraka z delci najbolj vpliva na ranljive skupine, kamor spadajo otroci, nosečnice, kronični bolniki in starejši. Za delce s premerom, manjšim od 200 nm, raziskave navajajo (Agarwal et al., 2021; Abt et al., 2000), da prehajajo iz zunanjega v notranji zrak skozi netesnosti v stavbnem ovojju. To pomeni, da se onesnaženosti notranjega okolja z delci, manjšimi od 200 nm, ne moremo povsem izogniti, saj slednji kljub dobro zasnovanemu stavbnemu ovojju najdejo špranje, skozi katere prodrejo v stavbo. Obravnavani delci so zdravju nevarni, saj zaradi svojega majhnega premera lahko prodrejo v dihalne poti, pljuča, najmanjši med njimi pa celo v krvni obtok. Ob daljši izpostavljenosti lahko povzročijo nastanek pljučnega raka in ostalih respiratornih ter kardiovaskularnih bolezni (WHO, 2013; Gozzi, 2017; Schraufnagel, 2020).

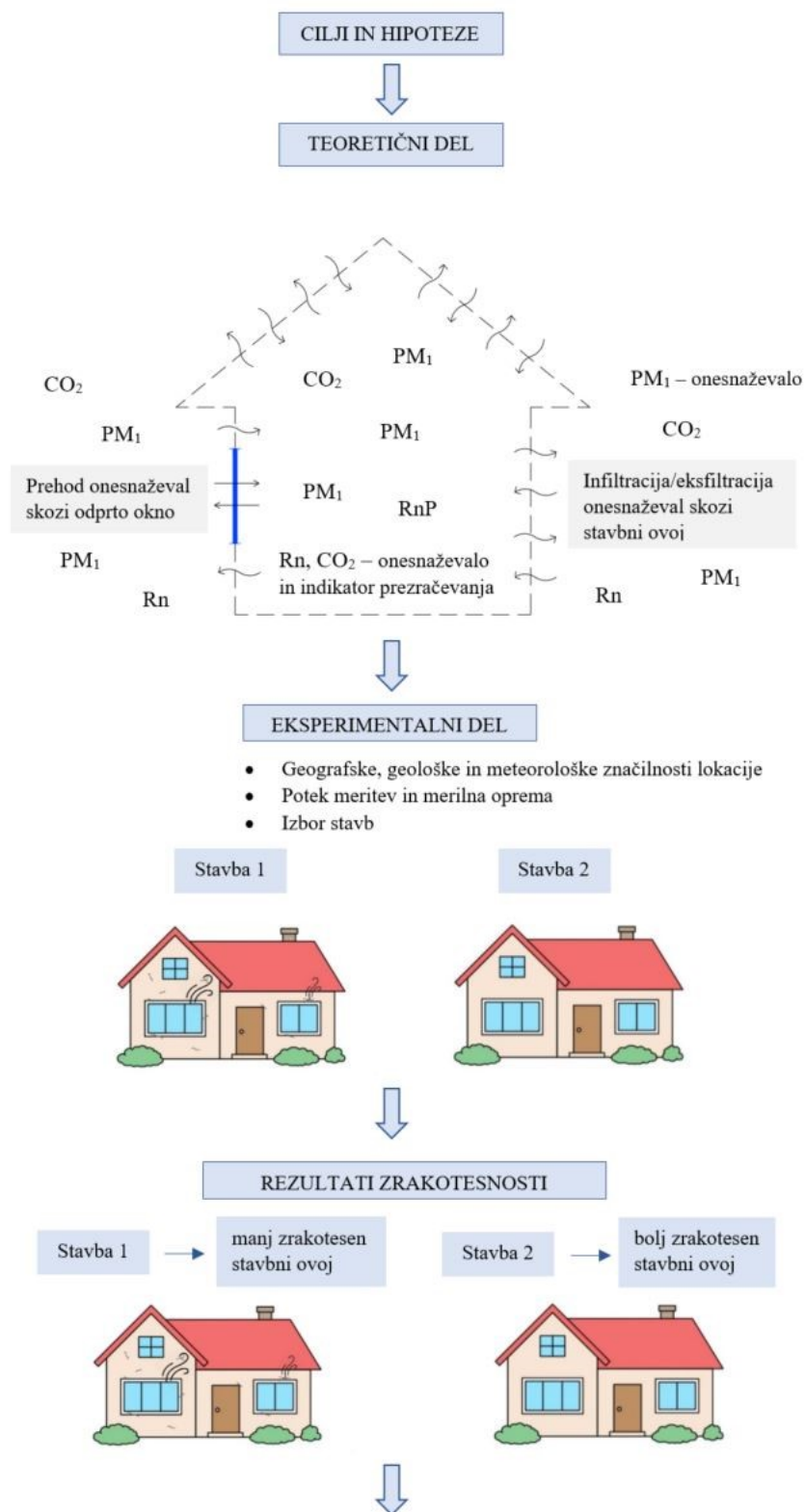
Onesnaževalo, ki prav tako z infiltracijo vstopi v notranje okolje stavbe, je radon (Rn). Zanj je značilno, da iz Zemljine skorje, kjer nastaja, vstopi v stavbo s talnim zrakom skozi netesne dele stavbnega ovoja, ki so v stiku z zemljino. Po drugi strani je izvor onesnaževal lahko tudi znotraj stavb. To so delci z notranjim izvorom in ogljikov dioksid (CO_2). Med delce, ki imajo svoj izvor v notranjem okolju, spadajo delci, ki nastanejo pri vsakdanjih opravilih (kuhanje, pospravljanje itd.) in navadah (kajenje, uporaba čajnih svečk itd.), pa tudi trdni radonovi produkti (RnP), ki nastajajo pri razpadu Rn. Izvor CO_2 v notranjem okolju smo ljudje, saj CO_2 nastaja pri celičnem dihanju in ga izločamo z izdihanim zrakom.

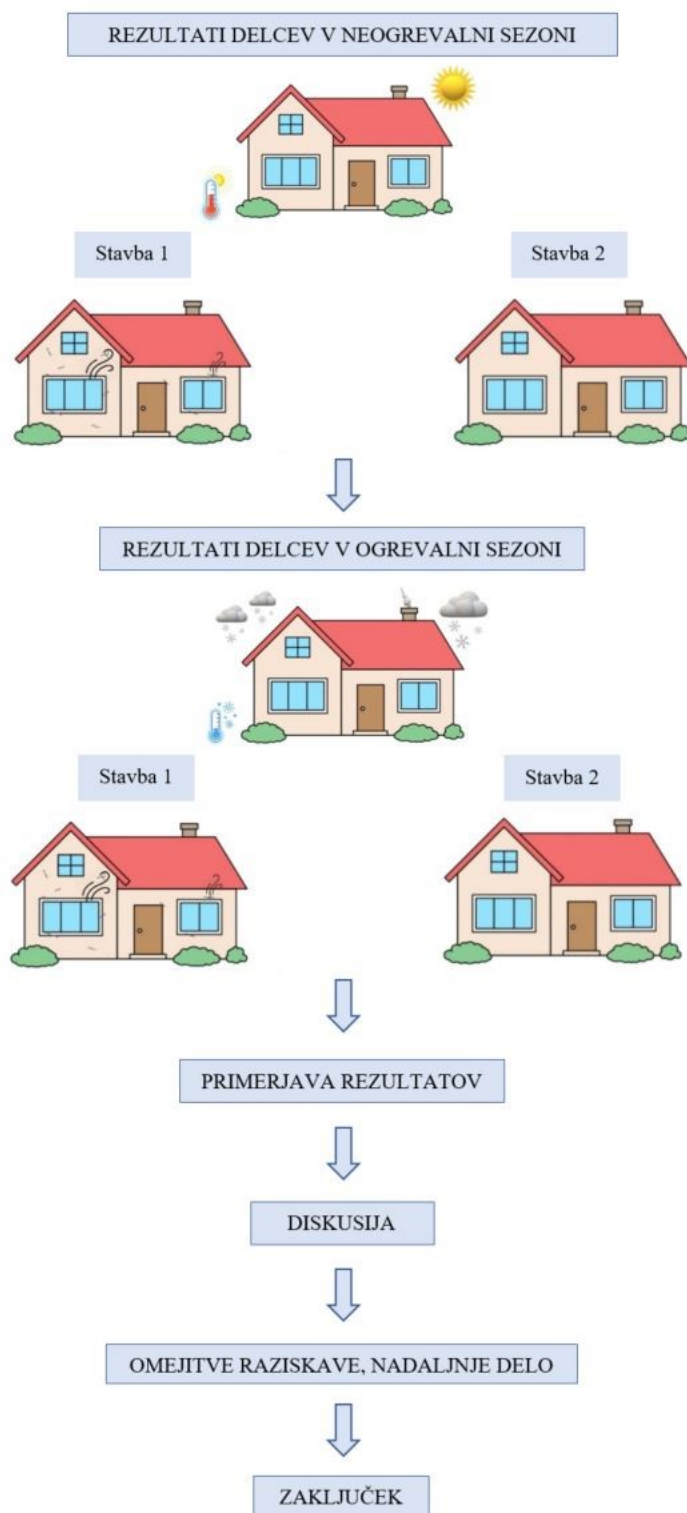
Če prezračevanje prostorov ni zadostno, se Rn, RnP, CO_2 in delci kopičijo v zraku. Rn in CO_2 sta učinkovita indikatorja prezračevanja, saj nam njuna koncentracija v prostoru pove, ali je prostor dovolj prezračen. Glede na svoj izvor in lastnosti lahko v zaprtem prostoru služita kot pokazatelja nekontroliranega prezračevanja (infiltracije). V ta namen smo ju uporabili tudi v naši raziskavi pri analizi vpliva tesnosti stavbnega ovoja na prehod delcev 10–1000 nm iz zunajega zraka v notranjost stavbe. Pri obsežnem pregledu literature o temi prehoda delcev skozi stavbni ovoj nismo našli veliko raziskav. Zaradi slabe raziskanosti tega področja bodo tudi ugotovitve naše raziskave pripomogle k boljšemu razumevanju mehanizma prehoda delcev različnih velikosti skozi ovoj stavbe, predvsem pa pojasnile, kolikšna je pri tem vloga tesnosti stavbnega ovoja.

2 NAMEN IN STRUKTURA

Namen raziskave je določiti, kako v času neogrevalne in ogrevalne sezone infiltracija zunanjega zraka (nekontrolirano prezračevanje) skozi stavbni ovoj vpliva na koncentracijo delcev v notranjem zraku. Predvsem pa nas je zanimalo, kolikšen vpliv ima stopnja zrakotesnosti stavbnega ovoja na koncentracijo delcev v zraku stavb. V ta namen smo izvedli kontinuirne meritve številčne koncentracije delcev (10–1000 nm) v izbranem bivalnem prostoru dveh stavb z različno zrakotesnostjo stavbnega ovoja in enako in vnaprej določeno periodiko kontroliranega naravnega prezračevanja skozi okno. Sočasno smo merili tudi koncentracijo CO₂ in radona (Rn, skupaj s produkti RnP), ki sta nam služila kot indikatorja infiltracije (nekontroliranega prezračevanja). V zunanjem zraku smo merili meteorološke dejavnike (temperatura, tlak, hitrost vetra, padavine), ki imajo ključno vlogo pri infiltraciji zunanjega zraka v stavbo.

Uvodnemu delu sledijo cilji in hipoteze raziskave, nato teoretične osnove, ki zajemajo prezračevanje, infiltracijo, delce ter Rn in CO₂ kot indikatorja prezračevanja. Temu sledi eksperimentalni del, v katerem opišemo geografske, geološke in meteorološke značilnosti lokacije, lastnosti obeh stavb in prostorov, potek meritev, merilno opremo ter postopek določanje infiltracije zraka skozi ovoj prostora na osnovi koncentracije CO₂. Nato sledijo rezultati, ki smo jih zaradi preglednosti razdelili na več poglavij. Najprej razložimo rezultate izračunov zrakotesnosti stavbnega ovoja za obe stavbi, nato pa ovrednotimo rezultate meritev koncentracij delcev v obeh sezonah (neogrevalna, ogrevalna) za obe stavbi. Nato sledi primerjava rezultatov med obema stavbama in med obema sezonama. Sledi diskusija, v kateri rezultate naše raziskave primerjamo z izsledki drugih avtorjev. Predzadnje poglavje zajema omejitve naše raziskave in predloge za nadaljnje delo. V zaključku se posvetimo hipotezam, ki smo jih bodisi potrdili bodisi ovrgli. Potek naše raziskave smo prikazali tudi shematsko na sliki 1.





Slika 1: Shematski prikaz raziskovalnega dela.

3 CILJI IN HIPOTEZE

3.1 Raziskovalni cilji

Zastavljeni cilji naloge so bili:

1. Na lokaciji z enakimi geološkimi in mikroklimatskimi značilnostmi ter kakovostjo zunanega zraka izbrati dve stavbi, ki sta po namembnosti, geometriji in načinu prezračevanja podobni, razlikujeta pa se po zrakotesnosti stavbnega ovoja.
2. V obeh stavbah izbrati po velikosti, etažnosti/legi in načinu prezračevanja podobna prostora, popisati njune gradbeno-tehnične karakteristike in za oba prostora izračunati zrakotesnost stavbnega ovoja po metodi Shi et al. (2019).
3. V izbranem testnem prostoru v vsaki stavbi izvesti enotedenske kontinuirne meritve številčne koncentracije in velikostne porazdelitve delcev velikosti 10–1000 nm, radona (^{222}Rn) in njegovih produktov (RnP) ter ogljikovega dioksida (CO_2), in sicer ob enakem režimu prezračevanja, v času neogrevalne in ogrevalne sezone.
4. Pripraviti takšen režim naravnega prezračevanja, da bo z meritvami možno slediti dnevno dinamiko delcev med delovniki in vikendi; beležiti periodiko prezračevanja (pogostost odpiranja okna in trajanje zračenja).
5. Osredotočiti se na obdobja brez kontroliranega prezračevanja (ki naj bodo praviloma daljša od obdobj kontroliranega zračenja) in analizirati, v kakšni meri delci različnih velikosti (<100 nm, 100–200 nm, 201–500 nm, >500 nm) prehajajo skozi stavbni ovoj (primerjava med bolj in manj zrakotesnim prostorom); med obdobji brez kontroliranega zračenja zmanjšati notranje izvore delcev na minimum, zato stanovalci v prostoru med izvajanjem meritev naj ne bodo prisotni.
6. Za obdobja brez prezračevanja (ko je okno zaprto) ugotoviti, kako hitro prehajajo delci iz zunanega zraka skozi stavbni ovoj v prostor; izračunati časovni zamik med najvišjo zunanjo in najvišjo notranjo številčno koncentracijo in velikostno porazdelitvijo delcev v obeh prostorih, v neogrevalni in ogrevalni sezoni.
7. V času brez kontroliranega prezračevanja ovrednotiti faktor ravnotežja F med koncentracijo RnP in ^{222}Rn v obeh prostorih in primerjati njegovo vrednost in časovni potek; spremljati časovni potek koncentracije CO_2 in meteoroloških parametrov (temperatura T , relativna vlažnost zraka RH in zračni tlak p (v neogrevalni in ogrevalni sezoni) in ovrednotiti njihov vpliv na zrakotesnost stavbnega ovoja.
8. Na osnovi dnevnega spreminjanja številčne koncentracije in velikostne porazdelitve delcev v obeh prostorih v obeh sezonah podati najbolj primeren časovni okvir kontroliranega prezračevanja za vzdrževanje zadovoljivo nizkih koncentracij delcev; s tem pa tudi ostalih onesnaževal, ki imajo glavni izvor v zunanem okolju in podobno dnevno dinamiko.

3.2 Hipoteze

Na podlagi preučene literature smo predpostavili naslednje hipoteze:

1. Stavba z višjo zrakotesnostjo stavbnega ovoja (S2-VT) ima nižjo številčno koncentracijo delcev vseh frakcij (<100 nm, 101–200 nm, 201–500 nm, >500 nm) v notranjem zraku kot stavba z nižjo zrakotesnostjo stavbnega ovoja (S1-NT) ne glede na sezono (neogrevalna, ogrevalna).
2. Številčna koncentracija delcev vseh frakcij (<100 nm, 101–200 nm, 201–500 nm, >500 nm) je tako v zunanem kot tudi v notranjem zraku višja v obeh stavbah v času ogrevalne kot neogrevalne sezone.
3. Stavba z nižjo zrakotesnostjo stavbnega ovoja (S1-NT) ima hitrejšo infiltracijo zunanjega zraka v stavbo, in sicer manjši časovni zamik med zaznavanjem povišane koncentracije delcev vseh frakcij (<100 nm, 101–200 nm, 201–500 nm, >500 nm) iz zunanjega zraka v notranjem zraku kot stavba z višjo zrakotesnostjo stavbnega ovoja (S2-VT) ne glede na sezono.

4 TEORETIČNI DEL

4.1 Prezračevanje stavb

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (U. l. RS, št. 42/02) prezračevanje definira kot »izmenjavo odtočnega zraka z zunanjim zrakom v prostorih in doseganje njegove čistosti ter s tem povezanega ugodja oseb v prostorih.« Deli ga na naravno, mehansko in hibridno prezračevanje, ki jih definira kot:

- »Naravno prezračevanje je prezračevanje, pri katerem se izkoriščajo naravne fizikalne lastnosti zraka pri različnih temperaturah v prostorih in zunaj njih, brez uporabe mehanskih naprav. Naravno prezračevanje poteka skozi odprta okna in zunanja vrata, prezračevalne odprtine in prezračevalne kanale ter čim manj nekontrolirano skozi pripre, zidove itd.
- Mehansko prezračevanje je prezračevanje, pri katerem se zamenjava odtočnega zraka z zunanjim doseže z mehansko napravo.
- Hibridno prezračevanje je prezračevanje, pri katerem se hkrati uporabljata naravno in mehansko prezračevanje.«

Da zagotovimo kakovostno notranje okolje, moramo poskrbeti za toplotno, svetlobno in zvočno udobje ter kakovost zraka. V raziskavi smo se osredotočili na kakovost zraka v prostoru, ki jo določimo na podlagi največjih dopustnih koncentracij onesnaževal v prostoru (delci, Rn, CO₂). »Parametri notranjega okolja morajo biti zagotovljeni v vseh bivalnih conah prostorov pri normalnih vremenskih razmerah, skladno z namembnostjo prostorov ter pri predvidenem številu prisotnih oseb v prostorih. Če v bivalnih conah prostorov niso zagotovljeni parametri notranjega okolja z naravnim prezračevanjem, morajo biti v stavbo vgrajene naprave oziroma napeljava, ki to zagotavljajo.« (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, U. l. RS, št. 42/02). Kakor navaja 31. člen Gradbenega zakona (U. l. RS, št. 1991/21), predpisano kakovost zraka v teh primerih dosežemo s sistemi mehanskega ali hibridnega prezračevanja, ki morajo omogočati učinkovito vračanje toplote zraka (rekuperacijo toplote zraka).

Ločimo tudi kontrolirano in nekontrolirano prezračevanje. Kontrolirano prezračevanje po naših željah reguliramo uporabniki stavbe. Mednje spadajo mehansko in hibridno prezračevanje ter kontrolirano naravno prezračevanje (na primer nočno hlajenje s prezračevanjem) (TSG-1-004:2022). Na nekontrolirano prezračevanje, kot pove že samo ime, nimamo vpliva, je aktivno ves čas. Kot nekontrolirano prezračevanje označujemo infiltracijo oziroma eksfiltracijo zraka skozi stavbni ovoj. Podrobneje je opisana v poglavju 4.2.

4.2 Zrakotesnost stavb in infiltracija oz. eksfiltracija zraka

4.2.1 Definicija in vrste infiltracije, eksfiltracije in vplivni faktorji

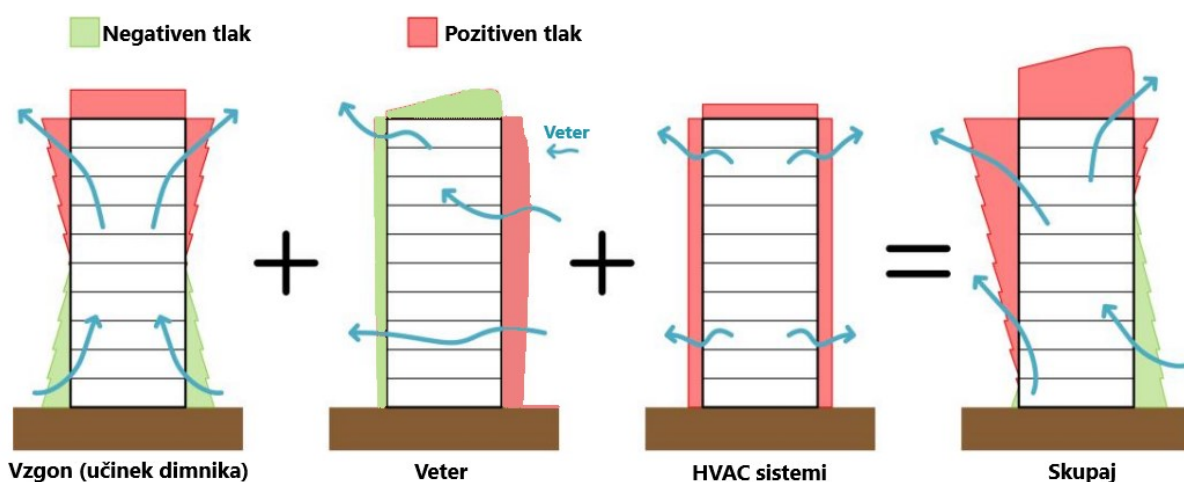
Infiltracija je nekontroliran pritok zunanjega zraka oz. zraka iz neogrevanih prostorov v ogrevane prostore stavbe skozi nenamerne odprtine v stavbnem ovoju. Med kritična mesta, kjer so lahko prisotne nenamerne odprtine, spadajo:

- vsi stiki zunanjih sten s temeljno ploščo, medetažno konstrukcijo in streho,
- stiki zunanje in notranje stene,
- stiki med okenskim okvirjem in podbojem oken,

- stiki med okenskim podbojem in steno,
- stiki med zunanjimi vrati in podbojem vrat,
- stiki med podbojem zunanjih vrat in steno oz. tlemi,
- szpoke v stavbnem ovoju,
- inštalacijski preboji (za vodovod, elektriko, kanalizacijo, plin, IKT priključke, klimo, mehansko prezračevanje) (ASHRAE, 2019).

Eksfiltracija je obraten proces infiltracije, torej nekontrolirano uhajanje zraka iz ogrevanih prostorov stavbe v zunanost oz. v neogrevane prostore skozi nenamerne odprtine v stavbnem ovoju. Do nekontroliranega pretoka zraka v stavbe ali iz njih prihaja zaradi razlik v zračnem tlaku med zunanostjo in notranostjo, ki so posledica:

- vetra,
- vzgona (učinka dimnika) ,
- delovanja sistemov ogrevanja, hlajenja in prezračevalnega sistema – HVAC sistemov (ASHRAE, 2019).



Slika 2: Infiltracija in eksfiltracija zraka skozi stavbni ovoj zaradi različnih vplivov (RDH Building Engineering Ltd, 2013).

Gibanje zunanjega zraka oz. veter ustvari tlak na stavbnem ovoju, kakor je ponazorjeno na sliki 2. Na zunanji steni, v katero je usmerjen veter, se ustvari pozitiven tlak oz. pritisk, na ostalih zunanjih stenah in strehi pa se ustvari negativen tlak oz. podtlak. Z vidika nekontroliranega pretoka zraka v stavbe in iz njih pozitiven tlak vetra pomeni, da v prostoru prihaja do infiltracije zraka, podtlak pa, da v prostoru poteka eksfiltracija zraka. Na vogalih stavbe, kjer veter ob trku s steno pridobi hitrost in zavije stran od stavbe, je podtlak najmočnejši. Nekoliko šibkejši podtlak je prisoten na preostalih delih zunanjih sten in strehe. Seveda sta porazdelitev in intenzivnost tlaka odvisni od smeri in jakosti vetra, gostote zraka pa tudi od lokacije (bližina hribov, morja) in značilnosti terena (prisotnost ovir, ki zmanjšujejo jakost vetra, kot so drevesa in ostale stavbe). Hkrati je tlak vetra na stavbo odvisen tudi od njene oblike in višine (pri visokih stavbah je tlak vetra v višjih nadstropjih večji kot v nižjih) (Younes et al., 2011; Saint-Gobain, 2018; Anis, 2016).

Vzgon oziroma učinek dimnika nastane zaradi razlike v tlaku med tlemi in vrhom stavbe, do katerega pride zaradi različnih gostot zraka, te pa so posledica temperaturnih razlik med zunanjim in notranjim zrakom. V hladnih podnebjih oz. pozimi je zunanji zrak veliko hladnejši od notranjega, topli zrak znotraj stavbe se dviga in povzroči eksfiltracijo zraka pri vrhu stavbe (skozi špranje na podstrešju, strehi). Takšno vzgonsko gibanje zraka povzroči negativen tlak pri tleh oz. v nižjih nadstropjih stavbe in posledično infiltracijo hladnega zunanjega zraka vanjo. V vsaki stavbi na določeni višini pride do izenačitve notranjega tlaka z zunanjim, tam je tlak nevtralen. Nižje kot so zunanje temperature, večja je temperaturna razlika med zunanjim in notranjim zrakom in večji je tudi vzgon. V toplih podnebjih oz. poleti pa v klimatiziranih stavbah prihaja do obratnega procesa – vzgon povzroči infiltracijo zraka pri vrhu stavbe (negativen tlak) in eksfiltracijo pri tleh stavbe (pozitiven tlak). Ker pa poleti temperaturne razlike med notranjim in zunanjim zrakom niso tako velike kot pozimi, tudi obratni učinek dimnika ni tako močan. Vzgon je odvisen tudi od višine stavbe – višja kot je stavba pri določeni gostoti zraka, večji bo vzgon. Zato prevladuje predvsem pri visokih stavbah, pojavi pa se tudi v stopniščih in dimnikih (Younes et al., 2011; Anis, 2016; Miller, 2019).

HVAC sistemi s svojim delovanjem navadno povzročajo pozitiven tlak v stavbi, s čimer je tlak v stavbi večji od zunanjega tlaka, ki pritiska na stavbo. To pomeni, da delovanje HVAC sistemov povzroča eksfiltracijo zraka skozi stavbni ovoj. Infiltracija zraka v stavbo je tako minimalna, posledično pa tudi prehod onesnaževal in zunanjega zraka v stavbo po tej poti (Anis, 2016).

4.2.2 Metode merjenja zrakotesnosti stavbe

Zrakotesnost stavb se preverja s tako imenovanim Blower door testom na način, ki ga predpisuje standard SIST EN ISO 9972. Izvesti ga je potrebno dvakrat – enkrat v času gradnje, da odkrijemo morebitna netesna mesta in jih nato ustrezno zatesnimo, ter ob zaključku gradnje, ko se stavbi izda tudi certifikat zrakotesnosti. Alternativa Blower door testa je Pulse metoda, ki je zaradi preproste in hitre izvedbe primerna predvsem za stavbe, v katerih ljudje že bivajo (Zheng et al., 2020).

Eden izmed načinov določanja zrakotesnosti je tudi metoda s sledilnim plinom (ang. *Tracer gas* metoda). Najpogosteje se uporabi plin žveplov heksafluorid (SF_6), saj se ga lahko zazna že pri zelo majhnih koncentracijah, kljub temu pa se uporabljajo tudi drugi plini, kot so helij, metan, etan, dušikov dioksid in ogljikov dioksid, slednji je tudi najcenejša izbira. Ne glede na izbrani plin le-ta ne sme biti strupen, eksploziven, vnetljiv in ne sme imeti močnega vonja.

Določevanje zrakotesnosti s pomočjo sledilnega plina lahko izvedemo s tremi različnimi tehnikami:

- Konstantno vpihovanje plina,
- Konstantna koncentracija plina,
- Nižanje koncentracije plina.

Zaradi svoje preprostosti je najbolj razširjena tehnika z nižanjem koncentracije plina, slednjo smo pri določevanju zrakotesnosti uporabili tudi mi, in sicer s sledilnim plinom CO_2 . Tako postopek meritve kot izračun smo podrobneje predstavili v poglavju 5.4. Pri uporabi metode s sledilnim plinom se predpostavi, da je infiltracija oz. eksfiltracija zraka med merjenjem konstantna. Prav tako je rezultat merjenja odvisen od vremenskih pogojev (zunanja temperatura, tlak, veter) – če se meritev za isto stavbo ponovi pri drugačnih zunanjih pogojih, je tudi rezultat zrakotesnosti drugačen (Labat et al., 2013; Gyasi, 2021).

4.2.3 Zahteve glede zrakotesnosti stavb, oken in vrat v različnih državah

V preglednici 1 so prikazane priporočene vrednosti za tesnost stavbnega ovoja v posamezni državi Evropske unije, Švici in Združenem kraljestvu. V Sloveniji zrakotesnost obravnava Tehnična smernica o učinkoviti rabi energije (prej TSG-1-004:2010, sedaj TSG-1-004:2022).

Preglednica 1: Primerjava zahtev za zrakotesnost stavb v različnih državah (Limb, 2001; Leprince et al., 2017; TSG-1-004:2010; TSG-1-004:2022; Ricketts et al., 2013).

Država	Zrakotesnost celotne stavbe
Avstrija	$n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z naravnim prezračevanjem $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem
Belgija	Priporočene vrednosti: $n_{50} < 3 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem $n_{50} < 1 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z rekuperacijo
Češka	$n_{50} \leq 4,5 \text{ h}^{-1}$ za stavbe brez mehanskega prezračevanja $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem $n_{50} \leq 1 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem in rekuperacijo $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ za pasivne stavbe z mehanskim prezračevanjem in rekuperacijo
Francija	$n_{50} \leq 2,58 \text{ h}^{-1}$ za enodružinske hiše ($0,6 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ pri tlaku 4 Pa) $n_{50} \leq 4,3 \text{ h}^{-1}$ za večstanovanjske stavbe ($1 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ pri tlaku 4 Pa)
Irska	$q_{50} \leq 7 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$
Latvija	Priporočene vrednosti: $q_{50} \leq 3 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ za stavbe brez mehanskega prezračevanja $q_{50} \leq 2 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem $q_{50} \leq 1,5 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem in rekuperacijo
Nemčija	Stavbe $< 1500 \text{ m}^3$: $n_{50} < 3 \text{ h}^{-1}$ za stavbe brez mehanskega prezračevanja $n_{50} < 1,5 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem Stavbe $> 1500 \text{ m}^3$: $q_{50} < 4,5 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ za stavbe brez mehanskega prezračevanja $q_{50} < 2,5 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem
Nizozemska	$n_{50} \leq 4-6 \text{ h}^{-1}$ za stanovanjske stavbe brez mehanskega prezračevanja $n_{50} \leq 2-3 \text{ h}^{-1}$ za stanovanjske stavbe z mehanskim prezračevanjem
Norveška	$n_{50} \leq 4 \text{ h}^{-1}$ za enodružinske hiše ali vrstne hiše $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ za ostale stavbe, ki imajo največ 2 nadstropji $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ za ostale stavbe, ki imajo več kot 2 nadstropji
Poljska	Priporočene vrednosti: $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ za stavbe brez mehanskega prezračevanja $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem
Slovenija	Po Tehnični smernici TSG-1-004:2010 je veljalo: Maksimalne vrednosti za stavbe, kjer se izvede meritev zrakotesnosti po standardu SIST EN 13829: $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ za nove stavbe brez mehanskega prezračevanja $n_{50} \leq 2 \text{ h}^{-1}$ za nove stavbe z mehanskim prezračevanjem, ki ima vaj 0,7-kratno izmenjavo zraka

	Če meritev nimamo, veljajo naslednje mejne vrednosti za posamezen razred zrakotesnosti: Razred 1: $n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$ za stavbe brez mehanskega prezračevanja $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem Razred 2: $n_{50} \leq 4 \text{ h}^{-1}$ Razred 3: $n_{50} \leq 6 \text{ h}^{-1}$ Razred 4: $n_{50} \leq 10 \text{ h}^{-1}$ Po novi Tehnični smernici TSG-1-004:2022 velja: - »Tesnost toplotnega ovoja energetsko manj zahtevne in energetsko zahtevne nove ali rekonstruirane stavbe se preveri eksperimentalno z metodo povišanega in znižanega tlaka v stavbi skladno s standardom SIST ISO 9972. Stopnja izmenjav zraka n_{50} (na enoto prostornine) in w_{50} (na enoto uporabne kondicionirane površine) se določi z upoštevanjem notranje prostornine stavbe ali cone prezračevanja.« - »Energijska učinkovitost energetsko manj zahtevne in energetsko zahtevne stavbe je dosežena, če stopnja izmenjav zraka n_{50}: - Ni večja od $1,5 \text{ h}^{-1}$ za stavbe z mehanskim prezračevanjem za nove oziroma ni večja od 2 h^{-1} za rekonstruirane stavbe; za energetsko zahtevne stavbe se lahko preveri za tipične energetske cone. - Če je obstoječa stavba prezračevana naravno in je n_{50} manjša od 3 h^{-1}, mora biti v tehničnem poročilu opisano, kako se kontrolirano zagotavlja minimalna stopnja izmenjav zraka v času zasedenosti stavbe.«
Švica	$n_{50} \leq 2,2 \text{ h}^{-1}$ za novogradnje ($0,5 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ pri tlaku 4 Pa) $n_{50} \leq 4,2 \text{ h}^{-1}$ za prenovljene stavbe ($1 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ pri tlaku 4 Pa)
Združeno	$q_{50} \leq 8 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ za stanovanjske stavbe z naravnim prezračevanjem
Kraljestvo	$q_{50} \leq 4 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ za stanovanjske stavbe z mehanskim prezračevanjem

Nekatere izmed držav v svojih standardih vključujejo tudi kriterije zrakotesnosti, ki jih morajo izpolnjevati proizvajalci oken in vrat, prikazani so v preglednici 2. Slovenija svojih posebnih zahtev nima in v Tehnični smernici o učinkoviti rabi energije (tako v stari verziji TSG-1-004:2010 kot tudi v novi TSG-1-004:2022) navaja, da se je glede zrakotesnosti oken in vrat potrebno držati slovenskega prevoda evropskega standarda SIST EN 12207. Na Danskem, v Nemčiji, Sloveniji, Švici in Združenem kraljestvu so kriteriji zrakotesnosti oken oz. vrat vezani na dolžino oboda okna [$\text{m}^3(\text{h} \cdot \text{m})^{-1}$], na Finskem in v Franciji pa na površino okna oz. vrat [$\text{m}^3(\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$], zaradi česar direktna primerjava med njimi ni mogoča. Nekatere izmed držav so, kakor je razvidno iz preglednice 2, okna razdelile v tri kategorije oz. razrede zrakotesnosti. V državah s hladnejšim podnebjem in v stavbah, ki imajo mehansko prezračevanje, so kriteriji zrakotesnosti oken nekoliko strožji kot v državah z bolj blagim podnebjem oz. v stavbah z naravnim prezračevanjem (Limb, 2001).

Preglednica 2: Primerjava kriterijev za zrakotesnost oken in vrat med državami (Limb, 2001; Schittich, 2007; TSG-1-004:2010; TSG-1-004:2022).

