

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE STAVBARSTVO

Ljubljana, 2023

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

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

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Mateji Doyjak in somentorici prof. dr. Janji Vaupotič (Institut "Jožef Stefan") za vloženo energijo in čas ter strokovno pomoč pri izdelavi in pisanju magistrskega dela.

Meritve smo izvedli v okviru raziskovalnega programa P1-0143 (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.

Iskreno se zahvaljujem dr. Nikoli Svrkoti ter "Centru za ekotoksikološka istraživanja" v Podgorici za izposojene detektorje jedrskih sledi in nesebično strokovno pomoč pri izvedbi meritev v Črni gori.

Zahvaljujem se zaposlenim v izbranih vrtcih v Sloveniji in Črni gori, da so nam odstopili svoje prostore za meritve in da so nam bili vedno na voljo za vsa vprašanja.

Kolegici Tajdi Božič, mag. inž. stavb. se najlepše zahvaljujem za vsestransko podporo in pomoč v času študija.

Hvala moji družini, ki brezpogojno verjame vame in me vedno podpira.

Hvala mojemu Vuku, s katerim vse moje ambicije ugledajo luč sveta.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 546.296:628.8:37.018.5(497.4)(497.16)(043.3)
Avtor: Anja Rupčič, inženirka politehnike (BSc)
Mentor: izr. prof. dr. Mateja Dovjak
Somentor: prof. dr. Janja Vaupotič
Naslov: Odvisnost dinamike radona od gradbenotehničnih karakteristik in režima dela v izbranih stavbah vzgojno-varstvenih zavodov v Sloveniji in Črni gori
Tip dokumenta: magistrsko delo
Obseg in oprema: 75 str., 7 pregl., 23 sl., 98 vir.
Ključne besede: Rn, CO₂, vrtec, stavbni ovoj, prezračevanje, režim dela

Izvleček

Raziskava obravnava dinamiko radona (Rn) v odvisnosti od geološke podlage lokacije in meteoroloških dejavnikov, gradbenotehničnih karakteristik stavbe ter režima dela in prezračevalnih navad v izbranih VVZ v Sloveniji in Črni gori. Na osnovi radonskih kart tveganja za Slovenijo in Črno goro smo izbrali štiri stavbe VVZ, in sicer dve v Sloveniji (SI-1 in SI-2) na področju zmerne tveganja za radon in dve v Črni gori (ME-1 in ME-2) na področju visokega tveganja za radon. Stavba SI-1 ima srednjo zrakotesnost stavbnega ovoja in naravno prezračevanje, stavba SI-2 pa visoko zrakotesnost stavbnega ovoja in hibridno prezračevanje. Stavbi ME-1 in ME-2 imata nizko zrakotesnost stavbnega ovoja in naravno prezračevanje. Režim dela je v vseh izbranih stavbah enak. V vseh štirih stavbah smo izvedli nekajtedenske kontinuirne meritve koncentracije Rn v zraku (večinoma v igralnicah) v obdobju prehoda iz hladne v toplo polovico leta (4. 2.–25. 4. 2022 v SI-1 in SI-2 in 18. 3.–14. 4. 2022 v ME-1 in ME-2). V SI-1 in SI-2 v Sloveniji smo dodatno kontinuirno merili še koncentracijo CO₂ (indikator kakovosti zraka v prostorih v času zasedenosti in učinkovitosti prezračevanja). V ME-1 in ME-2 v Črni gori smo dodatno merili povprečne koncentracije Rn v izbranih prostorih in v zunanjem zraku. Najbolj so nas zanimale povprečne koncentracije Rn v igralnicah v času obratovanja vrtcev (8 ur dnevno), ki smo jih izračunali iz kontinuirnih meritev za celotno obdobje in dobili naslednje vrednosti: (i) Slovenija, stavba SI-1, igralnica I1_SI-1, $C_{Rn}=109 \pm 65 \text{ Bq m}^{-3}$, stavba SI-2, igralnica I1_SI-2 $C_{Rn}=79 \pm 68 \text{ Bq m}^{-3}$ in igralnica I2_SI-2 $C_{Rn}=69 \pm 57 \text{ Bq m}^{-3}$, (ii) Črna gora, stavba ME-1, igralnica I1_ME-1 $C_{Rn}=227 \pm 207 \text{ Bq m}^{-3}$, stavba ME-2 igralnica I2_ME-2 $C_{Rn}=264 \pm 191 \text{ Bq m}^{-3}$ in garderoba G1_ME-2 $C_{Rn}=290 \pm 208 \text{ Bq m}^{-3}$. Koncentracije Rn so v delovnem času v igralnicah ME-1 in ME-2 v Črni gori višje za faktor okrog 3 kot so v igralnicah v SI-1 in SI-2 v Sloveniji. V ME-1 in ME-2 so jutranje koncentracije Rn običajno med 600 in 1000 Bq m⁻³, v SI-1 in SI-2 pa med 200 in 300 Bq m⁻³. V SI-1 in SI-2 v Sloveniji pa so v delovnem času večkrat presežene koncentracije CO₂. Dinamika Rn je v zraku vseh štirih stavb VVZ podobna, poleg geološke podlage pa na območje koncentracije Rn v prostoru odločilno vpliva zrakotesnost stavbnega ovoja. V ME-1 in ME-2 je ta slaba predvsem na stiku temeljne plošče z zemljino (preboji, razpoke), zato talni zrak, bogat z Rn, neovirano vstopa v obe stavbi, kjer se Rn kopiči. V ME-1 in ME-2 zadovoljivo nizkih koncentracij Rn ne morejo zagotoviti samo s prezračevanjem, potrebna bi bila radonska sanacija stavb. V SI-1 in SI-2 je koncentracija Rn zadovoljivo nizka, priporočljivo pa bi bilo optimizirati prezračevanje v delovnem času (povečati pogostost in trajanje prezračevanja) zaradi pogosto preseženih koncentracij CO₂.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 546.296:628.8:37.018.5(497.4)(497.16)(043.3)
Author: Anja Rupčič, B. Sc.
Supervisor: Assoc. Prof. Mateja Dovjak, Ph. D.
Co-supervisor: Prof. Janja Vaupotič, Ph. D.
Title: Dependence of radon dynamics on building characteristics and work regime in selected educational buildings in Slovenia and Montenegro
Document type: Master Thesis
Notes: 75 p., 7 tab., 23 fig., 98 ref.
Keywords: Rn, CO₂, kindergarten, building envelope, ventilation, working regime

Abstract

The research examines the dynamics of radon (Rn) depending on the geological basis of the location and meteorological factors, the building characteristics and the work regime and ventilation patterns in selected educational institutions in Slovenia and Montenegro. Based on the radon risk maps for Slovenia and Montenegro, we selected four educational buildings, namely two in Slovenia (SI-1 and SI-2) in the area of moderate radon risk and two in Montenegro (ME-1 and ME-2) in an area of high radon risk. Building SI-1 has medium air tightness of the building envelope and natural ventilation, while building SI-2 has high air tightness of the building envelope and hybrid ventilation. Buildings ME-1 and ME-2 have low airtightness of the building envelope and natural ventilation. The work regime is the same in all selected buildings. In all four buildings, we carried out several weeks of continuous measurements of the Rn concentration in the air (mostly in the playrooms) during the transition period from the cold to the warm half of the year (February 4–April 25, 2022 in SI-1 and SI-2 and March 18–April 14, 2022 in ME-1 and ME-2). In SI-1 and SI-2 in Slovenia, we additionally continuously measured the concentration of CO₂ (indicator of air quality in rooms during occupancy and ventilation efficiency). In ME-1 and ME-2 in Montenegro, we additionally measured average Rn concentrations in selected rooms and in the outside air. We were most interested in the average concentrations of Rn in the playrooms during the operation of the kindergartens (8 hours a day), which we calculated from continuous measurements for the entire period and obtained the following values: (i) Slovenia, building SI-1, playroom I1_SI-1, $C_{Rn}=109 \pm 65 \text{ Bq m}^{-3}$, building SI-2, playroom I1_SI-2 $C_{Rn}=79 \pm 68 \text{ Bq m}^{-3}$ and playroom I2_SI-2 $C_{Rn}=69 \pm 57 \text{ Bq m}^{-3}$, (ii) Montenegro, building ME-1, playroom I1_ME-1 $C_{Rn}=227 \pm 207 \text{ Bq m}^{-3}$, building ME-2 playroom I2_ME-2 $C_{Rn}=264 \pm 191 \text{ Bq m}^{-3}$ and dressing room G1_ME-2 $C_{Rn}=290 \pm 208 \text{ Bq m}^{-3}$. Rn concentrations are higher during working hours in playrooms ME-1 and ME-2 in Montenegro by a factor of about 3 than in playrooms in SI-1 and SI-2 in Slovenia. In ME-1 and ME-2, morning Rn concentrations are usually between 600 and 1000 Bq m⁻³, and in SI-1 and SI-2 between 200 and 300 Bq m⁻³. In SI-1 and SI-2 in Slovenia, CO₂ concentrations have been exceeded several times during working hours. The dynamics of Rn in the air of all four educational buildings is similar, in addition to the geological basis of the area, the Rn concentration in the room is crucially influenced by the airtightness of the building envelope. In ME-1 and ME-2, this is poor, especially at the contact of the foundation slab with the ground (shafts, cracks), so Rn reach soil air easily enters both buildings, where Rn accumulates. In ME-1 and ME-2, satisfactorily low Rn concentrations cannot be

ensured by ventilation alone, radon remediation of the buildings would be necessary. In SI-1 and SI-2, the concentration of Rn is satisfactorily low, but it would be advisable to optimize ventilation during working hours (increase the frequency and duration of ventilation) due to the often exceeded CO₂ concentrations.

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA	I
ZAHVALA	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PREGLEDNIC	X
OKRAJŠAVE / ABBREVIATIONS	X
SIMBOLI / SYMBOLS	XII
1 UVOD	1
2 CILJI IN HIPOTEZE	5
3 TEORETIČNO OZADJE	6
3.1 Zahteve za graditev VVZ stavb v Sloveniji in Črni gori	6
3.2 Prezračevanje stavb	10
3.3 Fizikalno-kemične lastnosti radona	10
3.4 Radon v stavbah	11
3.4.1 Vpliv geologije in meteorologije na koncentracije radona	11
3.4.2 Vstop radona v stavbo in vloga stavbnega ovoja	13
3.4.3 Dinamika radona v prostoru	15
3.5 Koncentracije radona po Evropi in pregled raziskav v vrtcih v Sloveniji in Črni gori ...	17
3.5.1 Pregled raziskav VVZ - Slovenija	19
3.5.2 Pregled raziskav VVZ – Črna gora	21
3.6 Ogljikov dioksid v stavbah	22
3.7 Dnevni potek koncentracij radona in ogljikovega dioksida v igralnici vrtca	24
4 METODE	25
4.1 Izbor lokacij	25
4.2 Izbor stavb VVZ in prostorov	28
4.2.1 Gradbenotehnični opis stavb in prostorov v Sloveniji	29
4.2.2 Gradbenotehnični opis stavb in prostorov v Črni gori	30
4.3 Merilna oprema	32
4.3.1 Radon Scout Professional	32
4.3.2 Radon Scout	33
4.3.3 Detektor jedrskih sledi Radosys	34
4.4 Izvedba meritev	34
4.4.1 Slovenija – meritve koncentracije ^{222}Rn in CO_2	34
4.4.2 Črna gora – meritve koncentracije ^{222}Rn	35
5 REZULTATI	38
5.1 Koncentracije ^{222}Rn in CO_2 v stavbah VVZ v Sloveniji	38
5.1.1 Koncentracije ^{222}Rn in CO_2 v stavbah VVZ v Sloveniji v izbranem tednu	44
5.2 Koncentracije ^{222}Rn v stavbah VVZ v Črni gori	48

5.2.1	Koncentracije ^{222}Rn v stavbah VVZ v Črni gori v izbranem tednu	51
5.3	Povzetek opisa stavb in rezultatov meritev za izbrane VVZ v Sloveniji in Črni gori.....	54
6	DISKUSIJA.....	57
6.1	Vloga stavbe pri koncentracijah ^{222}Rn in CO_2 v VVZ v Sloveniji in Črni gori glede na geološke značilnosti lokacije in meteorološke dejavnike	57
6.2	Vloga prezračevanja pri koncentracijah ^{222}Rn in CO_2 v VVZ v Sloveniji in Črni gori...	61
6.3	Predlogi za izboljšanje stanja ^{222}Rn in CO_2 glede na gradbenotehnične značilnosti stavb in zakonodajo	62
7	ZAKLJUČKI	63
VIRI.....		65

KAZALO SLIK

Slika 1: Shema strukture magistrskega dela.	4
Slika 2: Morfologija graditve stavb.	7
Slika 3: Razpadna vrsta ^{238}U , v kateri nastaja ^{222}Rn (povzeto po Syarbaini in Pudjadi, 2015).	11
Slika 4: Vstop radona v stavbo in širjenje iz kleti v nadstropja (povzeto po Schmid in sod., 2010).	14
Slika 5: Evropski radonski atlas koncentracij v domovih (Cinelli in sod., 2019).	18
Slika 6: Potek koncentracije v vrtcu a) Rn, b) CO_2	24
Slika 7: Geološka karta Slovenije (levo) (Bavec in sod., 2013) in geološka karta Črne gore (desno) (Radusinović, 2018).	25
Slika 8: Karta tveganja za radon: za Slovenijo (levo) (Vaupotič in Gregorič, 2017), za Črno goro (desno) (MORT, 2018).	26
Slika 9: Slovenske občine; občina Grosuplje je obarvana rdeče (Geopedia, 2022).	27
Slika 10: Regije in občine Črne gore (levo); občina Nikšić (desno) je obarvana rdeče (Vukotić, 2019a).	28
Slika 11: Tloris stavbe SI-1, z modro barvo je označena igralnica 1 (I1_SI-1), kjer smo izvedli meritve; z modro piko pozicija merilnika Radon Scout Professional.	29
Slika 12: Tloris stavbe SI-2, z modro barvo sta označeni igralnici 5 (I1_SI-2) in 6 (I2_SI-2), kjer smo izvedli meritve; z modro piko pozicija merilnika Radon Scout Professional.	30
Slika 13: Tloris stavbe ME-1; z modro barvo je označena igralnica (I1_ME-1), kjer smo izvedli kontinuirno meritev, z modro piko pa pozicija merilnika Radon Scout; z oranžno barvo je označena igralnica (I2_ME-1), kjer smo izvedli meritve z detektorji jedrskih sledi, z oranžnimi pikami pa pozicije detektorjev jedrskih sledi Radosys v igralnicah (I1_ME-1, I2_ME-1) in zunaj (D1_ME-1, D2_ME-1).	31
Slika 14: Tloris stavbe ME-2; z modro barvo sta označeni igralnica (I1_ME-2) in garderoba (G1_ME-2), kjer smo izvedli kontinuirni meritvi, z modrima pikama sta označeni poziciji merilnikov Radon Scout; z oranžno barvo je označena pozicija detektorjev jedrskih sledi v igralnici (I2_ME-2), z oranžnimi pikami pa pozicije detektorjev jedrskih sledi Radosys, v igralnicah (I1_ME-2, I2_ME-2) v garderobi (G1_ME-2) in zunaj (D1_ME-2, D2_ME-2).	32
Slika 15: Prenosni kontinuirni merilnik Radon Scout Professional (Sarad, 2021a).	33
Slika 16: Prenosni kontinuirni merilnik Radon Scout (Sarad, 2021b).	33
Slika 17: Detektor jedrskih sledi Radosys (levo) in čitalec sledi alfa (desno) (CETI, 2023).	34
Slika 18: Časovni potek koncentracije Rn v zraku igralnic v Sloveniji v obdobju 4. 2.–25. 4. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka ($^{\circ}\text{C}$) in tlak (hPa), e) hitrost vetra (m s^{-1}) in relativna vlažnosti zunanjega zraka (%). Rdeča črta označuje mejno koncentracijo Rn 300 Bq m^{-3}	40

Slika 19: Časovni potek koncentracije CO₂ v zraku igralnic v Sloveniji v obdobju 4. 2.–25. 4. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra (m s⁻¹) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Oranžna črta označuje mejno koncentracijo CO₂ 1000 ppm. 43

Slika 20: Časovni potek koncentracije Rn v zraku igralnic v Sloveniji v tednu 12.–18. 2. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra (m s⁻¹) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Rdeča črta označuje mejno koncentracijo Rn 300 Bq m⁻³... 46

Slika 21: Časovni potek koncentracije CO₂ v zraku igralnic v Sloveniji v tednu 12. –18. 2. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka, (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra (m s⁻¹) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Oranžna črta označuje mejno koncentracijo CO₂ 1000 ppm. 47

Slika 22: Časovni potek koncentracije Rn v zraku igralnic in garderobe v Črni gori v obdobju 18. 3.–14. 4. 2022: a) I1_ME-1, b) I1_ME-2, c) G1_ME-2 (garderoba), d) temperatura zunanjega zraka (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra (m s⁻¹) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Rdeča polna črta označuje mejno koncentracijo Rn 300 Bq m⁻³ v Sloveniji, črtkana pa 400 Bq m⁻³ v Črni gori. 50

Slika 23: Časovni potek koncentracij Rn v Črni gori v obdobju 26. 3.–1. 4. 2022 v prostorih enot: a) igralnica I1_ME-1, b) I1_ME-2, igralnica, c) G1_ME-2, garderoba ter izmerjene vrednosti parametrov d) temperature zraka (°C), tlaka (hPa), e) hitrosti vetra (m s⁻¹) in relativne vlažnosti zraka (%). Z rdečima črtama sta označeni mejni vrednosti. 53

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Zakonske zahteve v procesu graditve stavb VVZ v Sloveniji in Črni gori – Morfologija – proces graditve stavbe (Ur. l. RS, št. 100/05; Ur. l. Republike Črne gore, št. 40/11).....	8
Preglednica 2: Pregled raziskav radona za stavbe VVZ v Sloveniji.....	19
Preglednica 3: Pregled raziskav radona za stavbe VVZ v Črni gori.	21
Preglednica 4: Povzetek gradbenotehničnih značilnosti izbranih stavb VVZ, kjer smo izvedli meritve	36
Preglednica 5: Povprečne koncentracije R_n za obdobje 24. 3.–5. 5. 2022, izmerjene z detektorji jedrskih sledi Radosys v stavbah ME-1 in ME-2 VVZ v Črni gori (C : povprečna koncentracija R_n , ΔC : merilna negotovost) (CETI, 2023).....	51
Preglednica 6: Pregled gradbenotehničnih značilnosti stavb VVZ v Sloveniji in Črni gori.	54
Preglednica 7: Minimalna, maksimalna in povprečna koncentracija (AM) R_n ter razmerja koncentracije R_n za a) Slovenijo in b) Črno goro.....	55

OKRAJŠAVE / ABBREVIATIONS

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Ameriško združenje inženirjev za ogrevanje, hlajenje in klimatizacijo
CETI	Center for Eco-Toxicological Research – Center za ekotoksikološke raziskave
EC JRC	European Commission's Joint Research Centre – Skupno raziskovalno središče Evropske komisije
EPA	United States Environmental Protection Agency – Ameriška agencija za varstvo okolja
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive – Direktiva o energetske učinkovitosti stavb
EU	European Union – Evropska unija
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning – Ogrevanje, prezračevanje in klimatizacija
REHVA	Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations – Zveza evropskih združenj za ogrevanje, prezračevanje in klimatizacijo
VVZ	Vzgojno-varstveni zavod
WHO	World Health Organization – Svetovna zdravstvena organizacija

SIMBOLI / SYMBOLS

CO_2	Ogljikov dioksid
C_{CO_2}	Koncentracija ogljikovega dioksida (ppm)
C_{Rn}	Koncentracija (aktivnosti) radona (Bq m^{-3})
$\bar{C}$	Povprečna koncentracija Rn
ΔC	Merilna negotovost
P	Zračni tlak (hPa)
RH	Relativna vlažnost (%)
$^{222}\text{Rn}, \text{Rn}$	Radon
RnP	Radonovi kratkoživi produkt
$t_{1/2}$	Razpolovni čas radionuklida
T	Temperatura zunanjega zraka ($^{\circ}\text{C}$)
v	Hitrost vetra (m s^{-1})
V	Neto volumen prostora (m^3)

1 UVOD

V skrbi za zdravje ljudi je ena izmed prednostnih nalog doseganje optimalne kakovosti zraka v stavbah. Pri novejših stavbah jo zagotovimo z dobrim načrtovanjem stavbe in izborom, vgradnjo ter vzdrževanjem sistemov za ogrevanje, prezračevanje in klimatizacijo (HVAC). Pri starejših stavbah, ki jih večinoma prezračujemo naravno, pa so pomembne prezračevalne navade uporabnikov. V obeh primerih je potrebno zagotoviti ustrezen volumen svežega zraka, pri tem pa ohraniti udobje uporabnika in zmanjšati stroške energije (Prill, 2000). Poleg ogljikovega dioksida, ki je pomemben indikator kakovosti zraka v stavbah, je učinkovit pokazatelj tudi radon.

Radon (^{222}Rn , Rn) je naravni radioaktivni žlahtni plin brez barve, vonja in okusa. Nastaja v zemeljski skorji z alfa razpadom radija (^{226}Ra) v uranovi (^{238}U) razpadni vrsti. Od mesta nastanka v zrnju kamnine del Rn prehaja v prostor med zrnji, potuje s talnim zrakom ali vodo proti površju in izhaja v atmosfero. V zunanjem zraku se razredči, zato je njegova koncentracija praviloma nizka. Svetovno povprečje koncentracije radona v zraku je 10 Bq m^{-3} (Čeliković in sod., 2022). Drugače pa je v zraku stavb, kjer se Rn kopiči. V stavbe vstopa skozi netesne dele stavbnega ovoja v stiku z zemljino in lahko doseže tudi do 100-krat višje koncentracije od zunanjih (WHO, 2023). Netesni deli stavbnega ovoja so posledica neustrezne sestave konstrukcijskih sklopov, napak v izvedbi stikov, prebojev in razpok ipd. V slabše prezračevanih kletnih prostorih in pritličju praviloma radon doseže višje koncentracije kot v višjih nadstropjih. Najvišje pa so koncentracije v zemljini, običajno od nekaj 10 do nekaj 100 kBq m^{-3} (EC JRC, 2019).

Radon prištevamo med pomembna onesnaževala zraka v stavbah (WHO, 2009; Gopalakrishnan in Jeyanthi, 2022). Je glavni povzročitelj pljučnega raka, takoj za kajenjem cigaret (WHO, 2009). Na koncentracijo Rn v stavbah vplivajo predvsem geološke značilnosti področja ter vrsta in kakovost gradnje (Gruber in sod., 2013), dodatno pa tudi starost stavbe, vgrajeni gradbeni materiali, meteorološke razmere in prezračevalne navade (Silva in sod., 2022). Številne raziskave (Pampuri in sod., 2018; McGrath in sod., 2021; Silva in sod., 2022) opozarjajo na problem povišanih koncentracij radona v energetsko učinkovitih stavbah z višjo zrakotesnostjo stavbnega ovoja in nezadostnim prezračevanjem. Koncentracije Rn v zraku stavb najbolje ponazorimo na kartah, ki lahko temeljijo na izmerjenih vrednostih, kot je Evropski radonski atlas (Dubois, 2005), ali na tveganju za prisotnost Rn, ki poleg izmerjenih koncentracij običajno upošteva še geološke značilnosti in meteorološke razmere. Uporaba radonskih kart v začetni fazi graditve stavbe nam omogoča identifikacijo območja povišane ravni radona v prostorih in določitev ukrepov za preprečevanje in obvladovanje tveganja.

Pomembno vlogo pri koncentraciji Rn v stavbi imajo tudi mikroklimatske razmere zunaj in znotraj stavbe. Marley in sod. (2001) so preučevali vplive zunanjih in notranjih mikroklimatskih razmer in mehanskih sistemov ogrevanja in/ali klimatizacije na dinamiko Rn v tradicionalnih stanovanjskih in nestanovanjskih stavbah. Ugotovili so, da so tlačne in temperaturne razlike med zunanjim in notranjim okoljem, tlak vodne pare in hitrost vetra glavni faktorji, ki dolgoročno vplivajo na dinamiko Rn. Višje koncentracije se pojavijo v kletnih prostorih, ki so v stiku z zemljino, kljub stabilnejšim mikroklimatskim razmeram. Na spremembo koncentracije Rn vpliva tudi delovanje mehanskega sistema ogrevanja in/ali klimatizacije.

V raziskavi radona, ki je predmet tega magistrskega dela, smo se osredotočili na njegove koncentracije v Sloveniji in Črni gori, kjer smo na izbranih stavbah vzgojno-varstvenih zavodov razložili podobnosti in razlike v koncentracijah Rn glede na geološke in mikroklimatske razmere ter karakteristike gradnje. Več kot 50 % Slovenije pokrivajo karbonatne kamnine, ki so dobro prepustne in povezane z večjim tveganjem za povišane koncentracije radona v stavbah. Podobno litološko sestavo ima tudi Črna gora, kjer so prav tako razširjene karbonatne kamnine. Obe državi ležita na potresno dejavnem območju, ki prav tako povečuje tveganje za prisotnost Rn, in sta v preteklosti že doživeli rušilne potrese. Na prelomnih conah Rn prepotuje v krajšem času večjo razdaljo v zemljini in je koncentracija na površju običajno višja (Vaupotič in sod., 2010a). Potresi lahko poslabšajo kakovost stavbnega ovoja, pojavijo se lahko razpoke, skozi katere Rn vstopa v stavbo (Vaupotič in sod., 2010b).

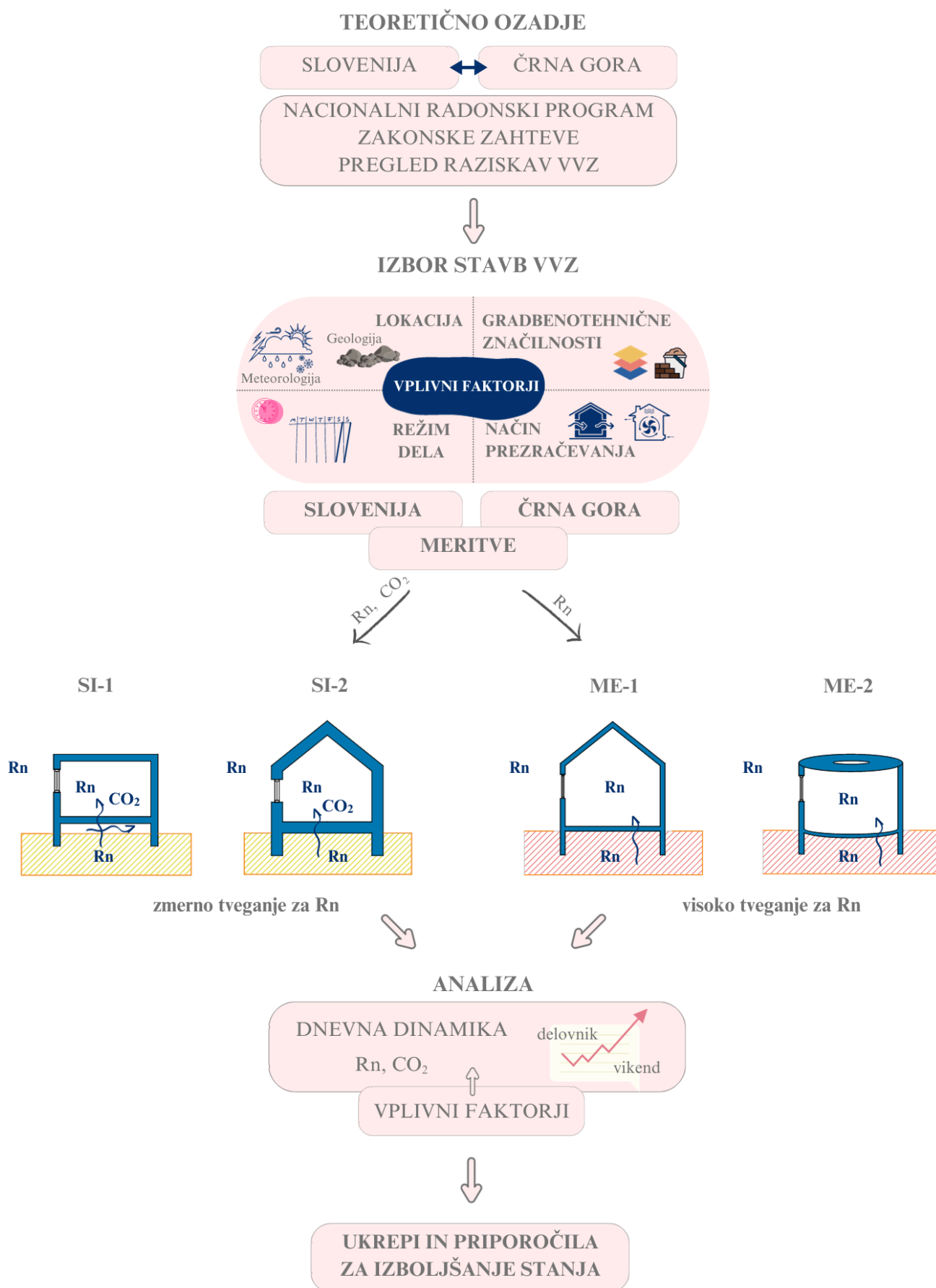
Prebivalci razvitih držav dnevno preživimo 80–90 % svojega časa v zaprtih prostorih, pri čemer je Rn odgovoren za več kot 50 % prejete doze od naravnega sevanja (Cosma in sod., 2013; McGrath in sod., 2021). Odrasli dobimo večji del doze zaradi izpostavljenosti radonu doma, kjer preživimo večino časa, manjši pa na delovnem mestu. Tudi otroci so radonu izpostavljeni predvsem doma, večina pa jih preživi 30 % dneva v vrtcu ali šoli. Ker prejmejo otroci pri isti koncentraciji Rn do dvakrat višjo dozo kot odrasli, so še posebej ranljiva skupina. Zato namenjamo preiskovanju Rn v vzgojno-varstvenih ustanovah posebno skrb. V primeru radonsko neustrezne graditve stavb in nezadostnega prezračevanja so lahko uporabniki izpostavljeni povišanim koncentracijam Rn, prav tako pa tudi povišanim koncentracijam ogljikovega dioksida (CO₂) (Vasilyev in sod., 2017; Pampuri in sod., 2018; Muhič in Muhič, 2022).

Naša raziskava obravnava stavbe vzgojno-varstvenih zavodov (VVZ) – vrtce (klasifikacija stavbe: 1263 Stavbe za izobraževanje in znanstvenoraziskovalno delo, Uredba o razvrščanju objektov, 2022; TSG – V – 006, 2022). V Sloveniji je 1187 vrtcev, od tega je 706 enot javnih samostojnih vrtcev, 325 enot je vezanih na osnovno šolo, 156 enot je zasebnih vrtcev (MIZŠ, 2022). V Črni gori je registriranih 52 vrtcev – 21 javnih in 31 zasebnih (Gradski portal, 2022). Pod njihovim okriljem deluje 158 vzgojnih enot – vrtcev, ki imajo skupno 790 vzgojnih skupin (Gradski portal, 2022). V sklopu svojih nacionalnih radonskih programov sta obe državi izvedli obsežna merjenja v stavbah vrtcev. Številne raziskave (Vaupotič in sod., 1994a; Vaupotič in sod., 1994b; Kullab in sod., 1997; Malanca in sod., 1997; Malanca in sod., 1998; Kitto, 2014; Vukotić in sod., 2020a; Vukotić in sod., 2021) obravnavajo tematiko radona v vrtcih, nismo pa v literaturi zasledili sočasne obravnave radona v vzgojno-varstvenih zavodih v Sloveniji in Črni gori (vpliv lokacije, geologije, klime, arhitekture, gradbenotehničnih karakteristik stavb). Tipična stavba vrtca, ki je bila zgrajena pred uvedbo politik in strategij na področju energetske učinkovitosti stavb (pred letom 2010, EPBD 2010/31/EU), ima v Sloveniji in Črni gori podobno arhitekturo, najpogosteje eno nadstropje (pritličje, brez kleti), eksoskeletno nosilno konstrukcijo stavbnega ovoja (večinoma opeka ali beton) z nižjo zrakotesnostjo (nižja toplotna izolativnost). Način prezračevanja je naravno z odpiranjem oken in vrat. Novejše stavbe, grajene po letu 2010, so načrtovane v smeri dosega čim nižje rabe energije in imajo raznolike gradbenotehnične značilnosti. Konstrukcija je eksoskeletna ali endoskeletna (trend je v izvedbi lahkih konstrukcij iz lesa, križno lepljenega lesa, montažnih stavb), stavbni ovoj je zrakotesen, prezračevanje mehansko ali hibridno. Z namenom reševanja prostorske stiske se je veliko občin odločilo za postavitev začasnih objektov, modularnih stavb (Poglajen, 2018).

Za raziskavo smo izbrali štiri stavbe VVZ v Sloveniji in Črni gori, ki imajo različne gradbenotehnične in lokacijske značilnosti (geologija, meteorološki dejavniki). Izbrali smo jih na osnovi rezultatov nacionalnih radonskih programov, ki sta ju izvedli obe državi. Oba programa smo na kratko predstavili skupaj z zakonskimi in podzakonskimi akti na področju graditve stavb VVZ.

Namen magistrskega dela je bil preučiti odvisnost dnevne dinamike Rn v zraku (v Sloveniji tudi CO₂) od gradbenotehničnih karakteristik stavbe, režima dela in prezračevalnih navad. V štirih izbranih stavbah VVZ v Sloveniji in Črni gori smo zato najprej izvedli nekajtedenske kontinuirane meritve koncentracije Rn (v Sloveniji tudi koncentracije CO₂) v nekaj igralnicah. Na osnovi rezultatov pa smo nato poskušali pojasniti (i) v kakšnem obsegu na dnevno dinamiko Rn (v Sloveniji tudi CO₂) v igralnici vplivajo gradbenotehnične karakteristike stavbe in njene lokacijske značilnosti, ki odražajo geologijo in meteorološke dejavnike, (ii) vlogo režima dela in (iii) učinkovitost prezračevanja.

Strukturo magistrskega dela predstavljamo na sliki 1.



Slika 1: Shema strukture magistrskega dela.

2 CILJI IN HIPOTEZE

Cilji magistrskega dela so naslednji:

1. Na osnovi nacionalnih programov meritev koncentracij radona v Sloveniji in Črni gori izbrati primerne stavbe VVZ za raziskavo, pri čemer je osnovni kriterij nekoliko povišana koncentracija radona v zraku. Preučiti radonski karti tveganja v obeh državah.
2. Izvesti gradbenotehnično karakterizacijo izbranih stavb ter karakterizacijo lokacijskih značilnosti (geološke značilnosti in meteorološki dejavniki), režima dela in prezračevalnih navad v igralnicah. Pregledati rezultate dosedanjih meritev koncentracije radona.
3. Izvesti kontinuirane meritve koncentracije Rn v zraku nekaj igralnic izbranih stavb VVZ v Sloveniji in Črni gori. V Sloveniji poleg koncentracije Rn izmeriti tudi koncentracijo CO₂, ki je dodatni indikator kakovosti zraka in učinkovitosti prezračevanja. V Črni gori izvesti meritve povprečne koncentracije Rn v zunanjem zraku (za Slovenijo te podatke imamo) in zraku igralnic.
4. Analizirati rezultate časovnih vrst Rn (Slovenija in Črna gora) in CO₂ (Slovenija) v zraku igralnic ter rezultate meritev povprečnih koncentracij Rn v zunanjem in notranjem zraku (Črna gora).
5. Ovrednotiti dnevno dinamiko Rn (Slovenija in Črna gora) in CO₂ (Slovenija) glede na gradbenotehnične značilnosti stavbe, njene lokacijske značilnosti, režim dela in prezračevalne navade v igralnicah, posebej za delovne dneve in posebej za vikende.
6. Podati osnovno statistično analizo koncentracij Rn v igralnicah izbranih VVZ glede na prisotnost/odsotnost uporabnikov.
7. Izdelati priporočila za znižanje koncentracij Rn (Slovenija in Črna gora) in CO₂ (Slovenija) v igralnicah VVZ.

Zastavljene hipoteze magistrskega dela na podlagi preučene literature so naslednje:

1. Glede na radonski karti Slovenije in Črne gore, ki sta odraz geoloških in klimatskih značilnosti ter prezračevalnih navad v obeh državah, pričakujemo, da bodo povprečne koncentracije radona v igralnicah VVZ višje v Črni gori (izbrani lokaciji se nahajata na območju visokega tveganja za radon) kot v Sloveniji (izbrani lokaciji se nahajata na območju zmernega tveganja za radon).
2. Povprečne koncentracije radona v izbranih igralnicah VVZ bodo višje v modularni stavbi kot v klasično zidani stavbi in višje v hibridno prezračevani stavbi kot naravno prezračevani stavbi. V igralnicah, ki so učinkovito prezračevane in imajo tesen stavbni ovoj, je koncentracija radona nizka.
3. Povišane jutranje koncentracije radona, ki so odraz kopičenja radona preko noči v igralnicah, se učinkovito znižajo s prezračevanjem.
4. Na povišano koncentracijo radona v vseh igralnicah VVZ vpliva predvsem geološka podlaga lokacije, vloga meteoroloških dejavnikov je manj izrazita.

3 TEORETIČNO OZADJE

Po navedbi Building Performance Institute Europe (Economidou in sod., 2015) je 17 % nestanovanjskih stavb v Evropi namenjenih izobraževanju in predstavljajo ene izmed najstarejših stavb. Povprečna starost stavb VVZ v Sloveniji je 25 let, od tega je bila polovica teh zgrajena po letu 1980 (Vaupotič in sod., 2007), nekaj vrtcev pa je starih med 50 in 100 let (Vaupotič in sod., 1993). V Črni gori je bilo več kot polovico stavb VVZ zgrajenih pred letom 1980 (Vukotić in sod., 2020a). V nadaljevanju dela bomo navedli zakonske zahteve za graditev stavb VVZ vrtcev v Sloveniji in Črni gori.

3.1 Zahteve za graditev VVZ stavb v Sloveniji in Črni gori

V procesu graditve stavb VVZ je potrebno upoštevati splošne zahteve, ki veljajo za stavbe (v Sloveniji Uredba CRP EU, št. 305/2011; Gradbeni zakon, Uradni list RS, št. 199/21; v Črni gori: Zakon o urejanju prostora in gradnji objektov, Uradni list ČG, št. 64/2017) in specifične zahteve glede na (i) namembnost stavb za izobraževanje in zahteve na področju šolstva (v Sloveniji: Zakon o vrtcih, Ur. l. RS, št. 100/05; v Črni gori: Zakon o predšolski vzgoji in izobraževanju, Ur. l. Republike Črne gore, št. 40/11; Pravilnik o bližjih pogojih za ustanavljanje zavodov na področju vzgoje in izobraževanja, Ur. l. Republike Črne gore, št. 040/06) in (ii) delovno okolje (Zakon o varnosti in zdravju pri delu, Ur. l. RS, št. 43/11, Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih, Ur. l. RS, št. 43/11).

Na področju gradbenotehničnih zahtev za stavbe in prostore VVZ je potrebno upoštevati:

- Pravilnik o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca, Ur. l. RS, št. 20/17),
- Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 110/02 s spr.),
- Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (Ur. l. RS, št. 70/2022) s tehnično smernico Energijska učinkovitost stavb (TSG-1-004: 2022) in
- Pravilnik o zaščiti pred hrupom v stavbah (Uradni list RS, št. 10/12 s spr.) s tehnično smernico Zaščita pred hrupom v stavbah (TSG-1-005: 2012).

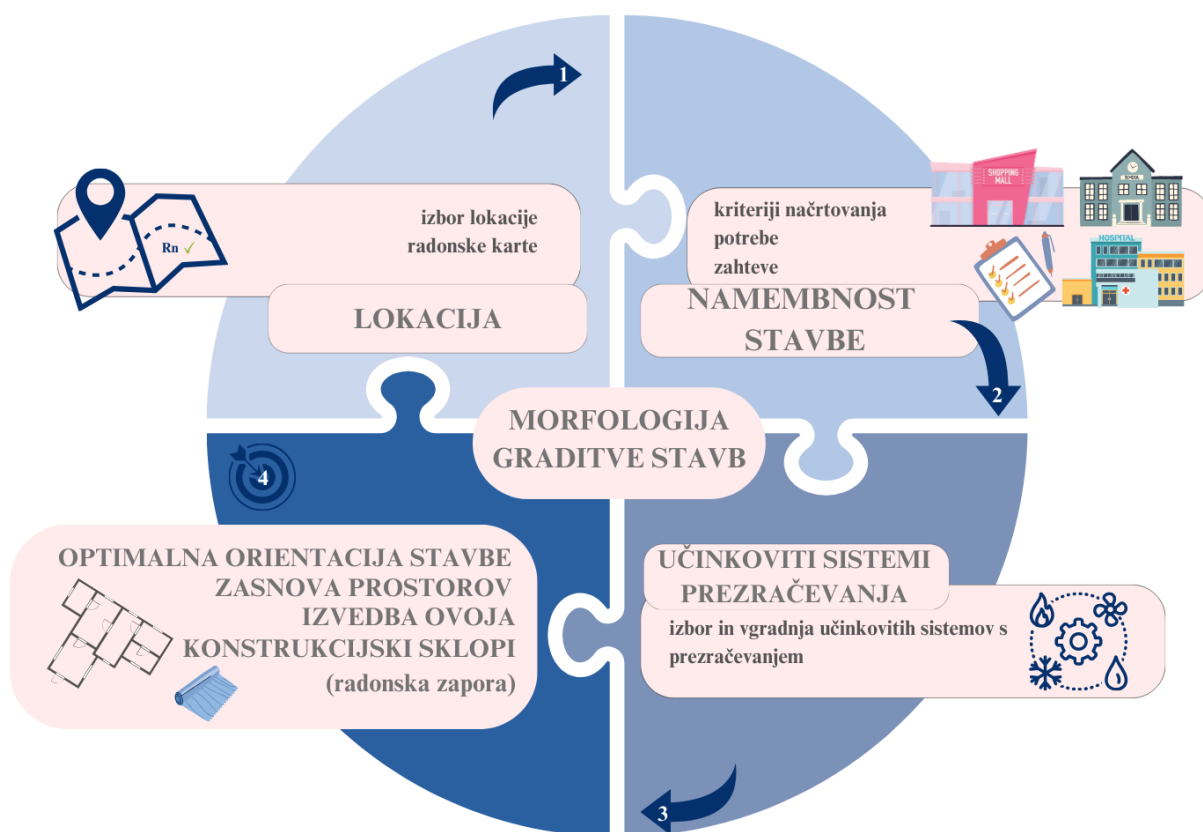
Na osnovi upoštevanja navedenih zakonskih in podzakonskih zahtev se načrtuje stavba VVZ, tesnost stavbnega ovoja, volumen aktivnih prostorov in tehnološki sistemi s prezračevanjem (Preglednica 1).

Uredba CRP EU, št. 305/2011, je mednarodni pravni akt, ki ga uporabljajo vse države članice EU in podrobneje določa pogoje, ki zadevajo gradbene proizvode in objekte v celoti. Uredba poudarja, »Gradbeni objekti morajo biti načrtovani in zgrajeni tako, da ne ogrožajo varnosti ljudi, domačih živali ali imetja ter ne škodujejo okolju.« Uredba predpisuje bistvene zahteve, ki veljajo tako za gradbene proizvode (gradbeni materiali, tehnični sistemi za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje ipd.) kot za stavbo VVZ kot celoto: 1. mehanska odpornost in stabilnost, 2. varnost pri požaru, 3. higiena, zdravje in okolje, 4. varnost in dostopnost pri uporabi, 5. zaščita pred hrupom, 6. varčevanje z energijo in ohranjanje toplote, 7. trajnostna raba naravnih virov, 8. univerzalna graditev in uporaba objektov.

Pri projektiranju, gradnji in vzdrževanju stavb VVZ, ki se nahajajo na radonsko ogroženem področju, je potrebno upoštevati zahteve za znižanje koncentracije radona pod referenčno raven, s čimer se prepreči ogrožanje zdravja ljudi zaradi škodljivih učinkov radona. V Sloveniji so zahteve za novogradnje pred škodljivimi učinki radona definirane v Pravilniku o zahtevah za novogradnje, posege v obstoječe stavbe

in sanacijo obstoječih stavb zaradi varovanja zdravja ljudi pred škodljivimi učinki radona (Ur. l. RS, št. 14/22 in 55/23). V skladu s tem pravilnikom je definirano: »Projektiranje in gradnja novih stavb na radonskem območju se zagotovi s prezračevanjem zemljine pod talno konstrukcijo stavbe ali s popolnim tesnjenjem med zemljino in notranjim zrakom z radonsko zaporno folijo.« Ministrstvo za zdravje RS je v letu 2017 izdalo tudi Smernico za gradnjo radonsko varnih stavb novogradenj, ki združuje ukrepe, ki jih treba izvesti pred projektiranjem novogradenj, vse z namenom zagotavljanja izgradnje radonsko varnih stavb. Ministrstvo za naravne vire in prostor je v avgustu leta 2023 izdalo tudi tehnično smernico za graditev (TSG-1-007: 2023) in zaščito pred visokimi koncentracijami radona v stavbah. Slednja smernica se uporablja za projektiranje in gradnjo novih stavb, posege v obstoječe stavbe ter protiradonsko sanacijo obstoječih stavb za znižanje koncentracije radona v stavbah.

Z namenom celovitega pristopa k preprečevanju in obvladovanju Rn pa je pomembno, da se ukrepe izvede skladno z morfologijo načrtovanja stavb, ki se začne z izborom lokacije (v pomoč so radonske karte), in se nadaljuje z optimalno orientacijo stavbe, zasnovo prostorov in izvedbo ovoja ter konstrukcijskih sklopov (tesnjenje, radonska zapora). Izbor in vgradnja učinkovitih tehničnih sistemov s prezračevanjem je ena izmed zadnjih faz načrtovanja, ki prav tako pomembno prispeva k znižanju onesnaževal v zraku stavb (Asimow, 1962; Krainer, 1993a; Krainer 1993b; Dovjak in sod., 2018).



Slika 2: Morfologija graditve stavb.

V Črni gori nacionalni pravni okvir še vedno ne določa preventivnih in korektivnih gradbenih ukrepov za zaščito pred radonom ter odgovorne institucije za ukrepanje, če je koncentracija Rn nad predpisano referenčno vrednostjo. Zakon o prostorskem načrtovanju in izgradnji objektov (Uradni list Črne gore, št. 64/17) med drugim določa, da je potrebno v fazi projektiranja in gradnje objektov preventivno izvesti zaščito pred radioaktivnim plinom Rn. Pri tem še ni natančno definirano, na kakšen način se to izvede.

S pomočjo zaporedja posameznih korakov (morfologija graditve, slika 2) bomo predstavili zahteve za graditev stavb VVZ v Sloveniji in Črni gori, ki so razdeljene na stavbo in zemljišče, stavbni ovoj – netransparentni in transparentni del, tehnološke sisteme in aktivne prostore (Preglednica 1). V preglednici smo navedli samo bistvena področja načrtovanja, ki se nanašajo na našo raziskavo.

Preglednica 1: Zakonske zahteve v procesu graditve stavb VVZ v Sloveniji in Črni gori – Morfologija – proces graditve stavbe (Ur. l. RS, št. 100/05; Ur. l. Republike Črne gore, št. 40/11).