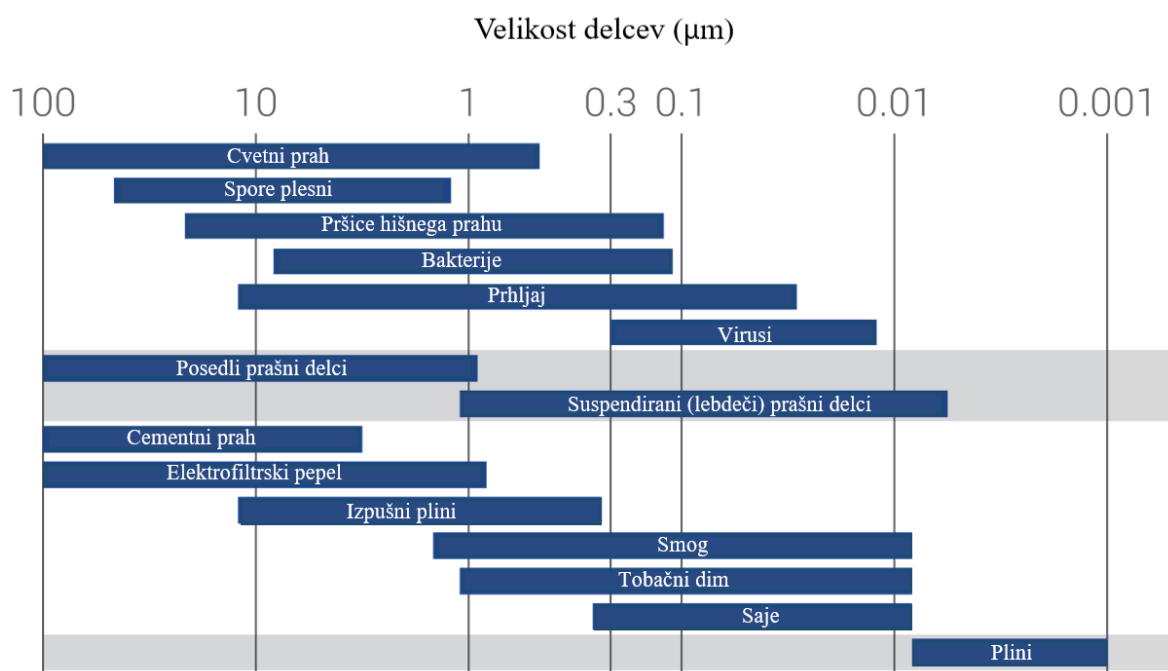
Država	Zrakotesnost oken	Zrakotesnost vrat
Danska	/	$0,18 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda vrat pri tlaku 50 Pa
Finska	Pri tlaku 50 Pa in površini okna: Razred 1: $< 0,5 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$ Razred 2: $0,5\text{--}2,5 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$ Razred 3: $> 2,5 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$	/
Francija	Pri tlaku 100 Pa in površini okna: Razred A1: $20\text{--}60 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$ Razred A2: $7\text{--}20 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$ Razred A3: $< 7 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$	Standardizirane vrednosti pri tlaku 50 Pa: Razred A1: $13\text{--}38 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$ Razred A2: $5\text{--}13 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$ Razred A3: $< 5 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$
Nemčija	$1\text{--}20 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda okna pri tlačni razliki 10 do 1000 Pa	/
Italija	$1,4\text{--}4 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda okna in tlaku 50 Pa $4,8\text{--}31 \text{ m}^3(\text{h.m}^2)^{-1}$ površine okna in tlaku 50 Pa	/
Slovenija	Po Tehnični smernici TSG-1-004:2010 je veljalo: »Vsaj razred 2 po SIST EN 12207: $6,75 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda oken ali vrat pri tlaku 100 Pa – za okna in balkonska vrata, ki so vgrajena v eno- ali dvoetažne stavbe, in za vhodna vrata, ki so vgrajena v prvem ali drugem nadstropju.« »Vsaj razred 3 po SIST EN 12207: $2,25 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda oken oz. vrat pri tlaku 100 Pa – za okna in balkonska vrata, ki so vgrajena v tri- ali večnadstropne stavbe, in za vhodna vrata, ki so vgrajena v tretjem ali višjem nadstropju.« Po novi Tehnični smernici TSG-1-004:2022 velja: Tesnost oken in vrat mora biti skladna s standardom SIST EN 12207: - »V energetske nezahtevnih stavbah je smiselna vgradnja oken in vrat z 2. kategorijo prepustnosti zraka na pripirah. - V energetske manj zahtevnih stavbah z višino do vključno P+5 etaž je smiselna vgradnja oken in vrat s 3. kategorijo prepustnosti zraka na pripirah. - V drugih stavbah je smiselna vgradnja oken in vrat s 4. kategorijo, razen če je površina oken in vrat v ovoju stavbe manjša od $1/7$ uporabne površine stavbe ali cone. V tem primeru je smiselna vgradnja oken in vrat s 3. kategorijo prepustnosti zraka na pripirah.«	
Švica	$5,65 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda okna in tlaku 150 Pa $8,95 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda okna in tlaku 300 Pa $14,25 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda okna in tlaku 600 Pa	/
Združeno kraljestvo	$1,22\text{--}6,2 \text{ m}^3(\text{h.m})^{-1}$ oboda okna in tlaku 50 Pa	/

4.3 Delci

4.3.1 Definicija in razvrstitev delcev

Aerosolni delci (v nadaljevanju delci) so skupek trdnih in tekočih delcev, ki potujejo po zraku. Angleški izraz zanje je *particulate matter*, iz česar izhaja njegova okrajšava PM. Delce med seboj razlikujemo glede na velikost, način nastanka (primarni, sekundarni delci) ter glede na izvor (naravni in antropogeni delci) (WHO, 2013).

Najpogostejša razvrstitev delcev je glede na njihovo velikost. Določimo jo tako, da izmerimo premer delca, ki lahko varira od nekaj nanometrov (nm) do nekaj mikrometrov (μm). Velikostna razvrstitev delcev je hkrati tudi najpomembnejša, saj nam pomaga pri določevanju njihovih fizikalnih in kemijskih lastnosti, transporta in nastanka. Nekateri pogosti delci in njihova velikost v μm so prikazani na sliki 3. Velikost delcev navadno označimo z oznako PM_X , ki zajema delce, katerih največji premer je velikosti $X \mu\text{m}$. Delce s premerom, manjšim od $10 \mu\text{m}$, imenujemo grobi delci (PM_{10}), tiste s premerom do $2,5 \mu\text{m}$ fini delci ($\text{PM}_{2,5}$), delce s premerom, manjšim od $0,1 \mu\text{m}$ oz. 100 nm , pa ultrafini delci ($\text{PM}_{0,1}$) (Vallius, 2005). V raziskovalni nalogi smo se osredotočili na delce premera $10\text{--}1000 \text{ nm}$.



Slika 3: Prikaz velikostne razporeditve delcev ($1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$) (Kelley, 2020).

Glede na nastanek delce razdelimo na primarne in sekundarne. Primarni se izločajo v zrak neposredno iz vira, sekundarni pa so rezultat kemijskih reakcij v atmosferi, pri katerih nastanejo hlapne snovi, te pa nato kondenzirajo v tekoče in trdne delce. Tipični primeri nastanka sekundarnih delcev so oksidacija SO_2 v žeplovo in NO_x v dušikove kisline, ki jih nato nevtralizira amonijak ter oksidacija lahkih organskih spojin (VOC), pri kateri se tvorijo sekundarni organski aerosoli (SOA). Med sekundarne delce tako spadajo amonijev sulfat, sadra, nitrati (Gozzi et al., 2017).

Primarni delci so lahko naravnega izvora ali pa so produkt človekovih dejavnosti, ki jih označimo kot antropogene izvore.

- Naravni izvori so: morski aerosoli, cvetni prah, dim, ki nastane pri gozdnih požarih, vulkanski pepel, puščavski prah, odnašanje zemljine z vetrom.
- Antropogeni izvori so: izpušni plini motornih vozil, obraba avtomobilskih zavor in gum, izgorevanje fosilnih goriv (premog, lignit, kurilno olje), izpusti elektrarn in industrijskih obratov (proizvodnja cementa, keramike, opek, taljenje in varjenje kovin), rudarjenje, sežiganje odpadkov, kmetijstvo, kuhanje (WHO, 2013).

4.3.2 Velikost delcev glede na izvor

V preglednici 3 so navedeni velikostni razredi delcev, ki so prisotni v okolju, v katerem izvajamo našo raziskavo. Velikost delcev, ki se nahajajo v emisijah dizelskih in bencinskih vozil, je povzeta po raziskavi Morawska et al. (2008). Velikost delcev, ki nastanejo pri obrabi pnevmatik vozil, je zajelo poročilo Vu et al. (2015). Slednje, tako kot Wallace et al. (2004), poroča tudi o velikosti delcev pri kuhanju na plinskem štedilniku. Kolikšni delci nastanejo pri ogrevanju z različnimi viri, navaja Bolling Kochbach et al. (2009).

Preglednica 3: Velikost delcev različnih izvorov (Morawska et al., 2008; Vu et al., 2015; Wallace et al., 2004; Bolling Kochbach et al., 2009).

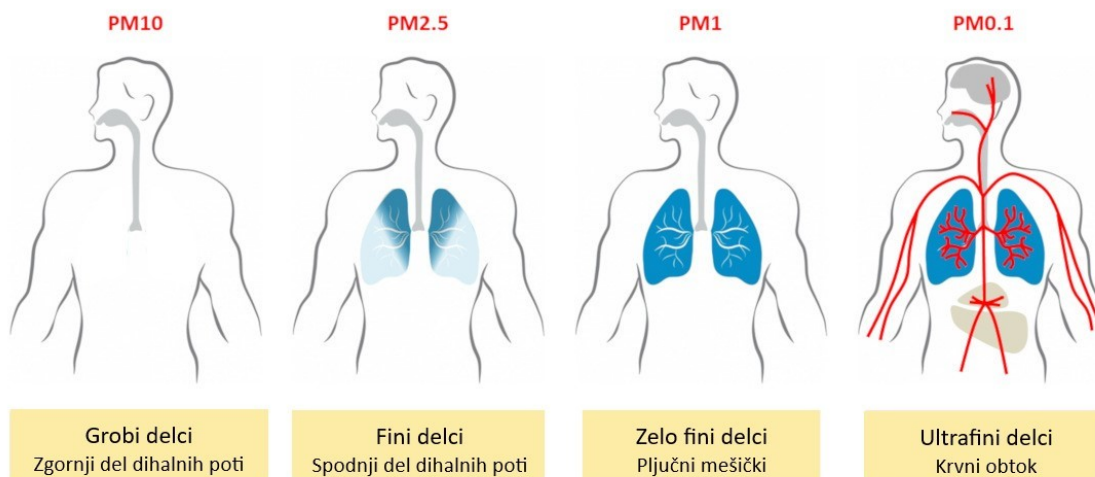
Vir delcev	Premier delcev
Emisije vozil – bencin	20–130 nm
Emisije vozil – dizel	20–60 nm
Obraba pnevmatik vozil	15–50 nm
Kuhanje – plinski štedilnik, pečica	Predvsem 10–100 nm (lahko tudi do 1000 nm)
Ogrevanje – peč na drva, pelete, sekance	50–125 nm
Ogrevanje – kamin, štedilnik na drva	50–600 nm

Celokupno koncentracijo večjih delcev ($PM_{2,5}$ in PM_{10}) največkrat merimo in podamo v obliki masne koncentracije. Masna koncentracija delcev C_m je skupna masa delcev v enoti prostornine zraka [$\mu g m^{-3}$]. Za manjše delce (PM_1), ki imajo veliko razmerje površine glede na maso, pa je primernejše merjenje njihovega celokupnega števila in velikostne porazdelitve. Številčna koncentracija delcev C_N je število delcev v enoti prostornine zraka [cm^{-3}]. Številčne koncentracije delcev običajno podajamo za dva velikostna razreda delcev, in sicer za fine delce PM_1 in ultrafine delce $PM_{0,1}$.

4.3.3 Vstop delcev v stavbe, telo in njihov vpliv na zdravje

Onesnaženost zraka predstavlja velik zdravstveni in okoljski problem. Njen indikator so ravno delci, saj jim je izpostavljen večji delež populacije kot ostalim onesnaževalcem zraka. Delci iz zunanjega okolja lahko vstopijo v stavbo na več načinov, in sicer z mehanskim prezračevanjem, naravnim prezračevanjem (z odpiranjem oken, vrat) in infiltracijo (poglavje 4.1). Ne glede na to, ali se nahajamo v zunanjem ali notranjem okolju, delci v telo vstopijo z dihanjem (skozi nosno in/ali ustno votlino). Tisti s premerom $10 \mu m$ (PM_{10}) prodrejo le v zgornji del dihalnih poti (nosna votlina, žrelo, grlo in zgornji del sapnika), delci $PM_{2,5}$ prodrejo tudi v spodnji del dihalnih poti (spodnji del sapnika in pljuča), delci s premerom

1 μm (PM_{10}) dosežejo pljučne mešičke, ultrafini delci s premerom do 100 nm ($\text{PM}_{0.1}$) pa se iz pljučnih mešičkov prenesejo v krvni obtok in dosežejo tudi ostale organe, kot so vranica, jetra, srce, centralni živčni sistem in kosti, lahko tudi možgane. Doseg delcev posameznih velikosti je prikazan na sliki 4 (WHO, 2021; Schraufnagel, 2020).



Slika 4: Doseg delcev različnih velikosti v telesu (Danel, 2019).

Vpliv delcev na zdravje ljudi je odvisen od njihove velikosti in kemijske sestave, koncentracije v ozračju, časa izpostavljenosti, prav tako pa tudi od občutljivosti in individualnih lastnosti posameznika (npr. alergije, obstoječe bolezni, kajenje). Izpostavljenost delcem povzroča respiratorne bolezni, kardiovaskularne in rakave bolezni, predvsem raka pljuč, povezana je tudi z diabetesom, negativno pa vpliva tudi na centralni živčni sistem. Še posebej občutljiva skupina so starejši, ljudje s pridruženimi boleznimi, nosečnice in otroci. Izpostavljenost nosečnic delcem poveča tveganje za nizko težo novorojenčka, pri otrocih pa upad pljučnih funkcij (WHO, 2013; Gozzi et al., 2017; Schraufnagel, 2020).

Kratkotrajna izpostavljenost delcem dokazano negativno vpliva na respiratorno zdravje (npr. napadi astme), medtem ko so kronične bolezni in smrtnost povezani z dolgotrajnejšo izpostavljenostjo delcem. Kelly et al. (2012) navajajo raziskave, ki so pokazale korelacijo med izpostavljenostjo finim delcem ($\text{PM}_{2.5}$) ter povešanim številom hospitalizacij in smrti zaradi respiratornih in kardiovaskularnih bolezni. WHO ocenjuje, da je z izpostavljenostjo delcem vsako leto povezanih približno 3% vseh bolezni srca in pljuč ter 5% smrti zaradi pljučnega raka (WHO, 2013; Schraufnagel, 2020).

4.3.4 Meje vrednosti delcev v zraku

Kljub temu da že majhna koncentracija delcev lahko povzroči resne zdravstvene težave, do sedaj še ni bilo ugotovljeno, katera je zgornja meja koncentracije delcev, pod katero ni škodljivega vpliva na zdravje (WHO, 2021). Stremimo torej k temu, da dosežemo čim nižje koncentracije delcev v zraku. Skladno s tem vodilom WHO navaja priporočene vrednosti masne koncentracije delcev PM_{10} in $\text{PM}_{2.5}$ v zunanjem zraku, Evropska unija pa z Direktivo 2008/50/ES določa mejne vrednosti, ki so v veljavi tudi v Sloveniji. Tako priporočene mejne vrednosti WHO kot tudi določene mejne vrednosti Evropske direktive so navedene v preglednici 4, razlika med njimi pa je precejšnja. Vrednosti delcev v zunanjem zraku, ki jih priporoča WHO, so namreč tudi do 4-krat nižje od mejnih vrednosti, ki jih dovoljuje

Evropska direktiva. V preglednici 4 so prikazane tudi mejne masne koncentracije PM_{10} in $PM_{2,5}$, ki jih za notranji zrak predpisuje Ameriška agencija za varstvo okolja (EPA).

Dopustno masno koncentracijo delcev PM_{10} v notranjem zraku v Sloveniji predpisuje Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (U. l. RS, št. 42/02) in znaša $100 \mu g m^{-3}$. V omenjenem pravilniku so v PM_{10} zajeti vsi delci, manjši od $10 \mu m$, torej tudi fini in ultrafini delci (PM_1 in $PM_{0,1}$), ki jih obravnavamo v raziskavi, vendar pa posebnega predpisa, ki bi bil veljal samo zanje, zaenkrat še ni. WHO navaja, da za priporočene mejne vrednosti v notranjem zraku lahko upoštevamo iste vrednosti, kot veljajo za zunanji zrak in so navedene v preglednici 4 (WHO, 2010).

Preglednica 4: Priporočene in mejne vrednosti PM v zunanjem zraku (WHO, 2021; Evropska direktiva 2008/50/ES; EPA, 2012).

		Evropska direktiva 2008/50/ES (mejne vrednosti za zunanji zrak)	EPA (mejne vrednosti za notranji zrak)	WHO (priporočene vrednosti za zunanji in notranji zrak)
PM_{10}	Letno povprečje	$40 \mu g m^{-3}$	/	$15 \mu g m^{-3}$
	Dnevno povprečje	$50 \mu g m^{-3}$ – ne sme biti prekoračeno več kot 35-krat v koledarskem letu	$150 \mu g m^{-3}$	$45 \mu g m^{-3}$
$PM_{2,5}$	Letno povprečje	$20 \mu g m^{-3}$	$12 \mu g m^{-3}$	$5 \mu g m^{-3}$
	Dnevno povprečje	/	$35 \mu g m^{-3}$	$15 \mu g m^{-3}$

4.3.5 Sorodne raziskave delcev

V tem poglavju predstavljamo rezultate in ugotovitve sorodnih raziskav o koncentraciji delcev v zunanjem in notranjem zraku. Navedeni članki, tako kot naša raziskava, obravnavajo delce s premerom do 100 ali do 1000 nm ($PM_{0,1}$ in PM_1), nekateri pa poleg teh vključujejo tudi večje delce ($PM_{2,5}$ in PM_{10}).

Abt et al. (2000) so v raziskavi preučevali, kako zunanja koncentracija delcev vpliva na koncentracijo delcev v notranjem zraku. Meritve delcev velikosti 20 nm– $10 \mu m$ so leta 1996 izvajali v 4 stanovanjskih stavbah v mestu Boston (stavba 1: 30. 3.–4. 4. in 13.–18. 6.; stavba 2: 10.–16. 4. in 15.–21. 5.; stavba 3: 29. 5.–4. 6.; stavba 4: 6.–11. 6.). Razmerje med notranjo in zunanjo koncentracijo delcev (pri čemer ni bilo prisotnih notranjih izvorov delcev) za delce velikosti 20–100 nm znaša v povprečju 0,80, za delce velikosti 100–200 nm pa 0,94. To pomeni, da skoraj vsi delci <200 nm preidejo iz zunanosti skozi ovoj v notranjost stavbe.

Young et al. (2004) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev premera 10–430 nm v zunanjem zraku. Meritve so izvajali med 20. in 30. 7. 2002 v mestu Detroit v ZDA. Ugotovili so, da je do povišane koncentracije delcev prišlo v času jutranje prometne konice zaradi izgorevanj fosilnih goriv in nato zopet

okrog poldneva zaradi tvorbe sekundarnih delcev, ko je sončno sevanje, s tem pa tudi fotokemične reakcije, največje. Okrog poldneva je številčna koncentracija delcev znašala 73000 cm^{-3} , kar je za faktor 3,5 več kot v času jutranje prometne konice, ko je znašala 20000 cm^{-3} . Pred jutranjo prometno konico je bila koncentracija delcev okrog 14000 cm^{-3} . Koncentracijo delcev v zraku so znižale padavine, saj so v času močnega deževja zabeležili 5-krat nižjo koncentracijo delcev kot sicer, in sicer je padla iz 39000 cm^{-3} na 7300 cm^{-3} .

Zhang et al. (2016) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev premera 15–661 nm v zunanjem zraku. Meritve so izvajali med junijem 2012 in majem 2014 v mestu Wuhan na Kitajskem. Ugotovili so, da padavine pripomorejo k nižji koncentraciji delcev, prav tako tudi višje temperature zraka. V času monsunskega obdobja (maj–september) je na mesec padlo med 150 in 300 mm padavin, koncentracija delcev je takrat znašala $5000\text{--}20000\text{ cm}^{-3}$. V suhem delu leta, ko padavin skoraj ni bilo, so zabeležili število delcev $30000\text{--}70000\text{ cm}^{-3}$. Veter je v nekaterih primerih znižal koncentracijo delcev v ozračju, v drugih pa jo je zvišal, saj je prinesel delce od drugod.

Nam et al. (2010) so v raziskavi merili masno koncentracijo delcev $\text{PM}_{2,5}$ (delci s premerom do $2,5\text{ }\mu\text{m}$) v zunanjem zraku, ki nastanejo zaradi izpušnih plinov motornih vozil. Meritve so izvajali poleti in pozimi v letih 2004 in 2005, vključenih je bilo 496 vozil v Kansas Cityju v ZDA. Ugotovili so, da je koncentracija delcev pri nižjih temperaturah ozračja eksponentno narasla. Poleti, ko so temperature ozračja višje, so zabeležili masno koncentracijo $0,065\text{ g/km}$, pozimi, ko so temperature ozračja nižje, pa $0,087\text{ g/km}$.

Hernandez et al. (2017) so v raziskavi merili masne koncentracije delcev PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ in PM_{10} v zunanjem zraku. Meritve so izvajali osem tednov, in sicer med julijem in septembrom 2016, na kampusu Unitec Mount Albert v mestu Auckland na Novi Zelandiji. Rezultati so pokazali porast koncentracije delcev v času jutranje (7.00–9.00) prometne konice iz $3,0$ na $5,0\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$, v času popoldanske (17.00–19.00) pa iz $2,5\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$ na $10,0\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$. Porast so opazili tudi od 19.00 do 23.00, in sicer iz popoldanskih $10,0\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$ na $23,0\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$, kar pripisujejo povečani kurjavi v večernih urah. Prav tako so ugotovili, da je temperatura obratno sorazmerna s koncentracijo delcev; v času višje zunanje temperature se koncentracija delcev zniža. Med 12.00 in 15.00 ima zunanji zrak temperaturo $13\text{--}18\text{ }^{\circ}\text{C}$, koncentracija delcev takrat znaša $2,5\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$, ponoči med 00.00 in 03.00 je temperatura zraka $5\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}$, koncentracija delcev pa med $4,0$ in $5,0\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$. Koncentracija delcev se zniža tudi takrat, ko so prisotne padavine, iz $5\text{--}10\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$ naraste na $22\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$.

Wallis et al. (2019) so v raziskavi merili masno koncentracijo delcev PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ in PM_{10} v dveh naravno prezračevanih eksperimentalnih stavbah z različno zrakotesnostjo. Stavbi sta imeli leseno nosilno konstrukcijo in sta bili zgrajeni za namen raziskave, v njiju so simulirali tudi prisotnost uporabnikov. Nahajali sta se v kampusu Unitec Mount Albert v mestu Auckland na Novi Zelandiji. Masna koncentracija delcev PM_1 v stavbi z nižjo zrakotesnostjo stavbnega ovoja je ob simulirani prisotnosti uporabnikov znašala $43,8\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$, v stavbi z višjo zrakotesnostjo stavbnega ovoja pa $36,9\text{ }\mu\text{gm}^{-3}$. Ugotovili so, da je bila koncentracija delcev za 15 % večja v stavbi z manj zrakotesnim stavbnim ovojem.

Hussein et al. (2004) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev premera 7–600 nm v zunanjem in notranjem zraku. Meritve so izvajali med 15. majem in 30. junijem 2000 v zunanjem in notranjem okolju kletne pisarne v Helsinkih na Finskem. Velik vpliv na koncentracijo delcev je imel veter, ki je delce bodisi odnesel iz ozračja bodisi jih prinesel od drugod. Prav tako je na koncentracijo delcev vplival promet, saj je bila koncentracija delcev ob prometnih konicah (med 6.00 in 9.00 ter med 15.00 in 18.00) višja. Takrat je znašala zunaj do 20000 cm⁻³ in znotraj do 8000 cm⁻³, sicer pa zunaj do 15000 cm⁻³ in znotraj do 5000 cm⁻³. Prostor je bil mehansko prezračevan, zato je koncentracija delcev znotraj narasla skoraj skočasno z zunanjo. Hkrati to dokazuje, da delci s premerom do 600 nm prehajajo v stavbo tudi skozi mehanske sisteme prezračevanja.

Zauli-Sajani et al. (2018) so v raziskavi merili masno koncentracijo delcev PM_{2,5} in številno koncentracijo delcev premera 5,6–560 nm. Koncentracijo delcev so merili poleti (2.–17. 7. 2014) in pozimi (4.–18. 12. 2014) tako v notranjem kot tudi v zunanjem zraku v mestu Modena v Italiji. V zunanjem zraku so poleti zabeležili nižjo koncentracijo finih delcev (PM_{0,1}) kot pozimi. Poleti je znašala 5889 cm⁻³, pozimi 9313 cm⁻³. Za koncentracijo delcev v notranjem zraku je veljalo ravno obratno; koncentracija delcev PM_{0,1} je bila poleti višja in je znašala 5753 cm⁻³, pozimi je bila nižja in je znašala 5439 cm⁻³. Na podlagi omenjenih rezultatov so ugotovili, da je infiltracija delcev poleti višja kot pozimi, faktor infiltracije poleti znaša 0,98, pozimi pa 0,58.

Klejnowski et al. (2013) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev premera 28 nm–10 µm v zunanjem zraku. Meritve so izvajali od januarja do oktobra 2010 v mestu Zabrze na Poljskem. Rezultati meritev so pokazali, da ima 99 % vseh delcev v zraku premer ≤ 1 µm (PM₁). Ugotovili so tudi, da je koncentracija vseh delcev v zunanjem zraku pozimi za faktor 1,78 višja kot poleti. Pozimi je znašala 8797 cm⁻³, poleti pa 4946 cm⁻³. Porast je bil najvišji pri delcih premera 617 nm–2,41 µm, koncentracija slednjih je bila pozimi za faktor 3,18–4,29 višja kot poleti. Najmanjši porast je bil viden pri delcih premera 28–56 nm, njihova koncentracija je bila pozimi za faktor 1,2–1,5 višja kot poleti. Porast delcev so tako poleti kot pozimi zaznali v času jutranje in popoldanske prometne konice. Poleti so delci narasli še zgodaj popoldne (12.00–14.00) zaradi povečanega tvorjenja sekundarnih delcev v času visokega sončnega sevanja, pozimi pa zgodaj zvečer (18.00–23.00) zaradi kurjave.

Hussein et al. (2019) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev PM₁ ter masno koncentracijo delcev PM₁₀ v zunanjem zraku v mestu Amman v Jordaniji. Meritve so izvajali med 1. 8. 2016 in 31. 7. 2017. Rezultati so pokazali, da je 93 % vseh delcev PM₁ imelo premer <100 nm. Ugotovili so, da je številčna koncentracija delcev PM₁ višja pozimi kot poleti. Med decembrom in februarjem je koncentracija delcev znašala 33000–37000 cm⁻³, med junijem in septembrom pa 12000–16000 cm⁻³. Prav tako so ugotovili, da močnejši kot je bil veter, nižja je bila koncentracija delcev PM₁. Povprečna koncentracija PM₁ je bila okrog 28000 cm⁻³, pri vetru hitrosti 5,5 ms⁻¹ pa je padla pod 12000 cm⁻³. Najvišja koncentracija PM₁ je bila pri T < 10 °C (okrog 30000 cm⁻³), najnižja pa pri zmernih temperaturah 15 < T < 25 °C (okrog 15000 cm⁻³). Pri T > 25 °C je koncentracija delcev PM₁ zopet narasla.

Shi et al. (2007) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev s premerom 5,6–560 nm v zunanjem zraku. Meritve so izvajali od 18. do 27. 2. ter od 1. do 10. 3. 2005 v mestu Beijing na Kitajskem. Rezultati meritev so pokazali, da večja kot je bila hitrost vetra, nižja je bila koncentracija delcev. Pri hitrosti vetra do 1,0 ms⁻¹ je koncentracija delcev znašala 58600 cm⁻³, pri hitrosti vetra nad 3,0 ms⁻¹ je koncentracija

delcev znašala 39200 cm^{-3} . Na številčno koncentracijo delcev je vplivala tudi smer vetra. Najvišja (54600 cm^{-3}) je bila takrat, ko je veter pihal z jugovzhoda. Prav tako so ugotovili, da je bila številčna koncentracija delcev v zraku večja ob oblačnih (67900 cm^{-3}) kot jasnih (49100 cm^{-3}) dnevih.

Talbot et al. (2017) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev s premerom 14,7–724 nm. Meritve so izvajali poleti (16. 8.–8. 9. 2014) in pozimi (5.–24. 2. 2015) v zunanjem in notranjem zraku nenaseljenega stanovanja v kraju Suchdol na Češkem pri različnih režimih naravnega prezračevanja. Rezultati so pokazali padec koncentracije delcev med 00.00 in 3.00 tako v zunanjem kot tudi v notranjem zraku, saj takrat skoraj ni bilo prometa, prav tako večina stavb ponoči izklopi kurjavo. Zunanja koncentracija delcev je takrat znašala $4000\text{--}7000 \text{ cm}^{-3}$, notranja pa $3500\text{--}4200 \text{ cm}^{-3}$. Ugotovili so, da so poleti delci porasli (9700 cm^{-3}) v popoldanskih urah med 12.00 in 15.00, saj so se takrat formirali sekundarni delci (visoko sončno sevanje). Pozimi v večernih urah (18.00–23.00) pa je koncentracija delcev tako v zunanjem (9000 cm^{-3}) kot tudi notranjem zraku (5500 cm^{-3}) narastla zaradi ogrevanja. Naraščanje koncentracije delcev v zunanjem (10800 cm^{-3}) in notranjem (4200 cm^{-3}) zraku med 21.00 in 00.00 čez poletje pripisujejo nižjim temperaturam. Višjo koncentracijo delcev tako poleti kot tudi pozimi so zaznali v času jutranje prometne konice, in sicer med 6.00 in 10.00 uro. V zunanjem zraku je koncentracija delcev takrat narasla do 6000 cm^{-3} , v notranjem zraku pa do 5000 cm^{-3} . Bistvene razlike med številčno koncentracijo delcev poleti in pozimi niso opazili. Ugotovili so tudi, da višja hitrost vetra lahko vpliva tudi na večjo stopnjo infiltracije zraka v stavbo.

Hussein et al. (2005) so v raziskavi merili številčno koncentracijo delcev 3–400 nm v zunanjem in notranjem zraku. Meritve so izvajali med 1. in 22. 2. 2000 v naravno prezračevani družinski hiši v kraju Espoo na Finskem. Stanovalci so v hiši bivali do vključno 17. 2. in raziskovalcem poročali o svojih dnevnih aktivnostih. Preostale dni meritev je bila hiša prazna. Hiša je bila nova, zato so predvidevali, da ima njen stavbni ovoj visoko tesnost, kot možna mesta infiltracije zraka pa so izpostavili špranje ob okenskih okvirjih. V času, ko ni bilo prisotnih notranjih virov, so delci v notranjem zraku izvirali iz zunanosti. V tem času so ugotovili, da časovni zamik med najvišjo zunanjo in najvišjo notranjo koncentracijo delcev znaša med 10 in 45 minut. Najvišje zunanje koncentracije so bile dosežene ob 8.00, 17.00 ter 19.30. Ob 8.00 in 17.00 je bila koncentracija delcev v zunanjem zraku 12000 cm^{-3} , v notranjem zraku pa 2500 cm^{-3} . Ob 19.30 je bila v zunanjem zraku koncentracija delcev 14000 cm^{-3} , v notranjem zraku pa 3000 cm^{-3} . Ugotovili so, da aktivnosti v času bivanja, kot so hoja, igranje otrok in vsakodnevna hišna opravila, povišajo koncentracijo delcev v stavbi (5000 cm^{-3}).

Z analizo dosedanjih raziskav smo želeli poudariti, da o prehodu delcev skozi stavbni ovoj do sedaj še ni bilo izvedenih veliko raziskav. Še posebej ne takšnih, ki bi obravnavale vpliv tesnosti stavbnega ovoja na koncentracijo delcev v notranjem zraku. Večina raziskav obravnava nihanje koncentracije delcev v zunanjem zraku. Tiste, ki poročajo o koncentracijah delcev v notranjem zraku, pa večinoma merijo prisotnost notranjih virov. Le raziskava Wallis et al. (2019) primerja koncentracijo delcev v dveh stavbah z različno tesnim stavbnim ovojem, medtem ko Abt et al. (2000) analizira kolikšen delež delcev iz zunanjega preide v notranji zrak. Hussein et al. (2005) pa je tisti, ki je obravnaval časovni zamik med najvišjo zunanjo in najvišjo notranjo koncentracijo delcev. Omenjene raziskave so tudi najbližje naši raziskavi. Glede na to, da nismo zasledili več podobnih znanstvenih raziskav, lahko trdimo, da ta tematika še ni dovolj dobro raziskana. Rezultati naše raziskave bodo zato nedvomno prispevali k boljšemu poznavanju in razumevanju tega področja.

4.4 Radon in radonovi produkti

4.4.1 Definicija in lastnosti radona, njegovih produktov in ravnotežnega faktorja

Radon je naraven radioaktiven žlahtni plin brez vonja, barve in okusa. Nastane pri α -radioaktivni preobrazbi radija (Ra) v radioaktivnih nizih urana (^{238}U), torija (^{232}Th) in aktinija (^{235}U), ki se nahajajo v kamninah in zemljinah. Med izotopi radona (Rn) so najpomembnejši trije, in sicer ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (toron) ter ^{219}Rn (aktinon). ^{222}Rn ima najdaljši razpolovni čas ($t_{1/2}=3,82$ dni) in je prisoten v okolju v višjih koncentracijah kot ostala dva izotopa, ki jima zato ne posvečamo toliko pozornosti. Ko govorimo o radonu (Rn), imamo običajno v mislih izotop ^{222}Rn , ki ga obravnavamo tudi v naši raziskavi. ^{222}Rn iz tal prehaja v zrak, kjer pri njegovi α -radioaktivni preobrazbi nastanejo radonovi kratkoživi produkti (RnP): ^{218}Po (polonij), ^{214}Pb (svinec), ^{214}Bi (bizmut) in ^{214}Po (polonij). V zraku se lahko vežejo na aerosolne delce, ki jih imenujemo vezani RnP (10–800 nm), ali pa ostanejo nevezani RnP (0,5–5 nm). Koncentracijo aktivnosti (krajše koncentracijo) radona in njegovih kratkoživih produktov podamo v enoti Bqm^{-3} (Keith et al., 2012; Bezek, 2013).

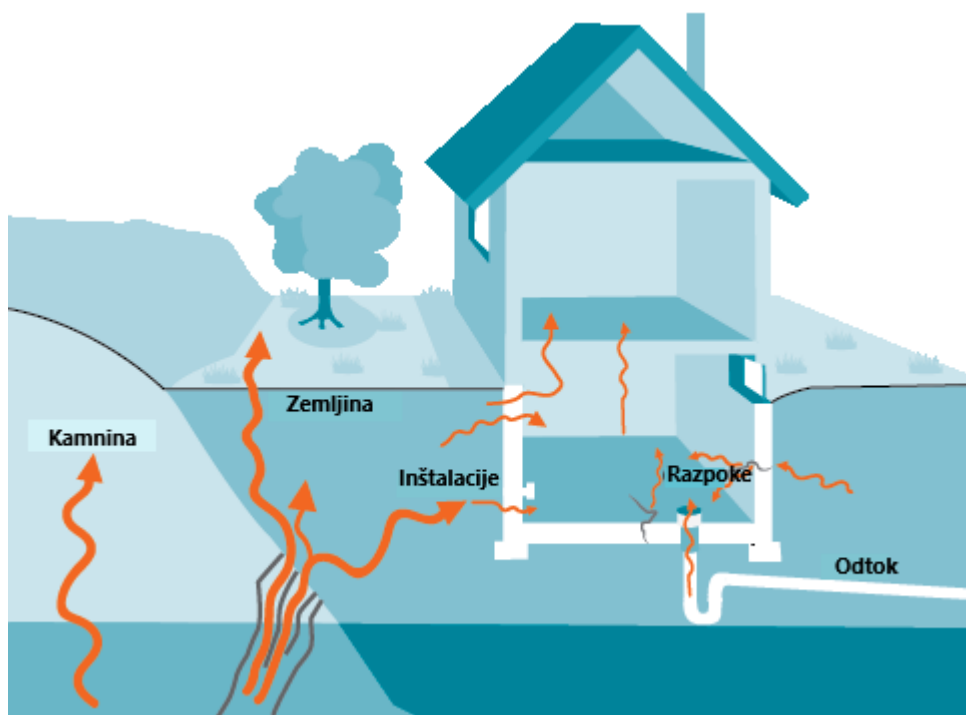
Ravnotežni faktor F podaja stopnjo radioaktivnega ravnotežja med plinom radonom (^{222}Rn , Rn) in njegovimi kratkoživimi produkti (RnP), ki so trdni kovinski delci. V domovih je F v povprečju okrog 0,4, običajno se giblje v območju od 0,3 do 0,6. Bolj kot je prostor prezračen, nižji je F , manj kot je prostor prezračen, višji je F . Zaradi vezave RnP na aerosolne delce in njihovega posedanja se popolno radioaktivno ravnotežje med Rn in RnP nikoli ne vzpostavi (Nazaroff, 1988; Bezek, 2013).

4.4.2 Radon v stavbah in njegov vpliv na zdravje

Radon iz Zemljine skorje prehaja v stavbe s talnim zrakom skozi netesne dele stavbnega ovoja, ki so v stiku z Zemljino (tla na/pod terenom, kletna stena). Ta vključuje razpoke v talni plošči, stike med talno ploščo in stenami, preboje oz. špranje okoli cevi ali kablov itd., kar prikazuje slika 5. Do vstopa prihaja zaradi razlike v tlaku med zunanjim in notranjim zrakom. Zaradi vstopa iz tal so koncentracije radona najvišje v kletnih prostorih, znatne koncentracije pa ponekod lahko najdemo tudi v višjih nadstropjih, kamor se radon razširi iz kleti. Če je v gradbenih materialih povišana vsebnost radija, se radon sprošča v prostor tudi iz gradbenega materiala, kot npr. iz opeke ali betona, v katerem je prisoten elektrofilitrski pepel.

Koncentracija radona v stavbah je torej odvisna od:

- geološke sestave ter strukture tal (vsebnost urana v kamninah in zemljinah ter prepustnost in poroznost tal),
- hidrometeoroloških parametrov (veter, temperatura zraka, padavine, zračni tlak),
- gradbenih materialov stavbe, zrakotesnosti stavbe in prezračevalnih navad njenih uporabnikov (Bezek, 2013; WHO, 2023).



Slika 5: Vstop radona v stavbo (Natural Resources Canada, 2008).

Epidemiološke raziskave kažejo, da prisotnost radona (^{222}Rn) v zraku domov poveča tveganje, da zbolimo za pljučnim rakom. Z vdihavanjem zraka se radonovi kratkoživi produkti (RnP) odložijo na stene dihalnih poti, pri svojih nadaljnjih radioaktivnih preobrazbah, pri katerih se sprošča energija, pa lahko poškodujejo DNK in s tem pa pripomorejo k nastanku rakavega tkiva v pljučih. WHO (2009) ocenjuje, da je izpostavljenost radonu povzročitelj 3–14 % vseh rakavih obolenj na pljučih, odvisno od koncentracije radona. Kar 25-krat večjo verjetnost, da ob izpostavljenosti radonu zbolijo za rakom pljuč, imajo kadilci. Pri nekadilcih je radon glavni povzročitelj pljučnega raka, večina zbolijo že zaradi izpostavljenosti nizkim in srednje visokim koncentracijam radona, kakršnim smo navadno izpostavljeni v domovih ali na delovnem mestu. Verjetnost, da posameznik zbolijo za rakom pljuč, je premosorazmerna s koncentracijo radona in se za vsakih 100 Bqm^{-3} poveča za približno 16 %. Poleg pljuč lahko nizke doze, ki jih prejmemo zaradi izpostavljenosti radonu, zaznamo tudi na koži, v kostnem mozgu in ledvicah. Vendar pa nobena izmed dosedanjih raziskav ni pokazala, da bi radon, razen pljučnega, povzročal še katero drugo vrsto raka (WHO, 2009).

4.4.3 Meje vrednosti radona v zraku

Referenčno raven povprečne letne koncentracije radona (^{222}Rn) v zaprtih prostorih navaja Direktiva Sveta Evropske unije 2013/59/Euratom, države članice pa nacionalne referenčne nivoje lahko določijo same. V Sloveniji referenčno raven povprečne letne koncentracije radona, pod katero ukrepi za njegovo zmanjševanje niso potrebni, navaja Uredba o nacionalnem radonskem programu, Uradni list RS, št. 18/18, 86/18 in 152/20. Dopuslno koncentracijo radona v notranjem zraku pri nas navaja tudi Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02), kakor je razvidno iz preglednice 5; v prostorih dovoljuje višjo koncentracijo kot Uredba o nacionalnem radonskem programu, Uradni list RS, št. 18/18, 86/18 in 152/20. Priporočila glede koncentracije radona v zaprtih prostorih navajata WHO

(2010) in EPA (2021). Slednja priporoča 2-krat nižjo koncentracijo radona, WHO pa 3-krat nižjo koncentracijo radona, kot jo navaja Direktiva sveta Evropske unije 2013/59/Euratom. Vse omenjene dopustne in priporočene koncentracije radona v notranjem zraku so navedene v preglednici 5.

Preglednica 5: Dovoljenje in priporočene koncentracije radona v notranjem zraku (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Ur.l. RS, št. 42/02; Uredba o nacionalnem radonskem programu, Uradni list RS, št. 18/18, 86/18 in 152/20; Direktiva sveta 2013/59/Euratom, 2013; WHO, 2010; EPA, 2021).

Publikacija/institucija	Dovoljenje in priporočene koncentracije radona (^{222}Rn) v notranjem zraku
Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (dopustna vrednost)	400 Bqm $^{-3}$
Uredba o nacionalnem radonskem programu (referenčna raven povprečne letne koncentracije radona v zaprtih prostorih)	300 Bqm $^{-3}$
Direktiva sveta 2013/59/Euratom o določitvi temeljnih varnostnih standardov za varstvo pred nevarnostmi zaradi ionizirajočega sevanja (referenčna raven povprečne letne koncentracije radona v zaprtih prostorih)	300 Bqm $^{-3}$
WHO – Svetovna zdravstvena organizacija (priporočena vrednost)	100 Bqm $^{-3}$ (če tega zaradi specifik države ni mogoče doseči, se poveša na 300 Bqm $^{-3}$)
EPA – Agencija za varstvo okolja v ZDA (priporočena vrednost)	148 Bqm $^{-3}$ (enakovredno 4 pCi/L)

4.5 CO $_2$ in Rn kot indikatorja prezračevanja

Koncentracija ogljikovega dioksida (CO $_2$) v zunanjem zraku povprečno znaša okrog 400 ppm (ang. *parts per million*) (Küçüküseyin, 2021). CO $_2$ v procesu dihanja izdihavamo vsa živa bitja, zato je njegova koncentracija v notranjem zraku neposredno povezana s številom uporabnikov, njihovimi aktivnostmi in njihovim časom uporabe prostora. Kadar je njegova koncentracija v prostoru višja od 1000 ppm, lahko povzroči glavobol, omotico, težave s koncentracijo, sindrom bolnih stavb (SBS). Rezultati raziskav so pokazali, da pri koncentraciji CO $_2$ nad 1000 ppm nezadovoljstvo v svojem počutju občuti 20 % uporabnikov prostora, če koncentracija naraste na 2000 ppm, pa nelagodje zazna 36 % uporabnikov (Küçüküseyin, 2021; Dovjak et al., 2019). CO $_2$ je zato eden izmed glavnih kazalnikov kakovosti notranjega zraka in ustreznosti prezračevanja stavbe (ASHRAE Standard 62.1-2019). Tudi mi smo ga uporabili kot indikator prezračevanja, natančneje kot indikator infiltracije zunanjega zraka v stavbo. Koncentracijo CO $_2$ smo merili sočasno s koncentracijo Rn in delcev in na ta način spremljali nekontrolirano prezračevanje prostora (infiltracijo). Kot omenjeno v poglavju 3.2.2, smo na osnovi meritev koncentracije CO $_2$ izračunali zrakotesnosti stavbnega ovoja prostora.

V Evropski uniji se zahteve in priporočila glede dopustne koncentracije CO $_2$ v prostorih razlikujejo od članice do članice. Nemški standard DIN 1946-6 kot zgornjo mejo za koncentracijo CO $_2$ v prostoru priporoča 1500 ppm, na Finskem je najvišja priporočena koncentracija 1200 ppm, na Norveškem, Švedskem in Danskem pa 1000 ppm (Küçüküseyin, 2021). ASHRAE Standard 62.1-2019 kot

priporočeno najvišjo koncentracijo CO₂ v prostorih navaja 1000 ppm, REHVA pa 800 ppm. V Sloveniji so zahteve glede kakovosti notranjega zraka navedene v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (U. l. RS, št. 42/02), ki za CO₂ kot dopustno koncentracijo navaja 3000 mg/m³ (1667 ppm).

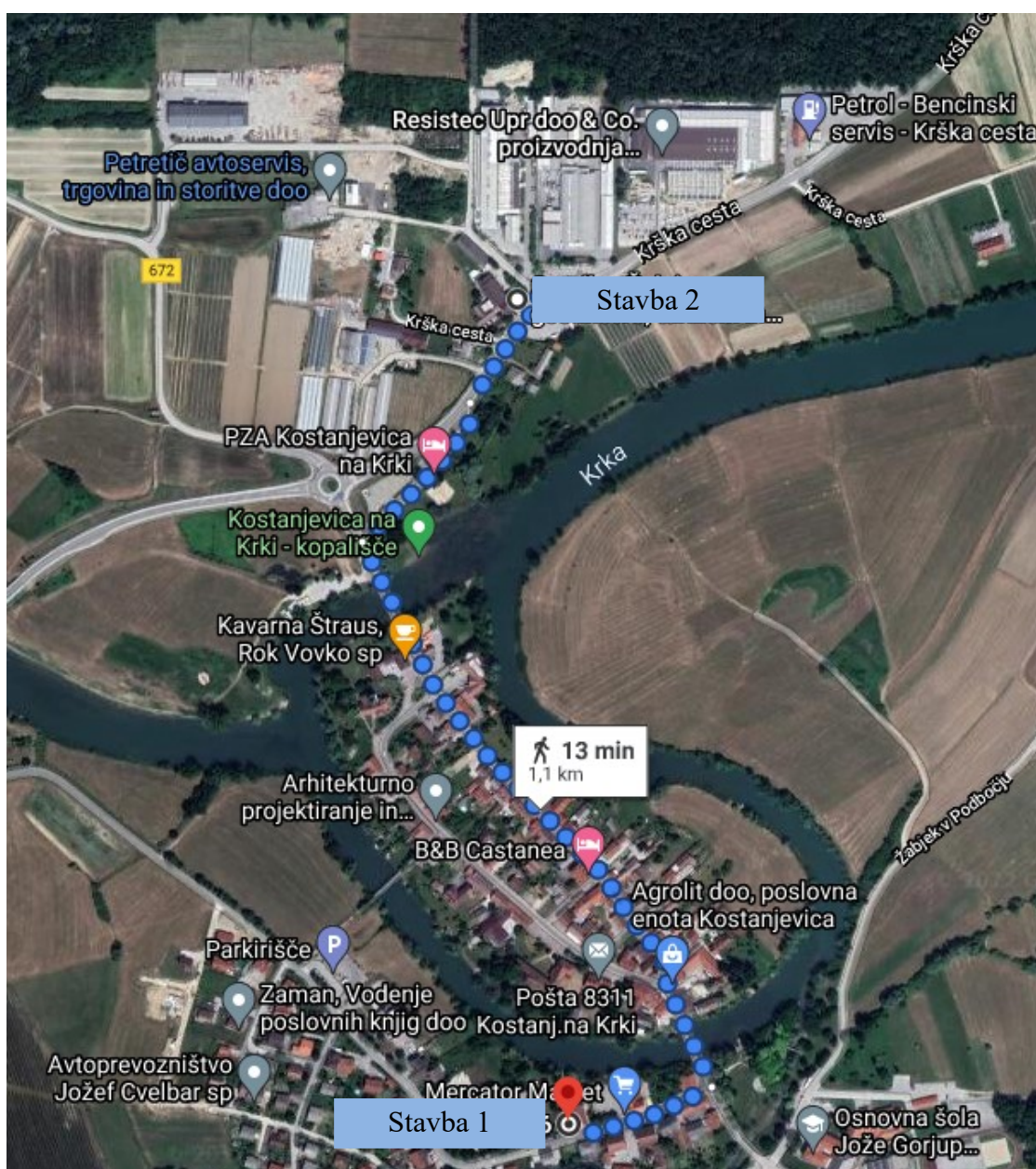
Radon, ki smo ga v poglavju 4.4 omenili kot onesnaževalca zraka, je tako kot CO₂ indikator kakovosti notranjega okolja in prezračevanja stavbe. Volumen svežega zraka, ki zadošča za kakovostno notranje okolje na osnovi indikacije CO₂, pa vedno ne zadošča, da bi iz zraka odstranil tudi onesnaževala, kot je Rn. Zato smo z izbiro Rn kot indikatorja na varnejši strani, kot če za sledenje kakovosti notranjega okolja izberemo CO₂ (Dovjak et al., 2021). Koncentracije Rn, ki jih želimo doseči, da bo kakovost notranjega okolja ustrezna, smo že navedli v poglavju 4.4.3 v preglednici 5. V raziskavi smo kot indikatorja prezračevanja prostora uporabili kombinacijo obeh, CO₂ in Rn.

5 EKSPERIMENTALNI DEL

5.1 Geografske, geološke in meteorološke značilnosti lokacije

Stavbi, v katerih smo izvedli meritve, se nahajata v Kostanjevici na Krki, kraju s 691 prebivalci (SURS, 2022). Točni lokaciji obeh stavb sta označeni na sliki 6.

Stavba 1 se nahaja v pretežno stanovanjskem delu mesta. Je 7 m oddaljena od občinske ceste, ki je manj prometna, njena povprečna prometna obremenitev znaša približno 500 vozil/dan. Na njej prevladuje promet z osebnimi avtomobili, tovornega prometa skoraj ni. Stavba 2 je 12 m oddaljena od državne ceste, v neposredni bližini se nahajata tudi dve industrijski podjetji. Prometna obremenitev te državne ceste znaša okrog 3350 vozil/dan, od tega 200 tovornih vozil/dan (Odprti podatki Slovenije, 2023).



Slika 6: Lokacija obeh stavb (Google Maps, 2022).

Geološka zgradba tal na območju Kostanjevice na Krki ni povsem homogena. Na sliki 7 lahko vidimo, da na območju, kjer se nahaja stavba 1, tla sestavljajo aluvialne rečne naplavine, ki jih je ob povišanem vodostaju tja odložila reka Krka. Tla na območju stavbe 2 pa sestavljata glina in alevrolit (Geološki zavod Slovenije, 2022).



Slika 7: Geološka zgradba tal (Geološki zavod Slovenije, 2022).

Kostanjevica na Krki ima zmernocelinsko (subpanonsko) podnebje, zanj je značilno, da povprečne temperature najhladnejšega meseca znašajo med 0 in 3 °C, najtoplejšega pa med 15 in 20 °C. Povprečne aprilске temperature so višje oz. približno enake kot oktobrské. Povprečna letna količina padavin znaša med 800 in 1000 mm, največ padavin je poleti v obliki ploh in neviht, najmanj pa v zimskih mesecih (Ogrin, 1996).

5.2 Izbor stavb in prostorov

Za izvajanje meritev v stavbah 1 in 2 smo se odločili, ker se nahajata v istem majhnem kraju in sta druga od druge oddaljeni le 1,1 km, zato imata isto podnebje ter podobno sestavo tal. Prostora v obeh stavbah, ki smo ju izbrali za meritve, imata enako namembnost (CC-SI 11100 – enostanovanjska stavba) ter primerljivo neto tlorisno površino in neto volumen (TSG-V-006:2022). Po drugi strani pa imata stavbi različno sestavo stavbnega ovoja in odprtín ter s tem tudi različno zrakotesnost (stavba 1, nizka zrakotesnost, oznaka S1-NT; stavba 2, visoka zrakotesnost, oznaka S2-VT), zaradi česar smo predvideli, da se bodo njuni rezultati razlikovali. Tako stavbi kot prostora so podrobneje opisani v poglavjih 5.2.1–5.2.4.

5.2.1 Opis stavbe 1

Stavba 1 (S1-NT), ki je prikazana na sliki 8, se nahaja na Ljubljanski cesti 6 v Kostanjevici na Krki. Njeni osnovni podatki so prikazani v preglednici 6. Razberemo lahko, da je bila zgrajena leta 1997 in da ovoj stavbe, razen vmesnega pleskanja, vse do danes ni bil obnovljen. Okna imajo lesene okvirje, prav tako vgrajene leta 1997. Tudi ti so bili od vgradnje dalje le nekajkrat prebarvani, drugih popravil okenskih okvirjev ali njihovih stikov ni bilo. Zato predvidevamo, da ima stavba 1 več nezaželenih špranj in razpok ter je posledično manj zrakotesna od obeh izbranih stavb.



Slika 8: Stavba 1 (S1-NT).

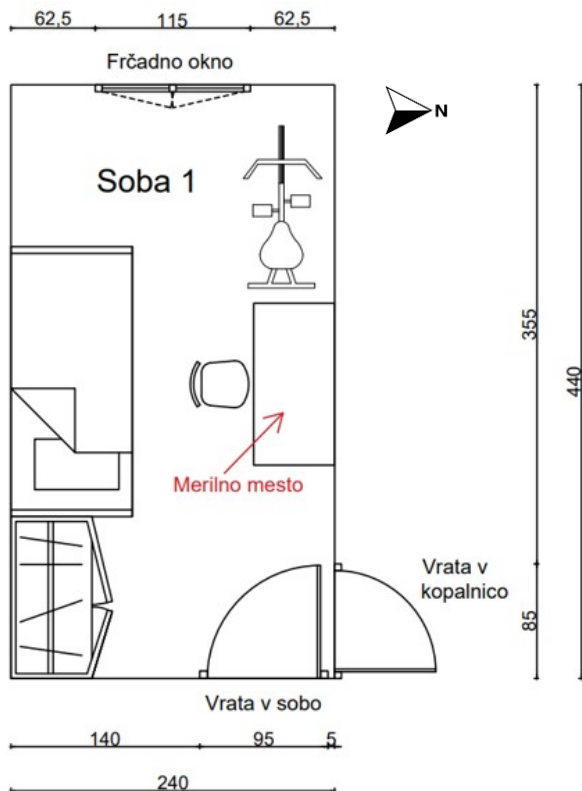
Preglednica 6: Osnovni podatki o stavbi 1 (S1-NT) (TSG-V-006:2022).

Stavba poimenovanje:	STAVBA 1 (S1-NT)
Lokacija:	Kostanjevica na Krki
Neto tlorsna površina stavbe:	342 m ²
Število nadstropij:	Pritličje + mansarda
Leto izgradnje stavbe:	1997 (razen južne stene obrnjene na ulico, ki je prvotna s konca 19. stoletja)
Klasifikacija stavbe:	CC-SI 11100 – enostanovanjska stavba CC-SI 12202 – stavba zavarovalnice CC-SI 12304 – stavba za storitvene dejavnosti
Število prebivalcev:	3
Število zaposlenih:	3

Prostor izvajanja meritev v stavbi 1 smo poimenovali soba 1. Njene osnovne informacije so predstavljene v preglednici 7, njen tloris smo skicirali in skupaj s fotografijo prostora prikazali na sliki 9. Na tlorisu je s puščico označeno merilno mesto, hkrati pa so iz njega razvidne tudi dimenzije prostora in odprtín (v cm). Vrata v sobo in vrata iz sobe v kopalnico so bila med izvajanjem meritev zaprta, ker pa niso zrakotesna, so omogočala gibanje zraka po stanovanju. To predstavlja realne razmere v stavbi, zato vrat nismo želeli dodatno tesniti.

Preglednica 7: Osnovni podatki o prostoru (sobi 1) v S1-NT.

Prostor poimenovanje:	SOBA 1
Nadstropje:	Mansarda, bivalni del stavbe
Funkcija prostora:	Soba za goste
Neto tlorisna površina prostora:	10,5 m ²
Neto višina prostora:	2,6 m
Neto volumen prostora:	26,8 m ³
Orientacija prostora:	Zahod
Osončenost:	Prostor ni zasenčen zaradi dreves ali sosednjih objektov, senči ga le napušč frčade dolžine 30 cm.
Število in vrsta oken:	1 dvokrilno okno + 1 fiksno trikotno okno
Leto vgradnje oken:	1997
Material okenskega okvirja:	Les
Vrsta zasteklitve:	Dvoslojna zasteklitev
Pozicija senčil na oknih:	Notranja rolo senčila
Število in vrsta vhodov/izhodov:	2 lesena vrata –1 na hodnik in 1 v kopalnico



Slika 9: Tlorisna skica (levo) in fotografija sobe 1 (desno) v S1-NT.

Sestava konstrukcijskih sklopov sobe 1, ki mejijo na zunanost, je predstavljena v preglednici 8.

Preglednica 8: Konstrukcijski sklopi sobe 1, ki mejijo na zunanost v S1-NT.

Konstrukcijski sklop	Material	Debelina sloja [cm]
Zunanja stena	Toplotno-izolacijski omet	5,00
	Opeka	29,00
	Apneno cementni omet	2,00
Stene frčade	Tankoslojni fasadni omet	1,00
	Cementno iverna plošča	1,00
	Bitumenski trak	0,40
	Lesene deske	3,00
	Steklena volna/leseni morali (nosilna konstrukcija)	10,00
	PE folija	0,02
	Zračna plast/kovinska podkonstrukcija	5,00
	Mavčno kartonske plošče	1,25
Strop proti neogrevanemu podstrešju	Lesene deske	3,00
	Leseni tramovi/steklena volna	12,00
	Kovinska podkonstrukcija	5,00
	Mavčno kartonske plošče	1,25
Streha	Opečnati strešniki (bobrovec)	1,50
	Prečne letve	3,00
	Vzdolžne letve	3,00
	Strešna lepenka	0,13
	Lesene deske	3,00
	Leseni špirovci/steklena volna	12,00
	PE folija	0,02
	Zračna plast/kovinska podkonstrukcija	5,00
	Mavčno kartonske plošče	1,25

Za razumevanje in razlago rezultatov meritev je pomemben tudi podatek o tehničnih stavbnih sistemih, ki delujejo v stavbi. Navedeni so v preglednici 9.

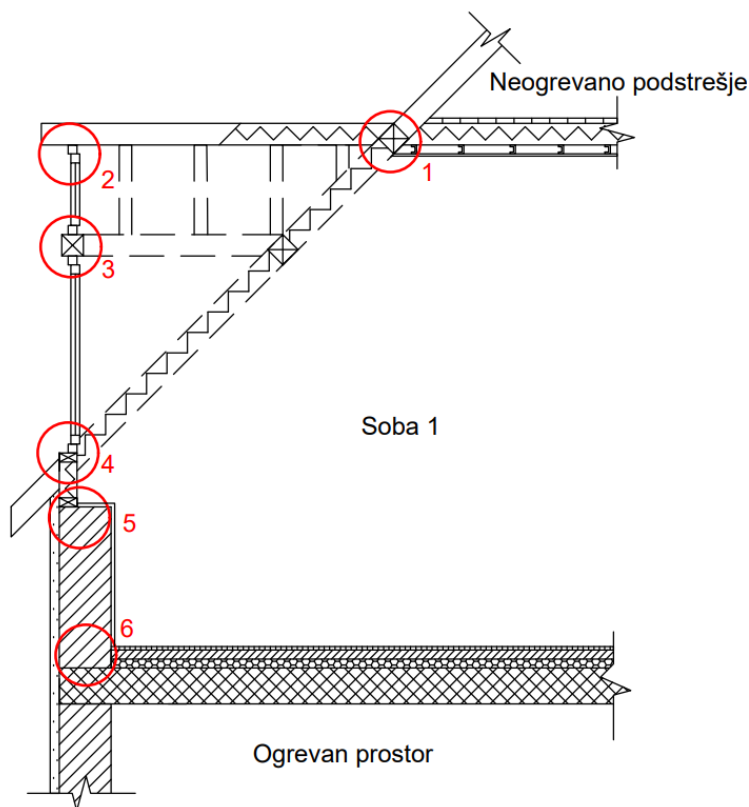
Preglednica 9: Sistemi ogrevanja, hlajenja, prezračevanja v S1-NT.

Ogrevanje prostorov-vrsta energentov	Toplotna črpalka in kamin
Hlajenje prostorov	Nobenega
Pripravo tople sanitarne vode	Toplotna črpalka
Kuhanje	Tekoči naftni plin
Ukrepi za povečanje energetske učinkovitosti stavbe v zadnjih 7-letih	Namestitev toplotne črpalke
Način izvajanja prezračevanja	Odpiranje oken v celoti (na stežaj)

5.2.2 Prikaz kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka

Na sliki 10 je skica kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka skozi stavbni ovoj sobe 1 v S1-NT. Sestavo konstrukcijskih sklopov smo podrobno predstavili v prejšnjem poglavju 5.2.1, preglednica 8. Na spodnji skici kritičnih mest (slika 10) smo zato prikazali le bistvene sloje konstrukcijskih sklopov – nosilni in toplotnoizolacijski sloj ter okno. Stiki horizontalne in vertikalne konstrukcije ter stiki med vertikalno konstrukcijo in oknom so zaradi preglednosti izrisani na nivoju osnovnih funkcij. S črtno črto smo ponazorili nosilno konstrukcijo frčade, ki v izbranem prerezu (skozi katerega smo narisali skico) ni vidna, a vendar omejuje prostor z zunanostjo in služi tudi za lažjo predstavo o poteku strešne nosilne konstrukcije. Toplotna izolacija stropa proti neogrevanemu podstrešju in toplotna izolacija strehe se nahajata med lesenimi tramovi. Na sliki 10 smo tramove na polovici prerezali in dodali šrafuro, ki ponazarja, da se na tem mestu nahajata tako toplotna izolacija kot tudi nosilna konstrukcija. Bistvene vertikalne dimenzije smo prikazali v centimetrih. S številkami 1–6 so označena kritična mesta v ovoju, za katera predvidevamo, da niso povsem zrakotesna in omogočajo infiltracijo oz. ekxfiltracijo zraka:

- 1) Stik med stropom proti neogrevanemu podstrešju in streho;
- 2) Stik med okenskim podbojem in streho frčade ter stik med okenskim okvirjem in podbojem okna;
- 3) Stik med okenskim podbojem in tramom strešne konstrukcije ter stik med okenskim okvirjem in podbojem okna;
- 4) Stik med okenskim podbojem in steno frčade ter stik med okenskim okvirjem in podbojem okna;
- 5) Stik med steno frčade in zunanjo steno;
- 6) Stik med zunanjo steno in medetažno konstrukcijo.



Slika 10: Skica kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka skozi stavbni ovoj sobe 1 v S1-NT.

5.2.3 Opis stavbe 2

Stavba 2 (S2-VT), ki je prikazana na sliki 11, se nahaja na Krški cesti 4 v Kostanjevici na Krki. Njeni osnovni podatki so zbrani v preglednici 10. Vidimo, da je bila stavba zgrajena leta 1985, a je bila v letu 2020 deležna celovite energetske sanacije, ki je zajemala toplotno izolacijo fasadnega ovoja, zamenjavo oken, vrat in zunanjih senčil ter menjavo strešne kritine (preglednica 13). Predvidevamo, da so se s sanacijo fasade stavbe zatesnile morebitne razpoke oz. netesnosti v zunanji steni. Nova PVC okna in vrata tesnijo skladno s trenutno veljavnimi standardi, prav tako so bili ob montaži zatesnjeni vsi stiki med njimi in steno oz. tlemi. Zaradi omenjenih in nedavno izvedenih sanacijskih ukrepov predpostavljamo, da ima stavba 2 bolj zrakotesen stavbni ovoj.



Slika 11: Stavba 2 (S2-VT).

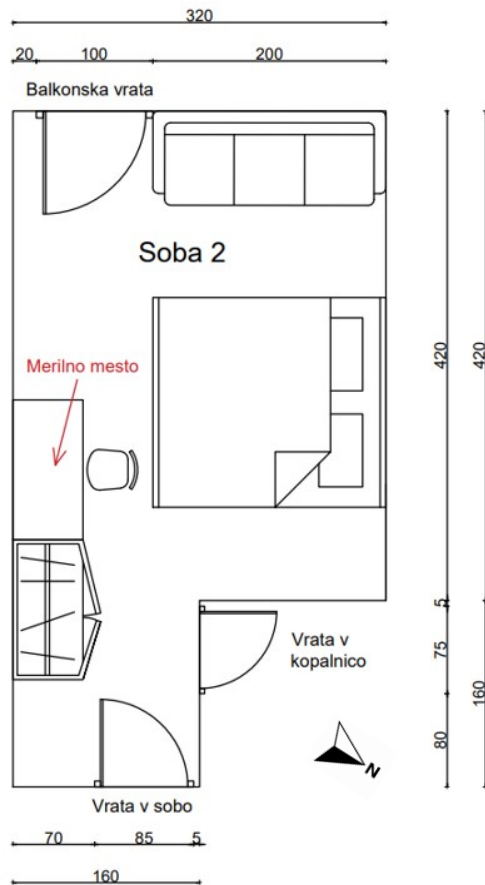
Preglednica 10: Osnovni podatki o stavbi 2 (S2-VT) (TSG-V-006:2022).

Stavba poimenovanje:	STAVBA 2 (S2-VT)
Lokacija:	Kostanjevica na Krki
Neto tlorsna površina stavbe:	1580 m ²
Število nadstropij:	Pritličje + nadstropje
Leto izgradnje stavbe:	1985
Klasifikacija stavbe:	CC-SI 11100 – enostanovanjska stavba CC-SI 12111 – gostišče z restavracijo in nastanitvami
Število prebivalcev:	2
Število zaposlenih:	10

Prostor izvajanja meritev v stavbi 2 (S2-VT) smo poimenovali soba 2. Njene osnovne informacije podajamo v preglednici 11, njen tloris in fotografija prostora pa sta prikazani na sliki 12. Na tlorisu je z rdečo puščico označeno mesto, kjer so bili postavljeni merilniki, prav tako so na njem označene tudi dimenzije prostora in odprtini (v cm). Vrat v sobo in kopalnico nismo želeli dodatno tesniti, da bi rezultati meritev odražali realne razmere.

Preglednica 11: Osnovni podatki o prostoru (sobi 2) v S2-VT.

Prostor poimenovanje:	SOBA 2
Nadstropje:	1. nadstropje, hotelski del
Funkcija prostora:	Soba za goste
Neto tlorisna površina prostora:	16,0 m ²
Neto višina prostora:	2,4 m
Neto volumen prostora:	38,4 m ³
Orientacija prostora:	Jugozahod
Osončenost:	Prostor je senčen z nadaljevanjem objekta
Število in vrsta oken:	1 balkonska vrata
Leto vgradnje oken:	2020
Material okenskega okvirja:	PVC
Vrsta zasteklitve:	Dvoslojna zasteklitev
Pozicija senčil na oknih:	Zunanja senčila (rolete) in notranja senčila (zavese)
Število in vrsta vhodov/izhodov:	2 lesena vrata – 1 na hodnik in 1 v kopalnico



Slika 12: Tlorisna skica (levo) in fotografija sobe 2 (desno) v S2-VT.

Sestava konstrukcijskih sklopov sobe 2 v S2-VT, ki mejijo na zunanost, je predstavljena v preglednici 12.

Preglednica 12: Konstrukcijski sklopi sobe 2, ki mejijo na zunanost v S2-VT.

Konstrukcijski sklop	Material	Debelina sloja [cm]
Zunanja stena	Zaključni fasadni sloj	0,50
	EPS	20,00
	Apneno cementni omet	2,00
	Opeka	29,00
	Apneno cementni omet	2,00
Strop proti neogrevanemu podstrešju	EPS	20,00
	AB plošča	15,00
	Apneno cementni omet	2,00

Za razumevanje in kakovostno razlago rezultatov meritev potrebujemo tudi podatek o tehničnih stavbnih sistemih, ki delujejo v stavbi. Navajamo jih v preglednici 13.

Preglednica 13: Sistemi ogrevanja, hlajenja, prezračevanja v S2-VT.

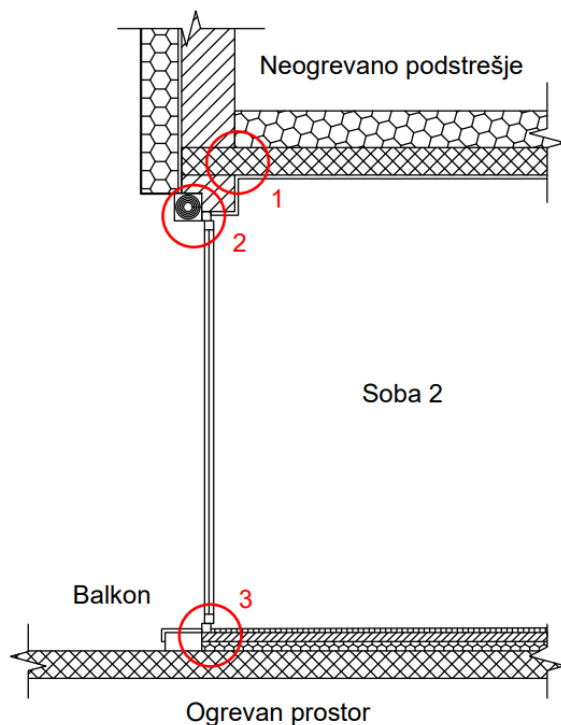
Ogrevanje prostorov - vrsta energentov	Toplotna črpalka
Hlajenje prostorov	Klimatska naprava
Pripravo tople sanitarne vode	Toplotna črpalka
Kuhanje	Tekoči naftni plin
Ukrepi za povečanje energetske učinkovitosti stavbe v zadnjih 7 letih	Namestitvev toplotne črpalke, zamenjava oken in balkonskih vrat, toplotna izolacija fasade, menjava strešne kritine (leta 2020)
Način izvajanja prezračevanja	Odpiranje oken v celoti (na stežaj) ali na nagib (na kip)

5.2.4 Prikaz kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka

Na sliki 13 je skica kritičnih mest infiltracije oz. eksfiltracije zraka skozi stavbni ovoj sobe 2 v S2-VT. Na ovoju so označeni le nosilni konstrukcijski sloji, izolacijski sloji, balkonska vrata ter zunanja roletna omarica. Ostali sloji za raziskavo niso ključni, zato jih na skico nismo narisali, smo jih pa navedli v poglavju 5.2.3 v preglednici 12. Zaradi boljše preglednosti skice so stik horizontalne in vertikalne konstrukcije, stik med vertikalno konstrukcijo, roletno omarico in balkonskimi vrati ter stik balkonskih vrat s horizontalno konstrukcijo narisani na nivoju, ki zadošča za potrebe naše raziskave. Na skici smo označili tudi bistvene vertikalne dimenzije (v cm). S številkami 1–3 smo označili kritična mesta v ovoju, skozi katera poteka nekontrolirano prezračevanje – infiltracija oz. eksfiltracija zraka:

- 1) Stik med zunanjo steno in stropom proti neogrevanemu podstrešju;
- 2) Stik med podbojem balkonskih vrat in zunanjo steno, stik med okvirjem in podbojem balkonskih vrat, stik med roletno omarico, zunanjo steno in podbojem balkonskih vrat;
- 3) Stik med podbojem balkonskih vrat in medetažno konstrukcijo, stik med podbojem in okvirjem balkonskih vrat.

V sobi 2 je na zunanji steni nameščena klimatska naprava, ki pa v prikazanem prerezu fasadnega pasa ni vidna. Inštalacijski preboj zanjo, ki je izveden skozi zunanjo steno, prav tako spada med kritična mesta, skozi katera lahko prihaja do nekontroliranega prehoda zraka v prostor ali iz njega.