Morfologija – proces graditve stavbe	Slovenija	Črna gora
Lokacija		
Velikost zemljišča	15 m ² –25 m ² zemljišča na otroka.	Zemljišče mora biti dovolj prostorno.
Kapaciteta stavbe	Minimalno 2 oddelka. Maksimalno 6 oddelkov.	Minimalno 3 oddelka. Ni definirano.
Igralne površine	Minimalno 15 m ² po otroku.	Minimalno 8 m ² po otroku.
Klima		
	Upoštevanje mikroklimatskih pogojev lokacije.	Zaželena sončna lega, pozicija vrtca zaščiten pred močnimi in hladnimi vetrovi.
Geomorfologija		
	Zemljišče vrtca mora imeti najmanj polovico prostih površin in poti.	Zemljišče mora biti dovolj prostrano, brez vlage in podtalnice.
Število nadstropij		
	Največ 1 nadstropje nad pritličjem.	Največ 1 nadstropje nad pritličjem.
Stavbni ovoj – netransparentni del		
Toplotni prehod	Največji dovoljeni koeficient toplotnega prehoda za neprosojne dele ovoja stavbe je 0,35 W m ⁻² K ⁻¹ .	Ni definirano.
Stavbni ovoj – transparentni del		
Okna	Okenski parapeti v pritličnih igralnicah so največ 0,60 m nad tlemi, v nadstropju pa najmanj 0,90 m.	Okenski parapeti v pritličnih igralnicah so največ 0,60 m nad tlemi, v nadstropju pa najmanj 0,90 m.
	Spodnji rob okenskih kril, ki se odpirajo v prostor, mora biti vsaj 1,25 m nad tlemi.	Spodnji rob okenskih kril, ki se odpirajo v prostor, mora biti vsaj 1,25 m nad tlemi.
	Vsaj 30 % oken v vsaki igralnici mora imeti možnost pripiranja z nagibom (okrog spodnje osi).	Za prezračevanje prostorov naj ima praviloma 30 % oken v objektu možnost odpiranja z naklonom.
Vrata	Vhodna vrata morajo biti široka 0,90 m.	Širina vhodnih vrat je 0,90 m, s stekleno površino 0,60 m x 0,60 m v osrednjem zgornjem delu vrat.

	Vsa vrata v otroških sobah se morajo odpirati proti izhodu iz stavb.	Krila dvokrilnih vrat v prostorih se morajo odpirati proti izhodu iz objekta.
Sistemi		
Prezračevanje	Prezračevanje v prostorih za otroke je urejeno skladno z veljavnimi tehničnimi predpisi, pri tem pa hitrost gibanja zraka ne sme presegati $0,2 \text{ ms}^{-1}$.	Za zagotovitev svežega zraka je potrebno naravno prezračevanje prostorov, če to ne zadošča, pa je treba izvajati mehansko prezračevanje (ventilatorji ipd.).
	V prostorih za otroke mora biti relativna vlaga zraka 40–60 %	Relativna vlažnost zraka v prostorih za otroke mora biti v skladu s predpisi.
	Garderobe in sanitarije za otroke ter kuhinjo, pralnico in prostore za shranjevanje čistil je potrebno dodatno mehansko prezračevati.	Garderobe in sanitarije za otroke je treba dnevno dodatno prezračevati z naravnimi in mehanskimi sistemi.
Ogrevanje	Prostori morajo biti enakomerno ogrevani: – 20 °C za prostore, kjer se nahajajo otroci, – 23 °C za varstvene prostore in – najmanj 18 °C za športne dvorane.	Ogrevanje v objektu mora biti enakomerno s temperaturami: – najmanj 21 °C (za jedilnico, športni prostor in za skupno igralnico) in – najmanj 23 °C (ostali prostori).
Aktivni prostori		
Igralnice	Površina igralnice, v kateri se zadržujejo otroci, je 60 m ² , vendar ne manjša od 50 m ² (Ur. l. RS, št. 100/05).	Ni natančno definirano.
	Na otroka se zagotovijo minimalno 3 m ² notranje igralne površine. V igralno površino se ne štejejo tla, na katerih je vgrajeno oziroma pritrjeno pohištvo.	Površina igralnice v jaslilih in vrtcih je najmanj 3 m ² na otroka, v kar se ne vštevajo tla, na katerih je vgrajeno oziroma pritrjeno pohištvo.
Garderoba	Neto površina garderobe je 8 m ² .	Neto površina garderobe je najmanj 0,50 m ² na otroka.
	Prehodi med elementi opreme morajo biti široki najmanj 1 m, če je garderoba namenjena otrokom razvojnega oddelka pa najmanj 1,20 m.	Širina prehoda med garderobnimi elementi je 0,80 m, za otroke s posebnimi potrebami pa 1,20 m.

3.2 Prezračevanje stavb

Doseganje optimalne kakovosti zraka v delovnem in bivalnem okolju je ena izmed prednostnih nalog ne le deležnikov graditve stavb, temveč tudi vzdrževalcev in upravljalcev stavb. Optimalno kakovost zagotovimo z dobrim načrtovanjem stavbe, izborom in vgradnjo ter vzdrževanjem sistemov za ogrevanje, prezračevanje in klimatizacijo (HVAC). Pri tem je potrebno zagotoviti ne samo primerno količino svežega zraka, ampak tudi njegovo čistost ter ohraniti udobje in zmanjšati stroške energije (Prill, 2000). Prezračevanje stavb se lahko izvaja na tri načine: naravno, mehansko in hibridno. Naravno prezračevanje je prezračevanje brez uporabe mehanskih naprav, pri katerem se izkoriščajo naravne fizikalne lastnosti zraka (temperaturne in tlačne razlike, vpliv vetra). Poteka skozi odprta okna in zunanja vrata, prezračevalne odprtine in prezračevalne kanale. Mehansko prezračevanje je prezračevanje, pri katerem se zamenjava odtočnega zraka z zunanjim doseže z mehansko napravo, pri klimatizaciji s klimatizacijsko napeljavo (z njo kontroliramo temperaturo, vlažnost, prezračevanje in čistočo zraka). Hibridno prezračevanje je prezračevanje, pri katerem se hkrati uporabljata naravno in mehansko prezračevanje (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Ur. l. RS, št. 42/02).

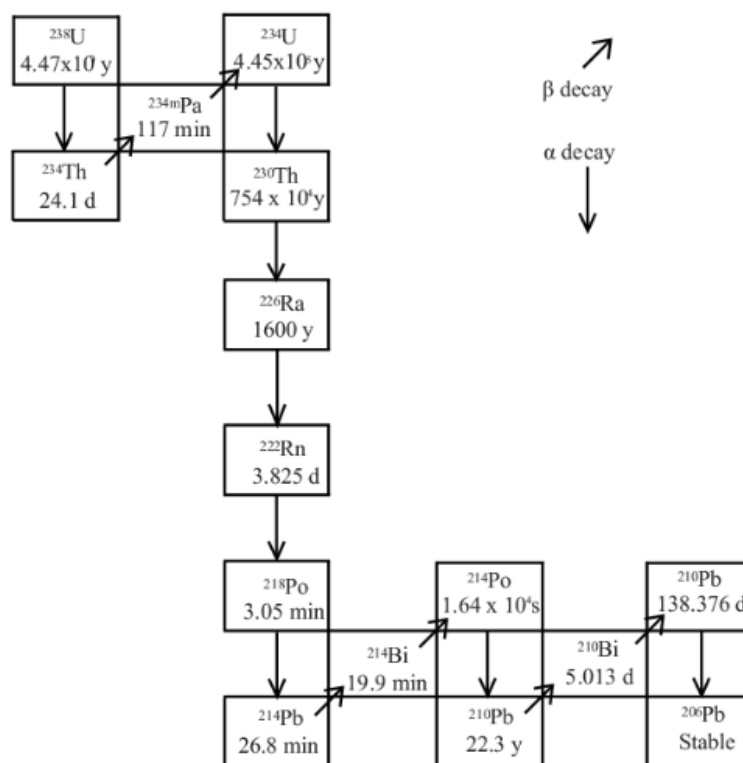
3.3 Fizikalno-kemične lastnosti radona

Radon je naravni radioaktivni žlahtni plin brez barve, vonja in okusa. Izotop ^{222}Rn nastaja z alfa radioaktivno preobrazbo (razpadom) radija (^{226}Ra) v razpadni verigi urana (^{238}U) (slika 3).

Atomsko število Rn je 86, relativna atomska masa pa 222 g mol^{-1} . Njegovo tališče je $-71 \text{ }^{\circ}\text{C}$, vrelišče pa $-61,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Uvrščamo ga med najtežje pline v naravi z gostoto $9,73 \text{ kg m}^{-3}$. Poznamo najmanj 34 izotopov radona v območju od ^{195}Rn do ^{228}Rn . Pomembnejši so trije, in sicer ^{222}Rn (radon, $t_{1/2} = 3,82$ dni), ^{220}Rn (toron, $t_{1/2} = 55,6$) in ^{219}Rn (aktinon, $t_{1/2} = 3,9$ s). Ker ima ^{222}Rn najdaljšo razpolovno dobo, lahko pripotuje iz zemeljske skorje na površje in se kopiči v prostorih stavb (Wilkening, 1990).

^{222}Rn je najbolj pogosto obravnavan radonov izotop. Zato, ko govorimo o radonu, če ni drugače navedeno, imamo v mislih ^{222}Rn . Tudi naša raziskava obravnava ^{222}Rn , ki ga bomo v nadaljevanju imenovali radon ali Rn (^{222}Rn pa le izjemoma, v povezavi z nastankom).

Koncentracijo aktivnosti radona (krajše: koncentracijo radona) v zraku podajamo v enoti Bq m^{-3} (enota aktivnosti je 1 preobrazba v 1 sekundi in jo imenujemo 1 Bq – becquerel).



Slika 3: Razpadna vrsta ^{238}U , v kateri nastaja ^{222}Rn (povzeto po Syarbaini in Pudjadi, 2015).

3.4 Radon v stavbah

Parametre, ki vplivajo na koncentracijo Rn v prostoru, delimo na zunanje in notranje. Zunanji parametri so tesno povezani z lokacijo stavbe (geologija – predvsem litologija) in meteorološkimi razmerami (spremembe zračnega tlaka, zunanja temperatura, vlažnost ipd.) (McGrath in sod., 2021). Najpomembnejši zunanji parameter je vir radona, ki je odvisen sestave in prepustnosti zemljine (Vaupotič in sod., 1996). Notranji parametri so vezani na samo stavbo, in sicer na sestavo in izvedbo delov stavbnega ovoja v stiku z zemljino (gradbene materiale, stikov, radonsko tesnost plasti, razpoke, preboje), etažnost in izvedbo kleti, energetska učinkovitost stavbe, učinkovitost prezračevalnega sistema itd. (Silva in sod., 2022).

Zunanji in notranji parametri, ki vplivajo na koncentracijo radona v prostoru, so natančneje predstavljeni v naslednjih poglavjih.

3.4.1 Vpliv geologije in meteorologije na koncentracije radona

Kot smo že omenili, nastaja ^{222}Rn z radioaktivno preobrazbo (z razpadom) iz ^{226}Ra . Le manjšemu deležu Rn uspe priti iz zrna kamnine, kjer nastaja (emanacija), se širiti dalje proti površini (migracija) in končno izhajati na prosto (ekshalacija). Koncentracija aktivnosti radona v zemljini je odvisna od vsebnosti urana v kamnini (geologija, geokemija), velikosti in sestave zrn (geološka struktura, ki določa emanacijski koeficient) ter od geofizikalnih (poroznost kamnine, tektonske in seizmične značilnosti), geokemičnih (prisotnost fluidov: nosilnih plinov, termalne vode) in hidrometeoroloških (vlažnost kamnine, razlike

temperature in tlaka med kamnino in ozračjem) parametrov, ki vplivajo na transport radona v mediju (Etiope in Martinelli, 2002; EC JRC, 2019).

Radon vstopi v stavbo iz zemljine z advekcijo in difuzijo (Otton, 1992). Razlike v tlaku med zemljino in stavbo ter prisotnost odprt in razpok v stavbnem ovoju v stiku z zemljino povzročijo, da talni zrak z Rn vstopa v stavbo in izstopa iz nje (Otton, 1992). Povečano tveganje za izpostavljenost radonu v stavbah na lokacijah z večjo prepustnostjo kamnin obravnavajo številni znanstveni članki (Otton, 1992; Vaupotič in sod., 1994b; Vaupotič in Kobal, 2001; Hahn in sod., 2015; Gillmore in sod., 2018; Silva in sod., 2022). V primeru netesnosti ovoja stavbe Rn iz zemljine enostavno vstopa v stavbo, se kopiči v kletih in pritličjih, kjer lahko doseže povišane koncentracije ter se naprej širi v višja nadstropja (Gopalakrishnan in sod., 2022).

Gopalakrishnan in Jeyanthi (2022) so izmerili koncentracije Rn v 130 stanovanjih v Kinsarviku na Norveškem. V 77 stanovanjih so koncentracije presegle vrednost 40.000 Bq m^{-3} . Z različnimi geokemičnimi analizami kamnin, podtalnice in sedimentov so prišli do ugotovitve, da na koncentracijo Rn v stanovanjih vplivajo podzemni zračni tokovi, ki nastanejo zaradi temperaturnih razlik med zrakom v tleh in atmosferskim zrakom. Nizke koncentracije radona so bile izmerjene na lokacijah z manj prepustnimi tlemi, prekritimi z nanosi melja in gline (Gopalakrishnan in Jeyanthi, 2022). Lažji prehod Rn je skozi tla, ki so sestavljena iz grobega peska in prod (Otton, 1992) ter tla, ki so bogata s karbonatnimi kamninami (Sundal in sod., 2022). Takšna območja so tudi v Sloveniji in Črni gori. Vaupotič in Popit (2002a) poročata o vplivu geologije na povišane koncentracije radona v slovenskih vrtcih in šolah. Iz podatkovne baze, pridobljene v okviru nacionalnega radonskega programa v Sloveniji, je bilo izbranih 76 trenutnih koncentracij radona v igralnicah in učilnicah, ki so presegle nacionalno referenčno raven ukrepanja 400 Bq m^{-3} (ta je veljala do leta 2018, ko smo sprejeli nižjo referenčno raven 300 Bq m^{-3}). Ugotovljeno je bilo, da so koncentracije radona v prostorih, geologija pod stavbo (vsebnost urana, prepustnost, poroznost in tektonski prelomi) ter kakovost stavbnega ovoja povezani.

Nacionalna radonska raziskava v Črni gori je bila izvedena v vseh izobraževalnih ustanovah, z izjemo univerz. V šolskem letu 2016/17 so izmerili koncentracijo Rn v 468 stavbah (v skupaj 2855 pritličnih prostorih). Koncentracije radona nad 300 Bq m^{-3} so bile najdene v 213 stavbah (728 prostorih), nad 1000 Bq m^{-3} pa v 47 stavbah (111 prostorih). Vpliv spremenljivk (podnebje, urbano/podeželsko območje, starost stavbe, število nadstropij, gradbeni materiali, klet, temeljna plošča, okenski okvirji in ogrevanje) na koncentracije radona v stavbah so preučevali z uporabo univariatne in multivariatne statistične analize. Rezultati multivariatne statistične analize so pokazali, da 5 spremenljivk: območje, nadstropnost, klet, leto izgradnje in okenski okvirji statistično značilno vpliva na koncentracijo radona v pritličju stavb. Ugotovitve multivariatne statistične analize od univariatne so pomembnejše, ker vse preučene spremenljivke delujejo hkrati, pri čemer nekatere pomembno vplivajo na koncentracije radona v zaprtih prostorih (Vukotić in sod., 2020a; Vukotić in sod., 2020b).

Velik vpliv na koncentracijo radona v stavbah imajo tudi meteorološke razmere (Cinelli in sod., 2011). Parametri v zunanjem zraku, ki so povezani s spreminjanjem koncentracije radona v notranjem zraku, so predvsem zračni tlak, temperatura, hitrost in smer vetra, vlažnost zraka (Schubert in sod., 2018). Za potrebe raziskave so Cortina in sod. (2008) izvedli 7 sezonskih raziskav z uporabo kanistrov za oglje. Meritve so trajale od leta 2004 do leta 2006. Analizirali so 233 vzorcev v 16 stavbah na 59 različnih

lokacijah v mestu Santiago de Compostela v Španiji. Dvojno so izločili 55 lokacij, kjer so posode z ogljem pokazale višje koncentracije od posod, kjer so uporabili detektorje jedrskih sledi. Dodatno so ugotovili neposredne povezave med koncentracijo radona v stavbah in temperaturo zunanjega zraka. Avtorji so neposredno povezali prezračevanje prostorov z energetske učinkovitostjo stavbe z vsemi aktivnostmi uporabnika. Rey in sod. (2022) ugotavljajo soodvisnost zunanje temperature zraka in koncentracije radona v stavbi. Poleg temperature imajo velik sočasen vpliv tudi hitrost in smer vetra ter gradbenotehnične lastnosti stavbe. Padavine občasno vplivajo na raven R_n v stavbi, in sicer predvsem vpliva njihova jakost (Rey in sod., 2022).

Na osnovi pregleda raziskav lahko zaključimo, da na koncentracije R_n v notranjem zraku močno vpliva geologija, najpomembnejši dejavniki pa so:

- vsebnost urana v kamninah,
- prepustnost kamnin,
- poroznost kamnin,
- tektonski prelomi.

Radon se lažje premika skozi bolj prepustna tla, ki so sestavljena iz grobega peska in prod, kot skozi neprepustna tla, kot je na primer glina (Otton, 1992). Zelo dobro prepustne so karbonatne kamnine.

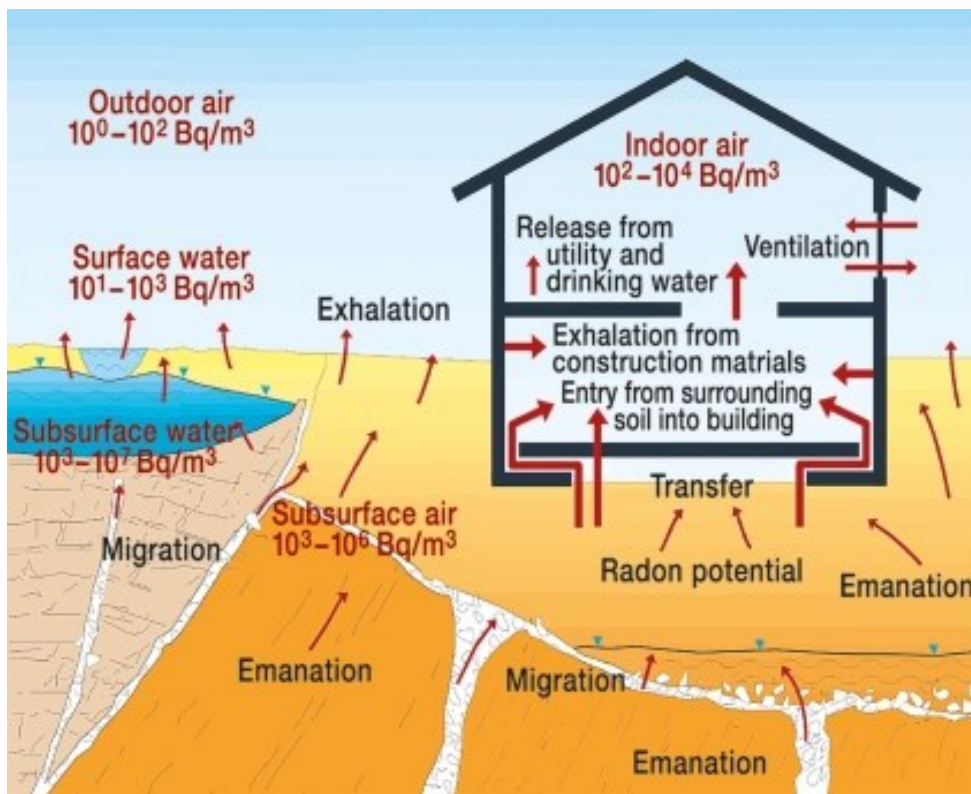
Zaključimo lahko tudi, da ima na koncentracijo radona v zraku stavb pomemben vpliv tudi meteorologija, pri čemer je potrebno omeniti predvsem:

- zračni tlak,
- temperaturo zraka,
- hitrost vetra,
- vlažnost zraka.

Seveda na koncentracijo radona v zraku stavb pomembno vplivajo njene gradbenotehnične karakteristike, predvsem zrakotesnost, kar predstavljamo v nadaljevanju.

3.4.2 Vstop radona v stavbo in vloga stavbnega ovoja

Pretežni del radona vstopa v stavbo iz zemljine. Ko je tlak v zemljini večji od tlaka v stavbi, potuje talni zrak, bogat z radonom, iz zemljine v notranjost stavbe (Minkin in sod., 2008). Infiltracija talnega zraka v notranjost stavbe se vrši skozi netesne dele stavbnega ovoja, ki so v stiku z zemljino (razpoke, pomanjkljiva križanja, preboji ipd.). Iz kleti in pritličij, kjer so koncentracije najvišje, se radon širi v višja nadstropja in se pri tem razredči, zato so koncentracije v višjih nadstropjih praviloma nižje. Dodaten (velikokrat zanemarljiv) vir radona v stavbi je lahko tudi voda ali zemeljski plin (Gopalakrishnan in Jeyanthi, 2022). Načini vstopa radona v stavbo so prikazani na sliki 4.



Slika 4: Vstop radona v stavbo in širjenje iz kleti v nadstropja (povzeto po Schmid in sod., 2010).

Če se stavba nahaja na območju s potencialno visokim tveganjem za izpostavljenost radonu, se vrši tok talnega zraka iz zemljine proti talni konstrukciji in kletnim stenam zaradi:

- spremembe zračnega tlaka,
- razlike v tlaku med tlemi in stavbo,
- prisotnosti razpok, prebojev v delih ovoja v stiku z zemljino stavbe,
- povečane prepustnosti zemljine okoli kleti (če je klet izvedena).

Talna konstrukcija in kletne stene so vmesnik med zemljino in notranjim okoljem, zato lahko njihova izvedba in sestava vplivata na koncentracijo Rn v notranjem okolju (Vaupotič in sod., 2002b). V kletnih prostorih so lahko prisotni tudi preboji in jaški, zaradi posedanja stavbe pa se lahko pojavijo razpoke, skozi katere Rn vstopa v stavbo.

V vseh sektorjih družbe si prizadevamo za zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov (Wang in sod., 2022). Pri stavbah je glavni cilj doseči zmanjšanje rabe energije s prenovo toplotnega ovoja stavbe in uvedbo obnovljivih virov energije. S toplotno izolativnim in zrakotesnim toplotnim ovojem zmanjšujemo transmisijske toplotne izgube (skozi transparentne dele – okna in vrata ter netransparentne dele – zunanje stene, streha, tla) in ventilacijske toplotne izgube (zaradi nekontroliranih izmenjav zraka skozi ovoj). Poleg prenosa toplote pa se vrši tudi prenos mase, ki vključuje tako difuzijo vodne pare kot onesnaževala.

Pri energijsko učinkoviti prenovi se poveča zrakotesnost stavbnega ovoja. Ob nepravilni zasnovi ali uporabi prezračevanja pa se posledično zmanjša volumen zraka za prezračevanje prostorov (Dovjak in sod., 2020; Dovjak in sod., 2021). Danes je pogosta praksa izvedba le delne prenove, ki vključuje

izboljšanje toplotne izolativnosti zunanjih sten, oken in/ali strehe. Deli stavbnega ovoja v stiku z zemljino (kletne stene, tla) pa običajno niso vključeni v prenovo. Zaradi navedenega lahko Rn vstopa v notranjost stavbe skozi nesaniране dele stavbnega ovoja v stiku z zemljino (Collignan in sod., 2016). Wang in sod. (2022) so izvedli sistematičen pregled 68 epidemioloških raziskav, ki so obravnavale vpliv ukrepov za varčevanje z energijo na izpostavljenost uporabnikov radonu, biološkim agensom in kemikalijam. Poudarjajo, da delni ukrepi izboljšanja toplotnega ovoja stavbe brez vgradnje učinkovitega mehanskega prezračevanja povečajo koncentracije radona in ostalih onesnaževal v prostoru. To pa ima lahko negativen vpliv na zdravje uporabnikov. Zato je na področjih z večjim tveganjem za radon v zemljini potrebno za preprečevanje negativnega vpliva na zdravje uporabnikov stavb (poleg tehničnih sistemov prezračevanja prostorov) izvesti tudi aktivne ali pasivne sisteme prezračevanja pod talno konstrukcijo ter zagotoviti popolno tesnjenje med zemljino in notranjim zrakom z radonsko zaporno folijo (EPA, 2001; Boardman in sod., 2015; Pravilnik o zahtevah za novogradnje, posege v obstoječe stavbe in sanacijo obstoječih stavb zaradi varovanja zdravja ljudi pred škodljivimi učinki radona, Ur. l. RS, št. 14/22 s spr.). Aktivni sistemi prezračevanja vključujejo prisilno prezračevanje zemljine pod talno konstrukcijo stavbe in odvajanje radona z uporabo ventilatorja, pasivni sistemi pa vključujejo prezračevanje zemljine pod talno konstrukcijo stavbe brez uporabe ventilatorja. V dele ovoja v stiku z zemljino se vstavlja tudi radonsko zaporno folijo, v prostorih pa se izvaja učinkovito prisilno prezračevanje (Pravilnik o zahtevah za novogradnje, posege v obstoječe stavbe in sanacijo obstoječih stavb zaradi varovanja zdravja ljudi pred škodljivimi učinki radona, Ur. l. RS, št. 14/22 s spr.).