Slika 13: Skica kritičnih mest infiltracije/eksfiltracije zraka skozi zunanji ovoj sobe 2 v S2-VT.

5.3 Potek meritev

Meritve smo izvedli v dveh obdobjih, in sicer v neogrevalni (september 2021) in ogrevalni (marec, april 2022) sezoni. V izbrani sobi so trajala po en teden (od nedelje do naslednje nedelje), točna obdobja izvajanja meritev v posamezni stavbi in sezoni najjavimo v preglednici 14.

Preglednica 14: Obdobje izvajanja meritev v S1-NT (soba 1) in S2-VT (soba 2) v neogrevalni in ogrevalni sezoni

	Obdobje merjenja v neogrevalni sezoni	Obdobje merjenja v ogrevalni sezoni
S1-NT soba 1	12. 9.–19. 9. 2021	27. 3.–3. 4. 2022
S2-VT soba 2	19. 9.–26. 9. 2021	20. 3.–27. 3. 2022

Pred začetkom izvajanja meritev smo pripravili časovnico prezračevanja, v kateri smo navedli obdobja odpiranja in zapiranja okna (vedno smo odpiralo isto okno). Med izvajanjem meritev so se v sobi izmenjavala obdobja, ko je bilo okno bodisi odprto ('odprto obdobje') bodisi zaprto ('zapro obdobje'). V odprtem obdobju se je prostor naravno prezračeval skozi okno, v zaprtem obdobju pa je bila prisotna le nenadzorovana infiltracija/eksfiltracija zraka. Časovnica odpiranja in zapiranja oken je bila enaka za vsa obdobja meritev in je prikazana v preglednici 15. Imeli smo tri odprta in dve zaprta obdobja, prvo odprto obdobje se je začelo v nedeljo popoldne s priklopom merilnikov, tretje odprto obdobje pa se je končalo z izklopom merilnikov naslednjo nedeljo. V času izvajanja meritev stanovalci v prostoru niso bili

prisotni, vstop v prostor je bil omejen le na odpiranje oz. zapiranje okna. V času izvajanja meritev smo omejili aktivnosti v neposredni bližini sobe, kjer smo izvajali meritve, da bi na minimum omejili nastajanje delcev iz notranjih virov.

Preglednica 15: Časovnica odprtih in zaprtih obdobj v sobi v času merjenja.

Dan in ura	Obdobje
Nedelja (začetek merjenja) – Ponedeljek 11.00	Odprto
Ponedeljek 11.00 – sredo 5.00	Zaprto
Sreda 5.00 – četrtek 11.00	Odprto
Četrtek 11.00 – sobota 5.00	Zaprto
Sobota 5.00 – nedelja (konec merjenja)	Odprto

Vse rezultate meritev podajamo v poletnem času (+1 GMT), saj je bil to čas, v katerem smo izvedli večino meritev; izjema je meritev v stavbi 2 v ogrevalni sezoni, ki smo jo izvedli v zimskem času. Zato smo za to meritev merilnike nastavili na poletni čas, prav tako pa smo temu prilagodili tudi odpiranje oken (ker bi po poletnem času okno zaprli ob 11.00, smo ga mi zaradi zimskega časa zaprli že ob 10.00).

5.4 Določanje infiltracije skozi ovoj prostora na osnovi koncentracije CO₂

Vhodne podatke za izračun zrakotesnosti obeh stavb smo pridobili z metodo sledilnega plina. Uporabili smo plin CO₂ in kontinuirano spremljali nižanje njegove koncentracije v zaprtem prostoru, kar je podrobneje opisano v poglavju 4.2.2. Infiltracijo zunanjega zraka skozi ovoj v prostor smo izračunali po metodi Shi et al. (2019) z uporabo naslednjih enačb (1) in (2).

$$\ln[C_{in}(t) - C_{out}(t)] = -N_{inf} \cdot t + \ln[C_{in}(0) - C_{out}(0)] \quad (1)$$

$$Q_{inf} = N_{inf} \cdot V_{neto} \quad (2)$$

Pri tem je:

C_{in} – koncentracija CO₂ v notranjem zraku [ppm]

C_{out} – koncentracija CO₂ v zunanjem zraku [ppm]

t – čas [h]

N_{inf} – število izmenjav zraka z infiltracijo skozi ovoj prostora [h⁻¹]

V_{neto} – neto volumen prostora [m³]

Q_{inf} – količina zraka, ki se izmenja z infiltracijo skozi ovoj prostora [m³h⁻¹].

Število izmenjav zraka N_{inf} smo izračunali po enačbi (1), pri čemer smo za C_{out} privzeli povprečno koncentracijo CO₂ v zunanjem zraku, ki skladno s člankom Kücükhüseyin (2021), objavljenem v REHVA Journal, znaša 400 ppm. Koncentracijo CO₂ v notranjem zraku (C_{in}) smo merili z merilnikom HOBO MX CO2 Logger. Začetno koncentracijo, torej $C_{in}(0)$, smo povišali na vsaj 1500 ppm, merilnik pa je nato beležil, kako koncentracija CO₂ pada s časom. Pri izračunu smo upoštevali najnižjo vrednost $C_{in}(t)$, in sicer takrat, ko jo je merilnik zabeležil prvič. Začetno povišanje $C_{in}(0)$ smo dosegli tako, da so se v prostoru zadrževale tri osebe dlje časa, ko pa je koncentracija CO₂ narasla na vsaj 1500 ppm, so prostor zapustile. Prostor je nato ostal prazen ves čas merjenja, s čimer smo zagotovili, da v njem ni bilo

dodatnih virov CO₂. Na podlagi izračunanega števila izmenjav zraka N_{inf} in podatka o volumnu prostora V smo po enačbi (2) izračunali še količino zraka, ki se izmenja z infiltracijo skozi ovoj prostora Q_{inf} . Meritve koncentracije CO₂ za določitev infiltracije smo izvedli posebej, izven časa, ko so potekale v izbrani sobi enotedenske meritve.

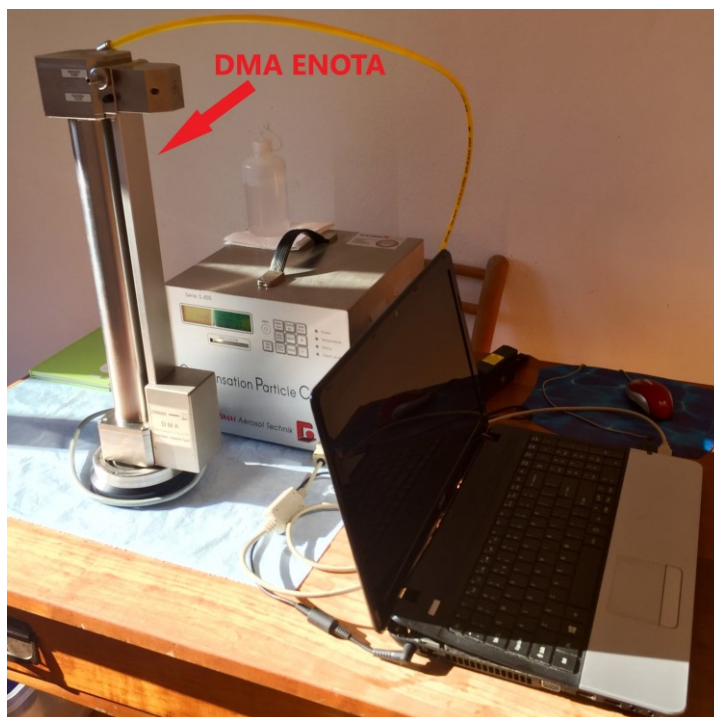
5.5 Merilna oprema

5.5.1 Merilnik SMPS+C

Meritve številčne koncentracije delcev velikosti od 10 do 1100 nm smo izvedli z merilnikom SMPS+C (ang. *Scanning Mobility Particle Spectrometer*) nemškega proizvajalca Grimm Aerosol Technik.

Merilnik je prikazan na sliki 14 in je sestavljen iz naslednjih dveh enot:

- Elektrostatični ločevalnik delcev po velikosti DMA (ang. *Differential Mobility Analyzer*). Razlikujemo med srednjo enoto DMA (meri delce s premerom 5–350 nm) in veliko enoto DMA (meri delce s premerom 10–1100 nm). DMA loči delce po velikosti tako, da meri njihovo mobilnost. Ta je odvisna od velikosti delcev in njihovega naboja. Delci, ki so večji od velikosti, ki jo želimo meriti, se ulovijo v impaktorju. Ostale manjše delce DMA ločevalnik porazdeli v 44 kanalov, in sicer tako, da spreminja napetost med zunanjo in notranjo elektrodo od 5 do 10000 V. Manjši kot so delci, večja sta njihova mobilnost in naboj. Pri določeni napetosti oz. v določenem kanalu razdaljo med zunanjo in notranjo elektrodo prepotuje le delec določene velikosti (Bezek, 2013). V raziskavi smo uporabili veliko DMA enoto, delce znotraj 44 kanalov različnih velikosti (od 10 do 1100 nm) pa smo razdelili v štiri velikostne razrede (frakcije), in sicer (v nm) <100, 100–200, 201–500, >500, ki nam omogočajo primerjavo ultrafinih in finih delcev (PM_{0,1} in PM₁).
- Kondenzacijski števec delcev CPC (ang. *Condensation Particle Counter*) je sestavljen iz saturatorja, ki ga obdaja plašč, prepojen z butanolom s temperaturo 35 °C, ter iz kondenzatorja, ki ima temperaturo 10 °C. Aerosolni delci najprej potujejo v saturator, kjer se oplasčijo z nasičeno paro butanola, nato pa v kondenzator, kjer se tvorijo kapljice, velike nekaj µm, ki jih optični števec zazna in prešteje (Bezek, 2013).



Slika 14: Merilnik SMPS+C 5400.

Merilnik SMPS+C, model 5404, je med meritvijo povezan z računalnikom, na katerem nameščeni program shranjuje vsakih sedem minut: (i) število prešteti delcev znotraj vsakega od 44 velikostnih kanalov, (ii) celokupno število delcev velikosti 10–1100 nm in (iii) geometrični srednji premer delcev d_{GM} [nm]. Številčna koncentracije delcev C_N [cm⁻³] pomeni število delcev v cm⁻³. Merilnik deluje pri temperaturi od 10 do 35 °C in relativni vlažnosti zraka do 95 %. Njegovo merilno območje je od 1 do 10⁷ cm⁻³ z natančnostjo $\pm 10\%$ (Grimm, 2012).

5.5.2 Merilnika AlphaGUARD in AlphaPM

Meritve koncentracije radona (²²²Rn) v zraku smo izvedli s kontinuirnim merilnikom AlphaGUARD (proizvajalca Bertin Technologies), meritve koncentracije radonovih produktov (RnP) pa z dodatno enoto merilnika AlphaPM. Ker smo koncentracijo Rn in RnP merili sočasno, smo merilnika povezali s posebnim kablom in na ta način omogočili sinhronizacijo podatkov obeh merilnikov. Interval vzorčenja zraka lahko poljubno nastavimo, v našem primeru je bil 60 min. Merilnika sta prikazana na sliki 15.

Kadar deluje merilnik AlphaGUARD na pasiven način (ne črpa zraka), potuje zrak v ionizacijsko komoro z difuzijo. Da omogočimo v komoro vstop samo Rn (ne pa tudi RnP, ki so tudi vedno prisotni v zraku prostora), je pred komoro nameščen filter iz steklenih vlaken. Skozi filter difundira le Rn, na filtru pa se zadržijo RnP in prašni delci. Tok delcev alfa, ki v komori nastajajo pri razpadu Rn, ionizira zrak in tvori ionske pare (pozitivno nabiti ioni in elektroni). V ionizacijski komori, katere ohišje je kovinsko in deluje kot anoda, je med anodo in katodo med meritvijo napetost 750 V. Zaradi električnega polja pozitivno nabiti ioni potujejo h katodi, elektroni pa k anodi, kar izmerimo kot električni tok. Merilnik podaja koncentracijo radona v enoti Bqm⁻³, njegovo merilno območje je od 2 Bqm⁻³ do 2 MBqm⁻³, pri čemer natančnost merjenja znaša $\pm 3\%$. Merilnik istočasno meri tudi temperaturo, tlak in relativno vlažnost (Bertin Technologies, 2019).

Merilna enota AlphaPM za detekcijo radonovih produktov (RnP) deluje pri temperaturi od 0 do 50 °C in ima merilno območje od 2 Bqm⁻³ do 1000 kBqm⁻³. AlphaPM ima vgrajeno črpalko, da črpa zrak skozi filter, ki zadrži RnP. Alfa aktivnost RnP na filtru zaznava mikročip občutljiv na sevanje alfa. Izračun koncentracije aktivnosti RnP temelji na izmerjeni aktivnosti alfa na filtru in volumnu prečrpanega zraka skozi filter. Končni rezultat je koncentracija aktivnosti RnP v enoti Bqm⁻³. Program izvede izračun vsakih 10 min, podatki se zbirajo in shranjujejo v pomnilniku merilnika AlphaGUARD, ki jih sinhronizira s svojimi podatki (na izbrani časovni interval). Združene podatke obeh merilnikov prenesemo na računalnik v programu DataEXPERT. Ker sta AlphaGUARD in AlphaPM povezana, lahko program za vsako meritev izračuna ravnotežni faktor F med koncentracijo RnP in Rn (Saphymo GmbH, 2012).



Slika 15: Merilnik AlphaGUARD z merilno enoto AlphaPM.

5.5.3 Merilnik Radon Scout Professional

S kontinuirnim merilnikom Radon Scout Professional proizvajalca SARAD GmbH (slika 16) merimo koncentracijo ²²²Rn in CO₂ v zraku, dodatno pa še temperaturo in relativno vlažnost zraka. Merilnik deluje pasivno, koncentracijo ²²²Rn pa meri na principu štetja celokupne aktivnosti alfa Lucasove celice na silicijevi fotopomnoževalki (SiPM) z visoko občutljivostjo (>2,5 cpm(kBqm⁻³)⁻¹). Detekcija CO₂ poteka na osnovi NDIR (ang. *Non-dispersive infrared*) senzorja.

Koncentracijo aktivnosti ²²²Rn merilnik poda v enoti Bqm⁻³, njegovo merilno območje je od 0 do 1 MBqm⁻³, natančnost <2 %. Koncentracijo CO₂ poda v enoti ppm, v območju od 400 do 5000 ppm, z natančnostjo <5 % ±50 ppm. Interval merjenja je nastavljen od 1 do 225 min, v našem primeru je bil 60 min, saj je to priporočeni časovni interval za koncentracijo ²²²Rn nižjo od 300 Bqm⁻³. Merilnik vse rezultate shrani v svojem pomnilniku, na računalnik jih prenesemo v programu Radon Vision (SARAD, 2020).

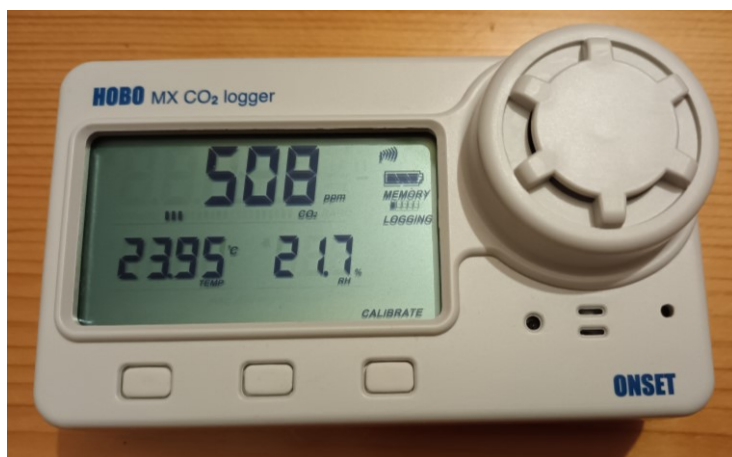


Slika 16: Merilnik Radon Scout Professional.

5.5.4 Merilnik HOBO MX CO₂ Logger

Kontinuirni merilnik HOBO MX CO₂ Logger (MX1102), proizvajalca Onset, ki smo ga v naši raziskavi uporabili za izračun zrakotesnosti stavbnega ovoja, je prikazan na sliki 17. Detekcija CO₂ poteka na osnovi NDIR. Njegovo merilno območje je od 0 do 5000 ppm, natančnost pri 25 °C, relativni vlažnosti zraka <70 % ter tlaku 1,013 hPa je ±50 ppm oz. ±5 %. Ob zagonu je merilnik potrebno kalibrirati, in sicer tako, da ga 5 min pustimo delovati zunaj. Časovni interval meritev je poljuben, v našem primeru je bil 2 min. Prav tako je potrebno določiti nadmorsko višino, na kateri se nahajamo, v našem primeru je bila 150 m n.m.v.

Merilnik deluje na baterije, z aplikacijo HOBConnect ga lahko povežemo s pametnim telefonom preko Bluetooth povezave, prenesemo rezultate meritev in jih shranimo v Excel datoteki. Poleg koncentracije CO₂ meri tudi temperaturo in relativno vlažnost zraka (HOBO, 2015).



Slika 17: Merilnik HOBO MX CO₂ Logger.

6 REZULTATI ZRAKOTESNOSTI

6.1 Zrakotesnost stavbnega ovoja prostora v stavbi 1 (S1-NT)

V preglednici 16 so zbrani rezultati štirih obdobj meritev koncentracije CO_2 in izračuni zrakotesnosti stavbnega ovoja prostora (soba 1) v stavbi 1 (S1-NT). Navedli smo začetno oz. najvišjo koncentracijo $C_{\text{in}}(0)$ ter prvo najnižjo koncentracijo $C_{\text{in}}(t)$, ki smo jo izmerili pri posamezni meritvi v času t . Prikazan je tudi neto volumen prostora V_{neto} , število izmenjav zraka z infiltracijo N_{inf} ter količina zraka, ki se izmenja z infiltracijo skozi ovoj prostora Q_{inf} .

Preglednica 16: Vhodni podatki ter izračunana N_{inf} in Q_{inf} za prostor (soba 1) v stavbi 1 (S1-NT).

	$C_{\text{in}}(0)$ [ppm]	$C_{\text{in}}(t)$ [ppm]	Časovno obdobje padanja koncentracije CO_2	t [h]	N_{inf} [h^{-1}]	V_{neto} [m^3]	Q_{inf} [m^3h^{-1}]
Meritev 1	1868	527	17.59–21.49	3,83	0,64	26,78	17,11
Meritev 2	1702	427	20.50–5.34	8,73	0,44	26,78	11,88
Meritev 3	1758	477	9.53–20.07	10,23	0,28	26,78	7,51
Meritev 4	1743	523	11.39–21.13	9,57	0,25	26,78	6,69
Povprečje					0,40		10,87

Razlaga simbolov: $C_{\text{in}}(0)$ – začetna koncentracija CO_2 v notranjem zraku, $C_{\text{in}}(t)$ – prva najnižja koncentracija CO_2 v notranjem zraku, t – čas, N_{inf} – število izmenjav zraka z infiltracijo skozi ovoj prostora, V_{neto} – neto volumen prostora, Q_{inf} – količina zraka, ki se izmenja z infiltracijo skozi ovoj prostora.

V preglednici 16 vidimo, da se tako količina zraka, ki se izmenja z infiltracijo Q_{inf} , kot tudi število izmenjav zraka skozi ovoj prostora N_{inf} med štirimi obdobji meritev precej razlikujeta. Najnižja N_{inf} je $0,25 \text{ h}^{-1}$ ($6,69 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$) pri meritvi 4, najvišja pa pri meritvi 1 in znaša $0,64 \text{ h}^{-1}$ ($17,11 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$), razlikujeta se za faktor 2,56. Povprečna N_{inf} znaša $0,40 \text{ h}^{-1}$ ($10,87 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$). Do različnih vrednosti N_{inf} prihaja zaradi slabše zrakotesnosti stavbnega ovoja prostora, zaradi katere imajo zunanji dejavniki, opisani v poglavju 4.2.1 (veter, temperatura, tlak), večji vpliv na notranje okolje. Meritvi 1 in 2 smo izvedli zvečer oz. ponoči, ko je temperatura zunanjega zraka T_{out} nižje ($2\text{--}8 \text{ }^\circ\text{C}$), meritvi 3 in 4 pa podnevi, ko je T_{out} višja ($14\text{--}19 \text{ }^\circ\text{C}$) (ARSO, 2022). Temperatura notranjega zraka T_{in} se je pri vseh meritvah gibala okoli $20 \text{ }^\circ\text{C}$. To pomeni, da je ΔT ($T_{\text{in}} - T_{\text{out}}$) pri meritvah 1 in 2 znašala okrog $12\text{--}18 \text{ }^\circ\text{C}$, pri meritvah 3 in 4 pa le okrog $1\text{--}6 \text{ }^\circ\text{C}$. Zaradi različnih temperatur zraka je različen tudi zunanji zračni tlak, kar vpliva na hitrost infiltracije/eksfiltracije zraka skozi ovoj prostora (omenjeno v poglavju 4.2.1) (Younes et al., 2011; Anis, 2016; Miller, 2019). Večji ΔT pomeni tudi višjo hitrost infiltracije/eksfiltracije zraka skozi stavbni ovoj, zaradi česar je N_{inf} večji pri meritvah 1 in 2, ki imata večji ΔT . Infiltracija oz. eksfiltracija zraka skozi ovoj je višja tudi v primeru višje hitrosti vetra (Younes et al., 2011; Anis, 2016; Saint-Gobain, 2018). Ta je med vsako meritvijo variirala med 1 in 5 ms^{-1} , kar pomeni, da je bil vpliv vetra na infiltracijo zraka skozi stavbni ovoj pri vseh štirih meritvah podoben. To potrjuje, da je na razpon N_{inf} vplivala predvsem ΔT .

6.2 Zrakotesnost stavbnega ovoja prostora v stavbi 2 (S2-VT)

Rezultati treh obdobj meritev koncentracije CO₂ in izračuni zrakotesnosti stavbnega ovoja prostora (soba 2) v stavbi 2 (S2-VT) so prikazani v preglednici 17. Za vsako izmed treh meritev podajamo začetno oz. najvišjo koncentracije $C_{in}(0)$ ter prvo najnižjo koncentracijo $C_{in}(t)$, ki smo jo izmerili pri posamezni meritvi v času t . V preglednici 17 je zapisan tudi neto volument prostora V_{neto} , ter izračunana število izmenjav zraka skozi infiltracijo prostora N_{inf} in količina zraka, ki se izmenja z infiltracijo skozi ovoj prostora Q_{inf} .

Preglednica 17: Vhodni podatki ter izračunana N_{inf} in Q_{inf} za prostor (soba 2) v stavbi 2 (S2-VT).

	$C_{in}(0)$ [ppm]	$C_{in}(t)$ [ppm]	Časovno obdobje padanja koncentracije CO ₂	t [h]	N_{inf} [h ⁻¹]	V [m ³]	Q_{inf} [m ³ h ⁻¹]
Meritev 1	2002	695	18.38–23.44	5,10	0,33	38,40	12,74
Meritev 2	1670	498	16.37–7.39	15,03	0,17	38,40	6,55
Meritev 3	1875	650	20.33–5.47	9,23	0,19	38,40	7,38
Povprečje					0,23		8,89

Razlaga simbolov: $C_{in}(0)$ – začetna koncentracija CO₂ v notranjem zraku, $C_{in}(t)$ – prva najnižja koncentracija CO₂ v notranjem zraku, t – čas, N_{inf} – število izmenjav zraka z infiltracijo skozi ovoj prostora, V_{neto} – neto volumen prostora, Q_{inf} – količina zraka, ki se izmenja z infiltracijo skozi ovoj prostora.

Iz preglednice 17 je razvidno, da rezultata meritve 1 odstopata od rezultatov meritev 2 in 3, tako po količini izmenjanega zraka Q_{inf} kot skladno s tem številu izmenjav zraka z infiltracijo skozi ovoj prostora N_{inf} . Število izmenjav zraka N_{inf} je pri meritvi 1 največje in znaša 0,33 h⁻¹ (12,74 m³h⁻¹), pri meritvah 2 in 3 je nižje, a zelo podobno, in sicer pri meritvi 2 je 0,17 h⁻¹ (6,55 m³h⁻¹) in pri meritvi 3 je 0,19 h⁻¹ (7,38 m³h⁻¹). Najvišja (meritev 1) in najnižja (meritev 2) N_{inf} se razlikujeta za faktor 1,94, pri meritvah 2 in 3 pa le za faktor 1,12. Povprečna N_{inf} na podlagi rezultatov treh meritev znaša 0,23 h⁻¹ (8,89 m³h⁻¹). Temperatura zraka v prostoru T_{in} se je pri vseh meritvah gibala okrog 21 °C, temperatura zunanjega zraka T_{out} pa se je med meritvami razlikovala. Najvišjo T_{out} (8–12 °C) smo zabeležili pri meritvi 2, in sicer ΔT ($T_{in}-T_{out}$) približno 9–13 °C. Hitrost vetra se je ves čas meritve 2 gibala okoli 0,5–1,5 ms⁻¹. Nekoliko nižjo T_{out} (5 °C) smo zabeležili pri meritvah 1 in 3, pri čemer je bila pri meritvi 1 hitrost vetra okrog 4 ms⁻¹, pri meritvi 3 pa 2 ms⁻¹ (ARSO, 2022). Kot omenjeno, je N_{inf} najnižji pri meritvi 2, kar lahko pojasnimo z najmanjšim ΔT , ki privede do manjše infiltracije/eksfiltracije zraka (Younes et al., 2011; Anis, 2016; Miller, 2019). Pri meritvah 1 in 3 je ΔT večji (okrog 16 °C) kot pri meritvi 2, zaradi česar je infiltracija/eksfiltracija zraka večja (večji N_{inf}). Najvišjo N_{inf} dosežemo pri meritvi 1, ko je bila zabeležena najvišja hitrost vetra (Younes et al., 2011; Anis, 2016; Saint-Gobain, 2018).

Povprečno število izmenjav zraka z infiltracijo skozi ovoj prostora N_{inf} je v stavbi 1 (S1-NT) za faktor 1,74 večje kot v stavbi 2 (S2-VT). Primerjava rezultatov N_{inf} obeh stavb nam jasno kaže, da se skozi ovoj prostora v stavbi 1 infiltrira večja količina zraka kot skozi ovoj prostora v stavbi 2. S tem smo dokazali, da je ovoj stavbe 1 manj zrakotesen od ovoja stavbe 2. Tudi odstopanja izračunanih N_{inf} med posameznimi meritvami v stavbi 1 so nekoliko večja kot odstopanja med rezultati meritev v stavbi 2. Zaradi slabše tesnosti stavbnega ovoja je namreč vpliv zunanjih dejavnikov (temperatura, tlak, veter) na infiltracijo zraka skozi ovoj prostora v stavbi 1 nekoliko večji kot v stavbi 2.

7 REZULTATI IZMERJENIH PARAMETROV V NEOGREVALNI SEZONI

Ključni parameter, ki ga obravnavamo v naši raziskavi, so številčne koncentracije delcev C_N velikosti 10–1000 nm in njihova velikostna porazdelitev d_{GM} . Idealno bi bilo, če bi C_N in d_{GM} merili kontinuirno istočasno v zunanjem in notranjem zraku (torej z dvema instrumentoma), ker pa smo imeli na voljo samo enega, smo raziskavo zasnovali tako, da smo izvajali meritve v prostoru pri odprtem ali zaprtem okno. Za tako imenovana 'odprta obdobja' (okno odprto) imamo približek C_N in d_{GM} v zunanjem zraku, za 'zaprta obdobja' (okno zaprto) pa C_N in d_{GM} v notranjem zraku (prostoru). Na grafih časovnih potekov so prikazani vsi izmerjeni parametri v zaprtih in odprtih obdobjih skupaj, in sicer imajo zaprta obdobja modro ozadje, odprta obdobja pa belo.

7.1 Odprta in zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)

Da lahko pojasnimo koncentracije delcev v zraku prostora v določenem času, je ključnega pomena poznavanje zunanjih razmer v tem času. Mednje spadajo temperatura zunanjega zraka (T_{out}), tlak zunanjega zraka (p), količina padavin (P) in hitrost vetra (v). Dosedanje raziskave ugotavljajo, da P znižajo koncentracijo delcev v ozračju, v pa koncentracijo delcev bodisi zniža bodisi zviša, T pa je obratno sorazmerna s koncentracijo delcev. To pomeni, da je ob nižjih T ozračja zabeležena višja koncentracija delcev (Zhang et al., 2016; Hernandez et al., 2017; Hussein et al., 2004, Hussein et al., 2019; Shi et al., 2007).

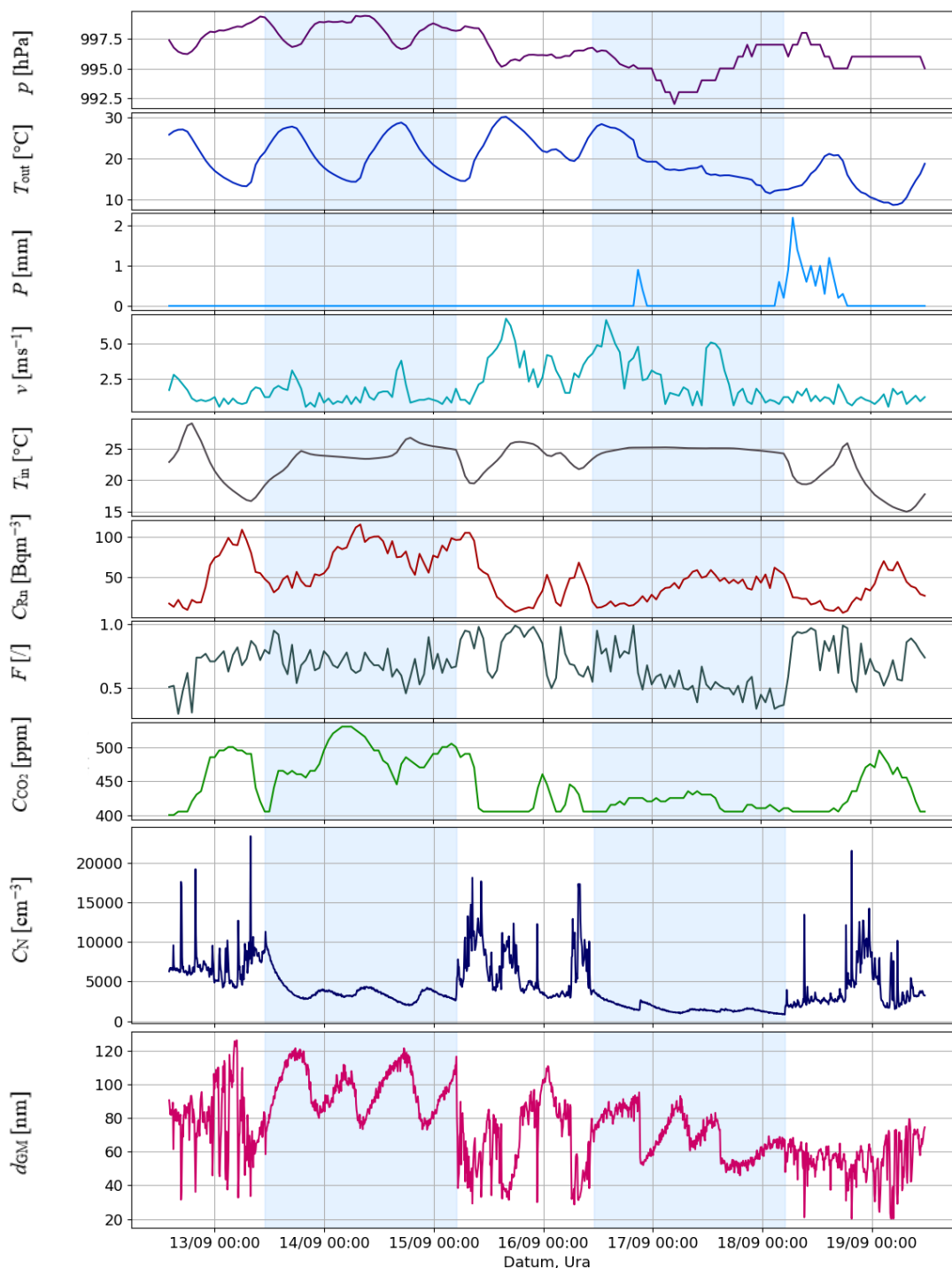
Podatke o količini padavin in hitrosti vetra smo pridobili na spletni strani ARSO za samodejno meteorološko postajo Cerklje ob Krki, ki je od stavbe 1 oddaljena približno 10 km (ARSO, 2022), ostale parametri smo izmerili sami.

Slika 18 prikazuje zunanje vremenske pogoje med izvajanjem meritev v neogrevalni sezoni v stavbi 1 (S1-NT). Tudi obdobja z modrim ozadjem na grafih se nanašajo na zunanje vremenske pogoje. Dnevna T_{out} se je v prvih dneh povzpela do 30 °C, od 17. 9. dalje, ko je bilo prisotno nekaj padavin, je padla na okrog 21 °C. Ponoči se je T_{out} gibala okrog 15 °C, tudi v času dežja pa ni padla pod 10 °C. Padavine so bile prisotne 17. 9. zvečer in nato 18. 9. ves dan, ko je padlo do 2 mm dežja. Zračni tlak se je v času izvajanja meritev gibal med 992 in 998 hPa. Veterovno je bilo med 15. in 17. 9., ko je hitrost vetra dosegla do 6 ms⁻¹. Preostale dni je veter pihal le s hitrostjo do 2,5 ms⁻¹.

Parametri, izmerjeni v zraku v prostoru, so prikazani na sliki 18. Sledijo si v naslednjem vrstnem redu: notranja temperatura zraka T_{in} , koncentracija radona C_{Rn} , ravnotežni faktor F (razmerje med koncentracijo RnP in Rn), koncentracija ogljikovega dioksida C_{CO_2} , številčna koncentracija delcev C_N in velikostna porazdelitev delcev d_{GM} . Potek T_{in} v odprtih obdobjih sledi poteku T_{out} . Ob pričetku zaprtih obdobj T_{in} najprej naraste (za 7 °C v prvem in za 3 °C v drugem zaprtem obdobju), nato pa se umiri na okoli 25 °C. C_{Rn} bi morala biti v zaprtih obdobjih predvidoma višja kot v odprtih obdobjih, vendar to ne drži v celoti. Ob vsakem zaprtju okna namreč C_{Rn} najprej pade za okrog 50 Bqm⁻³, nato pa naraste na približno enako C_{Rn} kot je v zunanjem zraku. V prvem zaprtem obdobju je to nekaj čez 100 Bqm⁻³ v drugem pa nekaj čez 50 Bqm⁻³. Delno se to zgodi zato, ker je pri pasivnih meritvah (difuzija) odziv merilnika z manjšim zamikom, predvsem pa zaradi slabše tesnosti stavbnega ovoja, ko je bolj izražen vpliv meteoroloških dejavnikov na C_{Rn} . Izmerjene maksimalne C_{Rn} tudi ne presegajo mejnih vrednosti

300 oz. 400 Bqm⁻³, kot jih navaja slovenska zakonodaja (poglavje 4.4.3, preglednica 5). F se v prvem zaprtem obdobju giblje od 0,5 do 0,9, kar je nekoliko višje od povprečja 0,3–0,6, ki ga navajamo v poglavju 4.4.1, v drugem zaprtem obdobju pa se F giblje v območju povprečja. C_{CO_2} v času odprtih obdobjih znaša med 400 in 500 ppm, kar privzamemo kot povprečno koncentracijo CO₂ v zunanjem zraku. V prvem zaprtem obdobju C_{CO_2} naraste na slabih 550 ppm, v drugem zaprtem obdobju pa se giblje med 400 in 430 ppm. Razliko v C_{CO_2} v zaprtih obdobjih pripisujemo vplivu zunanjih razmer (tlak, veter), ki zaradi slabše zrakotesnosti stavbe bolj vplivata na notranje razmere. V času drugega zaprtega obdobja je bil tlak nižji, prav tako je bilo bolj vetrovno, kot v času prvega zaprtega obdobja, zato je bil prehod zraka skozi stavbni ovoj v drugem zaprtem obdobju večji.

Na sliki 18 sta tudi časovna poteka C_N ter d_{GM} . Vidimo, da oba parametra v odprtih obdobjih zelo nihata. V odprtih obdobjih pade d_{GM} tudi na 20 nm, medtem ko v zaprtih obdobjih povprečni d_{GM} ni manjši od 45 nm. V prvem zaprtem obdobju je d_{GM} v povprečju večji kot v drugem; v prvem se giblje med 80 in 120 nm, v drugem pa med 45 in 90 nm. Do razlike v d_{GM} prihaja zato, ker so v različnih obdobjih v zunanjem zraku prisotni različno veliki delci. C_N je pričakovano v odprtih obdobjih najvišja, saj je takrat praktično enaka koncentraciji delcev v zunanjem zraku. V prvem zaprtem obdobju število delcev pade na 2000 do 4000 cm⁻³, v drugem zaprtem obdobju pa na 1000 do 3000 cm⁻³. Kot omenjeno v prejšnjem odstavku, je infiltracija zraka v drugem zaprtem obdobju večja, zaradi česar bi moralo biti v stavbi tudi več delcev. A zaradi vetra in nekaj dežja, ki sta bila prisotna v tem času, je delcev v zunanjem in posledično tudi notranjem zraku manj. Podroben opis obnašanja delcev sledi v poglavju 7.2.



Slika 18: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms⁻¹), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm⁻³), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_N , cm⁻³) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v neogrevalni sezoni stavbe 1 (S1-NT).

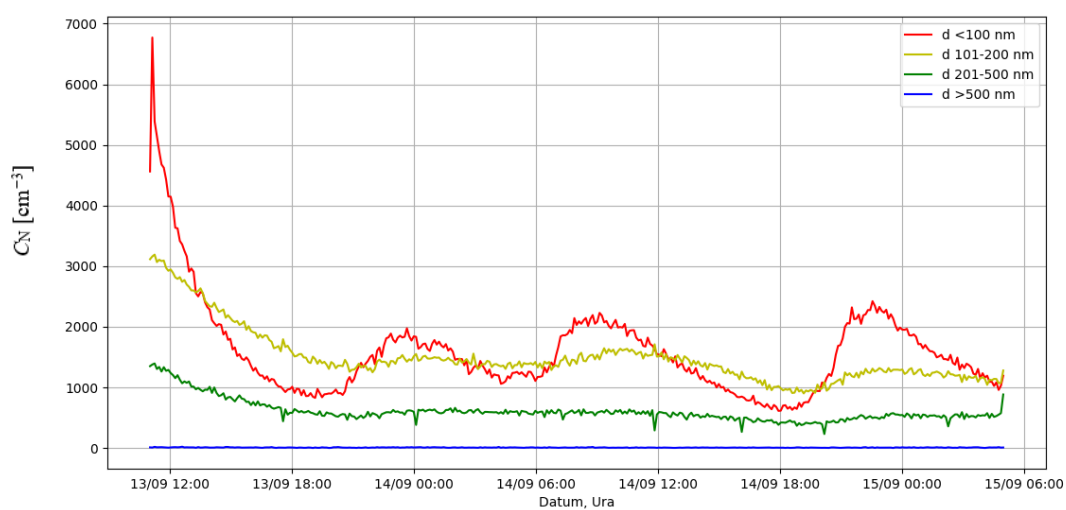
7.2 Zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)

Na sliki 19 je prikazan časovni potek koncentracije delcev štirih velikostnih razredov (frakcij) v 1. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT). Ti razredi so: $d < 100$ nm ($C_{N < 100}$), $101 < d < 200$ nm ($C_{N 100-200}$), $201 < d < 500$ nm ($C_{N 201-500}$), in $d > 500$ nm ($C_{N > 500}$). V opisu preglednice 18 smo podrobneje predstavili 3 spremembe, ki so se zgodile v tem obdobju. Začetek spremembe predstavlja čas, ko je številčna koncentracija delcev najnižja, konec spremembe je takrat, ko je koncentracija najvišja (preden ponovno začne padati). Kot vidimo v preglednici 18, se začetni in končni čas spremembe razlikujeta glede na velikost delcev. $C_{N > 500}$ je v zaprtim obdobju zelo nizka, praktično konstantna (slika 19), zato smo za časovni interval njihove spremembe upoštevali enak čas kot pri spremembi za $C_{N 201-500}$ (preglednica 18). Čas, v katerem naraste koncentracija delcev do končne (maksimalne) vrednosti, nam pove, koliko časa so delci določene velikosti potrebovali, da so se iz zunanosti infiltrirali skozi stavbni ovoj v prostor. Poleg koncentracij delcev različnih frakcij smo v preglednici 18 ob začetku in koncu spremembe prikazali tudi mikroklimatske parametre (T_{in} , T_{out} , p , v , P) ter kazalnike nekontroliranega prezračevanja (C_{Rn} , C_{CO2}), skupaj z F .

Porast številčne koncentracije delcev pri prvi spremembi v preglednici 18 pripisujemo znižanju T_{out} . Ob 19.07 je bila T_{out} 25,7 °C, ob 23.38 pa le še 17,8 °C. Kot navaja Zhang et al. (2016), nižja temperatura ozračja povzroči porast koncentracije delcev. Če pogledamo prvo spremembo v preglednici 18 in na sliki 19 vidimo, da začne $C_{N < 100}$ naraščati ob 19.07, ko znaša 827 cm⁻³, in doseže najvišjo vrednost čez 4,52 h, ko znaša 1975 cm⁻³, kar je za faktor 2,39 več. $C_{N 101-200}$ začne naraščati z zamikom, in sicer ob 20.49, ko znaša 1258 cm⁻³, doseže maksimum čez 3,18 h, ko znaša 1423 cm⁻³ je za tako končna koncentracija za faktor 1,23 višja od začetne. $C_{N 201-500}$ začne naraščati ob 20.42 (465 cm⁻³), da doseže svoj vrh pa traja dlje kot pri obeh manjših frakcijah, in sicer 5,30 h (662 cm⁻³). $C_{N 201-500}$ v tem času naraste za faktor 1,42. $C_{N > 500}$ znaša med 6 in 10 cm⁻³.

Do porasta številčne koncentracije delcev pri drugi spremembi (preglednica 18, slika 19) je prišlo zaradi večje gostote prometa v jutranjih urah, ko ljudje odhajajo na delo. Takrat se v zrak sprošča večja količina delcev, ki nastanejo pri obrabi pnevmatik in izgorevanju bencina in dizla motornih vozil (Young et al., 2004; Hernandez et al., 2017; Hussein et al., 2004; Klejnowski et al., 2013). Najbolj naraste $C_{N < 100}$, in sicer za faktor 2,01 (iz 1107 na 2229 cm⁻³). Omenjen porast se zgodi v 3,15 h (med 5.57 in 9.06). Pri $C_{N 101-200}$ zaznamo spremembo približno 45 min kasneje, ob 6.44, ko znaša 1286 cm⁻³, nato pa ob 9.20 naraste za faktor 1,28 na 1423 cm⁻³. Čas spremembe znaša 2,60 h. $C_{N 201-500}$ prične naraščati še kasneje, ob 7.18, takrat znaša 469 cm⁻³, maksimum doseže ob 10.34, ko znaša 637 cm⁻³. To pomeni, da $C_{N 201-500}$ v času 3,27 h naraste za faktor 1,36. $C_{N > 500}$ zaradi usedanja delcev med spremembo pade iz začetnih 7 cm⁻³ na 1 cm⁻³.

Porast številčne koncentracije delcev je še večji pri spremembi 3 (preglednica 18, slika 19). Ta porast števila delcev pripisujemo nižji T_{out} (Zhang et al., 2016). Zgodi se v večernih urah, med 17.54, ko je T_{out} 27,9 °C, in 22.32, ko T_{out} pade na 19,6 °C. $C_{N < 100}$ v 4,63 h naraste za faktor 3,95 in, sicer iz začetnih 613 cm⁻³ ob 17.54, na 2422 cm⁻³ ob 22.32. $C_{N 101-200}$ začne naraščati dobro uro kasneje, ob 19.09, ko znaša 901 cm⁻³. Maksimalno vrednost doseže $C_{N 101-200}$ ob 23.19, ko znaša 1319 cm⁻³, kar pomeni, da je v 4,16 h narasla za faktor 1,46. $C_{N 201-500}$ začne naraščati ob 18.48, takrat znaša 367 cm⁻³. V času 4,73 h tako naraste za faktor 1,57. Izjema je $C_{N > 500}$, ki pade iz 11 na 1 cm⁻³, kar pripisujemo usedanju delcev.



Slika 19: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v neogrevalni sezoni.

Preglednica 18: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).

		SPREMEMBA 1				
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz (faktor spremembe)
	13. 9. 2021		13. 9. 2021 (po 00:00 je datum 14. 9. 2021)			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	19.07	827	23.38	1975	4,52	2,39
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	20.49	1258	00.05	1423	3,18	1,23
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	20.42	465	2.00	662	5,30	1,42
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	20.42	6	2.00	10	5,30	1,66
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	19.07	45	23.38	54	4,52	1,21
F [/]		0,68		0,79		1,16
C_{CO_2} [ppm]		460		495		1,08
T_{in} [°C]		24,6		23,9		0,97
T_{out} [°C]		25,7		17,8		0,69
p [hPa]		997		998		1,00
v [ms ⁻¹]		1,8		0,8		0,44
P [mm]		0		0		1,00
		SPREMEMBA 2				
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	14. 9. 2021		14. 9. 2021			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	5.57	1107	9.06	2229	3,15	2,01
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	6.44	1286	9.20	1645	2,60	1,28
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	7.18	469	10.34	637	3,27	1,36
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	7.18	7	10.34	1	3,27	0,14
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	5.57	100	9.06	93	3,15	0,93
F [/]		0,65		0,78		1,20
C_{CO_2} [ppm]		530		515		0,97
T_{in} [°C]		23,5		23,4		0,99
T_{out} [°C]		14,4		18,7		1,30
p [hPa]		998		999		1,00
v [ms ⁻¹]		0,7		1,9		2,71
P [mm]		0		0		1,00
		SPREMEMBA 3				
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	14. 9. 2021		14. 9. 2021			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	17.54	613	22.32	2422	4,63	3,95
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	19.09	901	23.19	1319	4,16	1,46
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	18.48	367	23.32	575	4,73	1,57
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	18.48	11	23.32	1	4,73	0,09
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	17.54	81	22.32	55	4,63	0,68
F [/]		0,46		0,90		1,96
C_{CO_2} [ppm]		485		480		0,99
T_{in} [°C]		26,4		25,5		0,96
T_{out} [°C]		27,9		19,6		0,70
p [hPa]		997		999		1,00
v [ms ⁻¹]		2,1		1,1		0,52
P [mm]		0		0		1,00

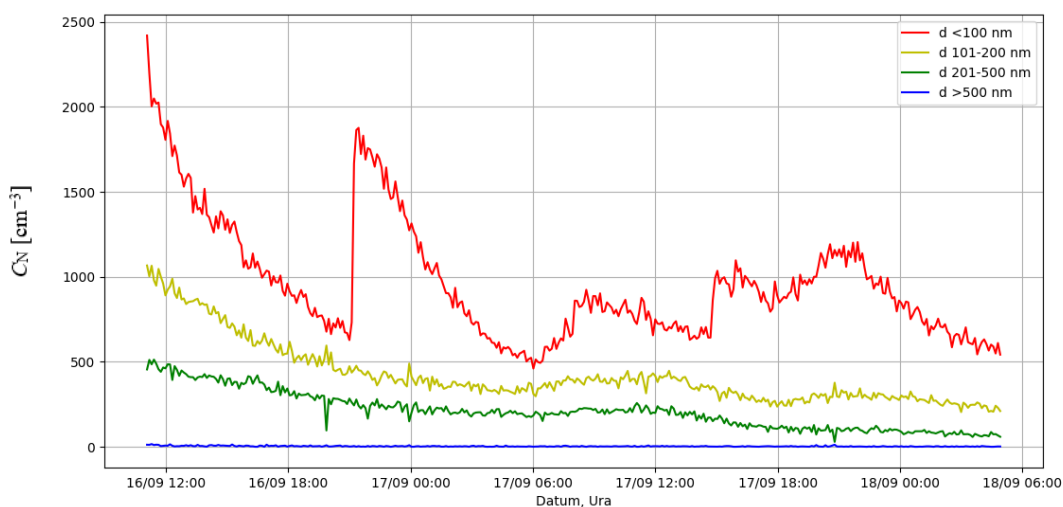
Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm⁻³], C_{Rn} – koncentracija radona Rn [Bqm⁻³], F – faktor ravnotežja med radonom in produkti [/], C_{CO_2} – koncentracija CO_2 [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [°C], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms⁻¹], P – količina padavin [mm].

Kot vidimo na sliki 20, imamo v drugem zaprtem obdobju, dne 16. 9. ob 21.00, nenaden skok $C_{N<100}$ na 1800 cm^{-3} , ki začne takoj upadati. Ostale frakcije delcev v tem času ne beležijo porasta. Ta skok $C_{N<100}$ zato pripisujemo aktivnosti znotraj stavbe, ki se je verjetno zgodila v času porasta. Na sliki 20 opazimo še 2 postopni spremembi oziroma porasta delcev, ki sta podrobneje analizirana v opisu preglednice 19.

Do prve spremembe $C_{N<100}$, prikazane v preglednici 19 (slika 20), pride med 6.01 in 8.36 zjutraj. V 2,58 h $C_{N<100}$ naraste za faktor 2,0, in sicer iz 461 na 924 cm^{-3} . Skoraj sočasno, ob 6.07, prične naraščati tudi $C_{N\ 101-200}$ (298 cm^{-3}), ki doseže maksimum ob 10.38 (447 cm^{-3}), kar je 4,52 h kasneje. Ob 6.28 začne naraščati tudi $C_{N\ 201-500}$, ki iz 152 cm^{-3} naraste na 258 cm^{-3} ob 11:05. Porast za faktor 1,70 se zgodi v 4,62 h. $C_{N>500}$ ostane skoraj enaka, variira med 3 in 1 cm^{-3} . Porast navedenih frakcij je posledica prometa (jutranji odhodi v službo) (Young et al., 2004; Hussein et al., 2004; Klejnowski et al., 2013; Hernandez et al., 2017).

Začetek druge spremembe $C_{N<100}$ (preglednica 19, slika 20) zaznamo ob 17.38 (795 cm^{-3}), konec pa ob 21.41 (1202 cm^{-3}). $C_{N<100}$ se poveča za faktor 1,51, naraščanje traja 4,01 h. 20 min kasneje, ob 17.58, začne naraščati tudi $C_{N\ 101-200}$ (236 cm^{-3}). Narašča vse do 20.47 (2,82 h), ko znaša 377 cm^{-3} , faktor povečanja je 1,60. Pred obema omenjenima frakcijama, ob 17.31, zabeležimo porast $C_{N\ 201-500}$, ki takrat znaša 88 cm^{-3} , ob 22.49 doseže maksimalno vrednost 124 cm^{-3} , kar je v 5,30 h, faktor poraste je 1,41. $C_{N>500}$ je vseskozi nizka, iz 4 pade na 1 cm^{-3} . Na splošno je število delcev $>500\text{ nm}$ pri vseh meritvah nizko, saj se ti večji delci hitreje posedajo. Tudi drugo spremembo delcev pripisujemo prometu (odhodom iz službe) (Young et al., 2004; Hussein et al., 2004; Klejnowski et al., 2013; Hernandez et al., 2017).

Če primerjamo sliko 19 (1. zaprto obdobje) in sliko 20 (2. zaprto obdobje), vidimo, da so v 2. zaprtem obdobju koncentracije delcev vseh frakcij v povprečju nižje. Razlog za to je v vremenu, saj je od 16. 9. od 20.00 do 17. 9. do 18.00 deževalo. Dež spira delce iz ozračja, zato je tudi njihova koncentracija v prostoru nižja (Young et al., 2004).



Slika 20: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v neogrevalni sezoni.

Preglednica 19: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).

SPREMEMBA 1						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	17. 9. 2021		17. 9. 2021			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	6.01	461	8.36	924	2,58	2,00
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	6.07	298	10.38	447	4,52	1,50
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	6.28	152	11.05	258	4,62	1,70
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	6.28	3	11.05	1	4,62	0,33
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	6.01	36	8.36	57	2,58	1,58
F [/]		0,64		0,52		0,81
C_{CO2} [ppm]		425		430		1,01
T_{in} [°C]		25,1		25,1		1,00
T_{out} [°C]		17,1		17,6		1,03
p [hPa]		993		993		1,00
v [ms ⁻¹]		1,3		0,6		0,46
P [mm]		0,2		0,2		1,00
SPREMEMBA 2						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	17. 9. 2021		17. 9. 2021			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	17.38	795	21.41	1202	4,01	1,51
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	17.58	236	20.47	377	2,82	1,60
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	17.31	88	22.49	124	5,30	1,41
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	17.31	4	22.49	1	5,30	0,25
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	17.38	47	21.41	34	4,01	0,72
F [/]		0,45		0,59		1,31
C_{CO2} [ppm]		405		415		1,02
T_{in} [°C]		25,0		24,8		0,99
T_{out} [°C]		15,7		14,8		0,94
p [hPa]		995		996		1,00
v [ms ⁻¹]		0,6		0,7		1,17
P [mm]		0,2		0,2		1,00

Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm^{-3}], C_{Rn} – koncentracija Rn [Bqm^{-3}], F – faktor ravnotežja med Rn in RnP [/], C_{CO_2} – koncentracija CO_2 [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [$^{\circ}\text{C}$], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms^{-1}], P – količina padavin [mm].

7.3 Odprta in zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)

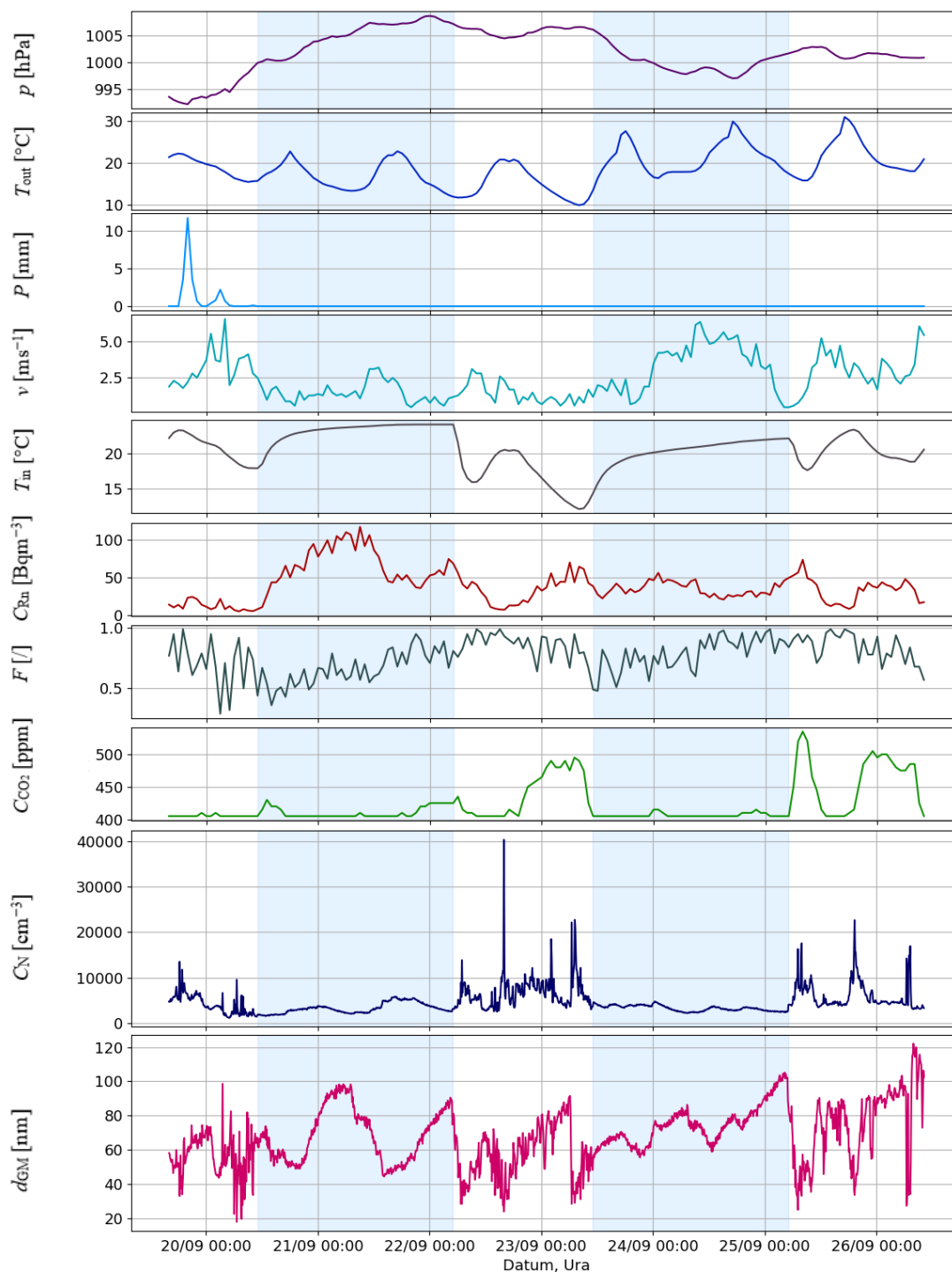
Slika 21 kaže časovni potek vseh parametrov (na začetku poglavja 7.1 smo podali njihov kratek opis pri stavbo 1), ki smo jih merili med odprtimi in zaprtimi obdobji v neogrevalni sezoni v stavbi 2 (S2-VT). Tudi tukaj imajo na grafih zaprta obdobja svetlo modro ozadje, odprta obdobja pa belo ozadje. Podatke o količini padavin in hitrosti vetra smo pridobili na spletni strani ARSO za samodejno meteorološko postajo Cerklje ob Krki, ki je od stavbe 2 oddaljena približno 10 km (ARSO, 2022).

Prvih pet grafov na sliki 21 kaže spreminjanje p , T_{out} , P , v in T_{in} . Dne 19. 9. proti večeru zabeležimo do 10 mm padavin, hkrati imamo takrat tudi najnižji p , ki se giblje med 990 in 995 hPa. Padavine 20. 9. dopoldne prenehajo, naraščati prične tudi p , vse do 1010 hPa. Med 19. 9. in 22. 9. se dnevna T_{out} giblje do 23 °C, ponoči pade do 12 °C. V naslednjih dneh T_{out} podnevi naraste do 31 °C, ponoči pade na okrog 17 °C. T_{in} v odprtih obdobjih sledi poteku T_{out} . V prvem zaprtem obdobju T_{in} najprej naraste na 23 °C, nato je do konca zaprtega obdobja skoraj konstanta, saj se poviša le od 24 °C. Ob začetku drugega zaprtega obdobja T_{in} naraste na 20 °C, nato do konca zaprtega obdobja rahlo narašča, vse do 22 °C. Močnejši veter smo zabeležili v noči iz 19. na 20. 9., vetrovno pa je bilo tudi obdobje med 24. in 26. 9., v obeh primerih je veter dosegel hitrost do 6,5 ms⁻¹.

Naslednji parameter na sliki 21 je C_{CO_2} , ki v prvem odprtem obdobju znaša okrog 400 ppm, v prvem zaprtem obdobju najprej naraste na okrog 430 ppm, nato pade na 400 ppm in proti koncu zopet naraste na do 430 ppm. Zaradi tesnejšega ovoja stavbe 2 so nihanja v koncentraciji znotraj zaprtega obdobja zelo majhna, in sicer le do 30 ppm. Do njih prihaja zaradi občasne prisotnosti ljudi na hodniku pred sobo, kjer smo izvajali meritve. Zaradi netesnih vrat med sobo in hodnikom poteka izmenjava zraka med obema prostoroma. V drugem odprtem obdobju C_{CO_2} niha med 400 in 490 ppm, vrh doseže 23. 9. v zgodnjih jutranjih urah, nato pa prične zopet padati in pred drugim zaprtjem znaša le še 425 ppm. V drugem zaprtem obdobju je koncentracija skoraj konstantna, niha med 400 in 430 ppm, kar je podobna vrednost, kot smo jo zabeležili pred zaprtjem okna. Tako smo še dodatno potrdili, da ima stavba 2 bolj tesen stavbni ovoj, kar smo dokazali z izračunom N_{inf} (poglavje 6.2), ki zagotavlja razmeroma konstantne notranje pogoje. Na sliki 21 nato sledita C_{Rn} in F . Vidimo, da C_{Rn} v prvem zaprtem obdobju niha med 50 in 110 Bqm⁻³ v drugem pa med 22 in 56 Bqm⁻³, s čimer ne presega priporočenih mejnih vrednosti 300 oz. 400 Bqm⁻³, ki jih navaja slovenska zakonodaja (poglavje 4.4.3, preglednica 5). Zaradi boljše zrakotesnosti stavbe bi pričakovali, da bo koncentracija radona v obeh zaprtih obdobjih višja kot v odprtih. To lahko potrdimo le za prvo zaprto obdobje, v drugem pa je koncentracija v prostoru podobna zunanji. Ker smo imeli v drugem obdobju padec zračnega tlaka in večjo razliko med najvišjo in najnižjo dnevno T_{out} , predvidevamo, da je glavni vir Rn ekshalacija iz sten, saj je koncentracija relativno nizka in dokaj konstantna, visok F pa pove, da zrak v prostoru ni svež, kar zopet potrjuje dobro zrakotesnost ovoja.

Zadnja dva parametra na sliki 21 sta C_N in d_{GM} . Časovni potek C_N kaže v obeh zaprtih obdobjih podoben trend, giblje se med 1500 in 5500 cm⁻³. V odprtih obdobjih je C_N predvsem odraz prometa in vremenskih sprememb in zato bolj niha kot v zaprtih obdobjih. Maksimumi dosegajo do 40000 cm⁻³, a zopet hitro padejo na do 3000 cm⁻³. Tudi d_{GM} v odprtih obdobjih izrazito variira, imamo hitre spremembe med 20 in 120 nm, v zaprtih obdobjih so nihanja postopna, v prvem zaprtem obdobju se d_{GM} giblje med 45 in

100 nm, v drugem pa med 57 in 105 nm. Različne velikosti delcev nakazujejo na njihov različen izvor, kar je natančneje razloženo v poglavju 7.4.



Slika 21: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms^{-1}), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm^{-3}), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_N , cm^{-3}) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v neogrevalni sezoni stavbe 2 (S2-VT).

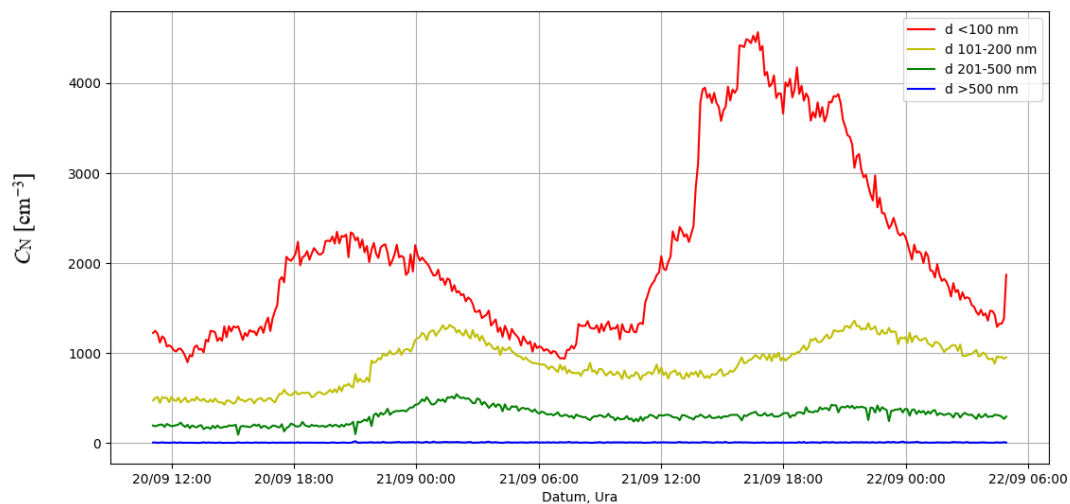
7.4 Zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)

Kot smo razložili že na začetku poglavja 7.2 za stavbo 1, smo koncentracije delcev v zaprtih obdobjih razdelili v štiri velikostne razrede (frakcije), glede na velikost njihovega premera. Ti razredi so: $d < 100$ nm ($C_{N < 100}$), $101 < d < 200$ nm ($C_{N 100-200}$), $201 < d < 500$ nm ($C_{N 201-500}$), in $d > 500$ nm ($C_{N > 500}$). Časovni potek njihovih številčnih koncentracij C_N smo grafično prikazali za prvo (slika 22) in drugo (slika 23) zaprto obdobje neogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT). Za obe zaprta obdobja smo večje spremembe C_N za vse frakcije podrobneje analizirali, in sicer podajamo rezultate v preglednici 20 za prvo in v preglednici 21 za drugo zaprto obdobje.

Če se osredotočimo na prvo zaprto obdobje (slika 22), vidimo, da sta bili prisotni dve večji spremembi v številčni koncentraciji delcev (preglednica 20). Kot kaže preglednica 20, se prva sprememba $C_{N < 100}$ začne ob 13.00, ko je koncentracija 962 cm^{-3} , končna pa 20.47, ko je 2340 cm^{-3} , kar je ob koncu za faktor 2,43 več kot na začetku. Najvišjo vrednost doseže po 8,78 h. $C_{N 101-200}$ začne naraščati uro in pol kasneje, ob 14.35, ko je koncentracija 426 cm^{-3} , in doseže maksimalno vrednost naslednji dan ob 1.17 zjutraj, ko je 1309 cm^{-3} . Koncentracija torej naraste za faktor 3,07 v 11,87 h. Začetek naraščanja $C_{N 201-500}$ zabeležimo šele ob 17.30, ko je 129 cm^{-3} , nato raste vse do naslednjega dne do 1.58 zjutraj, ko doseže maksimalno koncentracijo 543 cm^{-3} . To nam pove koncentracija v 8,47 h naraste za faktor 4,21. V tem času se nekoliko poviša tudi $C_{N > 500}$, in sicer iz začetnih $3 \text{ na } 11 \text{ cm}^{-3}$.

Druga sprememba $C_{N < 100}$ v prvem zaprtem obdobju (preglednica 20) se začne ob 7.16, ko znaša koncentracija 936 cm^{-3} , maksimalna je dosežena čez 7,33 h, ob 14.36, ko je 3891 cm^{-3} . Koncentracija je narasla za faktor 4,16. $C_{N 101-200}$ začne naraščati skoraj štiri ure kasneje, ob 10.59, ko je 702 cm^{-3} . Nato narašča 10,50 h, vse do 21.29, ko doseže svojo končno koncentracijo 1359 cm^{-3} , ki je od začetne višja za faktor 1,94. Ob 10.39 zaznamo tudi naraščanje $C_{N 201-500}$, ki iz začetnih 239 cm^{-3} naraste na končnih 418 cm^{-3} . Končno koncentracijo, ki je od začetne višja za faktor 1,75, imamo čez 9,28 h (ob 20.28). $C_{N > 500}$ se ne spremeni bistveno, iz 4 naraste na 9 cm^{-3} .

Glede na to, da se v pritličju stavbe 2 nahaja restavracija s kuhinjo, obe spremembi številčne koncentracije delcev (preglednica 20) pripisujemo delcem, ki nastanejo pri kuhanju in pečenju na plinskem štedilniku (Wallace et al., 2004; Vu et al., 2015) in se infiltrirajo v prostor. Poleg kuhanja porast koncentracije pri obeh spremembah pripisujemo tudi delcem, nastalim zaradi povečanega prometa (odhod iz službe) (Young et al., 2004; Hussein et al., 2004; Klejnowski et al., 2013; Hernandez et al., 2017).



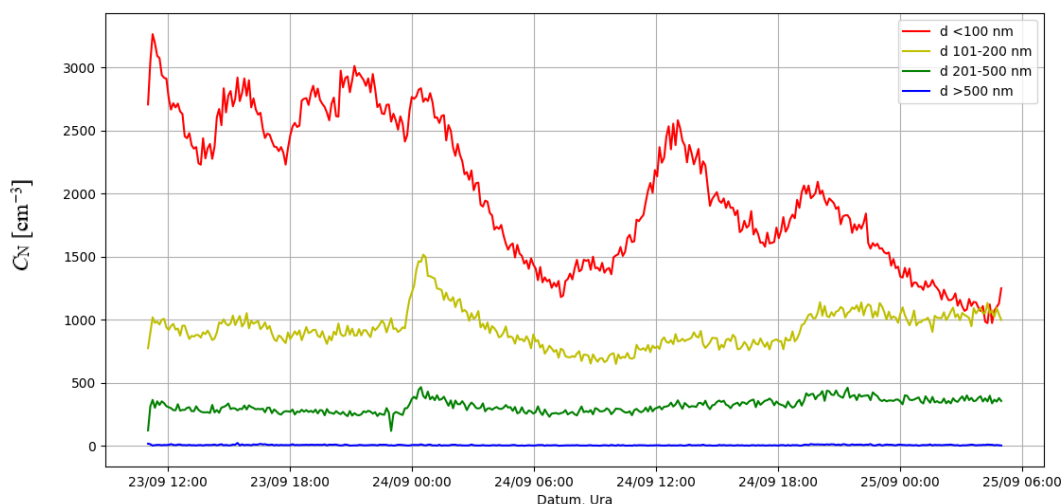
Slika 22: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v neogrevalni sezoni.

Preglednica 20: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).

SPREMEMBA 1						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	20. 9. 2021		20. 9. 2021 (po 00:00 je datum 21. 9. 2021)			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	13.00	962	20.47	2340	8,78	2,43
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	14.35	426	1.17	1309	11,87	3,07
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	17.30	129	1.58	543	8,47	4,21
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	17.30	3	1.58	11	8,47	3,67
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	13.00	27	20.47	60	8,78	2,22
F [/]		0,54		0,66		1,22
C_{CO_2} [ppm]		430		405		0,94
T_{in} [°C]		19,9		23,1		1,16
T_{out} [°C]		17,5		18,7		1,07
p [hPa]		1000		1003		1,00
v [ms ⁻¹]		1,0		1,0		1,00
P [mm]		0		0		1,00
SPREMEMBA 2						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	21. 9. 2021		21. 9. 2021			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	7.16	936	14.36	3891	7,33	4,16
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	10.59	702	21.29	1359	10,50	1,94
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	10.39	239	20.28	418	9,82	1,75
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	10.39	4	20.28	9	9,82	2,25
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	7.16	107	14.36	45	7,33	0,42
F [/]		0,60		0,82		1,37
C_{CO_2} [ppm]		405		405		1,00
T_{in} [°C]		23,7		24,0		1,01
T_{out} [°C]		13,4		21,8		1,63
p [hPa]		1005		1007		1,00
v [ms ⁻¹]		1,4		2,2		1,57
P [mm]		0		0		1,00

Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm⁻³], C_{Rn} – koncentracija R_n [Bqm⁻³], F – faktor ravnotežja med R_n in R_{nP} [/], C_{CO_2} – koncentracija CO₂ [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [°C], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms⁻¹], P – količina padavin [mm].