3.4.3 Dinamika radona v prostoru

Koncentracija radona v zraku prostora se spreminja, dinamika je odvisna predvsem od infiltracije v prostor in prezračevanja. Dnevni cikel koncentracije radona v zraku prostora kaže, da je koncentracija običajno najvišja zgodaj zjutraj pred prezračevanjem, saj se radon v času, ko ne zračimo, kopiči, nato se z zračenjem niža, doseže pozno popoldne najnižjo vrednost in začne zvečer ponovno naraščati (Schubert in sod., 2018). Koncentracija radona v prostoru je obratno sorazmerna s temperaturo zunanjega zraka (Gopalakrishnan in Jeyanthi, 2022). Pozimi, ko manj prezračujemo, je koncentracija radona za faktor 2–3 višja kot poleti (Arvela, 2005; Vaupotič, 2011). Schubert in sod. (2018) navajajo, da je ponavljajoči dnevni cikel koncentracije radona v prostoru povezan s ponavljajočim režimom prisilnega prezračevanja, medtem ko so dnevna nihanja ravni koncentracije radona v prostoru povezana z izhajanjem radona iz tal in gradbenih materialov pod vplivom sprememb temperature in tlaka. Ena izmed ključnih ugotovitev je, da spremembe gradienta tlaka znotraj in zunaj vplivajo na koncentracijo radona v prostoru (Schubert in sod., 2018).

V starejših stavbah je naravno prezračevanje še vedno prevladujoč način prezračevanja, kjer se izkoriščajo naravne fizikalne lastnosti (razlika tlaka zaradi temperaturne razlike in vetra) znotraj in zunaj stavbe (McGrath in sod., 2021). Posledično lahko pride do sezonskih nihanj koncentracije radona, pri čemer zimske koncentracije pogosto znatno presegajo celoletno povprečje (McGrath in sod., 2021). Groves-Kirkby in sod. (2015) so v kleti nestanovanjske stavbe (junij 2003–marec 2008) preučevali odvisnost koncentracije radona in temperature zraka. Klet v času raziskave ni bila v uporabi (stabilne razmere). Za potrebe raziskave so izračunana dnevna, mesečna in letna povprečja radona in notranje temperature. Podatki glede meteoroloških dejavnikov so bili zbrani na vremenski postaji, ki se nahaja v

bližini predmetnega prostora. Najdena je bila korelacija med koncentracijo radona in razliko med notranjo in zunanjo temperaturo zraka.

3.4.3.1 Slovenija

V raziskavi Vaupotič (2002c), ki se nanaša na 10 slovenskih vrtcev s povišanimi koncentracijami Rn, je poleg identifikacije virov (razpoke v betonski talni plošči, sifoni) opisana tudi dnevna dinamika radona v igralnicah. Radon se akumulira ponoči, ko so zaprta vsa okna in vrata, nato se koncentracija od 6. ure zjutraj (tj. do začetka obratovanja) zaradi odpiranja oken in vrat enakomerno niža do 12. ure. Ob 12. uri, ko zaprejo okna in se začne dnevni počitek otrok, se koncentracija ponovno zviša, vendar le za kratek čas. Nato sledi nižanje njegove koncentracije, ki doseže minimum med popoldanskim čiščenjem stavbe, potem pa zopet naraščanje, ki doseže vrh naslednji dan zgodaj zjutraj. Še posebej je bilo poudarjeno, da se zaradi olajšanega prehajanja talnega zraka (bogatega z radonom) v igralnice in nezadostnega prezračevanja lahko zgodi, da osebje in otroci vstopijo zjutraj v prostore, ko koncentracija radona še narašča oziroma je ta na dnevnem maksimumu.

Med leti 1993 in 1994 so izmerili koncentracije Rn v štirih vrtcih na različnih geoloških in podnebnih območjih Slovenije (Vaupotič in sod., 1998). V raziskavi so želeli pridobiti več informacij o vplivu lokalne geologije, podnebja, gradbenih materialov in zasedenosti prostorov na koncentracije Rn v vrtcu. V vrtcu na Krasu so bile v vseh merilnih obdobjih najvišje koncentracije radona. Glede na dve sezoni jesen–zima in pomlad–poletje, so bile višje koncentracije v sezoni jesen–zima. V vrtcu na Krasu so bile razlike med sezonama (jesen–zima in pomlad–poletje) zelo majhne. Slednje sta avtorja pripisala vplivu podnebja mesta, kjer se vrtec nahaja. Poletja so precej vroča, zato osebje vrtca pusti igralnice v vročih urah dneva zaprte (vrtec nima klimatskih naprav). Pozimi pa močen veter vpliva, da slaba toplotna izolacija oken zniža koncentracije Rn zaradi večje izmenjave notranjega zraka z zunanjim skozi netesen ovoj. V vrtcu, ki leži v alpskem območju, so bile razlike med sezonami večje. Za to območje so značilne hladne zime in mila poletja. V dveh vrtcih, ki se nahajata v Ljubljani, v nobenem od merilnih obdobjih ni bilo zaznati visokih koncentracij Rn. V teh dveh vrtcih zaradi razlik v zasedenosti (eden je poleti zaprt) ni bilo mogoče razložiti vpliva podnebja na koncentracijo Rn. V tej raziskavi je bilo poudarjeno, da lahko z doslednim odpiranjem oken znatno znižamo koncentracijo Rn, vendar le, če ta ni ekstremno visoka.

3.4.3.2 Črna gora

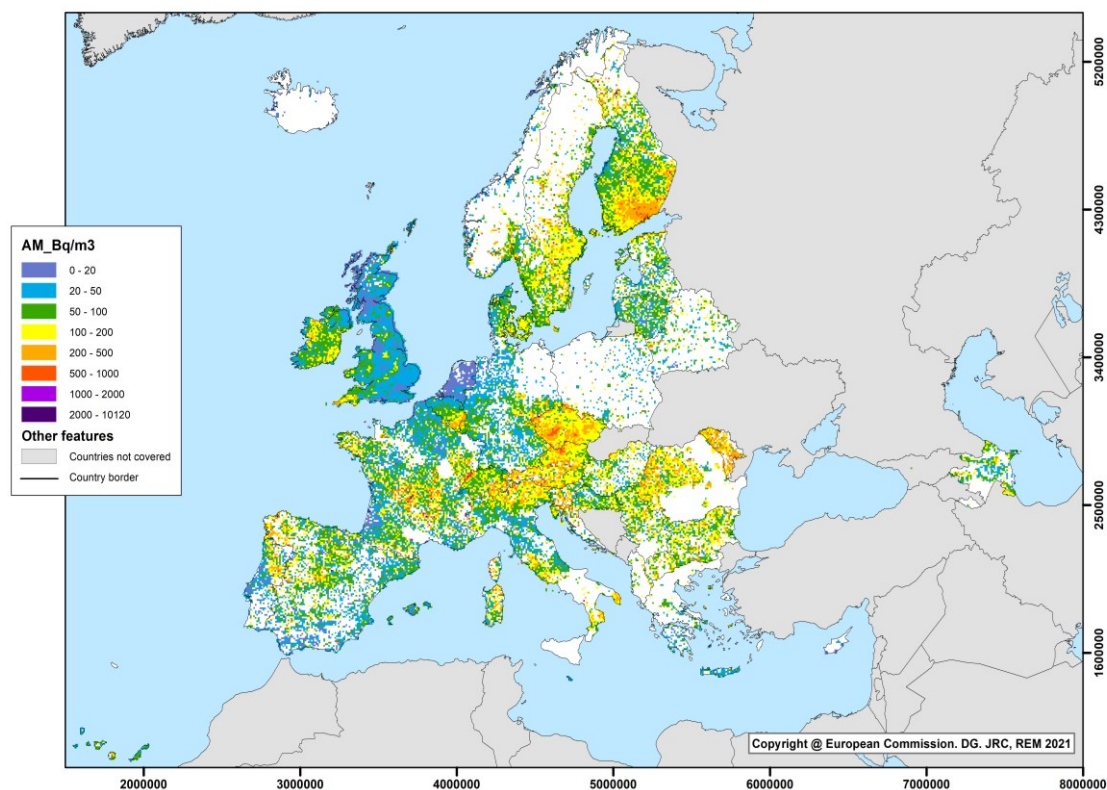
V okviru nacionalnega radonskega programa so v Črni gori opravili meritve koncentracij Rn v 1095 stanovanjih, v zimski in poletni sezoni. Rezultate od meritev v 930 stanovanjih so uporabili za izračun povprečnega razmerja koncentracije Rn v obdobju zima–poletje za tri podnebne pasove v državi (po Köppnovi klasifikaciji: Cs – sredozemsko podnebje, z vročimi in suhimi poletji ter blagimi zimami, Cf – blago in vlažno podnebje, z vročimi poletji, Df – snežno borealno podnebje, brez sušnega obdobja, s hladnimi poletji in hladnimi zimami). Koncentracije Rn so višje v hladnejšem delu leta (zimsko obdobje – od oktobra do marca) kot pa v toplejšem delu leta (poletno obdobje – od aprila do septembra). Sicer lahko imajo posamezna stanovanja zelo različna razmerja koncentracij Rn v obdobju zima–poletje, a je bil v raziskavi uporabljen dovolj velik vzorec, da lahko dobljenim rezultatom zaupamo. Raziskava je pokazala, da povprečne letne koncentracije Rn v črnogorskih domovih niso v skladu z logaritemsko normalno porazdelitvijo (Vukotić in sod., 2019b). V podnebnem pasu Cf (osrednji, največji del države)

so koncentracije Rn znatno višje kot v ostalih dveh podnebnih pasovih Cs in Df. Ker Cf predstavlja blago in vlažno podnebje s toplim poletjem, ta rezultat ni bil pričakovan. Avtorji pojasnjujejo, da teh rezultatov ni moč razložiti samo z vplivom podnebja, temveč je potrebno upoštevati tudi geološke danosti lokacije in gradbeno-fizikalne karakteristike stavb. Za Cf podnebni pas je značilna prisotnost tako apnenca kot tudi visokega krasa. Čeprav so te kamnine revne z vsebnostjo urana, so zelo dobro prepustne, saj imajo v svoji strukturi veliko razpok in votlin, in zato predstavljajo območja povečanega tveganja za radon (Vaupotič in sod., 2001a; Vaupotič in sod., 2001b; Vukotić in sod., 2019b).

V okviru nacionalnega radonskega programa so opravili meritve tudi v izobraževalnih ustanovah v Črni gori, z izjemo univerz. Rezultati univariatne statistične analize so pokazali, da na koncentracijo Rn najbolj vplivajo naslednje spremenljivke: starost stavbe, klet, okenski okvirji, gradbeni materiali. Koncentracije Rn so višje v starejših stavbah brez kleti in v stavbah s PVC in aluminijastimi okenskimi okvirji. V nasprotju s predvidevanji so avtorji ugotovili, da imata urbano oz. podeželsko območje in podnebje manjši vpliv na koncentracijo Rn, kot manjša debelina temeljne plošče. Eden izmed razlogov za to je verjetno manj zanesljiv vir podatkov, saj so ti bili posredovani s strani uporabnikov in ne iz projektne dokumentacije (Vukotić in sod., 2020b; Vukotić in sod., 2021).

3.5 Koncentracije radona po Evropi in pregled raziskav v vrtcih v Sloveniji in Črni gori

Evropski radonski atlas predstavlja povprečne enoletne koncentracije radona v zraku v pritličjih domov (slika 5), v mreži 10 km × 10 km (Cinelli in sod., 2019). Nacionalne raziskave radona so bile izvedene v 22 državah EU: Avstrija, Hrvaška, Estonija, Danska, Finska, Francija, Grčija, Madžarska, Irska, Italija, Litva, Luksemburg, Malta, Nizozemska, Poljska, Portugalska, Slovaška, **Slovenija**, Španija in Švedska. Regionalne raziskave so bile izvedene v 6 državah EU: Belgija, Bolgarija, Ciper, Nemčija, Latvija in Romunija. Zunaj EU so bile nacionalne raziskave izvedene v Azerbajdžanu, Belorusiji, Islandiji, Makedoniji, **Črni gori** (na sliki 6 podatki še niso vrisani), Rusiji, Srbiji, Švici, Ukrajini, Veliki Britaniji in na Norveškem. Zunaj EU so bile izvedene regionalne raziskave v Albaniji, Armeniji, Bosni in Hercegovini, Gruziji, Kazahstanu, Moldaviji in Turčiji (Cinelli in sod., 2019). Vidimo, da so koncentracije radona v območju od nekaj 10 do nekaj 1000 Bq m⁻³, odražajo pa geološke značilnosti, meteorologijo in značilnosti gradnje.



Slika 5: Evropski radonski atlas koncentracij v domovih (Cinelli in sod., 2019).

Čeprav se Evropski radonski atlas nanaša na domove, pa bi lahko podobno sliko dobili tudi za stavbe, namenjene za izobraževanje, saj so koncentracije Rn v veliki meri odraz geološke sestave in strukture tal.

V sistematični pregled raziskav Rn v stavbah za izobraževanje, kjer nas je zanimala odvisnost koncentracije Rn v stavbi od geoloških, geografskih in gradbenotehničnih značilnosti ter prezračevalnih navad, smo vključili naslednje baze podatkov: Science Direct, Pub Med in Research Gate za časovno obdobju od decembra 2020 do novembra 2023. Ključne besede v angleščini so bile: *Radon in Kindergartens, Educational Buildings, Indoor Air Quality, Action Level, Ventilation, Radon in Montenegro, Radon in Slovenia*, skupaj s *Soil, Health, Ventilation rates, Dosimetry, Relative Humidity, Temperature in Building materials*. Vse recenzirane članke, skupaj s povzetki in naslovi, smo podrobno pregledali, da bi ocenili njihovo relevantnost. Poleg tega smo pregledali številne mednarodne in nacionalne pravne akte Republike Slovenije in Črne gore (Ur. l. EU, Ur. l. RS, Službeni list ČG), dokumente Evropske komisije, poročila in dokumente Agencije za varstvo okolja Republike Slovenije in Agencije za varstvo okolja Črne gore, ISO standarde, priročnike Svetovne zdravstvene organizacije (World Health Organisation, WHO), Ameriške agencije za varstvo okolje (Environmental Protection Agency, EPA). Podrobno smo preučili nacionalna radonska programa za Slovenijo in Črno goro. V nadaljevanju povzemamo raziskave radona v VVZ, ki se nanašajo na Slovenijo (preglednica 2) in Črno goro (preglednica 3).

3.5.1 Pregled raziskav VVZ - Slovenija

Preglednica 2: Pregled raziskav radona za stavbe VVZ v Sloveniji.

Avtorji: Vaupotič in Kobal (2005). <i>Radon exposure in Slovenian kindergartens and schools</i> . In International congress series (vol. 1276, pp. 375–376). Elsevier.	
Metoda: V okviru nacionalnega radonskega programa so izmerili koncentracije Rn v 730 vrtcih ter 890 osnovnih in srednjih šolah. Z alfa scintilacijskimi celicami (izdelane na Institutu »Jožef Stefan«) so merili trenutne koncentracije Rn in iskali vire Rn. V stavbah s povišanimi koncentracijami so izvedli kontinuirne meritve Rn preko daljšega časovnega obdobja. Preučevali so dinamiko Rn med delovnim časom, ko so ljudje dejansko izpostavljeni Rn, in med vikendi, ko prostori niso v uporabi in se Rn akumulira.	Rezultati: Največ visokih koncentracij Rn so izmerili v VVZ na kraških območjih. Ugotovili so, da 360 otrok v vrtcih in 750 otrok v šolah ter 34 zaposlenih v vrtcih in 44 zaposlenih v šolah prejme efektivno dozo nad $2,5 \text{ mSv a}^{-1}$. Na podlagi rezultatov teh raziskav je bilo uspešno saniranih 16 vrtcev in 19 šol.
Avtor: Vaupotič (2002). <i>Search for radon sources in buildings–kindergartens</i> . Journal of Environmental Radioactivity, 61(3), 365–372.	
Metoda: V 10 vrtcih s povišanimi koncentracijami Rn so s pomočjo različnih merilnih tehnik identificirali vire Rn: to so razpoke, luknje in različni jaški. Ugotavljali so koncentracijo Rn na izvoru, hitrost vstopa v prostor in dnevna nihanja v zraku prostorov.	Rezultati: V treh vrtcih so ugotovili močne vire radona, kot so: razpoke v betonski plošči, jaški, umivalniki ipd. V dveh vrtcih so prostor sanirali z novo betonsko talno ploščo, v tretjem so na vhodu jaška (v katerem se je Rn koncentriral) vgradili ventilator in znižali koncentracijo.
Avtorji: Vaupotič, Šikovec in Kobal (2000). <i>Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools</i> . Health Physics, 78(5), 559–562.	
Metoda: Koncentracije Rn in hitrosti doze sevanja gama so izmerili v 890 šolah z okrog 280.000 učenci. Iskali so koncentracije Rn pozimi, torej pri najslabših pogojih, zato so bili prostori zaprti 12 ur pred odvzemom vzorcev zraka v scintilacijske celice. Hitrosti doz sevanja gama so izmerili s prenosnim Geigerjevim števcem.	Rezultati: Izračunali so, da je aritmetična srednja vrednost koncentracije Rn 168 Bq m^{-3} , geometrična pa 82 Bq m^{-3} . Aritmetična srednja vrednost hitrosti doze sevanja gama je 102 nGy h^{-1} , geometrična pa 95 nGy h^{-1} . V 77 šolah (8,7 %) je koncentracija Rn preseгла 400 Bq m^{-3} , takratno referenčno raven Rn za vrtce in šole v Sloveniji. Glavni vzrok za povišane koncentracije Rn v stavbah so prepustne karbonatne kamnine, ki pokrivajo večji del južne Slovenije.
Avtor: Vaupotič (2002). <i>Identification of sources of high radon levels in Slovenian schools</i> . Radiation Protection Dosimetry, 102(1), 75–80.	
Metoda: V 20 šolah s povišanimi koncentracijami Rn so identificirali vire Rn. Uporabili so kombinacijo različnih merilnih tehnik.	Rezultati: Ugotovili so, da je vzrok visokih koncentracij Rn največkrat slaba kakovost betonske talne plošče, v nekaj primerih pa se Rn koncentrira v talnih in stenskih jaških.

Avtorji: Vaupotič, Hunyadi, Baradács (2001). <i>Thorough investigation of radon in a school with elevated levels</i>. Radiation Measurements, 34(1–6), 477–482.	
Metoda: Izmerili so povprečne koncentracije Rn v vseh prostorih šole, v učilnicah pa so koncentracijo Rn in RnP merili tudi kontinuirno (10–14 dni) v različnih letnih časih in ugotavljali, kakšne so vrednosti v času zasedenosti stavbe (pouka) in v času, ko stavba ni v uporabi (vikendi, počitnice).	Rezultati: V učilnicah so koncentracije Rn pozimi v jutranjih urah (pred pričetkom pouka) dosegle tudi 6 kBq m^{-3}. Rn se je koncentriral v kletnih prostorih, kjer je bila povprečna koncentracija pozimi okrog 26 kBq m^{-3}. Efektivne doze sevanja, ki so jih prejeli zaposleni in učenci, so bile od 3,7 mSv do 6,7 mSv na leto.
Avtorji: Vaupotič (2010). <i>Slovenian approach in managing exposure to radon at workplaces</i>. Nukleonika, 55(4), 565–571.	
Metoda: Pregled koncentracij Rn v šolah, vrtcih, bolnišnicah, vinskih kletih in številnih drugih nestanovanjskih stavbah (zdravstveni domovi, železniške postaje, policijske postaje itd.) ter kraških jamah. Meritve so izvajali z različnimi aktivnimi (kontinuirne) in pasivnimi (trenutne in povprečne) merilnimi tehnikami. Pri kontinuirnih meritvah so v zraku merili tudi RnP, včasih dodatno še delež RnP v prosti in vezani obliki. Efektivne doze, ki so jih izračunali, so bile osnovni kriterij za radonsko sanacijo stavb.	Rezultati: V 46 vrtcih in 77 šolah so bile koncentracije Rn nad 400 Bq m^{-3} (prejšnja nacionalna referenčna raven). V polovici stavb so bile koncentracije Rn s sanacijskimi ukrepi uspešno znižane pod referenčno raven. V 5 prostorih od skupaj 201 in v 26 večjih bolnišnicah je koncentracija Rn presegla 1000 Bq m^{-3}. Nevezani delež RnP je bil najvišji v kraških jamah (poleti), najnižji pa v vrtcih in šolah. V Postojnski jami je delovni čas delavcev skrajšan oz. omejen tako, da letna efektivna doza ne preseže omejitev v pravilniku.
Avtorji: Vaupotič, Križman, Planinić, Kobal (1994). <i>Radon level reduction in two kindergartens in Slovenia</i>. Health Physics, 66(5), 568–572.	
Metoda: Sanacijski ukrepi za znižanje koncentracije Rn v zraku so bili izvedeni v 2 vrtcih (Medvode in Zelena jama), kjer so bile povprečne vrednosti Rn okoli 2000 Bq m^{-3} (v kurilni sezoni pred sanacijo). Prvi vrtec je zgrajen na sedimentnem prod, drugi pa na nasutju elektrofiltrskega pepela in žlindre.	Rezultati: V obeh primerih se je Rn kopičil v podtalnem kanalu, ki so ga pri sanaciji odprli na obeh koncih. Naravno prezračevanje kanalov ni dovolj znižalo koncentracije Rn, zato so v VVZ Medvode namestili ventilator, ki prezračuje kanal približno 20 minut trikrat na dan in tako zniža raven Rn na sprejemljivo vrednost. V vrtcu Zelena jama v trenutku nastanka članka sanacija še ni bila končana v celoti.