Potek številčne koncentracije delcev v drugem zaprtem obdobju stavbe 2 v neogrevalni sezoni je prikazan na sliki 23. Kot vidimo, je potek koncentracij delcev, še posebej $C_{N<100}$ in $C_{N\ 101-200}$, zelo razgiban. Razlog je verjetno prisotnost delcev, ki nastanejo pri kuhanju in pečenju na plinskem štedilniku (Wallace et al., 2004; Vu et al., 2015). Kuhinja restavracije je podnevi različno obremenjena, zato se ob različnih urah v ozračje in posledično tudi v prostor sprošča različno število delcev. Največjo spremembo $C_{N<100}$ zaznamo 24. 9. ob 7.20. Kot je predstavljeno v preglednici 21, $C_{N<100}$ takrat znaša 1179 cm⁻³, nato narašča do 13.05, ko doseže vrednost 2582 cm⁻³. To pomeni povišanje za faktor 2,19 v 5,75 h. Ob 10.02 začne naraščati tudi $C_{N\ 101-200}$, ki znaša takrat 650 cm⁻³, nato narašča do koncentracije 1139 cm⁻³, kar se zgodi ob 20.05, kar je čez 10,05 h, faktor povišanja je 1,75. Prva izmed frakcij, ki začne naraščati, je $C_{N\ 201-500}$, saj že ob 6.46 iz začetnih 231 cm⁻³ naraste na 461 cm⁻³, kar doseže ob 21.26, in v 13,67 h tako naraste za faktor 2,0. $C_{N>500}$ v času spremembe naraste iz 3 na 5 cm⁻³, kar pomeni, da je konstantna.



Slika 23: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v neogrevalni sezoni.

Preglednica 21: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju neogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).

	SPREMEMBA 1					
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	24. 9. 2021		24. 9. 2021			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	7:20	1179	13:05	2582	5,75	2,19
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	10:02	650	20:05	1139	10,05	1,75
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	6:46	231	21:26	461	13,67	2,00
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	6:46	3	21:26	5	13,67	1,67
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	7:20	38	13:05	29	5,75	0,76
F [/]		0,84		0,82		0,98
C_{CO2} [ppm]		405		405		1,00
T_{in} [°C]		20,7		21,2		1,02
T_{out} [°C]		17,9		23,6		1,32
p [hPa]		998		999		1,00
v [ms ⁻¹]		4,7		4,9		1,04
P [mm]		0		0		1,00

Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm⁻³], C_{Rn} – koncentracija R_n [Bqm⁻³], F – faktor ravnotežja med R_n in R_{nP} [/], C_{CO_2} – koncentracija CO₂ [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [°C], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms⁻¹], P – količina padavin [mm].

8 REZULTATI IZMERJENIH PARAMETROV V OGREVALNI SEZONI

8.1 Odprta in zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)

Rezultati meritev v stavbi 1 (S1-NT) med ogrevalno sezono so prikazani na sliki 24. Kot na slikah 18 in 21 imajo tudi na sliki 24 zaprta obdobja svetlo modro ozadje, odprta obdobja pa belo ozadje. Podatke o količini padavin in hitrosti vetra smo pridobili na spletni strani ARSO za samodejno meteorološko postajo Cerklje ob Krki, ki je od stavbe 1 oddaljena približno 10 km (ARSO, 2022).

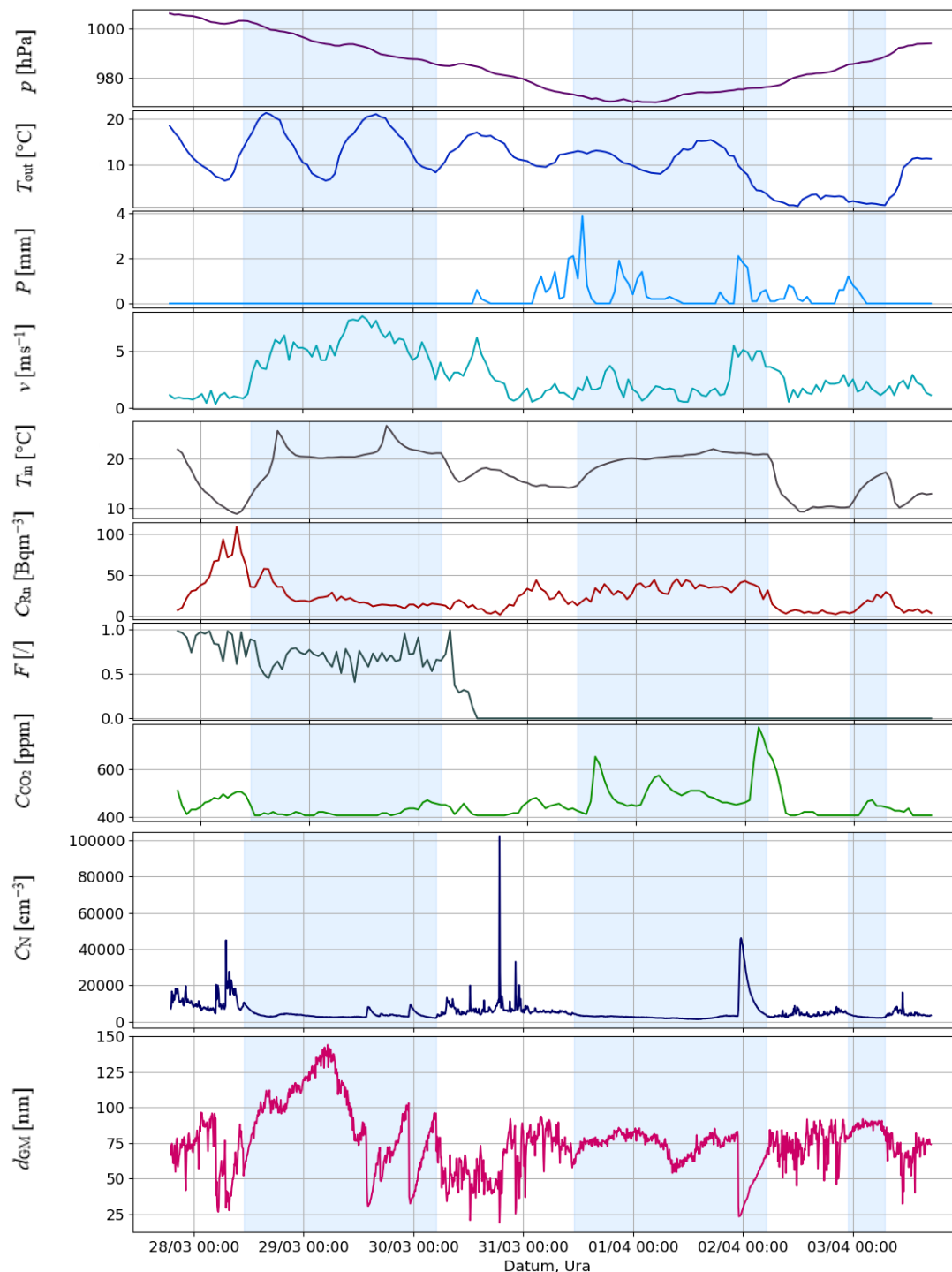
Na sliki 24 poleg predvidenih 2 zaprtih obdobji opazimo še eno krajše zaprto obdobje. Slednje traja od sobote, 2. 4., ob 23.00 do nedelje, 3. 4. 2022, ob 7.00. To je bilo ponoči, ko smo zaradi nepredvidljivih vremenskih razmer (bojazni, da se bosta krepila veter in dež) preventivno zaprli okno v izogib morebitnemu padanju dežja v prostor. Ker je to zaprto obdobje nepredvideno in kratko, zanj nismo izvedli podrobnejše analize rezultatov, kot smo jo izvedli za vsa ostala zaprta obdobja.

T_{out} je med izvajanjem meritve precej nihala (slika 24). Vidimo, da se je v ponedeljek, 28. 3., in torek, 29. 3., ponoči spustila do 5 °C, podnevi pa narasle na dobrih 20 °C. Najvišje dnevne T_{out} dne 30. in 31. 3. ter 1. 4. so bile med 11 in 17 °C. V soboto, 2. 4., se je ozračje ohladilo, T_{out} se je tako podnevi kot tudi ponoči gibala med 1 in 4 °C. T_{in} je med odprtimi obdobji sledila poteku T_{out} . V času prvega zaprtega obdobja je T_{in} dvakrat narasla na okrog 26 °C in nato spet padla na okrog 20 °C. V drugem zaprtem obdobju je T_{in} prav tako najprej narasla na 20 °C ter nato nihala okrog 22 °C. Zračni tlak se je gibal med 1007 in 970 hPa. Rahle padavine, do 0,6 mm, so se pojavile v popoldanskem času dne 30. 3. in se z vmesnimi prekinitvami nadaljevale skozi celotno 2. zaprto obdobje. Takrat je med najbolj obilnim deževanjem padlo do 4 mm dežja. Proti koncu 2. zaprtega obdobja, dne 2. 4., smo bili namesto dežja deležni do 0,8 mm snežnih padavin, ki jih je proti večeru zopet zamenjal dež. Slednji je vztrajal do 3. 4. do okrog 2.00 zjutraj. Veter hitrosti med slabih 5 in dobrih 8 ms⁻¹ beležimo skozi celotno prvo zaprto obdobje. Ponovno se okrepi tudi konec drugega zaprtega obdobja, ko je njegova hitrost do 5 ms⁻¹.

Na sliki 24 so prikazani tudi C_{Rn} , F in C_{CO_2} . Zaradi tehnične težave z merilnikom AlphaPM (meri koncentracijo radonovih produktov RnP), v obdobju od 30. 3. od 13.00 ure dalje ni več beležil podatkov, zaradi česar za to obdobje nimamo poteka F . C_{Rn} se v prvem zaprtem obdobju giblje med 10 in 60 Bqm⁻³, v drugem pa med 20 in 45 Bqm⁻³, s čimer ne presega priporočenih mejnih vrednosti 300 oz. 400 Bqm⁻³, ki jih navaja slovenska zakonodaja (poglavje 4.4.3, preglednica 5). V odprtih obdobjih je C_{Rn} nižja ali podobna kot v zaprtih obdobjih. Izjema je le prvo odprto obdobje, ko C_{Rn} naraste do 108 Bqm⁻³ (to se zgodi zelo redko), kar za 8 Bqm⁻³ presega mejo, ki jo WHO navaja kot priporočeno vrednost za Rn v zraku (poglavje 4.4.3, preglednica 5). F se v prvem zaprtem obdobju giblje med 0,5 in 0,9, kar je več od povprečja, ki ga omenjeno v poglavju 4.4.1 in znaša med 0,3 in 0,6. Visok F kaže na dobro zrakotesnost ovoja. C_{CO_2} v notranjem zraku se v prvem zaprtem obdobju giblje med 405 in 420 ppm, v drugem zaprtem obdobju pa med 410 in 780 ppm. Odprta obdobja odražajo C_{CO_2} , ki je prisotna v zunanjem zraku in znaša od 400 pa vse do 500 ppm.

Številčna koncentracija delcev C_N je v odprtih obdobjih višja kot v zaprtih (slika 24). V odprtih obdobjih znaša med 5000 in 20000 cm⁻³, 28. 3. in 30. 3. v večernih urah pa se je dvignila na dobrih 40000 oz. 100000 delcev cm⁻³. V prvem zaprtem obdobju se C_N giblje med 2000 in 9000 delci cm⁻³, v drugem pa

med 1200 in 4000 delci cm^{-3} . Izjema se zgodi le v noči iz 1. na 2. 4., ko C_N v 30 min zraste na 46000 cm^{-3} . Tudi d_{GM} je v širokem razponu, med odprtimi obdobji znaša 25–95 nm, v prvem zaprtem obdobju 30–140 nm, v drugem pa 25–85 nm.

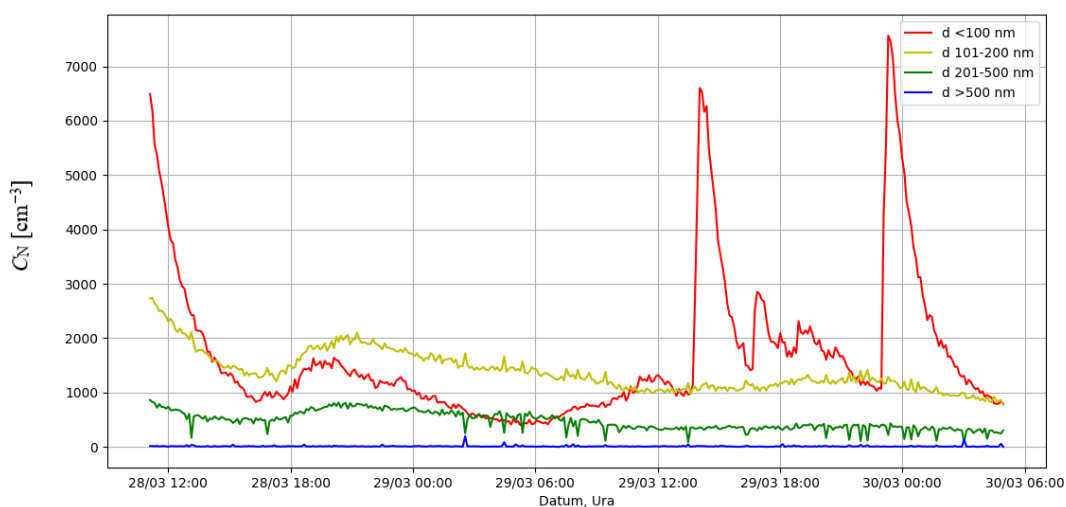


Slika 24: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms^{-1}), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm^{-3}), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_N , cm^{-3}) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v ogrevalni sezoni stavbe 1 (S1-NT).

8.2 Zaprta obdobja v stavbi 1 (S1-NT)

Tako kot pri analizi številčne koncentracije delcev C_N v neogrevalni sezoni smo tudi za zaprta obdobja ogrevalne sezone razdelili delce v štiri velikostne razrede (frakcije), in sicer: $d < 100$ nm ($C_{N < 100}$), $101 < d < 200$ nm ($C_{N 101-200}$), $201 < d < 500$ nm ($C_{N 201-500}$), in $d > 500$ nm ($C_{N > 500}$). Potek vseh frakcij C_N v stavbi 1 (S1-NT) med prvim obdobjem ogrevalne sezone je prikazan na sliki 25. Kot je razvidno v preglednici 22, smo izluščili 2 spremembi delcev, ki se zgodita v tem času. V času prve sprememba se začne porast $C_{N < 100}$ 28. 3., ko ob 16.17 iz 824 cm^{-3} naraste ob 20.07 na 1640 cm^{-3} , kar je za faktor 1,99 več in se zgodi v 3,83 h. Eno uro kasneje, ob 17.18, začne naraščati tudi $C_{N 101-200}$. Začetna koncentracija 1205 cm^{-3} v 3,95 h naraste za faktor 1,74 in ob 21.15 znaša 2101 cm^{-3} . $C_{N 201-500}$ ob 16.51 znaša 230 cm^{-3} , ob 20.21 pa 815 cm^{-3} , kar pomeni, da v 3,50 h naraste za faktor 3,54. $C_{N > 500}$ se ne spremeni bistveno, ob začetku spremembe znaša 11 ob koncu pa 9 cm^{-3} . Vidimo, da se med prvo spremembo najbolj poveča $C_{N 201-500}$, zato povišanje prej pripišemo delcem, ki so nastali pri ogrevanju stavb (Bolling Kochbach et al., 2009) kot delcem, ki so nastali zaradi povečanega prometa v popoldanskih urah (izgorevanje bencina in dizla, obraba pnevmatik) (Young et al., 2004; Hussein et al., 2004; Klejnowski et al., 2013; Hernandez et al., 2017).

Druga sprememba C_N , prikazana v preglednici 22, je nastala zaradi prisotnosti puščavskega prahu, ki ga je veter med 29. in 30. 3. iz Sahare prinesel nad osrednjo Evropo. Za začetek in konec spremembe $C_{N < 100}$ smo privzeli prvi interval, kjer koncentracija postopoma naraste. To se zgodi 29. 3. ob 5.15, ko znaša 401 cm^{-3} in nato narašča vse do 12.01, ko znaša 1321 cm^{-3} ; to pomeni, da v 6,77 h naraste za faktor 3,29. Kot lahko vidimo na sliki 25, tej spremembi $C_{N < 100}$ sledi še nekaj naraščanj in padanj koncentracije, ki pa jih zato, ker so tako nenadni, ne moremo uvrstiti med časovne spremembe. $C_{N 101-200}$ začne naraščati kasneje, ob 13.36, ko znaša 969 cm^{-3} , maksimalno vrednost doseže ob 22.17, ko znaša 1412 cm^{-3} , kar pomeni porast za faktor 1,46 v 8,68 h. $C_{N 201-500}$ začne naraščati ob 16.19, takrat znaša 220 cm^{-3} , 7,10 h kasneje, ob 23.25, doseže svojo maksimalno vrednost, ki je za faktor 1,97 višja od začetne, in znaša 434 cm^{-3} . $C_{N > 500}$ pade iz 16 na 3 cm^{-3} , saj je ta frakcija izmed vseh največja in se zato ti delci najhitreje posedejo.



Slika 25: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v ogrevalni sezoni.

Preglednica 22: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).

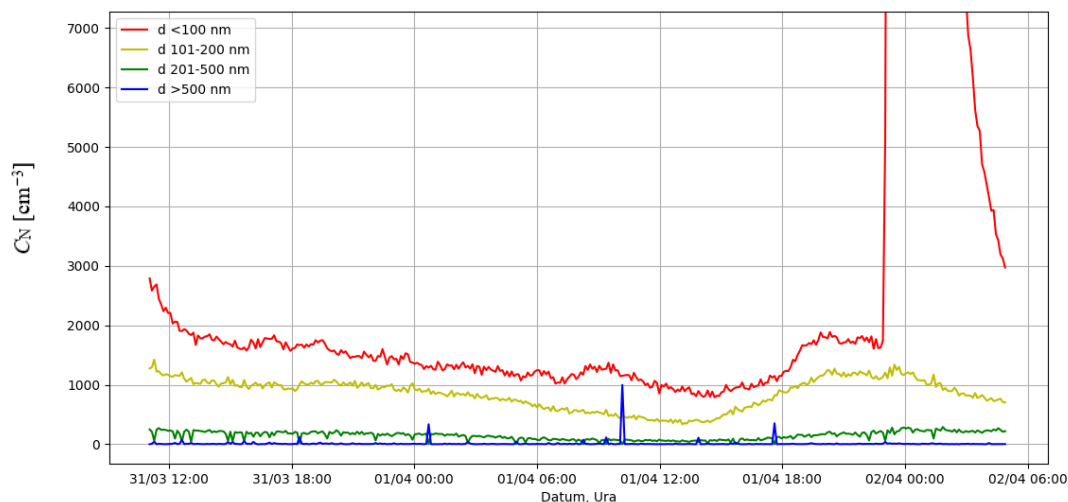
SPREMEMBA 1						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	28. 3. 2022		28. 3. 2022			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	16.17	824	20.07	1640	3,83	1,99
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	17.18	1205	21.15	2101	3,95	1,74
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	16.51	230	20.21	815	3,50	3,54
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	16.51	11	20.21	9	3,50	0,82
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	16.17	42	20.07	20	3,83	0,48
F [/]		0,58		0,78		1,34
C_{CO2} [ppm]		420		410		0,98
T_{in} [°C]		19,9		21,5		1,08
T_{out} [°C]		21,4		17,0		0,79
p [hPa]		1000		999		0,99
v [ms ⁻¹]		3,4		6,4		1,88
P [mm]		0		0		1,00
SPREMEMBA 2						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	29. 3. 2022		29. 3. 2022			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	5.15	401	12.01	1321	6,77	3,29
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	13.36	969	22.17	1412	8,68	1,46
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	16.19	220	23.25	434	7,10	1,97
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	16.19	16	23.25	3	7,10	0,19
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	5.15	29	12.01	17	6,77	0,59
F [/]		0,58		0,67		1,16
C_{CO2} [ppm]		410		405		0,99
T_{in} [°C]		20,3		20,9		1,03
T_{out} [°C]		6,5		18,1		2,78
p [hPa]		994		993		0,99
v [ms ⁻¹]		4,2		7,7		1,83
P [mm]		0		0		1,00

Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm⁻³], C_{Rn} – koncentracija R_n [Bqm⁻³], F – faktor ravnotežja med R_n in R_{nP} [/], C_{CO_2} – koncentracija CO_2 [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [°C], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms⁻¹], P – količina padavin [mm].

Na sliki 26 smo prikazali poteke vseh frakcij C_N v drugem zaprtem obdobju. Najprej opazimo nenaden skok $C_{N<100}$ na 44542 cm⁻³, ki se je zgodil 1. 4. ob 23.36. Predvidevamo, da ne gre za delce, ki bi se v prostor infiltrirali skozi stavbni ovoj iz zunanjega zraka. Menimo, da je do hitrega povečanja $C_{N<100}$ prišlo zaradi prisotnosti oziroma aktivnosti uporabnika stavbe v sosednjem prostoru. Vrata med prostorom izvajanja meritev in kopalnico oziroma hodnikom namreč niso zrakotesna. Razlogov za to je več, in sicer gre za nenaden porast samo delcev <100 nm, ne pa tudi ostalih frakcij, sočasno naraste C_{CO_2} na 780 ppm, občutno pa se zniža d_{GM} (drugo zaprto obdobje na sliki 24). Vse to nakazuje na aktivnost uporabnikov v sosednjem prostoru.

Kot edino spremembo C_N , ki nastane zaradi infiltracije delcev skozi stavbni ovoj iz zunanjega zraka, zato privzamemo porast, ki je zabeležen v preglednici 23. $C_{N<100}$ začne naraščati 1. 4. ob 14.41, ki takrat znaša 789 cm⁻³, nato narašča 5,63 h, vse do 20.19, ko doseže za faktor 2,39 višjo koncentracijo od začetne, natančneje 1888 cm⁻³. $C_{N101-200}$ začne naraščati uro in pol prej, ob 13.06, ko znaša 337 cm⁻³,

najvišjo vrednost doseže ob 20.33, ko znaša 1271 cm^{-3} , porast za faktor 3,97 se zgodi v 7,45 h. $C_{N \text{ 201-500}}$ narašča od 1. 4. od 14.14 pa vse do 2. 4. do 1.51. Pri tem se koncentracija zviša iz 64 na 290 cm^{-3} , kar predstavlja porast za faktor 4,53 v 11,60 h. $C_{N > 500}$ naraste iz 4 na 10 cm^{-3} . Tudi v tem primeru beležimo največji porast $C_{N \text{ 201-500}}$, zato spremembo 1 v preglednici 23 pripisujemo predvsem delcem, ki nastanejo pri ogrevanju (Bolling Kochbach et al., 2009), manj pa prometu, ki je posledica odhodov iz službe in šole (Young et al., 2004; Hussein et al., 2004; Klejnowski et al., 2013; Hernandez et al., 2017).



Slika 26: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 1 (S1-NT) v ogrevalni sezoni.

Preglednica 23: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 1 (S1-NT).

SPREMEMBA 1						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura 1. 4. 2022		Konec (SPRk) datum, ura 1. 4. 2022 (po 00:00 je datum 2. 4. 2022)		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
$C_{N < 100} [\text{cm}^{-3}]$	14.41	789	20.19	1888	5,63	2,39
$C_{N \text{ 101-200}} [\text{cm}^{-3}]$	13.06	337	20.33	1271	7,45	3,97
$C_{N \text{ 201-500}} [\text{cm}^{-3}]$	14.14	64	1.51	290	11,60	4,53
$C_{N > 500} [\text{cm}^{-3}]$	14.14	4	1.51	10	11,60	2,50
$C_{Rn} [\text{Bqm}^{-3}]$	14.41	37	20.19	33	5,63	0,89
F [/]		/		/		/
$C_{\text{CO}_2} [\text{ppm}]$		500		460		0,92
$T_{\text{in}} [^{\circ}\text{C}]$		21,5		21,4		1,00
$T_{\text{out}} [^{\circ}\text{C}]$		15,2		13,7		0,90
p [hPa]		974		975		1,00
v [ms^{-1}]		1,1		1,2		1,09
P [mm]		0		0,2		1,00

Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm^{-3}], C_{Rn} – koncentracija Rn [Bqm^{-3}], F – faktor ravnotežja med Rn in RnP [/], C_{CO_2} – koncentracija CO_2 [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [$^{\circ}\text{C}$], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms^{-1}], P – količina padavin [mm].

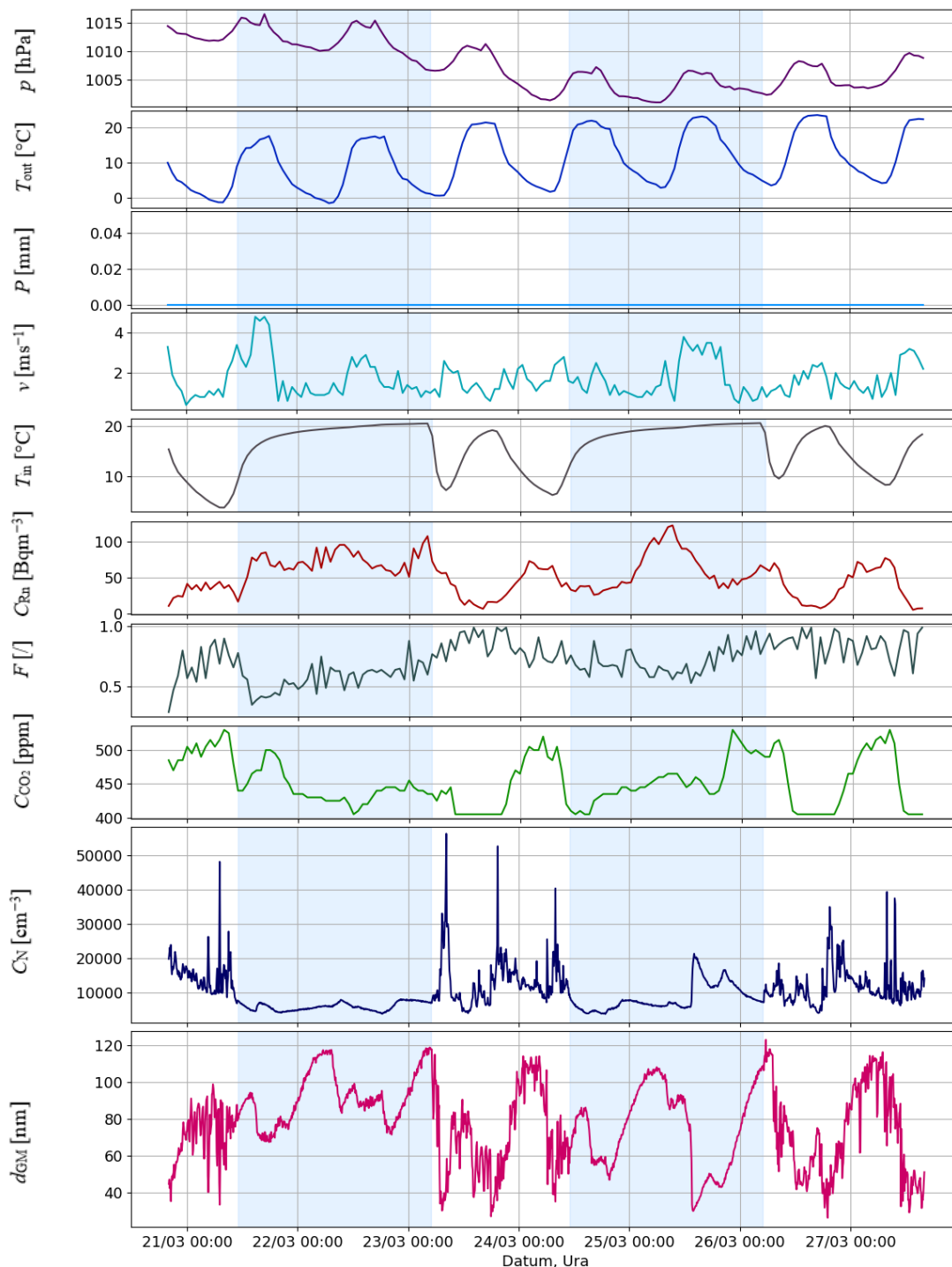
8.3 Odprta in zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)

Mikroklimatske razmere, ki so bile prisotne med meritvijo v ogrevalni sezoni v stavbi 2 (S2-VT), so prikazane na sliki 27. Tudi v tem primeru imajo zaprta obdobja na grafih svetlo modro ozadje, odprta obdobja pa belo ozadje. Podatke o količini padavin in hitrosti vetra smo pridobili na spletni strani ARSO za samodejno meteorološko postajo Cerklje ob Krki, ki je od stavbe 2 oddaljena približno 10 km (ARSO, 2022).

Med mikroklimatske razmere na sliki 27 spadajo p , T_{out} , P ter v (predstavljeni so na začetku poglavja 7.1). Vidimo, da se tako dnevna kot tudi nočna T_{out} v času meritve rahlo dviga. V prvem odprtem in prvem zaprtem obdobju T_{out} ponoči pade do $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, podnevi pa naraste na do $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nato se T_{out} od drugega odprtega obdobja dalje ponoči ne spusti več pod ničlo, pač pa se ustali na $2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Najvišja T_{out} podnevi doseže $21\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na sliki 27 je prikazan tudi potek T_{in} in vidimo, da v času odprtih obdobjih sledi poteku T_{out} . Ob začetku vsakega zaprtega obdobja se T_{in} najprej hitro dvigne na $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, nato pa postopoma še narašča do konca vsakega zaprtega obdobja, ko doseže $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zračni tlak čez celotno obdobje nekoliko pada, v prvem zaprtem obdobju je med 1017 in 1007 hPa , v drugem pa med 1007 in 1001 hPa . Padavin v celotnem obdobju ni bilo, kar je tudi razvidno s slike 27. Prav tako nismo zabeležili močnejšega vetra, celotno obdobje je v med 1 in 3 ms^{-1} , izjemi sta le ponedeljek, 21. 3., s hitrostjo do $4,8\text{ ms}^{-1}$ ter petek, 25. 3., popoldne s hitrostjo do $3,8\text{ ms}^{-1}$.

C_{Rn} je višja med zaprtimi obdobji, in sicer doseže najvišjo vrednost 107 Bqm^{-3} v prvem in 122 Bqm^{-3} v drugem obdobju (slika 27). S tem sicer ne presega maksimalnih dopustnih vrednosti 300 oz. 400 Bqm^{-3} , ki jih navaja slovenska zakonodaja, presega pa mejo 100 Bqm^{-3} , ki jo WHO navaja kot priporočeno koncentracijo R_n (poglavje 4.4.3, preglednica 5). Po drugi strani pa najnižja C_{Rn} v prvem zaprtem obdobju znaša 50 Bqm^{-3} , v drugem pa 30 Bqm^{-3} . Na sliki 27 sta prikazana tudi F ter C_{CO_2} . Ravnotežni faktor F v prvem zaprtem obdobju niha med $0,35$ in $0,88$, v drugem pa med $0,53$ in $0,96$, kar je višje od povprečja $0,3\text{--}0,6$, kot ga navajamo v poglavju 4.4.1. C_{CO_2} se tako v prvem kot v drugem zaprtem obdobju giblje med 405 in 500 ppm , v enakem razponu pa je tudi v odprtih obdobjih.

Na sliki 27 sta prikazana tudi časovna poteka C_N in d_{GM} . V odprtih obdobjih znaša C_N od 4000 pa vse do 56000 cm^{-3} , d_{GM} pa $25\text{--}115\text{ nm}$. V prvem zaprtem obdobju se C_N giblje med 4000 in 8000 cm^{-3} , d_{GM} pa je $70\text{--}118\text{ nm}$. V drugem zaprtem obdobju je C_N med 4000 in 20000 cm^{-3} , pri čemer je d_{GM} $30\text{--}108\text{ nm}$.

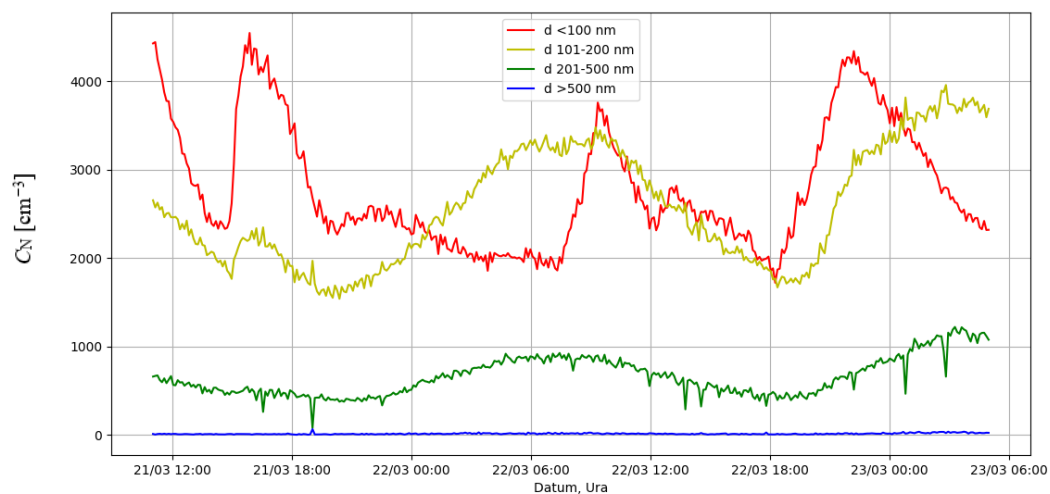


Slika 27: Časovni potek zračnega tlaka (p , hPa), zunanje temperature (T_{out} , °C), padavin (P , mm), hitrosti vetra (v , ms⁻¹), notranje temperature (T_{in} , °C), koncentracije radona (C_{Rn} , Bqm⁻³), ravnotežnega faktorja (F , /), koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} , ppm), številčne koncentracije delcev 10–1000 nm (C_N , cm⁻³) in velikostne porazdelitve delcev (d_{GM} , nm) v ogrevalni sezoni stavbe 2 (S2-VT).

8.4 Zaprta obdobja v stavbi 2 (S2-VT)

Po vzgledu zaprtih obdobj v prejšnjih poglavjih smo tudi tukaj številčne koncentracije delcev C_N razdelili v štiri velikostne razrede (frakcije), in sicer: $d < 100$ nm ($C_{N < 100}$), $101 < d < 200$ nm ($C_{N 100-200}$), $201 < d < 500$ nm ($C_{N 201-500}$), in $d > 500$ nm ($C_{N > 500}$). Potek C_N v prvem zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v ogrevalni sezoni je za vse frakcije prikazan na sliki 28. Omogočila nam je, da smo oblikovali preglednico 24, ki navaja dve spremembi različnih frakcij, do katerih je prišlo zaradi infiltracije delcev skozi ovoj stavbe. V prvi spremembi traja porast $C_{N < 100}$ 2,25 h, začne se 22. 3. ob 7.20 (1859 cm^{-3}) in konča ob 9.35 (3682 cm^{-3}), faktor povišanja je 1,98. Višanje $C_{N 101-200}$ traja 13,08 h, začne se prejšnji večer, 21. 3., ob 20.32 in zaključí 22. 3. ob 9:28, porast je iz začetnih 1539 cm^{-3} na končnih 2445 cm^{-3} , kar je povišanje za faktor 2,24. Tudi $C_{N 201-500}$ začne naraščati 21. 3. ob 20.32, ko znaša 333 cm^{-3} , maksimum doseže 22. 3. ob 7.28, ko znaša 926 cm^{-3} , kar je porast za faktor 2,78 v 8,92 h. $C_{N > 500}$ ostane skoraj konstantna, spreminja se med 9 in 11 cm^{-3} . Pri spremembi 1 pripisujemo porast koncentracije delcev večjih od 100 nm ogrevanju, saj se, kot smo navedli v preglednici 24, začne v večernih urah. T_{out} se med spremembo 1 giblje med $-1,5$ °C in $3,7$ °C, kar potrjuje, da je stavbe potrebno ogrevati (Bolling Kochbach et al., 2009). Porast $C_{N < 100}$ se začne zjutraj (preglednica 24), kar je verjetno predvsem posledica povečanega prometa v jutranjih urah (ko so praviloma povišane emisije najmanjših delcev), delno pa tudi ogrevanja (Young et al., 2004; Hussein et al., 2004; Klejnowski et al., 2013; Hernandez et al., 2017).

Druga sprememba, opisana v preglednici 24, se za $C_{N < 100}$ prične 22. 3. ob 18.16, ko je njihovo število 1720 cm^{-3} , nato ob 22.13 doseže najvišjo vrednost 4339 cm^{-3} , kar je za faktor 2,52 več, naraščanje pa traja 3,95 h. Skoraj sočasno, ob 18.23, začne naraščati $C_{N 101-200}$, in sicer iz 1667 cm^{-3} na 3956 cm^{-3} , kar doseže naslednji dan, 23. 3. ob 2.50; to predstavlja povišanje za faktor 2,37 v 8,45 h. $C_{N 201-500}$ začne naraščati prej, ob 17.49, ko znaša 328 cm^{-3} , do 1220 cm^{-3} naslednji dan, 23. 3., ob 3.18; koncentracija se poviša v 9,48 h za faktor 1,19. $C_{N > 500}$ je višja kot v prvem zaprtem obdobju, ob začetku spremembe znaša 27 ob koncu pa 32 cm^{-3} . Predvidevamo, da do spremembe 2 pride predvsem zaradi infiltracije delcev, ki nastanejo pri ogrevanju stavb, saj se vse frakcije povečajo v podobnem razmerju, medtem ko je pri prometu običajno izrazit porast $C_{N < 100}$. Tudi T_{out} ob koncu spremembe 2 znaša le $7,3$ °C, kar nakazuje, da je bilo ogrevanje stavb takrat nedvomno potrebno (Bolling Kochbach et al., 2009). Predpostavka temelji tudi na večernem času, v katerem začnejo delci naraščati (17.49 in 18.23, odvisno od frakcije), saj je to čas, ko smo ljudje običajno doma in imamo vklopljeno ogrevanje. Nekaj delcev verjetno nastane tudi zaradi kuhanja in pečenja na plinskem štedilniku v restavraciji v pritličju, saj kuhinja med tem časom obratuje (Wallace et al., 2004; Vu et al., 2015).



Slika 28: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 1. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v ogrevalni sezoni.

Preglednica 24: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 1. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).

SPREMEMBA 1						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	22. 3. 2022 (pred 00:00 je datum 21. 3. 2022)		22. 3. 2022			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	7.20	1859	9.35	3682	2,25	1,98
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	20.23	1539	9.28	2445	13,08	2,24
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	22.32	333	7.27	926	8,92	2,78
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	22.32	9	7.27	11	8,92	1,22
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	7.20	71	9.35	95	2,25	1,33
F [/]		0,66		0,47		0,71
C_{CO2} [ppm]		425		430		1,01
T_{in} [°C]		19,5		19,6		1,00
T_{out} [°C]		-1,5		3,7		2,20
p [hPa]		1010		1012		1,00
v [ms ⁻¹]		1,0		0,9		0,90
P [mm]		0		0		1,00
SPREMEMBA 2						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	22. 3. 2022		22. 3. 2022 (po 00:00 je datum 23. 3. 2022)			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	18.16	1720	22.13	4339	3,95	2,52
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	18.23	1667	2.50	3956	8,45	2,37
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	17.49	328	3.18	1220	9,48	3,72
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	17.49	27	3.18	32	9,48	1,19
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	18.16	67	22.13	57	3,95	0,85
F [/]		0,64		0,65		1,02
C_{CO2} [ppm]		440		440		1,00
T_{in} [°C]		20,2		20,3		1,00
T_{out} [°C]		17,0		7,3		0,43
p [hPa]		1014		1010		0,99
v [ms ⁻¹]		1,6		2,1		1,31
P [mm]		0		0		1,00

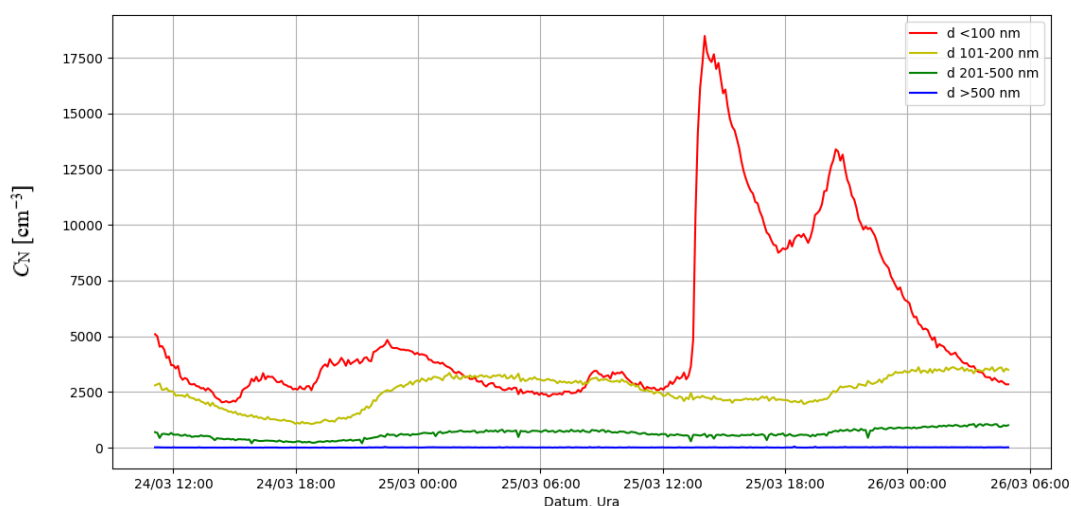
Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm⁻³], C_{Rn} – koncentracija R_n [Bqm⁻³], F – faktor ravnotežja med R_n in R_{nP} [/], C_{CO_2} – koncentracija CO₂ [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [°C], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms⁻¹], P – količina padavin [mm].

Za drugo zaprto obdobje v ogrevalni sezoni smo časovni potek C_N za različne frakcije delcev prikazali na sliki 29. Izluščili smo dve spremembi, ko C_N narašča, ki ju predstavljamo v preglednici 25. Prva sprememba $C_{N<100}$ se začne 24. 3. ob 18.05 z začetno koncentracijo 2609 cm⁻³, ki nato narašča 4,63 h, dokler ob 22.43 ne doseže vrednosti 4490 cm⁻³, kar predstavlja zvišanje za faktor 1,72. Ob 18.46 začne naraščati $C_{N\ 101-200}$, ki iz začetnih 1066 cm⁻³ do naslednjega dne, 25. 3., ob 1.32 naraste na 3357 cm⁻³, kar je za faktor 3,15 več v 6,77 h. Tudi $C_{N\ 201-500}$ začne naraščati ob 18.53, ko znaša 219 cm⁻³ in doseže najvišjo koncentracijo 808 cm⁻³ naslednji dan, 25. 3., ob 4.07, kar je porast za faktor 3,69 v 9,23 h. $C_{N>500}$ pade iz 7 na 4 cm⁻³, znižanje je minimalno, zgodi se zaradi usedanja delcev. Ker T_{out} zvečer občutno pade, saj je na začetku 20,4 °C ob koncu spremembe 1 pa le 9,9 °C, je ogrevanje stavb nedvomno potrebno. Spremembo 1 zato vsekakor pripišemo ogrevanju (Bolling Kochbach et al., 2009). Dodatno

pa nekaj delcev, ki so se infiltrirali skozi stavbni ovoj v prostor, verjetno izvira tudi iz kuhanja na plinskem štedilniku (Wallace et al., 2004; Vu et al., 2015) v pritličju restavracije v stavbi 2.

Sprememba 2, prikazana v preglednici 25, se za $C_{N<100}$ prične 25. 3. ob 17:39 (8750 cm^{-3}) in zaključi ob 20.29 (13393 cm^{-3}), kar pomeni porast za faktor 1,53 v 2,80 h. $C_{N 101-200}$ začne naraščati dobro uro kasneje, ob 18.54, ko znaša 1965 cm^{-3} , in doseže najvišjo vrednost naslednji dan, 26. 3., ob 2.14, ki znaša 3620 cm^{-3} , kar je porast za faktor 1,84 v 7,33 h. Tudi $C_{N 201-500}$ začne naraščati v podobnem trenutku, ob 19.14, ko znaša 501 cm^{-3} in raste vse do naslednjega dne, 26. 3., do 3.15, ko je 1066 cm^{-3} , kar je povišanje za faktor 2,13 v 8,02 h. $C_{N>500}$ pade iz 15 na 12 cm^{-3} , nizko koncentracijo pa pripisujemo dejstvu, da gre za večjo frakcijo, ki se hitreje posede. Sprememba 2 se zgodi deloma zaradi obratovanja kurilnih naprav v stavbah (Bolling Kochbach et al., 2009), deloma pa zaradi obratovanja kuhinje v restavraciji (Wallace et al., 2004; Vu et al., 2015).

V času drugega zaprtega obdobja, 25. 3., ob 14.10 se je zgodil še en nenaden porast koncentracije delcev $<100 \text{ nm}$ (17755 cm^{-3}). Ker je porast tako nenaden (zgodil se je v času krajšem kot 1 h) in ker v tem trenutku ne naraste nobena druga frakcija delcev, menimo, da je nastal zaradi infiltracije delcev, ki so nastali pri kuhanju v kuhinji restavracije (Wallace et al., 2004; Vu et al., 2015).



Slika 29: Časovni potek koncentracije delcev različnih velikostnih razredov v 2. zaprtem obdobju stavbe 2 (S2-VT) v ogrevalni sezoni.

Preglednica 25: Prikaz sprememb številčne koncentracije delcev v 2. zaprtem obdobju ogrevalne sezone v stavbi 2 (S2-VT).

SPREMEMBA 1						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	24. 3. 2022		24. 3. 2022 (po 00:00 je datum 25. 3. 2022)			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	18.05	2609	22.43	4490	4,63	1,72
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	18.46	1066	1.32	3357	6,77	3,15
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	18.53	219	4.07	808	9,23	3,69
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	18.53	7	4.07	4	9,23	0,57
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	18.05	32	22.43	42	4,63	1,31
F [/]		0,67		0,80		1,19
C_{CO_2} [ppm]		435		445		1,02
T_{in} [°C]		17,9		18,8		1,05
T_{out} [°C]		20,4		9,9		0,49
p [hPa]		1007		1002		0,99
v [ms ⁻¹]		2,0		1,1		0,55
P [mm]		0		0		1,00
SPREMEMBA 2						
Parameter	Začetek (SPRz) datum, ura		Konec (SPRk) datum, ura		Δt [h] (zakasnitev)	SPRk/SPRz
	25. 3. 2022		25. 3. 2022 (po 00:00 je datum 26. 3. 2022)			
$C_{N<100}$ [cm ⁻³]	17.39	8750	20.29	13393	2,80	1,53
$C_{N\ 101-200}$ [cm ⁻³]	18.54	1965	2.14	3620	7,33	1,84
$C_{N\ 201-500}$ [cm ⁻³]	19.14	501	3.15	1066	8,02	2,13
$C_{N>500}$ [cm ⁻³]	19.14	15	3.15	12	8,02	0,80
C_{Rn} [Bqm ⁻³]	17.39	52	20.29	42	2,80	0,81
F [/]		0,63		0,77		1,22
C_{CO_2} [ppm]		405		420		1,04
T_{in} [°C]		20,2		20,3		1,00
T_{out} [°C]		24,6		16,6		0,67
p [hPa]		1006		1004		0,99
v [ms ⁻¹]		3,5		3,3		0,94
P [mm]		0		0		1,00

Razlaga simbolov: C_N – številčna koncentracija delcev posamezne frakcije [cm⁻³], C_{Rn} – koncentracija Rn [Bqm⁻³], F – faktor ravnotežja med Rn in RnP [/], C_{CO_2} – koncentracija CO₂ [ppm], T_{in} ter T_{out} – notranja ter zunanja temperatura zraka [°C], p – zračni tlak [hPa], v – hitrost vetra [ms⁻¹], P – količina padavin [mm].

9 PRIMERJAVA REZULTATOV

V preglednici 26 povzemamo bistvene karakteristike lokacije in stavb 1 ter 2, ki vplivajo na koncentracijo delcev (10–1000 nm) v zraku in njihovo nekontrolirano infiltracijo v prostor v zaprtih obdobjih obeh stavb v neogrelni in ogrevalni sezoni. Hkrati so v njej predstavljeni tudi parametri, ki so nam omogočili oceniti vpliv sezone ter tesnosti stavbnega ovoja na koncentracijo delcev v stavbi z nižjo (S1-NT) in višjo (S2-VT) zrakotesnostjo. Eden izmed teh je dolžina kritičnih stikov stavbnega ovoja prostora. To je dolžina mest, kjer predvidevamo, da prihaja do infiltracije/eksfiltracije zraka skozi stavbni ovoj, omenili smo jih že v poglavju 5.2.2 in 5.2.4. V S1-NT znaša dolžina kritičnih stikov 6,60 m, v S2-VT pa 6,20 m. Večja dolžina kritičnih stikov še ne pomeni nujno večje infiltracije, saj so kljub večji dolžini stiki lahko bolj zrakotesni. Vendar glede na to, da je S1-NT manj zrakotesna ($N_{\text{inf}} = 0,40 \text{ h}^{-1}$) kot S2-VT ($N_{\text{inf}} = 0,23 \text{ h}^{-1}$), to pomeni, da so tudi kritični stiki v S1-NT manj tesni kot v S2-VT. Posledica tega je, da večja dolžina kritičnih stikov v S1-NT pripomore k manjši tesnosti njenega stavbnega ovoja.

V preglednici 26 vidimo, da imamo pomembnejše izvore delcev zunaj stavb S1-NT in S2-VT vse leto. Mednje spada v prvi vrsti promet, pri S2-VT pa dodatno še izpusti iz gostinskega objekta. V ogrevalni sezoni se tem izvorom pridružijo še delci, ki nastanejo pri kurjenju zaradi ogrevanja. Ti delci so, kot je opisano v poglavju 4.3.2, v območju velikosti 50–600 nm (Bolling Kochbach et al., 2009). Kakor vidimo v preglednici 26, so povprečne $C_{N<100}$ ter $C_{N\ 101-200}$ v obeh stavbah višje v ogrevalni sezoni kot v neogrevalni sezoni ne glede na to, ali gre za zaprto ali odprto obdobje. Če se osredotočimo najprej na zaprta obdobja v S1-NT, vidimo, da je v neogrevalni sezoni povprečna $C_{N<100}$ 1276 cm^{-3} , v ogrevalni sezoni pa 2622 cm^{-3} . Povprečna $C_{N\ 101-200}$ je v neogrevalni sezoni 957 cm^{-3} , v ogrevalni pa 1119 cm^{-3} . Če zdaj pogledamo rezultate še za zaprta obdobja v S2-VT, vidimo, da je v neogrevalni sezoni povprečna $C_{N<100}$ 2060 cm^{-3} , v ogrevalni pa 4054 cm^{-3} . Povprečna $C_{N\ 101-200}$ je v neogrevalni sezoni 901 cm^{-3} , v ogrevalni sezoni pa 2558 cm^{-3} . Pri obeh frakcijah večjih delcev pa vidimo, da sta v S2-VT tudi povprečna $C_{N\ 201-500}$ ter $C_{N>500}$ višji v ogrevalni sezoni kot v neogrevalni. Povprečna $C_{N\ 201-500}$ v S2-VT v zaprtem obdobju v neogrevalni sezoni znaša 311 cm^{-3} , v ogrevalni pa 643 cm^{-3} , medtem ko povprečna $C_{N>500}$ v neogrevalni sezoni znaša 5 cm^{-3} , v ogrevalni pa 13 cm^{-3} . Praviloma beležimo višje koncentracije delcev v ogrevalni sezoni zato, ker so takrat v ozračju prisotni tudi delci, ki nastanejo pri kurjenju zaradi ogrevanja stavb. V neogrevalni sezoni je delcev v zraku običajno manj, ni pa nujno, saj so vezani na gostoto prometa in se pojavljajo v konicah. V S1-NT je v odprtem obdobju ogrevalne sezone povprečna $C_{N\ 201-500}$ 542 cm^{-3} , medtem ko je v neogrevalnem višja in znaša 566 cm^{-3} . Tudi povprečna $C_{N>500}$ je v odprtem obdobju ogrevalne sezone nižja (12 cm^{-3}) kot v odprtem obdobju neogrevalne (17 cm^{-3}). Dejstvo, da v ogrevalni sezoni v S1-NT beležimo nižje $C_{N\ 201-500}$ in $C_{N>500}$ kot v neogrevalni sezoni, je v nasprotju s pričakovanim povišanjem koncentracije delcev zaradi kurjave. Ker je tudi promet na tej lokaciji redkejši, predvidevamo, da bi bil lahko razlog za to čas izvajanja meritve. Opravili smo jo proti koncu ogrevalne sezone, ko temperature zunajega zraka niso več tako nizke (T_{out} so se gibale med $6,5$ in $21,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Zato je intenziteta kurjenja verjetno manjša, kot bi bila, če bi se T_{out} spustila nižje. Pri različnih virih kurjenja nastanejo različno veliki delci, zato je možno tudi, da v okolici lokacije S1-NT ni veliko kurišč, iz katerih bi se sproščali delci $>200 \text{ nm}$.

Frakcija najmanjših delcev, na katero smo se osredotočili, so delci <100 nm. Kot vidimo v preglednici 26, je povprečna $C_{N<100}$ v S1-NT v odprtem obdobju 3676 cm^{-3} v neogrevalni in 4149 cm^{-3} v ogrevalni sezoni. V zaprtem obdobju je $C_{N<100}$ v povprečju 1276 cm^{-3} v neogrevalni in 2622 cm^{-3} v ogrevalni sezoni. V neogrevalni sezoni smo v zaprtih obdobjih zabeležili 5 sprememb delcev, pri katerih je $C_{N<100}$ v povprečju narasla za faktor 2,37. V ogrevalni sezoni smo zabeležili 3 spremembe delcev, pri katerih je $C_{N<100}$ v povprečju narasla za faktor 2,56. V S2-VT smo v odprtem obdobju v neogrevalni sezoni zabeležili povprečno $C_{N<100}$ 3894 cm^{-3} , v ogrevalni sezoni pa 8192 cm^{-3} . V zaprtem obdobju pa smo v neogrevalni sezoni imeli povprečno $C_{N<100}$ 2060 cm^{-3} in v ogrevalni sezoni pa 4054 cm^{-3} . V neogrevalni sezoni S2-VT smo zabeležili 3 spremembe delcev, pri katerih je $C_{N<100}$ v povprečju narasla za faktor 2,93. V ogrevalni sezoni je prišlo do 4 sprememb, v povprečju je $C_{N<100}$ narasla za faktor 1,94. Ker je $C_{N<100}$ v zaprtih obdobjih občutno nihala, to pomeni, da se delci v prostor infiltrirajo iz zunanosti.

Druga najmanjša frakcija so delci velikosti 101–200 nm. V S1-NT v odprtem obdobju povprečna $C_{N\ 101-200}$ znaša 1477 cm^{-3} (neogrevalna sezona) in 1743 cm^{-3} (ogrevalna sezona). V zaprtem obdobju pa je povprečna $C_{N\ 101-200}$ 957 cm^{-3} (neogrevalna sezona) in 1119 cm^{-3} (ogrevalna sezona). $C_{N\ 101-200}$ se v zaprtem obdobju spreminja, tako v neogrevalni kot tudi v ogrevalni sezoni, in sicer v neogrevalni sezoni v povprečju naraste za faktor 1,41, v ogrevalni sezoni pa za faktor 2,39. V S2-VT znaša v odprtem obdobju povprečna $C_{N\ 101-200}$ 1387 cm^{-3} (neogrevalna sezona) in 3776 cm^{-3} (ogrevalna sezona). V zaprtem obdobju pa znaša 901 cm^{-3} v neogrevalni in 2558 cm^{-3} v ogrevalni sezoni; to pomeni, da se v povprečju v zaprtem obdobju poveša za faktor 2,25 v neogrevalni in za faktor 2,40 v ogrevalni sezoni. Ker prihaja do spremembe $C_{N\ 101-200}$ v zaprtih obdobjih v obeh stavbah, to pomeni, da se ti delci infiltrirajo skozi ovoj v prostor.

Če pogledamo preglednico 26, vidimo, da znaša povprečna $C_{N\ 201-500}$ v S1-NT v odprtem obdobju 566 cm^{-3} v neogrevalni in 542 cm^{-3} v ogrevalni sezoni. V zaprtem obdobju pa je povprečna koncentracija v neogrevalni sezoni 408 cm^{-3} in v ogrevalni sezoni pa 309 cm^{-3} . Imamo 5 sprememb v neogrevalni sezoni, ko se je koncentracija v povprečju zvišala za faktor 1,49. V ogrevalni sezoni imamo 3 spremembe, s povišanjem v povprečju za faktor 3,35. V S2-VT smo v odprtem obdobju zabeležili povprečno $C_{N\ 201-500}$ 487 cm^{-3} (neogrevalna sezona) ter 1026 cm^{-3} (ogrevalna sezona), v zaprtih obdobjih pa 311 cm^{-3} (neogrevalna) ter 643 cm^{-3} (ogrevalna sezona). Koncentracija se je v zaprtih obdobjih spreminjala, v povprečju je v neogrevalni sezoni narasla za faktor 2,65, v ogrevalni sezoni pa za faktor 3,08. Ti porasti delcev v zaprtih obdobjih nam povedo, da so delci velikosti 201–500 nm v prostor vstopiti iz zunanosti.

Kot je razvidno iz preglednice 26, ima frakcija $C_{N>500}$, ne glede na stavbo, sezono in odprto ali zaprto obdobje, zelo nizko številčno koncentracijo. V S1-NT je povprečna $C_{N>500}$ v odprtem obdobju 17 cm^{-3} (neogrevalna sezona) oziroma 12 cm^{-3} (ogrevalna sezona), v zaprtem obdobju pa 6 cm^{-3} (neogrevalna sezona) oziroma 11 cm^{-3} (ogrevalna sezona). V S2-VT pa je povprečna $C_{N>500}$ v odprtem obdobju 10 cm^{-3} (neogrevalna sezona) oziroma 22 cm^{-3} (ogrevalna sezona), v zaprtem obdobju pa 5 cm^{-3} (neogrevalna sezona) oziroma 13 cm^{-3} (ogrevalna sezona). V S1-NT koncentracija v neogrevalni sezoni v povprečju pade za faktor 0,50 v ogrevalni sezoni pa naraste za faktor 1,17. V S2-VT pa koncentracija v neogrevalni sezoni v povprečju naraste za faktor 2,53 v ogrevalni sezoni pade za faktor 0,95. Čeprav daje analiza pri tako nizkem številu delcev nezanesljive rezultate, pa vidimo, da se v obeh stavbah v

zaprtim prostoru koncentracija delcev nekoliko preminja. Glede na to, da izvorov delcev v prostoru nismo imeli, lahko sklepamo, da tudi ti delci v prostor vstopijo iz zunanosti.

Kot je razvidno iz preglednice 26, se povprečne koncentracije vseh štirih frakcij delcev v obeh stavbah v zaprtih obdobjih spremenijo. V vsaki sezoni smo našli 3–5 sprememb, kolikšen je bil faktor povišanja, smo že opisali za vsako frakcijo posebej. Ker v prostoru med meritvami v zaprtih obdobjih ni bilo notranjih virov delcev, spremembe v koncentraciji potrjujejo, da delci vseh velikosti vstopajo v prostor iz zunanosti. Ker se delci gibajo skupaj z zrakom, ta pa se premika zaradi razlik v tlaku in temperaturi, predvidevamo, da je večina delcev v prostor prišla z infiltracijo skozi stavbni ovoj. Kljub vsemu pa obstaja tudi možnost, da je manjši delež delcev v prostor vstopil skozi špranje notranjih vrat iz ostalih prostorov v stavbi. Čeprav smo aktivnosti v stavbah (in ne le v prostoru meritev, kamor smo vstopali le zaradi odpiranja in zapiranja oken) v času meritev zmanjšali na najnižjo možno raven, pa so se v stavbah vsaj občasno zadrževali ljudje.

Glede na to, da se povprečne koncentracije delcev v odprtih obdobjih med stavbama razlikujejo, ne moremo objektivno oceniti, v katero stavbo preide več delcev. Predvidevali smo, da bo v zaprtim obdobju v S2-VT nižja koncentracija delcev vseh frakcij, saj ima ta stavba višjo tesnost ovoja. Kot je razvidno iz preglednice 26, to pogosto ne drži. Vzemimo za primer povprečno $C_{N\ 201-500}$ v ogrevalni sezoni. V zaprtim obdobju $C_{N\ 201-500}$ S2-VT znaša 643 cm^{-3} , v S1-NT pa 309 cm^{-3} . To pomeni, da je v S2-VT, ki ima višjo tesnost ovoja, višja koncentracija delcev. A hkrati je v S2-VT višja koncentracija delcev že v zunanjem zraku (v času odprtih obdobj), in sicer 1026 cm^{-3} v primerjavi z S1-NT, kjer je 542 cm^{-3} . Zaradi tega ne moremo potrditi, da višja tesnost ovoja pomeni tudi nižjo koncentracijo delcev v stavbi. S tem lahko potrdimo le, da delci, ne glede na tesnost, prehajajo skozi ovoj stavbe.

Povprečni čas Δt naraščanja koncentracije delcev od najnižje do najvišje vrednosti v zaprtim prostoru (preglednica 26) je v S1-NT za vse štiri velikostne frakcije delcev v neogrevalni sezoni 3,78 h ($C_{N<100}$), 3,46 h ($C_{N\ 101-200}$) in 4,64 h ($C_{N\ 201-500}$ in $C_{N>500}$); v ogrevalni sezoni pa 5,41 h ($C_{N<100}$), 6,69 h ($C_{N\ 101-200}$) ter 7,40 h ($C_{N\ 201-500}$ in $C_{N>500}$). Iz podatka, kako hitro naraste koncentracija posamezne frakcije, lahko sklepamo, da frakcija, ki naraste najhitreje, tudi najhitreje preide skozi stavbni ovoj. In obratno, frakcija, ki za doseg maksimalne koncentracije potrebuje največ časa, tudi najpočasneje prehaja skozi ovoj stavbe. Na osnovi tega smo ugotovili, da skozi ovoj najhitreje prehajajo najmanjši delci, to so delci $<100\text{ nm}$ in delci med 101 in 200 nm. Prav tako smo ugotovili, da delci, ne glede na velikost, v ogrevalni sezoni potrebujejo dalj časa, da dosežejo svojo maksimalno koncentracijo. To pomeni, da potrebujejo tudi dalj časa, da preidejo skozi stavbni ovoj v notranjost stavbe. Tudi zamiki začetka spremembe ostalih frakcij glede na $C_{N<100}$ so v neogrevalni sezoni manjši ($C_{N\ 101-200} = 0,83\text{ h}$, $C_{N\ 201-500}$ in $C_{N>500} = 0,88\text{ h}$) kot v ogrevalni sezoni ($C_{N\ 101-200} = 3,65\text{ h}$, $C_{N\ 201-500}$ in $C_{N>500} = 4,02\text{ h}$).

Povprečni čas Δt naraščanja koncentracije delcev od najnižje do najvišje vrednosti v zaprtim prostoru (preglednica 26) je v S2-VT za vse štiri velikostne frakcije delcev v neogrevalni sezoni 7,29 h ($C_{N<100}$), 10,81 h ($C_{N\ 101-200}$) in 10,65 h ($C_{N\ 201-500}$ in $C_{N>500}$); v ogrevalni sezoni pa 3,41 h ($C_{N<100}$), 8,91 h ($C_{N\ 101-200}$) ter 8,92 h ($C_{N\ 201-500}$ in $C_{N>500}$). Tudi v tej stavbi preidejo skozi ovoj v vsaki sezoni najhitreje delci $<100\text{ nm}$, ostali delci prehajajo počasneje. Če primerjamo Δt med sezonama, ugotovimo, da je slednja, ne glede na frakcijo delcev, manjša v ogrevalni sezoni. To pomeni, da delci v ogrevalni sezoni hitreje prehajajo skozi ovoj. Iz predstavljenih rezultatov lahko zaključimo, da delci ne glede na

velikost frakcije hitreje preidejo skozi ovoj v S1-NT. Takšen rezultat je pričakovan, saj ima S1-NT nižjo tesnost stavbnega ovoja, zaradi česar omogoča hitrejši prehod delcev skozenj. Izjema je le $C_{N < 100}$ v S2-VT v ogrevalni sezoni, z zakasnitvijo $\Delta t = 3,41$ h. Rezultati, prikazani v preglednici 26, nam povedo tudi, da so zamiki začetka sprememb frakcij $C_{N 101-200}$, $C_{N 201-500}$ in $C_{N > 500}$, glede na $C_{N < 100}$, v neogrevalni sezoni v S2-VT daljši kot v neogrevalni sezoni v S1-NT. Zamiki so v ogrevalni sezoni v S2-VT prav tako daljši od zamikov v ogrevalni sezoni v S1-NT. Tudi ta podatek potrjuje našo domnevo, da večji delci za vstop skozi ovoj potrebujejo dalj časa, posledica tega pa je, da v prostoru kasneje zaznamo njihovo naraščanje. Izjema je ponovno $C_{N 101-200}$ v S2-VT v ogrevalni sezoni, njen zamik (3,03 h) je namreč nekoliko krajši od zamika (3,65 h) iste frakcije v ogrevalni sezoni v S1-NT.

Preglednica 26: Zbirna preglednica karakteristik lokacije in stavbe, ki vplivajo na koncentracijo delcev v zaprtih obdobjih v neogrevalni in ogrevalni sezoni v obeh stavbah.

	S1-NT (nižja zrakotesnost)		S2-VT (višja zrakotesnost)	
Lokacija				
Oddaljenost od ceste do stavbe; vrsta prometa; prometna obremenitev	7 m; osebna vozila; 500 vozil/dan		12 m; osebna in tovorna vozila; 3350 vozil/dan, od tega 200 težkih tovornih vozil/dan	
Lokalni izvori delcev	Vse leto: promet Ogrevalna sezona: kurišča		Vse leto: promet, izpusti gostinskega objekta Ogrevalna sezona: kurišča	
Stavba				
Leto izgradnje; leto energetske sanacije stavbnega ovoja	1997; ni bila izvedena		1985; 2020	
Površina netransparentnega in transparentnega dela zunanjega ovoja prostora [m ²]	9,44; 1,95		5,58; 2,1	
Dolžina kritičnih stikov [m]	6,60 (obod frčadnega okna)		6,20 (dolžina preboja klimatske naprave, obod balkonskih vrat)	
N_{inf}^* [h ⁻¹]	0,40		0,23	
Parameter	Neogrevalna sezona	Ogrevalna sezona	Neogrevalna sezona	Ogrevalna sezona
Odperto obdobje (C_N zunaj)				
$\overline{C_N}_{<100}$ [cm ⁻³]	3676	4149	3894	8192
$\overline{C_N}_{101-200}$ [cm ⁻³]	1477	1743	1387	3776
$\overline{C_N}_{201-500}$ [cm ⁻³]	566	542	487	1026
$\overline{C_N}_{>500}$ [cm ⁻³]	17	12	10	22
Zaprto obdobje (C_N prostor)				
$\overline{C_N}_{<100}$ [cm ⁻³]	1276	2622	2060	4054
$\overline{C_N}_{101-200}$ [cm ⁻³]	957	1119	901	2558
$\overline{C_N}_{201-500}$ [cm ⁻³]	408	309	311	643
$\overline{C_N}_{>500}$ [cm ⁻³]	6	11	5	13
Število sprememb	5	3	3	4
$\overline{SPRk}/\overline{SPRz}$ za $\overline{C_N}_{<100}$	2,37	2,56	2,93	1,94
$\overline{SPRk}/\overline{SPRz}$ za $\overline{C_N}_{101-200}$	1,41	2,39	2,25	2,40
$\overline{SPRk}/\overline{SPRz}$ za $\overline{C_N}_{201-500}$	1,49	3,35	2,65	3,08
$\overline{SPRk}/\overline{SPRz}$ za $\overline{C_N}_{>500}$	0,50	1,17	2,53	0,95
$\overline{\Delta t}$ za $C_N<100$ [h]	3,78	5,41	7,29	3,41
$\overline{\Delta t}$ za $C_N 101-200$ [h]; zamik* [h]	3,46; 0,83	6,69; 3,65	10,81; 2,67	8,91; 3,03
$\overline{\Delta t}$ za $C_N 201-500$ [h]; zamik* [h]	4,64; 0,88	7,40; 4,02	10,65; 2,82	8,92; 4,51
$\overline{\Delta t}$ za $C_N>500$ [h]; zamik* [h]	4,64; 0,88	7,40; 4,02	10,65; 2,82	8,92; 4,51

* N_{inf} – povprečno število izmenjav zraka z infiltracijo skozi ovoj prostora

* zamik začetka spremembe glede na $C_N<100$

10 DISKUSIJA

Že v uvodu smo omenili raziskavi Agarwal et al. (2021) in Abt et al. (2000), ki navajata, da delci, manjši od 200 nm, prehajajo skozi stavbni ovoj. Če v naši raziskavi pogledamo slike (19, 20, 22, 23, 25, 26, 28, 29), ki prikazujejo časovni potek številčne koncentracije delcev C_N v zaprtih obdobjih obeh stavb, vidimo, da se koncentracija delcev <100 nm ($C_{N<100}$) ter 101–200 nm ($C_{N101-200}$) v zaprtem obdobju obeh stavb spreminja. Večje spremembe v koncentraciji smo zabeležili v preglednici 26, poglavje 9. V njej lahko vidimo, da v vsaki stavbi v povprečju beležimo 3–5 večjih sprememb delcev v zaprtem obdobju. Pri tem se $C_{N<100}$ v stavbi 1 (S1-NT) v povprečju poveča za faktor 2,37 (neogrevalna sezona) oziroma za faktor 2,56 (ogrevalna sezona), $C_{N101-200}$ pa za faktor 1,41 (neogrevalna sezona) oziroma za faktor 2,39 (ogrevalna sezona). Tudi v stavbi 2 (S2-VT) smo prišli do podobne ugotovitve, med zaprtimi obdobji $C_{N<100}$ v povprečju naraste za faktor 2,93 (neogrevalna sezona) oziroma za faktor 1,94 (ogrevalna sezona), $C_{N101-200}$ pa za faktor 2,25 (neogrevalna sezona) oziroma faktor 2,40 (ogrevalna sezona). Notranjih izvorov delcev v prostoru med izvajanjem meritev ni bilo (oziroma smo jih zmanjšali na najnižji možni nivo), zato nam porast številčne koncentracije delcev C_N v času zaprtih obdobj pove, da lahko delci v prostor vstopijo izključno skozi stavbni ovoj. S tem smo tudi mi dokazali, da delci, katerih premer je manjši od 200 nm, prehajajo skozi ovoj stavbe ne glede na to, ali je bolj (kot v S2-VT) ali manj tesen (kot v S1-NT).

Tudi raziskava Wallis et al. (2019) se je posvetila temu, kako zrakotesnost stavbnega ovoja vpliva na prehod delcev v notranje okolje. Merili so masno koncentracijo in ne številčne kot mi, a kljub temu je smiselno njihovo ugotovitev primerjati z našo. Ugotovili so namreč, da je bila koncentracija delcev za 15 % večja v stavbi z manj zrakotesnim stavbnim ovojem. Podoben rezultat smo pričakovali tudi mi, a vendar naši rezultati niso bili povsem enotni. Meritev v S1-NT in S2-VT nismo izvajali sočasno, zato so se zunanji pogoji (meteorološki parametri, izvori delcev) med stavbama razlikovali. Zaradi različnih zunanjih pogojev, tudi koncentracije delcev v notranjem zraku S1-NT in S2-VT (zaprto obdobje) med seboj težko primerjamo. S2-VT ima višjo tesnost stavbnega ovoja, v primerjavi s S1-NT pa je imela nižjo koncentracijo posamezne frakcije delcev v zaprtem obdobju le takrat, kadar je bila nižja tudi njena koncentracija v odprtem obdobju. Ta pojav smo zabeležili v neogrevalni sezoni, povprečna $C_{N101-200}$ v zaprtem obdobju S2-VT je znašala 901 cm^{-3} (odprto obdobje 1387 cm^{-3}), v S1-NT pa 957 cm^{-3} (odprto obdobje 1477 cm^{-3}). Tudi povprečna $C_{N201-500}$ je bila v neogrevalni sezoni v S2-VT nižja, saj je v zaprtem obdobju znašala 311 cm^{-3} (odprto obdobje 487 cm^{-3}), v primerjavi s S1-NT, kjer je v zaprtem obdobju znašala 408 cm^{-3} (odprto obdobje 566 cm^{-3}). Enako velja še za povprečno $C_{N>500}$, ki je v neogrevalni sezoni v S2-VT v zaprtem obdobju znašala povprečno 5 cm^{-3} (odprto obdobje 10 cm^{-3}), v S1-NT pa v zaprtem obdobju 6 cm^{-3} (odprto obdobje 17 cm^{-3}). V vseh ostalih primerih, zabeleženih v preglednici 26, je bila zunanja koncentracija delcev (odprto obdobje), in s tem tudi njihova notranja koncentracija (zaprto obdobje), višja v S2-VT v primerjavi z manj tesno S1-NT. Točne ocene, skozi katerega izmed obeh ovojev se v stavbo infiltrira več delcev in kolikšen je njihov odstotek, zato ne moremo podati.