Avtorja: Popit, Vaupotič (2002). <i>Indoor radon concentrations in relation to geology in Slovenia</i> . Environmental Geology, 42, 330–337.	
Metoda: V okviru nacionalnega radonskega programa (1990–1994) so v 730 vrtcih in 890 šolah po Sloveniji izmerili trenutne koncentracije Rn s scintilacijskimi celicami. Iz podatkovne baze so izbrali 330 trenutnih koncentracij Rn tako, da so pokrili celotno ozemlje. S statistično analizo so po pomembnosti razvrstili dejavnike, ki vplivajo na povišano koncentracijo Rn.	Rezultati: Ugotovljena je bila povezava med koncentracijami Rn v prostorih, vrsto kamenin, tektonskimi prelomi in starostjo stavb. Dejavniki, ki najbolj vpliva na povišano koncentracijo Rn, je bila starost stavbe (nad 50 let) in s tem povezane razpoke v talni plošči. Drugi dejavnik je bila litološka podlaga z najvišjimi koncentracijami Rn v stavbah vrtcev in šol, zgrajenih iz apnenca.
Avtorji: Vaupotič, Kobal, Planinič (1998). <i>Long-term radon investigation in four selected kindergartens in different geological and climate regions of Slovenia</i> . Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 238(1/2), 61–66.	
Metoda: V štirih vrtcih v različnih geoloških in podnebnih regijah Slovenije so v obdobju 1993–1994 izmerili koncentracije Rn s komplementarnimi merilnimi tehnikami. Namen raziskave je bil preučiti, kako lokalna geologija, podnebje, gradbeni materiali in zasedenost prostorov vplivajo na koncentracijo Rn v vrtcu.	Rezultati: Povprečne koncentracije Rn v delovnem času, izračunane iz kontinuiranih meritev, so bistveno nižje od celodnevni povprečnih koncentracij, ki jih dobimo z detektorji jedrskih sledi. Razmerje med koncentracijami se lahko razlikuje za faktor 2.
Avtorji: Vaupotič, Kobal, Nicholson, Kross (1996). <i>Building and environmental factors associated with elevated radon levels in kindergartens in Slovenia</i> . In IRPA9: 1996 International Congress on Radiation Protection. Proceedings. Volume 2.	
Metoda: V igralnicah 730 vrtcev (skupaj 66.000 otrok) so v zimskih obdobjih 1990/91 in 1991/92 merili trenutne koncentracije radona z alfa scintilacijskimi celicami pri najslabših pogojih (zgodaj zjutraj v neprezračenih igralnicah).	Rezultati: V 16 objektih (2,2 %) so koncentracije Rn presegle 800 Bq m^{-3} . Parametri, ki lahko vplivajo na koncentracije Rn, so geološka podlaga, sestava in prepustnost tal, podnebje, gradbeni material in zasedenost prostorov.

3.5.2 Pregled raziskav VVZ – Črna gora

Preglednica 3: Pregled raziskav radona za stavbe VVZ v Črni gori.

Avtorji: Vukotić, Zekić, Anđelić, Svrkota, Đurović, Dlabac (2020). <i>Radon on the ground floor in the buildings of pre-university education in Montenegro</i> . Nukleonika, 65(2), 53–58.	
Metoda: Nacionalna raziskava radona v Črni gori je bila izvedena v vseh stavbah za izobraževanje (razen na univerzah). Detektorji jedrskih sledi (Radosys, tip RSFV) so bili nameščeni v 468 stavbah (skupaj v 2855 pritličnih prostorih). Meritve povprečnih koncentracij Rn so potekale	Rezultati: Koncentracije Rn so bile v območju od 16 do 2810 Bq m^{-3} . Koncentracija nad 300 Bq m^{-3} je bila izmerjena v 135 stavbah, nad 1000 Bq m^{-3} pa v 18 stavbah. Rezultati univariatne statistične analize so pokazali, da na koncentracijo Rn vplivajo štirje parametri, in

9 mesecev. Parametre, ki vplivajo na koncentracijo Rn so analizirali z univariatno in multivariatno statistično analizo.	sicer: starost stavb, gradbeni materiali, izvedba kleti in vrsta okenskih okvirjev. Rezultati multivariatne statistične analize so razkrili še dva vplivna parametra, ki sta: ruralno/mestno območje in število nadstropij, hkrati pa so izključili dejavnik gradbeni materiali.
Avtorji: Vukotić, Zekić, Anđelić, Svrkota, Bogićević, Dlabac (2019) <i>Radon in Montenegrin schools and kindergartens—preliminary results.</i>	
Metoda: V okviru nacionalne raziskave radona so bile v 507 vrtcih in šolah (skupno 3345 prostorih) opravljene meritve koncentracije Rn v obdobju 2016–2017 z detektorji jedrskih sledi (Radosys, tip RSFV), ki so bili nameščeni v vseh učilnicah, pisarnah in igralnicah v pritličju ter v nekaterih prostorih v nadstropju.	Rezultati: V 223 prostorih so koncentracije Rn presegle 300 Bq m ⁻³ , od tega so v 48 stavbah presegle 1000 Bq m ⁻³ . Ker gre za preliminarne rezultate, avtorji domnevajo, da so povišane koncentracije posledica starosti stavb in pritličnih stavb.
Avtorji: Vukotić, Zekić, Anđelić, Svrkota (2020). <i>Radon survey in the buildings of pre-university education in Montenegro.</i> Contemporary Materials, 11(1).	
Metoda: V okviru nacionalne radonske raziskave so bile v 519 izobraževalnih ustanovah (z izjemo univerz) v obdobju 2016–2017 opravljene meritve koncentracije Rn.	Rezultati: V 44 % stavb so koncentracije Rn presegle 300 Bq m ⁻³ , v 9,5 % stavb pa so bile nad 1000 Bq m ⁻³ . Koncentracija Rn je v stavbah za izobraževanje bistveno višja kot v črnogorskih domovih. To je lahko posledica vrste gradnje (stavbe za izobraževanje so po volumnu večje, imajo manj etaž in relativno visoko povprečno starost).

3.6 Ogljikov dioksid v stavbah

Ogljikov dioksid (CO₂) je brezbarven plin, njegov delež v zunanjem zraku je okrog 0,03 %, njegova koncentracija pa približno 420 ppm (Prill, 2000). V zunanjem zraku se njegova koncentracija tekom dneva spreminja; narašča ponoči in je višja ob sončnem vzhodu, nižja pa je podnevi (Thomas in sod., 2002). Vidna je tudi razlika med njegovo koncentracijo v hladni in topli polovici leta (Idso in sod., 2002). V bližini prometnih območij, industrije in virov izgorevanja so koncentracije višje (Day in sod., 2002).

CO₂ je pomemben kazalnik kakovosti zraka v prostorih (Prill, 2000). Koncentracije CO₂ v prostorih so odvisne od prezračенosti prostora in zasedenosti slednjega z uporabniki. Gibljejo se od 420 ppm (popolna prezračенost, zunanja koncentracija) do 2000–4000 ppm; 5–10 krat višje koncentracije kot v zunanjem zraku najdemo v slabo prezračенih spalnicah, vrtcih, šolah. Na koncentracijo CO₂ v prostoru vpliva (Prill, 2000):

- število ljudi, ki uporabljajo prostor,
- trajanje zasedenosti prostora,
- volumen prostora,

- volumen izmenjanega zraka za prezračevanje in njegova kakovost (onesnaževala zaradi prometnih virov).

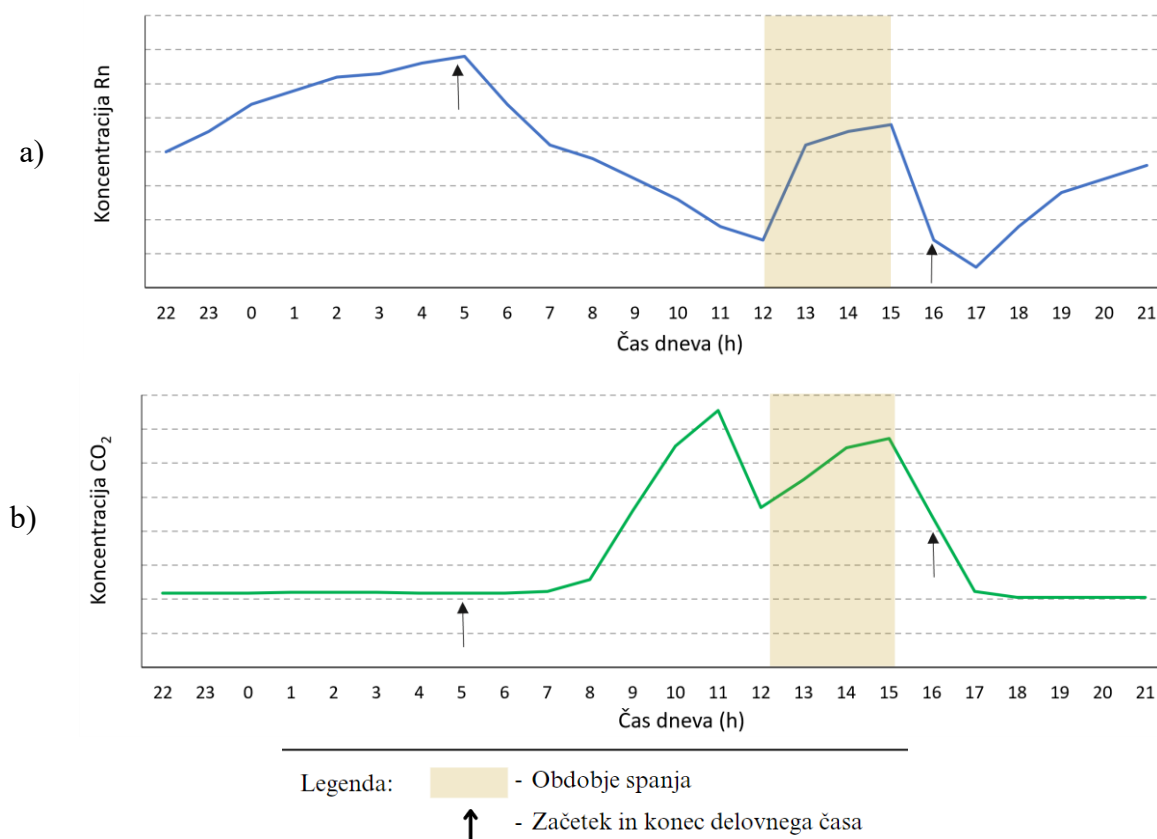
Koncentracije onesnaževal v notranjem zraku so pogosto višje od koncentracij v zunanjem zraku, kar se odraža v večji izpostavljenosti in večjem možnem negativnem vplivu na zdravje ljudi (Jones, 1999). S ciljem doseganja zadovoljivo nizkih koncentracij CO₂ je potrebno zagotoviti zadostno izmenjavo zraka, bodisi naravno, mehansko ali hibridno (Prill, 2000). Slednje je še posebej pomembno, če imamo energetske učinkovite stavbe, z dobro zatesnjenim stavbnim ovojem. Sohn in sod. (2009) so v 55 izobraževalnih ustanovah v Koreji (v 5 vrtcih, 20 osnovnih šolah, 15 srednjih šolah in 15 višjih šolah) izvedli enodnevne meritve koncentracije ogljikovega monoksida (CO), CO₂, trdnih delcev (PM₁₀), celokupnega mikrobnege števila (TBC), celokupnih koncentracij hlapnih organskih spojin (TVOC) in formaldehida (HCHO). Meritve so opravili v vseh štirih sezonah. Povprečne koncentracije CO₂ v učilnicah so znašale 1347 ppm poleti in 1270 ppm pozimi, kar kaže na nezadostno izmenjavo zraka. Razlogi za koncentracije nad mejno vrednostjo 1000 ppm so prenatrpani prostori ter zaprta okna in vrata med predavanji. Avtorji izpostavljajo tudi problem prekomernih ravni zunanjega hrupa in nizkih temperatur v zimskem času, kar se odraža v manjši pogostosti odpiranja oken. Prenove v korejskih šolah z vgradnjo novih gradbenih materialov in pohištva ter nezadostnim prezračevanjem bi negativno vplivale na kakovost zraka.

Muhič in Muhič (2022) sta opravila raziskavo v 311 vrtcih in šolah v Sloveniji. V naključno izbranih prostorih (302 z naravnim prezračevanjem, 9 z mehansko prezračevanjem) sta izmerila koncentracije CO₂, temperaturo in relativno vlažnost zraka. Izmerjene koncentracije CO₂ so bile: 5179 ppm v naravno prezračevanih šolah in 2190 ppm v mehansko prezračevanih šolah. V vrtcih je bila največja izmerjena koncentracija CO₂ v naravno prezračevanih prostorih 3494 ppm, v mehansko prezračevanih pa 2866 ppm. Po pričakovanjih so bile večje koncentracije CO₂ izmerjene v naravno prezračevanih prostorih. Povprečna koncentracija CO₂ med bivanjem je bila nižja v stavbah z večjo rabo energije kot v stavbah z manjšo rabo energije, kar povezujejo z zrakotesnostjo stavb. V energetsko učinkovitih stavbah, predvsem šolah, je povprečna koncentracija CO₂ praviloma višja. Avtorja poudarjata, da ni jasne povezave med največjo izmerjeno koncentracijo CO₂ in povprečno temperaturo zunanjega zraka. Poudarjata tudi, da zaradi majhnega vzorca mehansko prezračevanih prostorov ni mogoče trditi s statistično značilno zanesljivostjo, da so parametri kakovosti zraka v mehansko prezračevanih prostorih boljši. Vendar rezultati jasno kažejo, da sta tako maksimalna kot povprečna koncentracija CO₂ med bivanjem v mehansko prezračevanih prostorih nižja kot v naravno prezračevanih prostorih.

3.7 Dnevni potek koncentracij radona in ogljikovega dioksida v igralnici vrtca

Značilen dnevni potek koncentracij Rn in CO₂ v igralnici vrtca je prikazan na sliki 6, odraža pa režim dela in prezračevalne navade. Krivulji kažeta 24-urni potek koncentracije Rn (slika 6a) in koncentracije CO₂ (slika 6b), s črnima puščicama sta označena čas začetka in zaključka delovnika, rumeno osenčeni del pa pomeni čas počitka otrok. Ker imata Rn in CO₂ različen izvor, je tudi dnevni potek njunih koncentracij v igralnici vrtca različen.

Kot vidimo na sliki 6a, začne koncentracija Rn v igralnici naraščati pozno popoldne (okrog 17. ure), ko zaprejo okna in vrata. Rn, ki vstopa v stavbo v s talnim zrakom iz zemljine pod stavbo pod vplivom meteoroloških dejavnikov, se v zaprti igralnici koncentrira in doseže svoj maksimum naslednje jutro (okrog 5. ure). Po začetku delovnika koncentracija pada vse dopoldne (do 12. ure) zaradi prezračevanja, narašča v času počitka otrok, ko zaprejo okna in vrata (do 15. ure), nato zopet pada zaradi prezračevanja vse do zaključka delovnika (okrog 16. ure). Obratno, pa se koncentracija CO₂ v času zaključka delovnika že zniža na vrednost, ki je značilna za zunanji zrak in ostaja nizka vse do naslednjega jutra. Po začetku delovnika (ob 5. uri) začne število otrok v igralnici počasi naraščati, zato začne počasi naraščati tudi koncentracija CO₂, in doseže dnevni maksimum dopoldne (med 10. in 11. uro). V času počitka otrok koncentracija zopet narašča, nato se zaradi prezračevanja niža vse do zaključka delovnika (slika 6b).



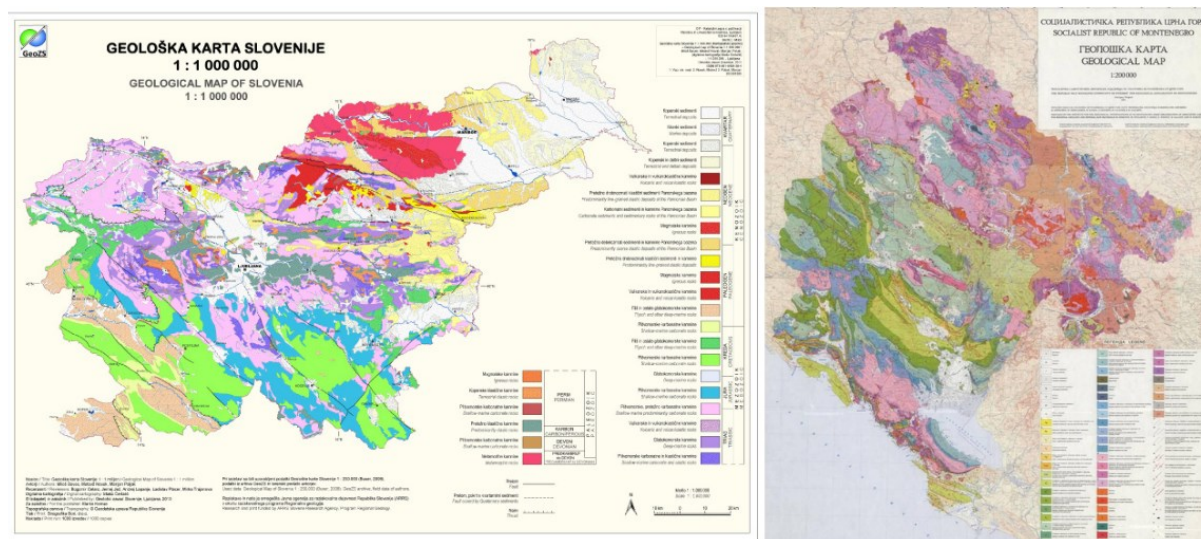
Slika 6: Potek koncentracije v vrtcu a) Rn, b) CO₂

4 METODE

4.1 Izbor lokacij

Slovenija in Črna gora se razlikujeta po velikosti populacije in po površini. Slovenija ima okoli 2.106.000 prebivalcev (SURS, 2022), Črna gora pa približno štirikrat manj – okoli 619.000 (Monstat, 2022). Slovenijo prištevamo med srednje velike evropske države s površino 20.271 km². Črna gora je približno 1,5-krat manjša in spada med majhne države, s površino 13.812 km². Slovenija ima 212, Črna gora pa 25 občin (MJU, 2022; Monstat, 2022).

Obe državi imata zapleteno geološko strukturo in raznolikost terena. Slovensko površje sestavljajo večinoma kamnine iz mezozoika (apnenec, dolomit), terciarja (lapor, peščenjak, fliš) in kvartarja (glinavec, konglomerat). Po načinu nastanka prevladujejo kamnine iz mezozoika ali apnenec (Bavec in sod., 2013). Različne vrste sedimentnih, magmatskih in metamorfnih kamnin sestavljajo površje ozemlja Črne gore. Na geoloških kartah Črne gore se razlikujejo formacije paleozojske starosti: devonsko-karbonski sedimenti, karbonski sedimenti, permski sedimenti in konglomerati. Prve tri tvorbe sestavljajo peščenjaki, meljevci in skrilavci. Klastični sedimenti so si po urbanosti in razbitosti podobni, zato je včasih zelo zapleteno slediti vsem njihovim plastem. Na sliki 7 vidimo, da imata obe državi podobne geološke značilnosti (oz. litološko sestavo), saj ju večinoma pokrivajo karbonatne kamnine, ki so podvržene raztapljanju, so razpokane in dobro prepustne. Obe državi ležita na seizmično aktivnih področjih, za katere so značilni tektonski premiki in potresi (Radojičić, 1996). Poroznost in razpokanost krasa se z globino zmanjšujeta vse do spodnje meje krasa (Radojičić, 1996). Obe državi imata glede na svojo geološko zgradbo nagnjenost k povečanemu tveganju za povišane koncentracije radona v stavbah.

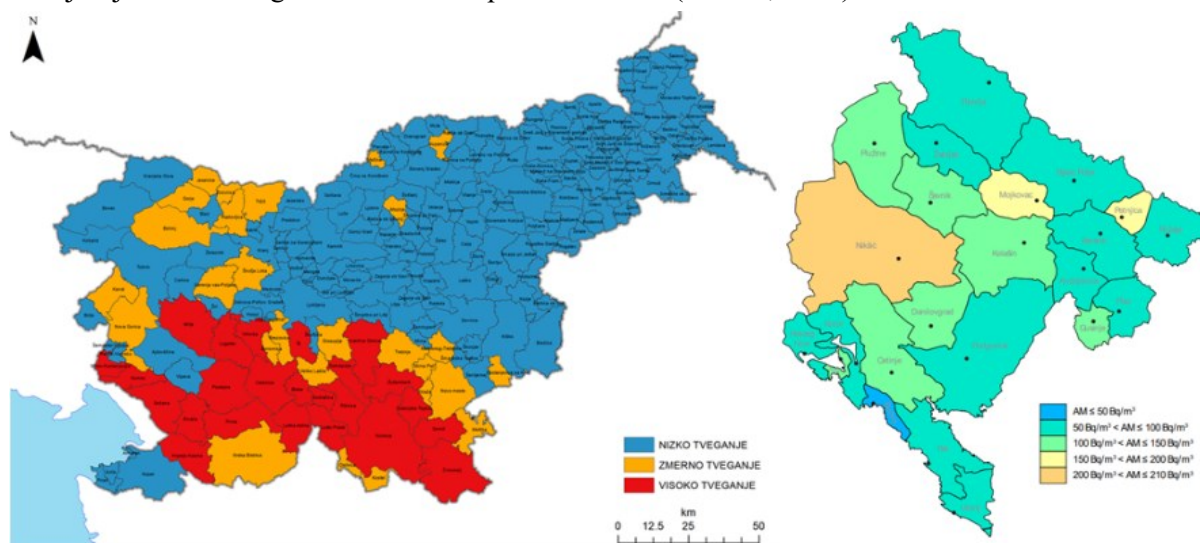


Slika 7: Geološka karta Slovenije (levo) (Bavec in sod., 2013) in geološka karta Črne gore (desno) (Radusinović, 2018).

Po Köppnovi podnebni klasifikaciji lahko podnebje Slovenije razdelimo na 3 osnovne podnebne tipe: zmerno vlažno podnebje z vročimi poletji (Cfa), zmerno vlažno podnebje s toplimi poletji (Cfb) in gorsko podnebje (H) (Ogrin, 1996). Po drugi strani pa lahko podnebje Črne gore razdelimo na: vlažno celinsko podnebje z vročimi poletji (Dfa), zmerno vlažno podnebje z vročimi poletji (Cfb) in sredozemsko podnebje z vročimi poletji (Csa) (Vukotić in sod., 2021).

Tako Slovenija kot Črna gora ležita na potresno aktivnem območju in sta bili v preteklosti že priči rušilnim potresom. Zaradi potresa se poslabša kakovost stavbnega ovoja, saj nastanejo razpoke in druge poškodbe, ki olajšajo prehajanje radona iz zemljine v stavbo. Zato imajo potresno aktivna območja povečano tveganje za povišane koncentracije radona v stavbah.

Obe državi sta v okviru nacionalnih radonskih programov izvedli obsežne meritve koncentracij Rn, na osnovi katerih sta ob upoštevanju dejavnikov, ki vplivajo na koncentracije Rn v prostorih, izdelali karte tveganja za radon (slika 8). V Sloveniji so bile izvedene prve sistematične raziskave Rn v obdobju 1990–1994 (Vaupotič in sod., 1994b; Vaupotič in sod., 2000). V Črni gori so prvo sistematično raziskavo Rn začeli deset let kasneje, leta 2000 (Vukotić in sod., 2021), vendar so jo zaradi pomanjkanja finančnih sredstev ustavili. Nadaljevali so jo v letu 2014 s projektom »Mapiranje radona v Črni gori in izboljšanje nacionalnega sistema zaščite pred radonom« (MORT, 2018).



Slika 8: Karta tveganja za radon: za Slovenijo (levo) (Vaupotič in Gregorič, 2017), za Črno goro (desno) (MORT, 2018).

V Sloveniji je referenčna raven za radon v domovih in delovnih prostorih 300 Bq m^{-3} (Ur. l. RS, št. 18/18, 86/18 in 152/20). V Črni gori je ta raven 400 Bq m^{-3} za obstoječe stavbe, 200 Bq m^{-3} za novozgrajene stavbe ter 1000 Bq m^{-3} za delovne prostore (MORT, 2018). Pomembno je omeniti, da so bile v Črni gori referenčne vrednosti določene brez predhodnega poznavanja dejanskega stanja koncentracij radona na državni ravni (Vukotić in sod., 2021). Po sistematičnih meritvah je bila državnim organom v Črni gori predlagana nova referenčna raven – 300 Bq m^{-3} , ki sledi direktivi EU 2013/59/EURATOM, po kateri naj bi se Črna gora ravnala, saj je kandidatka za članstvo v EU (Vukotić, 2019a; Vukotić in sod., 2019b).

Po nacionalnih meritvah so bile v obeh državah opredeljene občine z visokim tveganjem za radon (karta tveganja, slika 8, levo). Za Slovenijo je to 23 občin: Bloke, Cerknica, Črnomelj, Divača, Dobrepolje, Dolenjske Toplice, Hrpelje-Kozina, Idrija, Ig, Ivančna Gorica, Kočevje, Komen Logatec, Loška dolina, Loški potok, Miren - Kostanjevica, Pivka, Postojna, Ribnica, Semič, Sežana, Sodražica, Vrhnika, Žužemberk (Ur. l. RS, št. 18/18, 86/18 in 152/20). Za Črno goro je bilo opredeljenih šest občin: Nikšić, Danilovgrad, Mojkovac, Plužine, Šavnik in Petnjica (karta tveganja, slika 8, desno) (MORT, 2018).

Za lokacijo, kjer smo izvedli kontinuirane meritve koncentracije Rn v Sloveniji, smo izbrali občino Grosuplje (slika 9), ki je srednje velika občina, del osrednjeslovenske regije, s površino 134 km² in 21.314 prebivalci (Občina Grosuplje, 2022). Na karti tveganja (slika 8, levo) vidimo, da leži občina Grosuplje na področju zmernega tveganja za Rn. Kamnine sodijo v dobo kvartarja; zgradba je zelo preprosta, prevladujejo predvsem usedline, karbonatne kamnine in številni kraški pojavi. Grosuplje je tipično kraško polje, ki se je v celoti oblikovalo na dolomitu. To polje ni enaka udornina kot večina slovenskih kraških polj. Nastalo je z erozijo dolomita ob pomoči tektonskih sil. V prerezu je dolomit videti kot svetlo siva plast, globoka približno 60 cm. Tu prevladuje tudi rdeča ilovica, ki pa je zelo slabo rodovitna. Nahaja se na nadmorski višini 343 m. Najvišja povprečna temperatura je 26,1 °C (julij–avgust), najnižja povprečna temperatura pa 3 °C (januar) (Aladin, 2022).



Slika 9: Slovenske občine; občina Grosuplje je obarvana rdeče (Geopedia, 2022).

Za lokacijo, kjer bomo izvajali meritve koncentracije Rn v Črni gori, smo izbrali Nikšić, občino v osrednjem delu države (slika 10). Po nacionalnem radonskem programu občina sodi v prednostno radonsko območje. Mesto Nikšić ima površino 2.065 km² in 72.443 prebivalcev. Po površini je največje mesto v Črni gori (Antović in sod., 2007). Leži na nadmorski višini od 600 do 660 m na večjem kraškem polju, kjer so prisotni jezerski sedimenti, pesek, prod in glina (Radojičić, 1996). V okoliških gorah so tla slabo razvita ter brez kontinuitete in se spreminjajo zaradi dinamičnega reliefa, različnih podlag, klime in vegetacije. Nikšić je bil dolga leta industrijsko središče, z jeklarno, pivovarno, rudniki boksita ipd., kar je izjemnega pomena za gospodarstvo Črne gore (Antović in sod., 2007). Območje je bogato z nahajališči boksita in relativno visoko vsebnostjo urana (Antović in sod., 2007). Najvišja povprečna temperatura je 27 °C (julij–avgust), najnižja povprečna temperatura pa je –4 °C (januar) (Aladin, 2020).



Slika 10: Regije in občine Črne gore (levo); občina Nikšić (desno) je obarvana rdeče (Vukotić, 2019a).

4.2 Izbor stavb VVZ in prostorov

V Sloveniji so v okviru nacionalnega radonskega programa opravili sistematčne raziskave Rn v 790 vrtcih (Vaupotič in sod, 1994a, Vaupotič in sod., 1994b) in 890 šolah (Vaupotič in sod., 2000). V 45 vrtcih in 78 šolah so koncentracije presegale takratno referenčno raven 400 Bq m^{-3} (Vaupotič in sod., 2005). Stavbe s povišano koncentracijo Rn so bile večinoma zgrajene po letu 1980 (Vaupotič in sod., 2005), pritlične ali podkletene. Starejše stavbe so delno kamnite, medtem ko so novejšje iz opeke, betona ali pa so montažne. V večini stavb so prostori prezračevani naravno, torej z odpiranjem vrat in oken (Vaupotič, 2007).

V Črni gori so v okviru nacionalnega radonskega programa opravili raziskave v 247 izobraževalnih ustanovah z izjemo univerz. Skupaj so preiskali 519 stavb, od tega: 376 osnovnih šol, 51 srednjih šol, 81 vrtcev, 4 zavodov za otroke s posebnimi potrebami in 7 študentskih domov. V 223 stavbah (od skupno 507) so izmerili koncentracije Rn nad 300 Bq m^{-3} (Vukotić in sod., 2019b). Obravnavane stavbe so običajno pritlične, z največ enim ali dvema nadstropjema. Stavbe so večinoma brez kleti in brez centralnega ogrevanja (elektrika ali drva). Izgradnja na podeželju in v mestih se razlikuje po velikosti stavbe, pa tudi po uporabljenih gradbenih materialih za nosilno konstrukcijo. Večinoma gre za beton in opeko, redkeje tudi kamen (Vukotić, 2019a).

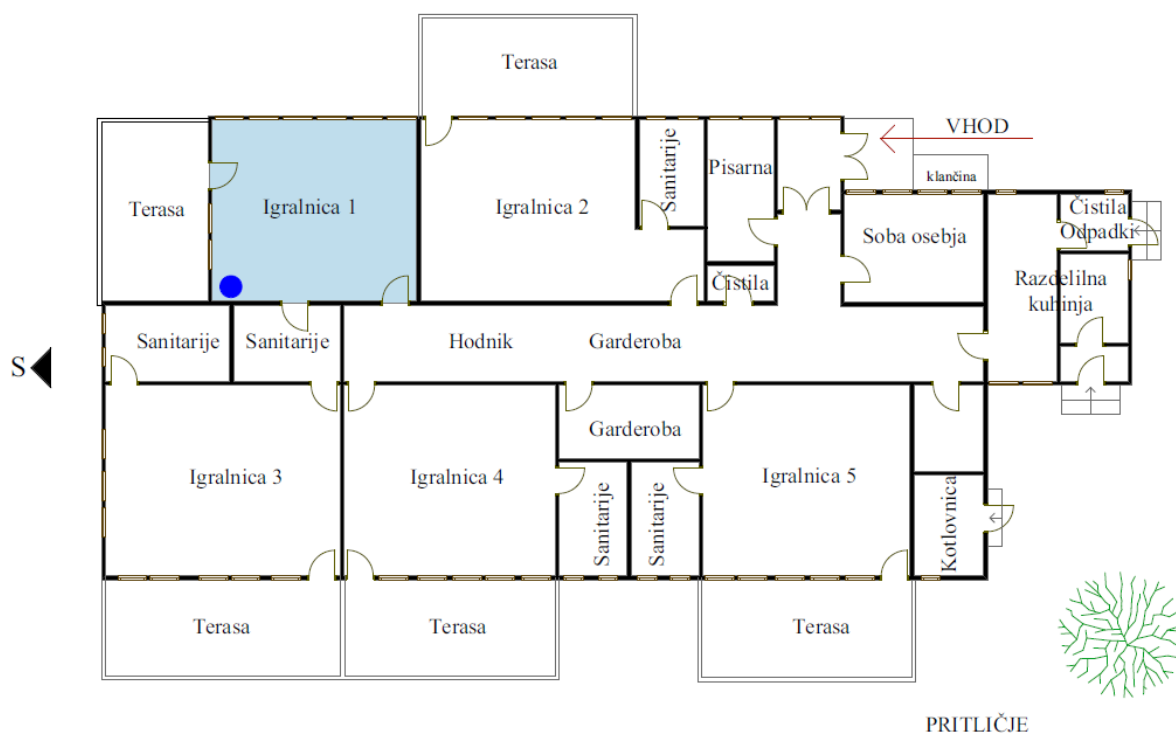
Na osnovi dostopnih podatkov o predhodnih meritvah koncentracije Rn in ob pomoči radonskih kart tveganja (slika 8) smo izbrali za raziskavo po dve stavbi VVZ v Sloveniji in Črni gori. Pri izbranih stavbah smo se omejili na splošen opis VVZ in kode stavb, zaradi ohranjanja anonimnosti uporabnikov.

V nadaljevanju podajamo gradbenotehnične opise vseh štirih stavb, na tlorisih pa smo označili tudi prostore, kjer smo izvedli meritve, kar bomo podrobneje razložili v poglavju 4.4 Izvedba meritev.

4.2.1 Gradbenotehnični opis stavb in prostorov v Sloveniji

V Grosuplju smo izbrali dve enoti istega VVZ, ki smo ju poimenovali SI-1 in SI-2.

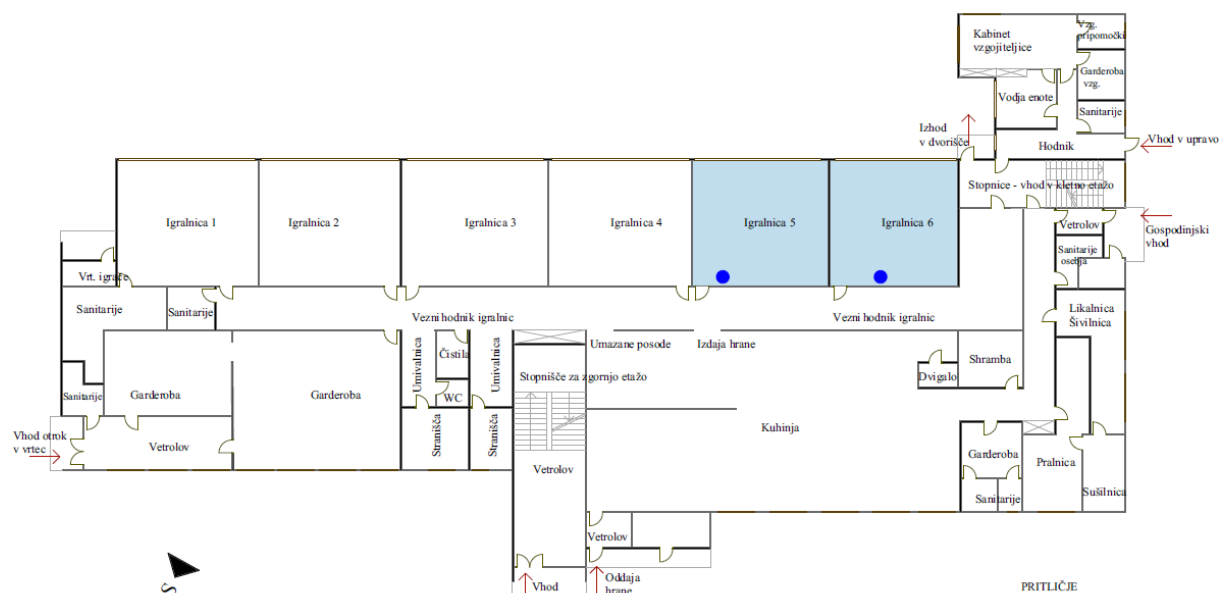
SI-1 (slika 11) je zgrajena kot samostojna enota, opremljena s komunalnimi priključki in lastno kotlovnico (plin). Je pritlična stavba, dimenzij 32 m × 14 m, dvignjena od tal za 0,3 m. Enota ima 5 igralnic, neto površino pa 48 m². Za potrebe celovitega obratovanja ima vso spremljajočo infrastrukturo, kot so: kuhinja, sanitarije, garderobe, pisarne, čistilnica. Stavba je sestavljena iz montažnih kontejnerskih modulov podjetja Trimo Trebnje. Fasado sestavljajo tipski izolacijski sendvič paneli, dvokapnico pa sestavlja lesena nosilna konstrukcija iz prečno žebeljanih nosilcev, preko katerih je položena trapezna pločevina RIMO TPO s slemenom v vzdolžni smeri stavbe. Nosilno konstrukcijo sestavlja okvirna kovinska škatlasta konstrukcija, ki je postavljena na sistem armiranobetonskih pasovnih temeljev. Odprtine objekta oziroma okna so izdelana iz PVC materiala in dvojne zasteklitve z zunanji žaluzijami. Finalna obdelava sten in stropa je laminat, tal pa PVC obloga ali guma. Notranja vrata so izdelana iz furniranega lesa. Prostor se prezračuje naravno z odpiranjem oken.



Slika 11: Tloris stavbe SI-1, z modro barvo je označena igralnica 1 (I1_SI-1), kjer smo izvedli meritve; z modro piko pozicija merilnika Radon Scout Professional.

SI-2 (slika 12) je večnadstropna stavba (pritličje, nadstropje in mansarda) s površino 1289 m². Stavba je bila zgrajena leta 1953 in prenovljena 2016. Etažna višina se giblje od 2,5 do 3,1 m. Zunanja stena je iz armiranega betona, s toplotno izolacijo iz polistirena in fasadnim ometom. Izvedeno ima prezračevano streho iz armiranega betona in toplotno izolacijo iz mineralne volne. Zaključni sloj strehe je aluminijasta pločevina. Talna konstrukcija je iz betonske plošče in je sestavljena iz polistirenske zvočne izolacije, obloge in lesenega poda. Odprtine oziroma okna objekta so južno orientirana, zasteklitev je troslojna s PVC okvirjem. Enota ima vso spremljajočo infrastrukturo, kot so: kuhinja, sanitarije, garderobe, pisarne, čistilnico. V pritličju stavbe je 6 igralnic (dve starostni skupini) z neto površino 42 m², v prvem nadstropju je prav tako 6 igralnic (ena starostna skupina) z neto površino 32,5 m². Prezračevanje je

hibridno, in sicer z lokalnimi prezračevalnimi sistemi z rekuperacijo, ki delujejo ves čas, ter z odpiranjem oken po potrebi.

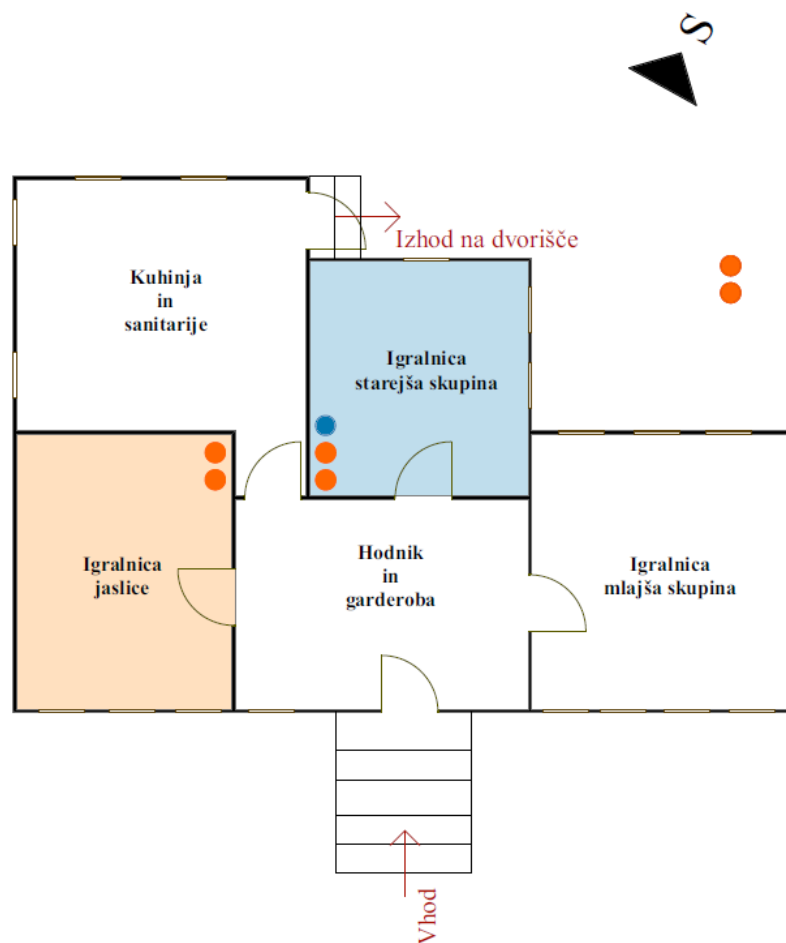


Slika 12: Tloris stavbe SI-2, z modro barvo sta označeni igralnici 5 (I1_SI-2) in 6 (I2_SI-2), kjer smo izvedli meritve; z modro piko pozicija merilnika Radon Scout Professional.

4.2.2 Gradbenotehnični opis stavb in prostorov v Črni gori

V Nikšiću smo izbrali dva vrtca, ki smo ju poimenovali ME-1 in ME-2.

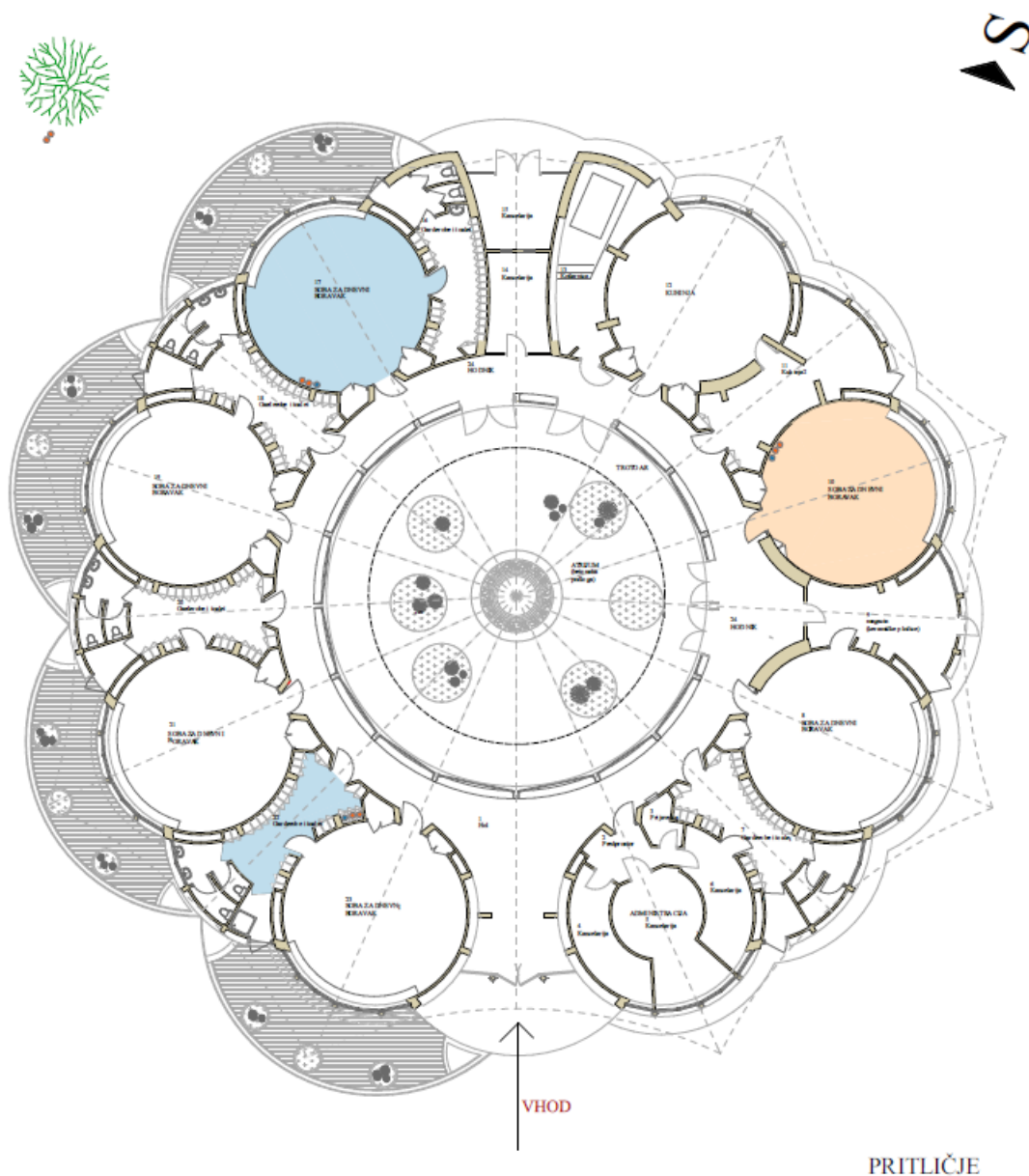
ME-1 (slika 13) je bil zgrajen leta 1950 in ima neto površino 420 m². Prvotno je bila stavba družinska hiša, ki so jo sčasoma spremenili v vrtec. Stavba je pritlična in je sestavljena iz treh pravokotnikov, ki se združijo. Vsak pravokotnik ima dvokapno streho s kritino iz opeke. Stavba je priključena na javni vodovod in kanalizacijo. Zunanje stene so iz kamna brez toplotne izolacije. Tla so obložena z lesom, prav tako vsa vrata. Okna imajo dvojno zasteklitev in lesene okvirje. Objekt je ogrevan s centralno kurjavo, primarni vir energije pa je elektrika. Za potrebe vrtca so dogradili sanitarije in kuhinjo, iz katerih se dostopa do dvorišča. V vrtcu so tri igralnice za tri različne starostne skupine otrok. Hodnik vrtca je hkrati tudi garderoba.



PRITLIČJE

Slika 13: Tloris stavbe ME-1; z modro barvo je označena igralnica (I1_ME-1), kjer smo izvedli kontinuirno meritev, z modro piko pa pozicija merilnika Radon Scout; z oranžno barvo je označena igralnica (I2_ME-1), kjer smo izvedli meritve z detektorji jedrskih sledi, z oranžnimi pikami pa pozicije detektorjev jedrskih sledi Radosys v igralnicah (I1_ME-1, I2_ME-1) in zunaj (D1_ME-1, D2_ME-1).

ME-2 (slika 14) je bil zgrajen leta 1971 in ima neto površino 994 m². Stavba je krožne oblike z atrijem, ima eno etažo – pritličje in je priključena na javni vodovod in kanalizacijo. Streha je ravna, zunanje stene so betonske brez toplotne izolacije. Stavba je priključena na centralno ogrevanje, prevladujoč energent je kurilno olje. Okna imajo dvoslojno zasteklitev in PVC okvir. Vsa notranja vrata so izdelana iz lesa v kombinaciji s steklom. Finalna obdelava tal je parket. Stavba ima 6 igralnic, prostore za upravo in administracijo ter kuhinjo. Vsaka igralnica ima lastno garderobo in sanitarije ter izhod na dvorišče.



Slika 14: Tloris stavbe ME-2; z modro barvo sta označeni igralnica (I1_ME-2) in garderoba (G1_ME-2), kjer smo izvedli kontinuirni meritvi, z modrima pikama sta označeni poziciji merilnikov Radon Scout; z oranžno barvo je označena pozicija detektorjev jedrskih sledi v igralnici (I2_ME-2), z oranžnimi pikami pa pozicije detektorjev jedrskih sledi Radosys, v igralnicah (I1_ME-2, I2_ME-2) v garderobi (G1_ME-2) in zunaj (D1_ME-2, D2_ME-2).

4.3 Merilna oprema

4.3.1 Radon Scout Professional

V Sloveniji smo uporabili prenosni merilnik Radon Scout Professional (Sarad, Nemčija). Merilnik (slika 15) meri koncentracijo ^{222}Rn kontinuirno, z intervalom vzorčenja zraka od 1 do 255 minut. Vgrajene ima še senzorje za temperaturo (T) in relativno vlažnost zraka (RH) ter CO_2 . Merilnik deluje pasivno, po principu štetja celokupne alfa aktivnosti Lucasove celice na silicijevi fotopomnoževalki (SiPM) z visoko občutljivostjo ($>2,5 \text{ cpm}/(\text{kBq m}^{-3})$); merilno območje je od 0 do 2 MBq m^{-3} . Detekcija CO_2

poteka na osnovi NDIR (ang. non-dispersive infrared) senzorja; merilno območje je od 400 do 5000 ppm, natančnost $<5\% \pm 50$ ppm. Kalibracija senzorja CO₂ poteka avtomatsko, glede na koncentracijo CO₂ v zunanjem zraku.

Vsi podatki se shranjujejo v pomnilniku merilnika, ki lahko zabeleži do 16.383 zapisov (kar je približno 2 leti zapisovanja pri frekvenci vzorčenja zraka enkrat na 60 min). Podatke prenesemo na računalnik v programu Radon Vision 8.0 (Sarad, 2021a).