V raziskavah Hussein et al. (2019), Klejnowski et al. (2013) ter Zauli-Sajani et al. (2018) so ugotovili, kot omenjamo že v poglavju 4.3.5, da je koncentracija delcev PM_1 v zunanem zraku višja pozimi (ogrevalna sezona) kot poleti (neogrevalna sezona). Tudi meritve naše raziskave, izvedene v odprtem obdobju v S2-VT, potrjujejo ugotovitve zgoraj omenjenih raziskav. Koncentracije vseh frakcij delcev

so v ogrevalni sezoni v S2-VT višje kot v neogrevalni sezoni, kar je razvidno iz preglednice 26, poglavje 9. $C_{N <100}$ je višja za okrog 4300 cm^{-3} , $C_{N 101-200}$ za dobrih 2300 cm^{-3} , $C_{N 201-500}$ za približno 500 cm^{-3} ter $C_{N >500}$ za 12 cm^{-3} . V odprtem obdobju v S1-NT se rezultati meritev deloma razlikujejo od ugotovitev prej omenjenih raziskav. $C_{N <100}$ in $C_{N 101-200}$ sta v odprtem obdobju v ogrevalni sezoni višji kot v neogrevalni sezoni (preglednica 26), in sicer za okrog 400 oziroma 300 cm^{-3} . $C_{N 201-500}$ in $C_{N >500}$ sta ravno nasprotno, v ogrevalni sezoni nižji kot v neogrevalni sezoni (preglednica 26), vendar le za 24 oziroma 5 cm^{-3} . Majhno razliko v koncentraciji delcev v S1-NT (odprto obdobje) pripisujemo obdobju izvedbe meritev, saj so potekale proti koncu ogrevalne sezone (27.–3. 4. 2022), ko so morda nekatera gospodinjstva že prenehala z ogrevanjem (ali ga vsaj občutno zmanjšala), zaradi česar bi lahko bila koncentracija delcev v ozračju bolj podobna tisti v neogrevalni sezoni. Hkrati je raziskava Zauli-Sajani et al. (2018) pokazala, da je v notranjem zraku koncentracija delcev poleti višja kot pozimi, kar nakazuje na večjo infiltracijo delcev v stavbo v poletnem obdobju. V naši raziskavi, kot lahko razberemo iz rezultatov v preglednici 26, je bila v obeh stavbah (S1-NT in S2-VT) v notranjem zraku (zaprto obdobje) številčna koncentracija delcev vseh frakcij višja v ogrevalni sezoni. Izjema je le $C_{N 201-500}$ v S1-NT, ki je imela višjo koncentracijo v neogrevalni sezoni (408 cm^{-3}) v primerjavi z ogrevalno (309 cm^{-3}).

V raziskavi Hussein et al. (2005), ki smo jo omenili v poglavju 4.3.5, so prišli do zaključka, da časovni zamik med najvišjo koncentracijo delcev v zunanjem in najvišjo koncentracijo delcev v notranjem zraku, za delce do 400 nm znaša $10\text{--}45 \text{ min}$. Tudi v naši raziskavi smo želeli določiti ta časovni interval, vendar ker koncentracije delcev nismo merili istočasno v zunanjem in notranjem zraku, ne moremo podati točne ocene. Naše meritve so nam dale le podatek, na osnovi katerega smo lahko izračunali, kdaj koncentracija delcev v notranjem zraku (zaprto obdobje) prične naraščati ter koliko časa traja (Δt), da doseže svojo maksimalno vrednost. Na osnovi tega podatka sklepamo, kakšna je hitrost infiltracije različno velikih delcev skozi ovoj stavbe. Izračunali pa smo tudi, s kolikšnim zamikom, glede na frakcijo $<100 \text{ nm}$, pričnejo naraščati ostale tri frakcije delcev (preglednica 26). Ugotovili smo, da delci $<100 \text{ nm}$ skozi ovoj prehajajo najhitreje.

11 PRIPOROČILA ZA NARAVNO PREZRAČEVANJE, OMEJITVE RAZISKAVE IN NADALJNJE DELO

Na podlagi izmerjenih koncentracij delcev v zunanjem zraku (ki so približek koncentracijam v prostoru v odprtih obdobjih) lahko podamo priporočilo, kdaj je najbolje naravno prezračevati prostore obeh stavb, da vanje preide najmanjše število delcev. Najprimernejši čas za zračenje izbranih stavb je takrat, ko je koncentracija delcev v zunanjem zraku najnižja. Kot je razvidno iz rezultatov naše raziskave, najnižje koncentracije delcev beležimo v zunanjem zraku med 00.00 in 5.00 zjutraj. To je torej obdobje, ko je naravno prezračevanje prostorov najbolj zaželeno, saj bomo vanje vnesli najmanj delcev iz ozračja. Za zagotavljanje ustrezne kakovosti notranjega okolja pa ni dovolj, da zračimo le ponoči med 00.00 in 5.00. Zaradi ostalih onesnaževal, ki so prisotna v notranjem zraku (CO_2 , Rn), je potrebno prostore zračiti tudi podnevi. Priporočamo izbiro obdobj, ko bo koncentracija delcev v zraku čim nižja. To pomeni, da se izogibamo zračenju v času jutranje in popoldanske prometne konice, poleti pa tudi obdobj, ko nekdo v bližini kosi travo ali kuri ogenj. Teže se je visokemu vnosu zunanjih delcev v prostor izogniti pozimi, ko je najbolje, da zračenja izvedemo v obdobjih manj intenzivnega ogrevanja, oz. ta obdobja prilagodimo režimu ogrevanja, ki je v splošni rabi. Najbolje je, da se zračenju izogibamo v zgodnjih jutranjih urah in zgodnjih večernih urah, ko se večina ljudi zadržuje doma in je ogrevanje bolj intenzivno.

V raziskavi smo bili omejeni na en merilnik štetja delcev, zato smo meritve v stavbah izvedli v dveh zaporednih tednih, po en teden v vsaki stavbi, v neogrevalni in ogrevalni sezoni. Pri tem smo izmenjavali odprta in zaprta obdobja (odpirali in zapirali smo okno), da bi zabeležili tako zunanje kot notranje koncentracije delcev. To pomeni, da smo za koncentracijo delcev v zunanjem zraku privzeli koncentracijo delcev, ki smo jo izmerili v prostoru pri odprtem oknu. Na osnovi drugih raziskav, ko je bil merilnik delcev nekaj časa zunaj (Bezek, 2013; Bencek, 2019) in nato v prostoru, in smo dobili primerljive koncentracije delcev, sklepamo, da lahko uporabimo takšen način merjenja. Seveda bi bilo idealno, če bi imeli dva merilnika, enega v prostoru in drugega zunaj, in meritev izvedli sočasno, kar pa je glede na zahtevnost meritve in samo ceno merilnika skoraj neizvedljivo. Še bolj kot sočasna meritev koncentracije delcev zunaj in v prostoru pa bi bila zaželeno sočasna meritev v obeh stavbah, saj bi tako rezultate lažje primerjali in bolje ocenili infiltracijo delcev skozi ovoj stavbe. S sočasno meritvijo v obeh stavbah bi bili meteorološki dejavniki (temperatura, tlak, veter, padavine) primerljivi za obe stavbi, saj sta druga od druge oddaljeni le okrog 1 km. Bolj natančno bi lahko izračunali tudi časovni zamik med najvišjo zunanjo in najvišjo notranjo koncentracijo delcev.

Čeprav je merjenje števila delcev zahtevno, še posebej, če za testni prostor izberemo bivalne prostore, saj s tem omejujemo in motimo bivalni ritem stanovalcev, pa bi bilo smiselno meritve izvajati dlje kot en teden. Če primerjamo neogrevalno in ogrevalno sezono, bi bilo meritve smiselno izvesti poleti julija (manj prometa zaradi dopustov) in pozimi januarja/februarja (sezona ogrevanja na vrhuncu). Vendar pa smo tudi pri tem omejeni, saj merilnik delcev deluje pri temperaturi v območju od -5 do 35 °C. Zaradi večje reprezentativnosti rezultatov bi bilo seveda zaželeno meritve v obeh stavbah izvesti vsaj dve leti zapored. Poleg tega bi bilo v raziskavo smiselno vključiti več stavb v istem kraju z različno tesnimi stavbnimi ovoji. Tako bi lahko razširili vpogled v vlogo tesnjenja stavbnega ovoja pri infiltraciji delcev v stavbo.

12 ZAKLJUČEK

Raziskava obravnava vpliv tesnosti stavbnega ovoja na koncentracijo delcev v zraku dveh stavb. V vsaki stavbi, od katerih ima ena manj tesen stavbni ovoj kot druga, smo izbrali en prostor, v katerem smo kontinuirano merili številčno koncentracije delcev (število v cm^{-3}) velikosti 10–1000 nm, ki smo jih pri analizi razdelili v štiri velikostne razrede (frakcije): $d < 100$ nm ($C_{N < 100}$), $101 < d < 200$ nm ($C_{N 100-200}$), $201 < d < 500$ nm ($C_{N 201-500}$), $d > 500$ nm ($C_{N > 500}$). Meritve smo izvedli v neogrevalni in ogrevalni sezoni, trajale so en teden, pri tem pa smo v prostoru izmenjaje odpirali in zapirali okno. Obdobja, ko je bilo okno odprto, smo poimenovali odprta obdobja (pomenijo koncentracije delcev v zunanjem zraku), obdobja, ko je bilo okno odprto, pa odprta obdobja (pomenijo koncentracijo delcev v zraku prostora oz. notranjem zraku).

Na začetku raziskave smo predpostavili tri hipoteze. Nanje lahko sedaj po izvedenih meritvah in analizi rezultatov odgovorimo. Predvidevali smo, da bo v zraku prostorov stavbe 2 (S2-VT), zaradi višje tesnosti ovoja, koncentracija delcev nižja kot v zraku stavbe 1 (S1-NT), ki ima nižjo tesnost stavbnega ovoja. Vendar se je v ogrevalni sezoni izkazalo ravno obratno. V zraku prostora v S2-VT je v ogrevalni sezoni koncentracija delcev višja kot v zraku prostora v S1-NT. To pomeni, da prve hipoteze za ogrevalno sezono nismo potrdili, saj je bila višja koncentracija delcev prisotna v stavbi z višjo tesnostjo ovoja (S2-VT). Takšen rezultat pojasnjuje koncentracija delcev v zunanjem zraku ogrevalne sezone (odprto obdobje), saj je bila v S2-VT za vse frakcije ($C_{N < 100}$, $C_{N 101-200}$, $C_{N 201-500}$, $C_{N > 500}$) približno dvakrat višja kot v S1-NT. Zaradi višjih koncentracij v zunanjem zraku v ogrevalni sezoni je v S2-VT višja tudi koncentracija v zraku prostora. Po drugi strani pa smo v neogrevalni sezoni našo hipotezo potrdili, saj je bila $C_{N 101-200}$, $C_{N 201-500}$ ter $C_{N > 500}$ v zaprtem obdobju večja v S1-NT kot v S2-VT. Izjema je le $C_{N < 100}$, ki je bila tudi v zaprtem obdobju neogrevalne sezone skoraj za faktor 2 višja v S2-VT. Predvidevamo, da je vzrok restavracija v pritličju v S2-VT, ki skozi prezračevalni sistem v zunanost oddaja delce < 100 nm in tako poveča njihovo koncentracijo v ozračju.

V drugi hipotezi smo predpostavili, da bo v obeh stavbah številčna koncentracija delcev (10–1000 nm), tako v zunanjem kot tudi v notranjem zraku, višja v času ogrevalne sezone v primerjavi z neogrevalno sezono. Številčne koncentracije delcev vseh štirih frakcij ($C_{N < 100}$, $C_{N 101-200}$, $C_{N 201-500}$, $C_{N > 500}$) so bile v S2-VT v odprtem obdobju (zunanji zrak) in v zaprtem obdobju (notranji zrak) višje v ogrevalni kot v neogrevalni sezoni (preglednica 26, poglavje 9). To pomeni, da smo za S2-VT hipotezo v celoti potrdili in dokazali, da je v času ogrevalne sezone zaradi kurjave število delcev v ozračju večje, posledično pa je večje tudi število delcev v notranjem zraku. Za S1-NT so bile v ogrevalni sezoni v odprtem obdobju koncentracije $C_{N < 100}$ ter $C_{N 101-200}$ višje kot v neogrevalni sezoni, koncentracije $C_{N 201-500}$ ter $C_{N > 500}$ pa nižje kot v neogrevalni sezoni. V zaprtem obdobju so bile koncentracije $C_{N < 100}$, $C_{N 101-200}$ ter $C_{N > 500}$ višje v ogrevalni sezoni, koncentracija $C_{N 201-500}$ pa je bila višja v neogrevalni sezoni. To pomeni, da smo za S1-NT hipotezo le deloma potrdili, saj velja le za nekatere frakcije delcev. Prav tako velja omeniti, da je razlika v številčni koncentraciji delcev med sezonama v S2-VT bolj izrazita (beležimo porast za faktor 2–3 v ogrevalni sezoni). V S1-NT razlika v koncentraciji delcev med sezonama ni tolikšna (razlikuje se zgolj za faktor 1,1–1,5). Zaključimo lahko, da v času izvajanja meritev v S1-NT koncentracija delcev zaradi kurjave (ogrevanja stavb) v ozračju ni bila več tako visoka.

Naša zadnja hipoteza je predvidevala, da bo imela S1-NT, ki ima nižjo stopnjo zrakotesnosti stavbnega ovoja, manjši časovni zamik med zaznavanjem povišane koncentracije delcev, ki se iz zunanosti infiltrirajo v stavbo. Izkazalo se je, da omenjene hipoteze ne moremo niti potrditi niti zanikati. Ker koncentracije delcev nismo merili sočasno v zunanjem in notranjem zraku, ne vemo točno, kdaj je začela naraščati v zunanjem zraku. Vemo samo, kakšna je bila koncentracija delcev v zunanjem zraku v trenutku, preden smo zaprli okno, in imamo podatek, kdaj je pričela koncentracija delcev posamezne frakcije naraščati v notranjem zraku. Vse, kar lahko zaključimo, je, da v obeh stavbah skozi ovoj najhitreje preidejo delci <100 nm, ostale frakcije, če jih ovrednotimo glede na $C_{N <100}$, preidejo počasneje, prav tako pa začnejo skozi ovoj prehajati z zamikom (preglednica 26, poglavje 9). Ugotovili smo tudi, da delci <100 nm skozi ovoj v S2-VT, ki ima višjo tesnost, preidejo počasneje kot v S1-NT, ki ima nižjo tesnost (S2-VT: $\Delta t = 7,3\text{--}3,4$ h; S1-NT: $\Delta t = 3,8\text{--}5,4$ h). Hkrati je tudi zamik, s katerim začnejo naraščati ostale frakcije, glede na $C_{N <100}$, večji v S2-VT (S2-VT: zamik = $8,9\text{--}10,8$ h; S1-NT: zamik = $3,4\text{--}7,4$ h).

Ne smemo pozabiti, da so bili naši rezultati meritev močno odvisni tudi od zunanjih dejavnikov (temperatura zunanjega zraka, tlak, veter, padavine). Upoštevati smo jih morali pri vrednotenju rezultatov, saj pogoji za obe stavbi niso bili enaki, ker meritev nismo mogli izvesti sočasno. Kljub temu nam rezultati potrjujejo, da tesnost stavbnega ovoja pomembno vpliva na infiltracijo delcev v notranjost stavbe. Hkrati rezultati kažejo, da je prehod delcev skozi ovoj stavbe široko in zahtevno področje, ki za popolno razumevanje zahteva obsežne raziskave. Na tem področju je zaenkrat opravljenih le manjše število študij, zato bo tudi naša raziskava nedvomno pripomogla k boljšemu poznavanju in razumevanju prehoda delcev <1000 nm skozi stavbni ovoj.

VIRI

- Abt, E., Suh, H. H., Catalano, P., Koutrakis, P. 2000. Relative contribution of outdoor and indoor particle sources to indoor concentrations. *Environmental Science Technology* 34: 3579–3587.
doi.org/10.1021/es990348y
- Agarwal, N., Meena, C. S., Raj, B. P., Saini, L., Kumar, A., Gopalakrishnan, N., Kumar, A., Balam, N. B., Alam, T., Kapoor, R. N., Aggarwal, V. 2021. Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic: Review. *Sustainable Cities and Society* 70: 102942. doi.org/10.1016/j.scs.2021.102942
- Anis, W. 2016. Air barrier systems in buildings. *Whole Building Design Guide*.
<https://www.wbdg.org/resources/air-barrier-systems-buildings> (Pridobljeno 17. 12. 2022.)
- ARSO. 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-ashrae-standards> (Pridobljeno 13. 12. 2022.)
- Bertin Technologies. 2019. AlphaGUARD User Manual. <https://www.laurussystems.com/wp-content/uploads/USER-MANUAL-ALPHAGUARD-2019.pdf> (Pridobljeno 11. 2. 2023.)
- Bencek, A. P. 2019. Odvisnost koncentracije nanodelcev v zunanjem zraku od stabilnosti atmosfere. Magistrsko delo. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici.
- Bezek, M. 2013. Vloga nano aerosolov v dozimetriji radona. Doktorska disertacija. Ljubljana, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana (samozaložba M. Bezek).
- Bolling Kochbach, A., Pagels, J., Espen Yttri, K., Barregard, L., Sallsten, G., Schwarze, P. E., Boman, C. 2009. Health effects of residential wood smoke particles: The importance of combustion conditions and physicochemical particle properties. *Particle and Fibre Toxicology* 6: 29.
doi.org/10.1186/1743-8977-6-29
- Caracci, E., Stabile, L., Buonanno, G. 2021. A simplified approach to evaluate the lung cancer risk related to airborne particles emitted by indoor sources. *Building Environment* 204: 108143.
doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108143
- Danel, V. 2019. Airborne particulate matter and their health effects. *Encyclopedia of the Environment*.
<https://www.encyclopedia-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects/>
(Pridobljeno 13. 12. 2022.)
- Direktiva 2008/50/ES o kakovosti zunanjega zraka in čistejšem zraku za Evropo. Uradni list Evropske unije. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=en>
(Pridobljeno 9. 1. 2023.)
- Direktiva Sveta 2013/59/Euratom o določitvi temeljnih varnostnih standardov za varstvo pred nevarnostmi zaradi ionizirajočega sevanja.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/sl/TXT/?uri=CELEX%3A32013L0059> (Pridobljeno 9. 1. 2023.)

Dominick, D., Wilson, S. R., Paton-Walsh, C., Humpries, R., Guerette, E. A., Keywood, M., Kubistin, D., Marwick, B. 2018. Characteristics of airborne particle number size distributions in a coastal-urban environment. *Atmospheric Environment* 186: 256–265. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.031

Dovjak, M., Kuček, A. 2019. *Creating Healthy and Sustainable Buildings*. Springer Nature Switzerland AG. doi.org/10.1007/978-3-030-19412-3

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. doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113742

European Commission. 2020. In focus: Energy efficiency in buildings. https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en (Pridobljeno 14. 4. 2023.)

EEA. 2022. Air quality in Europe 2022 report. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution> (Pridobljeno 28. 11. 2022.)

EPA. 2012. Revised air quality standards for particle pollution and updates to the air quality index. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-04/documents/2012_aqi_factsheet.pdf (Pridobljeno 9. 1. 2023.)

EPA. 2021. What is EPA's action level for radon and what does it mean? <https://www.epa.gov/radon/what-epas-action-level-radon-and-what-does-it-mean> (Pridobljeno 9. 1. 2023.)

EPA. 2022. Introduction to indoor air quality. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality> (Pridobljeno 30. 1. 2023.)

Geološki zavod Slovenije. 2022. Osnovna geološka karta. <https://ogk100.geo-zs.si/> (Pridobljeno 3. 2. 2023.)

Gozzi, F., Della Ventura, G., Marcelli, A., Lucci, F. 2017. Current status of particulate matter pollution in Europe and future perspectives: a Review. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 8, 6: 1901–1909.

Green Home Technology Center. 2022. Natural Ventilation. <https://greenhome.osu.edu/natural-ventilation> (Pridobljeno 11. 2. 2023.)

Grimm. 2012. Scanning mobility particle sizer. <https://pdf.directindustry.com/pdf/grimm-aerosol-technik/nano-smmps-c/69071-658941.html> (Pridobljeno 15. 2. 2023.)

Gyasi, P. 2021. Air infiltration measurement by tracer gas and pressurization techniques. doi.org/10.13140/RG.2.2.11029.04324

Hanke, W., Jansson, B., Komulainen, H., Ladefoged, O., Mangelsdorf, I., Steenhout, A., Testai, E., Nielsen, G., Harteman, P., Nevalainen, A. 2007. SCHER Opinion on risk assessment on indoor air quality. https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scher/docs/scher_o_055.pdf (Pridobljeno 30. 2. 2023.)

He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert, D. 2004. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentration in residential houses. *Atmospheric Environment* 38: 3405–3415. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.027

Hernandez, G., Berry, T. A., Wallis, S. L., Poyner, D. 2017. Temperature and Humidity Effects on Particulate Matter Concentrations in a Sub-Tropical Climate During Winter. International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering 102.

https://www.researchgate.net/publication/332707202_Temperature_and_humidity_effects_on_particulate_matter_concentrations_in_a_sub-tropical_climate_during_winter (Pridobljeno 25. 2. 2023.)

HOBO Data loggers. 2015. HOBO MX CO2 Logger (MX1102) Manual.

https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/19198-J%20MX1102%20Manual.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2023.)

Hu, Y., Yao, M., Liu, Y., Zhao, B. 2020. Personal exposure to ambient PM2.5, PM10, O3, NO2 and SO2 for different population in 31 Chinese provinces. Environmental International 144: 106018.

doi.org/10.1016/j.envint.2020.106018

Hussein, T., Hämeri, K., Aalto, P., Asmi, A., Kakko, L., Kulmala, M. 2004. Particle size characterization and the indoor-to-outdoor relationship of atmospheric aerosols in Helsinki.

Scandinavian Journal of Work, Environment & Health 30: 54–62.

https://www.researchgate.net/publication/8228509_Particle_size_characterization_and_the_indoor-to-outdoor_relationship_of_atmospheric_aerosols_in_Helsinki (Pridobljeno 27. 2. 2023.)

Hussein, T., Hämeri, K., Heikkinen, M. S. A., Kulmala, M. 2005. Indoor and outdoor particle size characterization at a family house in Espoo-Finland. Atmospheric Environment 39: 3697–3709.

doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.03.011

Hussein, T., Dada, L., Hakala, S., Petäjä, T., Kulmala, M. 2019. Urban Aerosol Particle Size Characterization in Eastern Mediterranean Conditions. Atmosphere 10: 710.

<https://doi.org/10.3390/atmos10110710>

Katsouyanni, K. 2013. Geographical distribution of air pollutants. IARC Scientific publication 161.

Keith, S., Doyle, J. R., Harper, C., Mumtaz, M., Tarrago, O., Wohlers D. W., Diamond G. L., Citra, M., Barber, L. E. 2012. Toxicological Profile for Radon. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US). <https://europepmc.org/article/nbk/nbk158784> (Pridobljeno 9. 3. 2023.)

Kelley, M. 2020. Demand based ventilation with particle counters.

<https://www.setra.com/blog/demand-based-ventilation-with-particle-counters> (Pridobljeno 23. 3. 2023.)

Kelly, F. J., Fussell, J. C. 2012. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. Atmospheric Environment 60: 504–526.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.039>

Klejnowski, K., Krasa, A., Rogula-Kozłowska, V., Blaszcak, B. 2013. Number Size Distribution of Ambient Particles in a Typical Urban Site: The First Polish Assessment Based on Long-Term (9 Months) Measurements. The Scientific World Journal 2013: 539568.

<https://doi.org/10.1155/2013/539568>

Krainer, A. 1993. Toward smart buildings, (Building science and environment-conscious design, Module 1: Design principles, 7). European Commission, London.

Küçüküseyin, Ö. 2021. CO₂ monitoring and indoor air quality. The REHVA European HVAC

Journal 58: 54–59. <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/co2-monitoring-and-indoor-air-quality> (Pridobljeno 3. 3. 2023.)

Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G., Roux, J. J. 2013. Assessment of the air change rate of airtight buildings under natural conditions using the tracer gas technique. Comparison with numerical modelling. *Building and Environment* 60: 37–44. doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.010

Leprince, V., Kapsalaki, M., Carrie, F. R. 2017. Impacts of energy policies on building and ductwork airtightness. *Ventilation Information Paper* 37. <https://www.aivc.org/sites/default/files/VIP37.pdf> (Pridobljeno 16. 3. 2023.)

Limb, M. J. 2001. A review of international ventilation, airtightness, thermal insulation and indoor air quality criteria. https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Technotes/TN55%20REVIEW%20OF%20VENTILATION%20CRITERIA.pdf (Pridobljeno 16. 3. 2023.)

Lv, Y., Wang, H., Wei, S., Zhang, L., Zhao, Q. 2017. The Correlation between Indoor and Outdoor Particulate Matter of Different Building Types in Daqing, China. *Procedia Engineering* 205: 360-367. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.002

Miller, P. 2019. Stack effect: Why it was so difficult to stay warm this winter. *Henderson headlines*. https://www.hendersonengineers.com/insight_article/stack-effect-why-it-was-so-difficult-to-stay-warm-this-winter/ (Pridobljeno 17. 3. 2023.)

Minnesota Department of Health. 2021. Carbon Dioxide (CO₂). <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/air/toxins/co2.html> (Pridobljeno 22. 3. 2023.)

Morawska, L., Ristovski, Z., Jayarante, E.R., Keogh, D.U., Ling, X. 2008. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmospheric Environment* 42: 8113–8138. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050

Nam, E., Kishan, S., Baldauf, R. W., Fulper, C. R., Sabisch, M., Warila, J. 2010. Temperature Effects on Particulate Matter Emissions from Light-Duty, Gasoline-Powered Motor Vehicles. *Environmental Science and Technology* 44: 4672–4677. doi.org/10.1021/es100219q

Natural Resources Canada. 2008. Radon: Test your home. <https://www.york.ca/newsroom/campaigns-projects/radon-test-your-home> (Pridobljeno 22. 3. 2023.)

Nazaroff, W. W., Nero, A. V. Jr. 1988. *Radon and its decay products in indoor air*. New York. John Wiley and Sons Inc: 1–53.

Ogrin, D. 1996. Podnebni tipi v Sloveniji. *Geografski vestnik* 68: 45-50. http://zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski_vestnik/Pred1999/GV_6801_039_056.pdf (Pridobljeno 3. 4. 2023.)

Odprti podatki Slovenije. 2023. Prometne obremenitve od leta 1997 dalje. Ministrstvo za infrastrukturo, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo. <https://podatki.gov.si/dataset/pldp-karte-prometnih-obremenitev> (Pridobljeno 1. 4. 2023.)

Pečarič, A. 2007. Sodobni sistemi za prezračevanje. <https://www.varcevanje-energije.si/prezracanje/sodobni-sistemi-za-prezracanje.html> (Pridobljeno 11. 3. 2023.)

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb. Uradni list RS, št. 42/02. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV4223#> (Pridobljeno 9. 3. 2023.)

RDH Building Engineering Ltd. 2013. Air Leakage Control in Multi-Unit Residential Buildings. https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article-air_leakage_control_in_large_res_buildings.pdf (Pridobljeno 5. 4. 2023.)

Ricketts, L., Finch, G., Bombino, R. 2013. Air Leakage Control in Multi-Unit Residential Buildings. https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article-air_leakage_control_in_large_res_buildings.pdf (Pridobljeno 21. 2. 2023.)

Rigamonti, D. 2021. Natural ventilation of buildings. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Natural_ventilation_of_buildings (Pridobljeno 11. 3. 2023.)

Saint-Gobain. 2018. Climatic loads 2A Determination of wind loads. <https://techhub.uk.saint-gobain-building-glass.com/sites/default/files/document-files/Climatic%20Loads%20A%20-%20Determination%20of%20Wind%20Loading%20-%202021-09-2018.pdf> (Pridobljeno 17. 1. 2023.)

Saphymo GmbH. 2012. AlphaPM Instruction Manual.

SARAD. 2020. Manual Radon Scout Professional https://www.sarad.de/cms/media/docs/handbuch/Manual_Radon-Scout_Professional_EN_19-03_2020.pdf (Pridobljeno 15. 1. 2023.)

Schittich, C., Stalb, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W. 2007. Glass Construction Manual, 2nd edition. München, Institut für Internationale Architektur und Dokumentation. <https://books.google.si/books?id=pt8xCgAAQBAJ&pg=PA131&lpg=PA131&dq=EN+12207+values+for+windows&source=bl&ots=G2D3eJTjWc&sig=ACfU3U2-o7KX4U0YhnhYEsBIUT4STjUbAQ&hl=sl&sa=X&ved=2ahUKewjNy-3ciev3AhWID-wKHS3WBW4Q6AF6BAbgEAM#v=onepage&q&f=false> (Pridobljeno 19. 1. 2023.)

Schraufnagel, D. E. 2020. The health effects of ultrafine particles. *Experimental and Molecular Medicine* 52: 311–317. doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3

Shi, Z., He, K., Yu, X., Yao, Z., Yang, F., Ma, Y., Ma, R., Jia, Y., Zhang, J., 2007. Diurnal variation of number concentration and size distribution of ultrafine particles in the urban atmosphere of Beijing in winter. *Journal of Environmental Sciences*, 19: 933–938. [doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60154-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60154-5)

Shi, Y., Li, X. 2019. A convenient method to assess air infiltration rate using particle mass balance principle. *Clima Web of Conferences* 111: 2–3. doi.org/10.1051/e3sconf/201911106039

SIST EN ISO 9972:2015. Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a5abb851-cf9e-46e9-9b54-606d33e56abb/sist-en-iso-9972-2015> (Pridobljeno 1. 4. 2023.)

Statistični urad Republike Slovenije. 2022. Prebivalstvo – izbrani kazalniki, občine in naselja, Slovenija, letno. <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/Data/05C5006S.px/> (Pridobljeno 26. 3. 2023.)

Strosnider, H., Kennedy, C., Monti, M., Yip, F. 2017. Rural and Urban Differences in Air Quality, 2008-2012 and Community Drinking Water Quality 2010-2015 – United States. *Surveillance Summaries* 66: 1–10. doi.org/10.15585/mmwr.ss6613a1

Talbot, N., Kubelova, L., Makeš, O., Ondraček, J., Cusack, M., Schwarz, J., Vodička, P., Zikova, N., Ždimal, V. 2017. Transformations of Aerosol Particles from an Outdoor to Indoor Environment. *Aerosol and Air Quality Research* 17: 653–665. doi.org/10.4209/aaqr.2016.08.0355

- Tehnična smernica o učinkoviti rabi energije TSG-1-004:2010. Uradni list RS, št. 102/04.
https://www.ozs.si/datoteke/ozs/sekcije/Janko%20Rozman/Sekcija%20instalaterjev-energetikov/TSG-01-004_2010_U%C4%8Dinkovita%20raba%20energije.pdf (Pridobljeno 19. 1. 2023.)
- Tehnična smernica o energijski učinkovitosti stavb TSG-1-004:2022. Uradni list RS, št. 199/21.
https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Dokumenti/Graditev/TSG-1-004_2022_ure.pdf
(Pridobljeno 29. 1. 2023.)
- Tehnična smernica o razvrščanju objektov TSG-V-006:2022. Uradni list RS, št. 199/21.
https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Dokumenti/Graditev/TSG-V-006_2022_razvrscanje_objektov.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2023.)
- 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>
- Vaupotič, J., Žvab, P., Smrekar, N., Gregorič, A., Dujmovič, P., Kobal, I. 2007. Sistematično pregledovanje delovnega in bivalnega okolja 2007. Ljubljana, Institut Jožef Stefan: str. 7–8.
<https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Porocila-radon/28591f3097/Porocilo-Radon-2007.pdf> (Pridobljeno 15. 3. 2023.)
- Vallius, M. 2005. Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air. Publications of the National Public Health Institute A 6/2005.
https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/9066/urn_isbn_951-740-508-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Pridobljeno 13. 2. 2023.)
- Vu, T. V., Delgado-Saborit, M., Harrison, R. M. 2015. Review: Particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies. Atmospheric Environment 122: 114–132. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.027
- Wallace, L. A., Emmerich, S. J., Howard-Reed, C. 2004. Source Strengths of Ultrafine and Fine Particles Due to Cooking with Gas Stove. Environmental Science Technology 38: 2304–2311.
doi.org/10.1021/es0306260
- Wallis, S. L., Hernandez, G., Poyner, D., Holmes, W., Birchmore, R., Berry, T. A. 2019. Particulate matter in residential buildings in New Zealand: Part II. The impact of building airtightness, mechanical ventilation using simulated occupancy. Atmospheric Environment 2019: 100026.
doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100026
- WHO. 2021. Ambient (outdoor) air pollution.
[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
(Pridobljeno 4. 4. 2023.)
- WHO. 2010. WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants.
https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf (Pridobljeno 9. 2. 2023.)
- WHO. 2013. Health effects of particulate matter.
https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf (Pridobljeno 12. 2. 2023.)
- WHO. 2009. WHO Handbook on indoor radon.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673> (Pridobljeno 6. 1. 2023.)
- WHO. 2023. Radon and health.
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health> (Pridobljeno 9. 2. 2023.)

- Younes, C., Abi Shdid, C., Bitsuamlak, G. 2011. Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics* 35: 267–302. doi.org/10.1177/1744259111423085
- Young, L. H., Keeler, G. J. 2004. Characterization of Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution During a Summer Campaign in Southwest Detroit. *Journal of the Air&Waste Management Association* 54: 1079–1090.
<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10473289.2004.10470987> (Pridobljeno 20. 3. 2023.)
- Zauli-Sajani, S., Rovelli, S., Trentini, A., Bacco, D., Marchesi, S., Scotto, F., Zigola, C., Lauriola, P., Cavallo, D. M., Poluzzi, V., Cattaneo, A., Hänninen, O. 2018. Higher health effects of ambient particles during the warm season: The role of infiltration factors. *Science of the Total Environment* 627: 67–77. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.217
- Zhang, T., Zhu, Z., Gong, W., Xiang, H., Fang, R. 2016. Characteristics of Fine Particles in an Urban Atmosphere – Relationships with Meteorological Parameters and Trace Gases. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13: 807. doi.org/10.3390/ijerph13080807
- Zhao, J., Birmili, W., Wehner, B., Daniels, A., Weinhold, K., Wang, L., Merkel, M., Kecorius, S., Turch, T., Franck, U., Hussein, T., Wiedensohler, A. 2020. Particle Mass Concentrations and Number Size Distributions in 40 Homes in Germany: Indoor-to-outdoor Relationships, Diurnal and Seasonal Variation. *Aerosol and Air Quality Research* 20: 576–589. doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0444
- Zheng, X., Mazzon, J., Wallis, I., Wood, C. J., 2020. Airtightness measurement of fan outdoor chamber using the Pulse and blower door methods under various wind and leakage scenarios. *Building and environment* 179: 106950. doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106950