Slika 15: Prenosni kontinuirni merilnik Radon Scout Professional (Sarad, 2021a).

4.3.2 Radon Scout

Merilnik, ki smo ga uporabljali za kontinuirane meritve v Črni gori, je Radon Scout (Sarad, Nemčija). To je prenosni kontinuirni merilnik ²²²Rn (slika 16) s frekvenco vzorčenja zraka enkrat na uro ali enkrat na tri ure. ²²²Rn skupaj z zrakom difundira v merilno komoro preko filtra, s pomočjo katerega se filtrirajo kratkoživi radonovi produkti (RnP). V komori je polvodniški detektor površine 2,3 cm², ki je pod napetostjo -50 V, na katerem se odložijo pozitivni ioni RnP (v glavnem ²¹⁸Po), ki nastajajo iz ²²²Rn v komori. Merilno območje je od 0 do 2 MBq m⁻³, negotovost meritve pa je $<6\%$. Merilnik ima vgrajen še senzorje za temperaturo (T) in relativno vlažnost (RH) zraka.

Kapaciteta pomnilnika je do 672 podatkovnih zapisov (kar je 28 dni meritev s frekvenco vzorčenja zraka enkrat na 60 min). Podatke prenesemo na računalnik s programom Radon Vision 8.0 (Sarad, 2021b).



Slika 16: Prenosni kontinuirni merilnik Radon Scout (Sarad, 2021b).

4.3.3 Detektor jedrskih sledi Radosys

Detekcija jedrskih sledi je pasivna metoda merjenja povprečne koncentracije ^{222}Rn v zraku. Detektor jedrskih sledi (ang. track etch detector oziroma solid state nuclear track detector) je sestavljen iz ohišja, v notranjosti katerega je detektorska folija (celulozni nitrati (LR-115), polikarbonati (Makrofol, Lexan), alildiglikol polikarbonati (CR-39) itd.). Metoda je zasnovana na štetju jedrskih sledi, ki jih v detektorski foliji naredijo delci alfa pri razpadu ^{222}Rn , ki difundira skozi ohišje detektorja. Sledi, ki so v detektorski foliji vidne šele po kemični ali elektrokemični obdelavi, štejemo pod mikroskopom ali z drugim merilnim sistemom. Gostota sledi je sorazmerna povprečni koncentraciji ^{222}Rn v zraku za obdobje, v katerem je bil detektor izpostavljen.

Detektor Radosys, model RSKS (Radosys, Madžarska), sestavlja plastično ohišje, ki je propustno za ^{222}Rn , v notranjosti je detektorska folija CR-39 (slika 17).



Slika 17: Detektor jedrskih sledi Radosys (levo) in čitalec sledi alfa (desno) (CETI, 2023).

4.4 Izvedba meritev

4.4.1 Slovenija – meritve koncentracije ^{222}Rn in CO_2

Kontinuirane meritve koncentracije Rn smo na obeh lokacijah izvedli v času od 4. 2. do 25. 4. 2022, in sicer v zimsko-spomladanskem obdobju. V času meritev so bili še vedno aktivni epidemiološki ukrepi za obvladovanje epidemije COVID-19, zato smo namestili merilnike skladno z njimi. V Sloveniji smo poleg koncentracije Rn merili še koncentracije CO_2 . Merilniki, ki smo jih uporabili, so last Odseka za znanosti o okolju, Institut »Jožef Stefan«.

Delovni čas enote S1-1 je od ponedeljka do petka, od 6. do 17. ure. Merilnik Radon Scout Professional smo namestili v eno od petih igralnic z neto površino 48 m^2 (igralnica 1, oznaka I1_SI-1). Okna igralnice se nahajajo na vzhodni strani. V igralnici ni vidnih razpok ali izvedenih jaškov, ki bi nakazovali na možen vir Rn. Igralnica je opremljena skladno s Pravilnikom o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca (Ur. l. RS, št. 73/00 s spr.) (pritrjeno pohištvo). Namenjena je starostni skupini od 3–4 leta, ki šteje 19 otrok. Skupno število otrok enote SI-1 znaša 64 otrok, medtem ko skupno število zaposlenih znaša 12. Prezračevanje je naravno z odpiranjem oken, in sicer vsaj 15 minut pred prihodom otrok, nato po zajtrku (okrog 8. ure) in ponovno pred dnevnim počitkom, ki traja

od 12.30 do 14.30. Po koncu varstva otrok, se izvede čiščenje in zračenje igralnice. Na tlorisu pritličja SI-1 (slika 11) je z modro barvo označena I1_SI-1 in z modro piko označen položaj merilnika.

Delovni čas enote SI-2 je od ponedeljka do petka, od 5.30 do 16.30. V SI-2 smo merilnika Radon Scout Professional postavili v dve igralnici: igralnica 5 (I1_SI-2) in igralnica 6 (I2_SI-2). Obe igralnici sta podobni, saj imata neto površino 42 m^2 in sta orientirani na jug. Igralnici nimata vidnih razpok in jaškov, ki bi lahko olajšali vstop Rn iz zemljine. Igralnici I1_SI-2 in I2_SI-2 sta opremljeni skladno s Pravilnikom o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca (Ur. l. RS, št. 73/00 s spr.) (pritrjeno pohištvo). Igralnica I1_SI-2 je namenjena II. starostni skupini, v kateri število otrok znaša 23. Igralnica I2_SI-2 je prav tako namenjena II. starostni skupini, kjer število otrok znaša 24. Skupno število otrok enote SI-2 znaša 65 v II. starostni skupini in 41 v I. starostni skupini, število zaposlenih pa je 56.

Prezračevanje je v obeh igralnicah hibridno. Vgrajen je lokalni prezračevalni sistem z vračanjem toplote (rekuperator). Po navedbah zaposlenih je imela med meritvijo I1_SI-2 izklopljen mehanski sistem prezračevanja, I2_SI-2 pa vklopljen mehanski sistem prezračevanja. Periodika odpiranja oken in urnik odpiranja sta enaka kot pri enoti SI-1. Ker sta igralnici ena zraven druge, smo želeli preveriti, ali vklopljen/izklopljen sistem mehanskega prezračevanja vpliva na koncentracije Rn. Na sliki 12 je tloris stavbe z označenima igralnicama, v katerih so potekale meritve.

Po dogovoru z zaposlenimi smo vse merilnike postavili na omare izven dosega otrok, da ne bi motili delovnega procesa, čeprav so majhni in ne povzročajo hrupa.

4.4.2 Črna gora – meritve koncentracije ^{222}Rn

Kontinuirane meritve koncentracije Rn so bile izvedene v času od 18. 3. do 14. 4. 2022. Tudi v Črni gori so bili v veljavi epidemiološki ukrepi za obvladovanje epidemije COVID-19, zato smo namestili merilnike skladno z njimi. Za kontinuirane meritve koncentracij Rn smo uporabili merilnike Radon Scout, last Odseka za znanosti o okolju, Institut »Jožef Stefan«. Detektorje jedrskih Radosys smo si izposodili na Centru za ekotoksikološka testiranja (CETI, Podgorica, Črna gora).

V prostore enote ME-1 smo namestili merilnik Radon Scout in šest detektorjev jedrskih sledi Radosys. V igralnico I1_ME-, smo postavili Radon Scout in dva detektorja Radosys. Po dva detektorja Radosys smo postavili še v igralnico jaslične skupine otrok (I2_ME-1) in na dvorišče vrtca (D1_ME-1; D2_ME-1). Meritve z detektorji smo izvedli v času od 24. 3. do 4. 5. 2022. Igralnica I1_ME-1 ima neto površino 50 m^2 , finalna obdelava tal je les, okna imajo dvojno zasteklitev in lesen okvir. V igralnicah I1_ME-1 in I2_ME-1 so vidne razpoke v tleh in stenah, predvsem okrog radiatorskih cevi ter stiku tal in stene. Namenjena je starejši starostni skupini, ki šteje 43 otrok. Skupno število otrok enote ME-1 znaša 129 otrok, dokler skupno število zaposlenih znaša 14.

Prezračevanje igralnic je naravno, z odpiranjem oken, večkrat dnevno. Prezračijo jih zjutraj, preden pridejo otroci v prostor, pred dnevnim počitkom in pred zaprtjem vrtca v popoldanskem času. Po potrebi, igralnice tudi dodatno prezračujejo. Na sliki 13 so označeni prostori, kjer smo izvedli meritve, in sicer

sta z modro (I1_ME-1) in oranžno (I2_ME-1) barvo označeni igralnici, z modro piko je označena pozicija merilnika Radon Scout, z oranžnimi pikami pa detektorjev jedrskih sledi Radosys.

V prostore enote ME-2 smo namestili dva merilnika Radon Scout in osem detektorjev jedrskih sledi Radosys. Prvi merilnik Radon Scout in dva detektorja Radosys smo namestili v igralnico I1_ME-2, neto površine 54 m². Okna so orientirana severozahodno. Na okenskem parapetu so radiatorji. Za hlajene prostora v poletnem času je vgrajena notranja enota klimatske naprave. V prostoru so vidne razpoke v tleh, okoli cevi radiatorja ter v stenah, na katere so pritrjene lesene omare. Razpoke v tleh so kritična mesta za vstop Rn. Drugi merilnik Radon Scout in dva detektorja Radosys smo postavili v garderobo (G1_ME-2), kjer se otroci zadržujejo v času preoblačenja, pred vstopom v igralnico in pred odhodom domov. Namenjena je mlajši starostni skupini, ki šteje 35 otrok. Skupno število otrok enote ME-2 znaša 200 otrok, dokler skupno število zaposlenih znaša 39. Garderoba ima neto površino 16 m², iz nje je vstop v sanitarije. Na stropu garderobe so vidni madeži vlage, na stenah okrog lesenih omaric pa razpoke. Dva detektorja Radosys smo postavili še v igralnici I2_ME-2, neto površine 54 m². Okna igralnice so orientirana severovzhodno. Dva detektorja Radosys smo postavili še na dvorišče vrtca (D1_ME-2, D2_ME-2) za meritev koncentracije Rn v zunanjem zraku. Prezračevanje je naravno, z odpiranjem oken, večkrat dnevno. Poleti je okno ves čas odprto na kip, pozimi prezračujejo po potrebi. Tloris pritličja enote ME-2 je prikazan na sliki 14, z označenimi prostori, kjer smo izvedli meritve.

Vse kontinuirne merilnike in detektorje jedrskih sledi smo postavili na omare, ki so izven dosega otrok, da ne bi motili delovnega procesa, čeprav so majhni in ne povzročajo hrupa.

Preglednica 4: Povzetek gradbenotehničnih značilnosti izbranih stavb VVZ, kjer smo izvedli meritve

a) Slovenija b) Črna gora.

Koda VVZ	Lokacijsko tveganje za radon	Karakteristika VVZ stavbe	Zrakotesnost stavbnega ovoja	Aktivni prostori (namembnost, koda), volumen, število uporabnikov	Sistem prezračevanja
a) Slovenija					
SI-1	Zmerno tveganje za radon	Montažni prefabricirani moduli, srednje toplotno izolirani ovoj, nad terenom, pritličje	Srednja	Igralnica: I1_SI-1 $V=135\text{ m}^3$ Število uporabnikov: 19	Naravno
SI-2		Klasična, liti beton, toplotno izoliran ovoj, na terenu, pritličje	Visoka	Igralnica: I1_SI-2, $V=120\text{ m}^3$ Število uporabnikov: 23 I2_SI-2 $V=120\text{ m}^3$	Hibridno (lokalno z rekuperacijo in odpiranjem oken po potrebi): Izklop: I1_SI-1 Vklop: I2_SI-2

				Število uporabnikov: 24	
--	--	--	--	----------------------------	--

b) Črna gora

ME-1	Visoko tveganje za radon	Klasična, zidana iz kamna, toplotno neizolirani ovoj, betonska talna plošča, na terenu, pritličje	Nizka	Igralnica: I1_ME-1 $V: 150 \text{ m}^3$ Število uporabnikov: 43 Vidne razpoke I2_ME-1 $V: 115 \text{ m}^3$ Število uporabnikov: 39 Dvorišče: D1_ME1 D2_ME1	Naravno
ME-2		Klasična, liti beton, toplotno neizolirani ovoj, na terenu, pritličje	Nizka	Igralnica: I1_ME-2 $V: 162 \text{ m}^3$ Število uporabnikov: 35 I2_ME-2 $V: 162 \text{ m}^3$ Število uporabnikov: 35 Vidne razpoke Garderoba: G1_ME-2 $V: 48 \text{ m}^3$ Dvorišče: D1_ME-2 D2_ME-2	Naravno

5 REZULTATI

V rezultatih najprej grafično predstavimo časovne poteke koncentracije Rn in CO₂ v zraku izbranih prostorov (I1_SI-1, I1_SI-2, I2_SI-2) v obeh stavbah (SI-1, SI-2) za celotno obdobje meritve v Sloveniji (sliki 18 in 19), nato pa še za naključno izbrani teden za (sliki 20 in 21), kjer je bolj nazorno viden dnevni cikel obeh onesnaževal. Podobno, vendar le za časovne poteke koncentracije Rn (ker koncentracije CO₂ nismo merili), grafično predstavimo nato rezultate za izbrane prostore (I1_ME-1, I1_ME-2, G1_ME-2) za obe stavbi (ME-1, ME-2) v Črni gori (sliki 22 in 23). Za Črno goro v preglednici 5 predstavimo še povprečne koncentracije Rn (te smo merili samo v Črni gori).

Nato sledi primerjalna analiza rezultatov koncentracije Rn v obeh državah. Najprej povzamemo v preglednici 4 gradbenotehnične značilnosti vseh štirih izbranih stavb (SI-1, SI-2 v Sloveniji in ME-1, ME-2 v Črni gori), nato pa podamo v preglednici 7 rezultate statistične analize koncentracij Rn, ki smo jih dobili na osnovi podatkov časovnih vrst Rn. Pri analizi smo se osredotočili na tri obdobja, in sicer na koncentracijo Rn v delovnem času (8 ur), celodnevno koncentracijo Rn (24 ur) in koncentracijo Rn med vikendi (24 ur). Izračune pa smo naredili v Sloveniji za tri igralnice (I1_SI-1, I1_SI-2, I2_SI-2) in v Črni gori za dve igralnici in garderobo (I1_ME-1, I1_ME-2, G1_ME-2).

Na grafih vertikalne črtice označujejo polnoč (00), vikendi so osenčeni z oranžno barvo, rdeče črte označujejo mejno koncentracijo za Rn in CO₂ (samo pri Sloveniji). Na tedenskih grafih so dodane še rdeče puščice (označujejo začetek delovnega časa), črne puščice (označujejo konec delovnega časa) ter rumeni kvadrati (označujejo obdobje spanja otrok).

Kot smo predstavili v poglavju 4.1 (slika 8), se izbrani stavbi VVZ v Sloveniji (SE-1, SI-2) nahajata na območju zmerne tveganja za radon, izbrani stavbi VVZ v Črni gori (ME-1, ME-2) pa na območju visokega tveganja za radon.

5.1 Koncentracije ²²²Rn in CO₂ v stavbah VVZ v Sloveniji

Kontinuirane meritve koncentracije Rn v stavbah SI-1 in SI-2 so potekale od 4. 2. do 25. 4. 2022. Meteorološki podatki za zunanji zrak za obdobje meritve so naslednji: temperatura zraka od -5 °C do 25 °C, relativna vlažnost od 11 % do 100 %, tlak od 957 hPa do 1004 hPa ter hitrost vetra od 1 m s⁻¹ do 7,3 m s⁻¹.

Slika 18a, b in c kaže časovni potek koncentracije Rn v zraku za celotno obdobje meritve v treh igralnicah (I1_SI-1, I1_SI-2, I2_SI-2) stavb v Sloveniji (SI-1, SI-2). Dnevni časovni poteki koncentracije Rn so podobni v vseh igralnicah. Koncentracija narašča preko noči in je najvišja zgodaj zjutraj pred prvim zračenjem. Vidne so razlike med delovnimi dnevi in vikendi (ko je koncentracija nekoliko višja), vpliv prezračevanja (delovni dnevi), manj pa vpliv sezone. Na sliki 18d in e so časovni poteki temperature, tlaka, hitrosti vetra in relativne vlažnosti v zunanjem zraku.

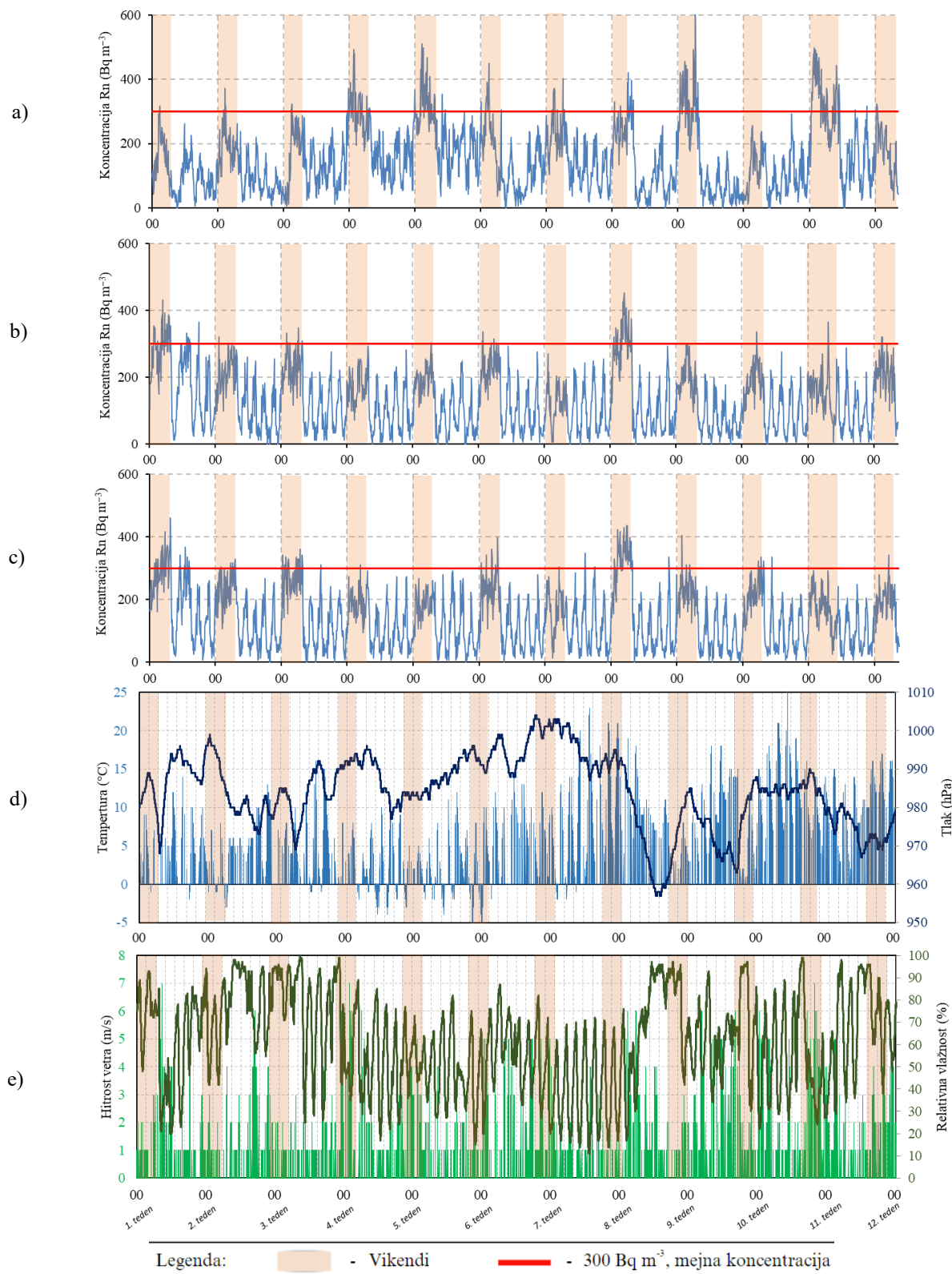
V igralnicah I1_SI-2 in I2_SI-2 (slika 18c in b), ki sta klasični betonski stavbi, koncentracija Rn doseže najvišje vrednosti med vikendi (običajno med 200 in 400 Bq m⁻³), ko sta stavbi zaprti in brez uporabnikov. Razlika je bila v uporabi lokalnega sistema prezračevanja z rekuperacijo, ki je bil v igralnici I1_SI-2 (slika 18c) izključen, v igralnici I2_SI-2 (slika 18b) pa je deloval. Bistven vpliv

delovanja/nedelovanja prezračevalnega sistema na koncentracijo Rn iz rezultatov ni viden, saj zaposleni dodatno prezračujejo igralnici z odpiranjem oken. V delovnih dnevih dosežejo koncentracije Rn najvišje vrednosti v zgodnjih jutranjih urah, običajno med 200 in 300 Bq m⁻³, nato čez dan padejo ter dosežejo najnižje vrednosti v poznih popoldanskih urah (običajno pod 20 Bq m⁻³). Dobro vidna je razlika med delovnimi dnevi, ki sledijo opisanemu dnevnemu ciklu, in vikendi, ko ostajajo koncentracije ves čas blizu maksimalnih vrednosti, vrhovi na krivuljah pa med vikendi običajno presežejo vrhove krivulj delovnih dni. Z merilnim obdobjem smo zajeli prehod iz hladne v toplo polovico leta (slika 18d in e), kar vidimo predvsem v naraščanju temperature zunanjega zraka. Ta je bila nekoliko višja zadnje tri tedne meritev, a še vedno prenizka (15–20 °C), da bi opazili nižanje koncentracije Rn. V zimskem obdobju, ko je večja temperaturna razlika med notranjim in zunanjim zrakom, namreč pride do izrazitejšega vleka talnega zraka (bogatega z Rn) skozi temeljno ploščo v prostor (Gopalakrishnan in Jeyanthi, 2022).

Slika 18a kaže časovni potek koncentracije Rn v igralnici I1_SI-1 v stavbi iz montažnih prefabriciranih modulov in naravnim prezračevanjem. Najvišja koncentracija 614 Bq m⁻³ je bila izmerjena 3. 4. ob 21. uri. To je bilo med devetim vikendom, ko je prišlo do hitrega znižanja zunanje temperature in porasta tlaka (slika 18d), visoka je bila tudi relativna vlažnost zraka (slika 18e). Najvišja koncentracija Rn med delovnim časom je bila 334 Bq m⁻³ (28. 3. ob 6. uri zjutraj, osmi teden), ko vidimo padec zunanje temperature na 3,6 °C.

Če primerjamo časovni potek koncentracije Rn v igralnici I1_SI-1 (slika 18a) z igralnicama I1_SI-2 (slika 18c) in I2_SI-2 (slika 18b), vidimo, da so dnevna nihanja koncentracije v I1_SI-1 bolj izrazita kot v I1_SI-2 in I2_SI-2. Vzrok je v prezračevanju, ki je v montažni stavbi I1_SI-1 samo naravno, v betonski stavbi I1_SI-2 in I2_SI-2 pa hibridno, kjer pa, kot smo že opisali, vpliva delovanja/nedelovanja lokalnega sistema prezračevanja z rekuperacijo nismo zaznali. V igralnici I2_SI-2 (delujoč sistem prezračevanja, slika 18b) je bila najvišja koncentracija Rn med vikendom 27. 3. ob 23. uri (452 Bq m⁻³, sedmi teden), med delovnim časom pa 7. 2. ob 6. uri (320 Bq m⁻³, prvi teden). V igralnici I1_SI-2 (nedelujoč sistem prezračevanja, slika 18c) je bila najvišja koncentracija Rn med vikendom 7. 2. ob 4. uri zjutraj (460 Bq m⁻³, prvi vikend), med delovnim časom pa 7. 2. ob 16. uri popoldne (310 Bq m⁻³, prvi teden). Kot vidimo, se je 7. 2. (prvi vikend) pojavila povišana koncentracije Rn v obeh igralnicah – I1_SI-2 in I2_SI-2 (slika 18c in b). V zgodnjih jutranjih urah se je znižal zračni tlak (slika 18d), kar je lahko povzročilo intenziven vlek talnega zraka (bogatega z Rn) v stavbo. Koncentracija Rn v igralnicah je naraščala do odprtja stavbe (v ponedeljek) in zračenja prostorov.

Praviloma koncentracija Rn v vseh treh igralnicah obeh stavb (SI-1 in SI-2) v delovnih dneh zelo redko preseže mejno vrednost 300 Bq m⁻³ (Vaupotič in sod., 1998; Vaupotič in Kobal, 2001; Vaupotič, 2002). Preseže jo običajno v zgodnjih jutranjih urah med vikendi, pred odprtjem in prezračevanjem vrtca.



Slika 18: Časovni potek koncentracije R_n v zraku igralnic v Sloveniji v obdobju 4. 2.–25. 4. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka ($^{\circ}C$) in tlak (hPa), e) hitrost vetra ($m\ s^{-1}$) in relativna vlažnosti zunanjega zraka (%). Rdeča črta označuje mejno koncentracijo $R_n\ 300\ Bq\ m^{-3}$.

Poleg koncentracije R_n smo v zraku merili tudi koncentracijo CO_2 , ki nam je služila kot vodilo učinkovitosti prezračevanja igralnic skupaj z njihovo zasedenostjo (slika 19a, b in c). Merilnik koncentracije CO_2 se je v igralnici I1_SI-2 ustavil 18. 3. (sobota, šesti vikend) zaradi prekinitve električnega napajanja (slika 19c). V igralnici I1_SI-1 (montažni prefabricirani moduli, naravno prezračevanje) dosežemo višje koncentracije CO_2 kot v igralnicah I1_SI-2 in I2_SI-2 (klasična betonska stavba, hibridno prezračevanje).

V I1_SI-1 (slika 19a) je najvišja koncentracija CO_2 2725 ppm (28. 3. ob 10. uri zjutraj, osmi teden). Vsakodnevno so otroci okrog 10. ure v prostoru, saj je to čas med zajtrkom in kosilom, zato se tudi ostale dni koncentracije CO_2 gibljejo od 1600 do več kot 2000 ppm. Razlog za visoke koncentracije je prevelika obremenitev prostora z uporabniki glede na zmogljivost naravnega prezračevanja (preglednica 4). Obremenitev prostora z uporabniki je 19, volumen prostora znaša 135 m^3 , neto površina prostora pa je 48 m^2 .

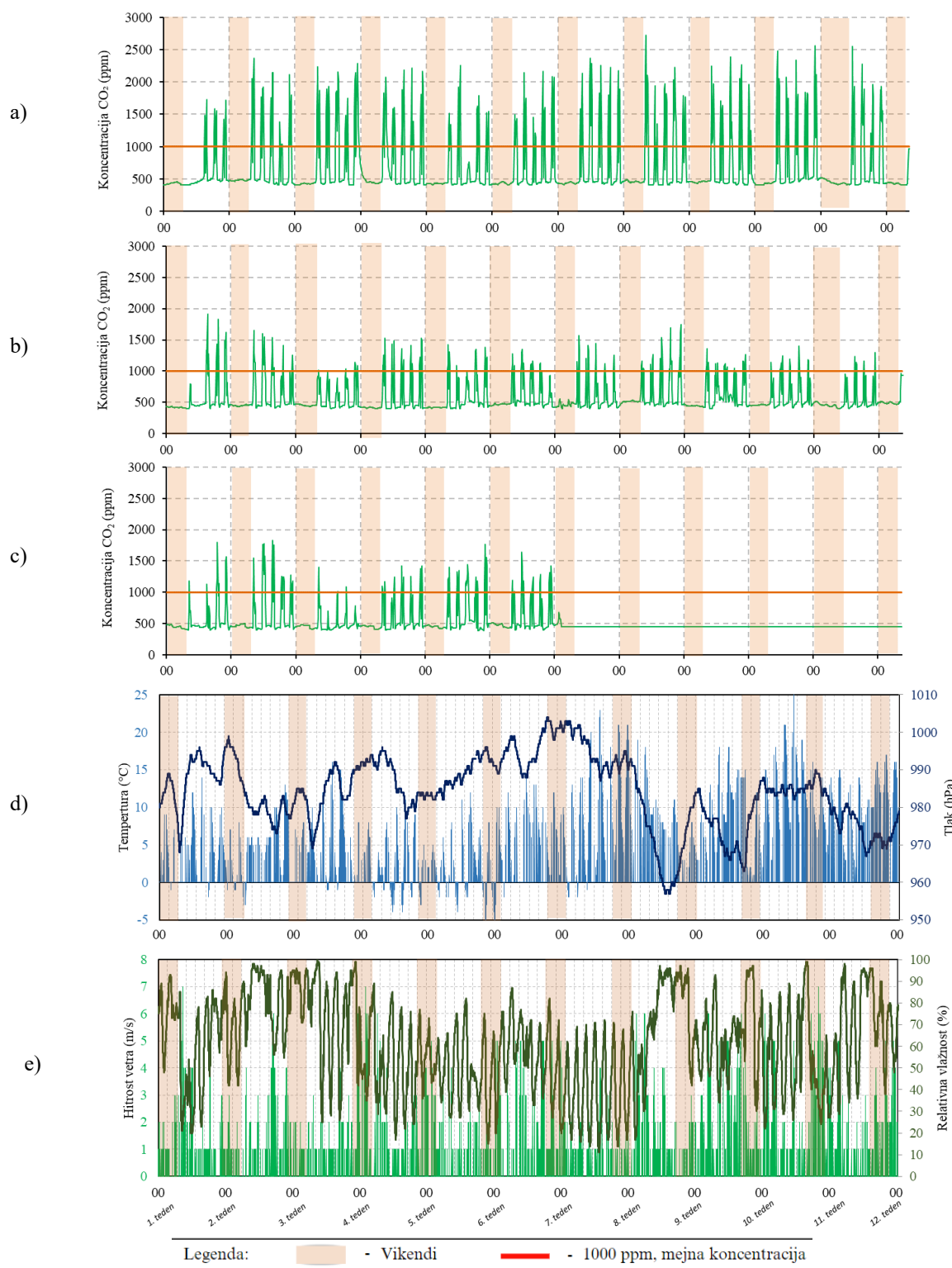
V igralnici I2_SI-2 (slika 19b) klasičnega vrtca, kjer lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, je bila najvišja koncentracija CO_2 1910 ppm (9. 2. ob 11. uri, prvi teden). Ostale dni se koncentracije gibljejo od 1000 do 1500 ppm. Ostri padci koncentracije CO_2 kažejo na boljše prezračevalne navade, kot je večkratno prezračevanje prostora, tako naravno z odpiranjem oken kot mehansko.

V igralnici I1_SI-2 (slika 19c) klasičnega vrtca, kjer lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, je bila najvišja koncentracija CO_2 1815 ppm (16. 2. ob 11. uri, drugi teden). Ostale dni se koncentracije gibljejo od 1000 do 1500 ppm. Podobno kot v I1_SI-1 je tudi v I1_SI-2 in I2_SI-2 prevelika obremenitev prostora z uporabniki glede na zmogljivost hibridnega prezračevanja (preglednica 4). Obremenitev prostora I1_SI-2 z uporabniki je 23, volumen prostora znaša 120 m^3 , medtem pa je neto površina prostora 42 m^2 . Volumen in površina sta ista v igralnici I2_SI-2, razlikuje pa se število uporabnikov prostora, ki v tem primeru znaša 24.

Če primerjamo časovna poteka koncentracije CO_2 v I2_SI-2 in I1_SI-2, vidimo zelo podobni krivulji. Ker se povišane dopoldanske koncentracije gibljejo v istem območju (1000 do 1500 ppm), ne vidimo razlik glede delovanja/nedelovanja lokalnega prezračevalnega sistema. Podobna opažanja smo zasledili tudi pri koncentracijah R_n . Po nekoliko nižjih koncentracijah CO_2 izstopa tretji teden (19.–25. 2.), ko koncentracija skoraj nikoli ne preseže mejne vrednosti 1000 ppm (ASHRAE 2013). Vidimo (slika 19d, e), da je bila v tem tednu višja temperatura zunanjega zraka, tlak je naraščal, ni bilo vetrovno, relativna vlažnost zraka je bila v širokem razponu. Predvidevamo, da je bilo zaradi ugodnih vremenskih razmer naravno prezračevanje bolj intenzivno.

Rezultati kažejo, da v klasičnem vrtcu, ki ima hibridni način prezračevanja, zaposleni po potrebi z odpiranjem oken dodatno prezračujejo obe igralnici (I2_SI-2 in I1_SI-2). V igralnici I1_SI-1, ki jo prezračujejo samo naravno, je stanje opazno slabše. Bolj pogosto in dlje časa trajajoče prezračevanje vseh igralnic v času obratovanja vrtca, bodisi naravno, mehansko ali hibridno, bi zagotovo znižalo koncentracijo CO_2 pod mejno vrednost. Da pa bi bilo prezračevanje čimbolj učinkovito, bi bila potrebna optimizacija, s katero bi preprečili tako izrazita povišanja koncentracije CO_2 , kot jih beležimo sedaj.

Na vseh grafih izstopajo vikendi in prazniki, ko je stavba vrtca zaprta. V tem času prostori niso zasedeni, zato se koncentracija CO₂ ustali pri okoli 450 ppm. Tu je trend obraten v primerjavi z Rn, ki se v zaprtih prostorih kopiči, zato so koncentracije najvišje ravno med vikendi in prazniki.



Slika 19: Časovni potek koncentracije CO₂ v zraku igralnic v Sloveniji v obdobju 4. 2.–25. 4. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra (m s⁻¹) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Oranžna črta označuje mejno koncentracijo CO₂ 1000 ppm.

5.1.1 Koncentracije ^{222}Rn in CO_2 v stavbah VVZ v Sloveniji v izbranem tednu

V poglavju 5.1 smo predstavili časovne poteke koncentracije Rn in CO_2 v zraku v treh izbranih igralnicah VVZ za celotno obdobje meritve. Da bi lahko bolj natančno pojasnili dnevno dinamiko Rn in CO_2 , smo v časovni vrsti izbrali enotedensko obdobje (delovni teden in vikend), na katerega smo se osredotočili in ga predstavljamo v nadaljevanju. Oba plina sta učinkovita indikatorja prezračevanja; z merjenjem koncentracije Rn, ki se je nakopičil ponoči, lahko ugotovimo učinkovitost prezračevanja igralnic predvsem v zgodnjih jutranjih urah (tako po odprtju vrtca), s koncentracijo CO_2 pa spremljamo prezračevalne navade in učinkovitost prezračevanja igralnic skozi celoten delovni čas.

Izbrali smo teden 12.–18. 2. 2022. Rezultati za Rn so prikazani na sliki 20. V tem tednu je bila temperatura zraka od $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, tlak od 973 hPa do 993 hPa, relativna vlažnost zraka od 43 % do 98 % (slika 20d, e).

V vseh treh igralnicah se med vikendom (na grafih oranžno osenčeno območje) Rn kopiči (slika 20a, b, c), nihanja koncentracije pa so odraz meteoroloških dejavnikov in tesnosti stavbnega ovoja. Na primeru tega vikenda smo želeli pokazati vplive meteoroloških dejavnikov, lokacije in stika stavbe z zemljiščem pod njo na dinamiko Rn v prostoru. Temperatura zunanjega zraka se je gibala od $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, tlak se je počasi nižal, relativna vlažnost zraka je podnevi padla na okrog 40 % in se ponoči zvišala na okrog 80 %.

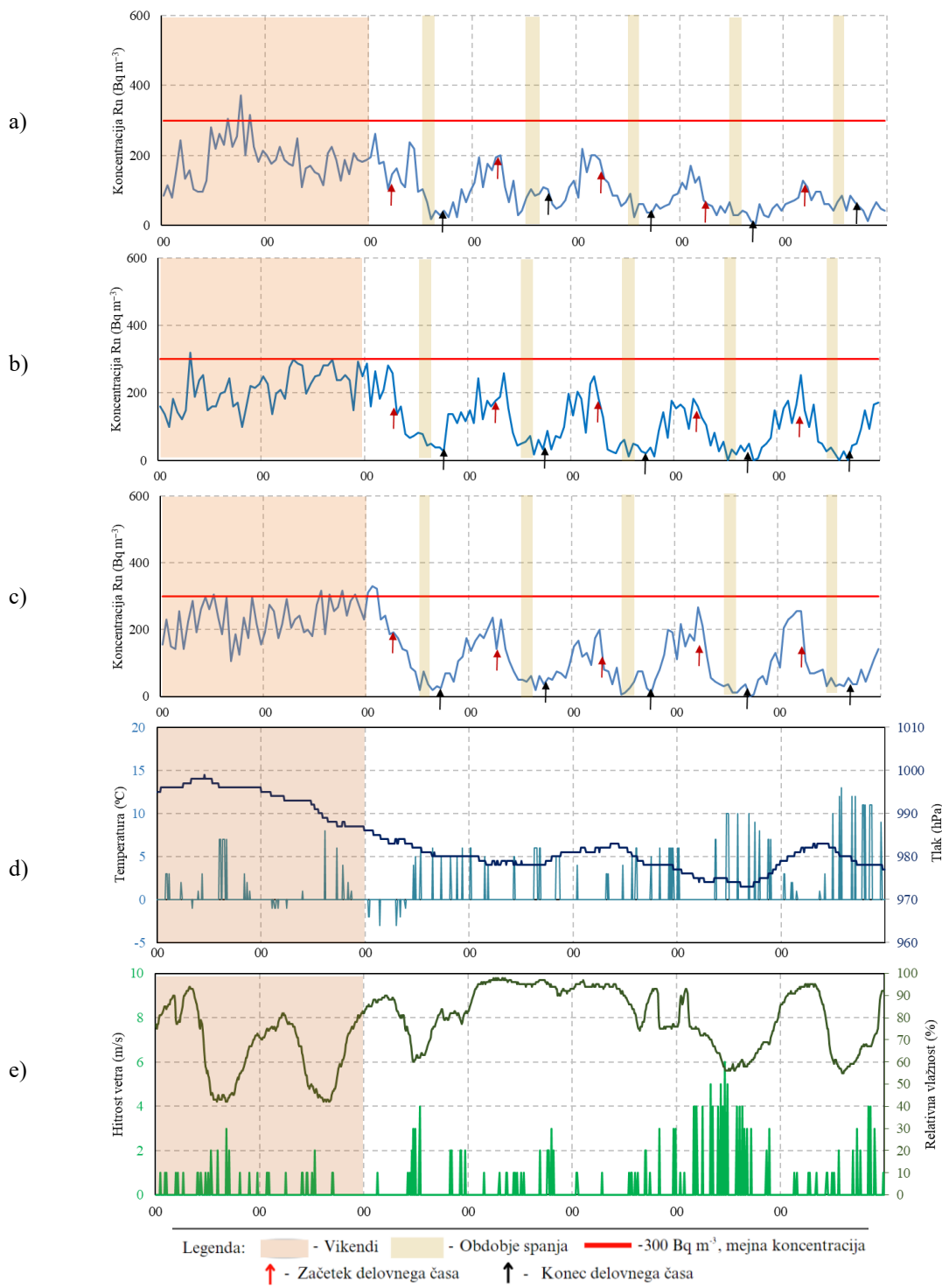
Med vikendom je bila v I1_SI-1 (naravno prezračevanje, slika 20a) najvišja koncentracija Rn 371 Bq m^{-3} (sobota ob 19. uri), v I2_SI-2 (lokalno prezračevanje deluje, slika 20b) 320 Bq m^{-3} (sobota ob 20. uri) in v I1_SI-2 (lokalno prezračevanje ne deluje, slika 20c) 320 Bq m^{-3} (ponedeljek ob 2. uri zjutraj). V delovnih dneh (neosenčeni deli na sliki 20a, b, c) koncentracije Rn v nobeni od treh igralnic niso presegle mejne vrednosti 300 Bq m^{-3} . Kopičenje Rn je vidno ponoči, ob začetku delovnika (rdeče puščice na grafih) pa se koncentracija hitro zniža zaradi jutranjega prezračevanja igralnic. V dopoldanskih urah koncentracija še počasi pada, nekoliko naraste med dnevnim počitkom otrok (na grafih osenčeno rumeno), ko zaprejo vsa okna in vrata. Oster padec koncentracije se zopet ponovi po počitku, saj igralnice ponovno prezračijo. Nadaljnje padanje koncentracije traja do poznega popoldneva, po koncu delovnika (črne puščice na grafih) pa začne koncentracija ponovno naraščati in je najvišja naslednje jutro, saj se je Rn v zaprtih prostorih ponoči zopet kopičil. Čeprav je dnevna dinamika Rn v vseh igralnicah podobna, pa opazimo tudi razlike, ki so odraz gradbenotehničnih karakteristik, predvsem tesnosti stavbnega ovoja.

Časovni potek koncentracije CO_2 v obdobju 12.–18. 2. 2022 kaže slika 21. Kot na sliki 20 za Rn smo tudi tukaj oranžno osenčili vikende in rumeno čas počitka otrok, z rdečimi puščicami smo označili začetek delovnega časa, s črnimi pa konec delovnega časa. Koncentracije Rn so najvišje v delovnem času, odražajo pa, kot že rečeno, prezračevalne navade in učinkovitost prezračevanja.

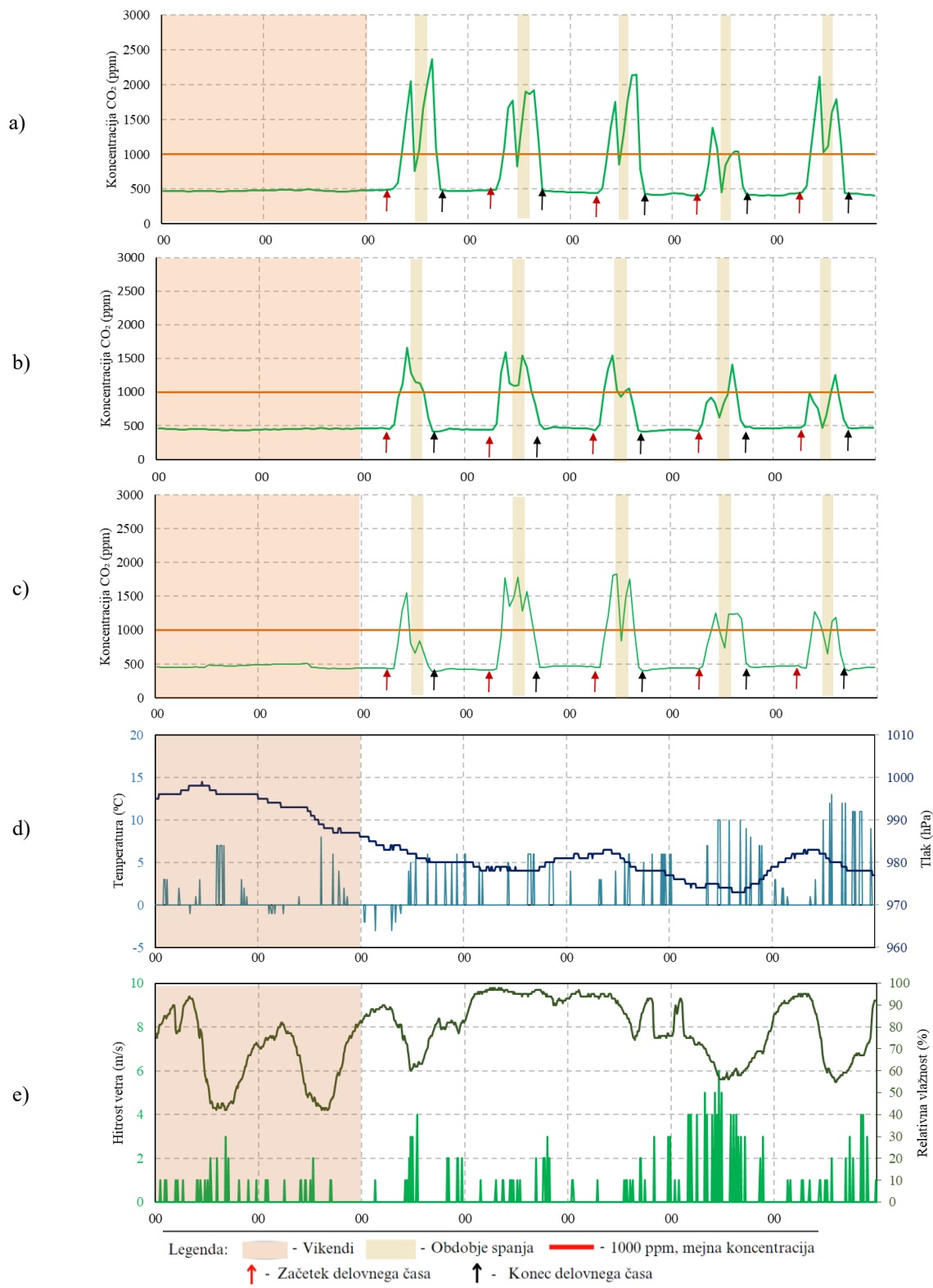
Vidno izstopa igralnica I1_SI-1 (montažni prefabricirani moduli, naravno prezračevanje), kjer je bila najvišja koncentracija CO_2 2365 ppm v ponedeljek, 14. 2., v času po dnevnem počitku otrok (slika 21a). Tudi ostale dneve je koncentracija CO_2 večkrat presegla 2000 ppm. V igralnici I2_SI-2 (klasična betonska stavba, lokalno prezračevanje deluje) je bila najvišja koncentracija 1655 ppm v ponedeljek,

14. 2., ob 11. uri (slika 21b), ostale dneve pa do 1500 ppm. V igralnici I1_SI-2, ki je v isti stavbi, je bila najvišja koncentracija 1815 ppm v sredo, 16. 2., ob 11 uri, saj je bilo lokalno prezračevanje izklopljeno, ostale dneve pa od 1200 do 1700 ppm (slika 21c).

V času obratovanja vrtca lahko v vseh treh igralnicah vidimo oster padec koncentracije CO₂, ki se običajno zgodi dvakrat dnevno, kar pomeni, da so takrat igralnice učinkovito prezračili. Na grafih vidimo tudi dneve, ko so igralnice prezračene manj učinkovito, saj koncentracije ne padejo pod mejno vrednost 1000 ppm. Med vikendi se koncentracije v vseh treh igralnicah gibljejo okrog 450 ppm, kar je pričakovano, saj so te takrat zaprte in nezasedene.



Slika 20: Časovni potek koncentracije R_n v zraku igralnic v Sloveniji v tednu 12.–18. 2. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra ($m\ s^{-1}$) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Rdeča črta označuje mejno koncentracijo $R_n\ 300\ Bq\ m^{-3}$.



Slika 21: Časovni potek koncentracije CO₂ v zraku igralnic v Sloveniji v tednu 12. –18. 2. 2022: a) I1_SI-1, b) I2_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo deluje, c) I1_SI-2, lokalno prezračevanje z rekuperacijo ne deluje, d) temperatura zunanjega zraka, (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra (m s⁻¹) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Oranžna črta označuje mejno koncentracijo CO₂ 1000 ppm.

5.2 Koncentracije ^{222}Rn v stavbah VVZ v Črni gori

Kontinuirane meritve koncentracije Rn v Črni gori so potekale od 18. 3. do 14. 4. 2022 v dveh stavbah VVZ. Stavbi (ME-1, ME-2) in merilna mesta (I1_ME-1, I2_ME-1, D1_ME-1, D2_ME-1, I1_ME-2, G1_ME-2, I2_ME-2, D1_ME-2, D2_ME-2) so podrobno opisani v poglavju 4.2. V času meritev je bila temperatura zunanjega zraka od $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, relativna vlažnost od 23 % do 99 %, tlak od 923 hPa do 957 hPa, hitrost vetra pa od 0 m s^{-1} do $9,2\text{ m s}^{-1}$. Ker se ME-1 in ME-2 nahajata na območju visokega tveganja za radon, je Nikšić prednostno obravnavano radonsko območje, kjer smo pričakovali povišane koncentracije Rn.

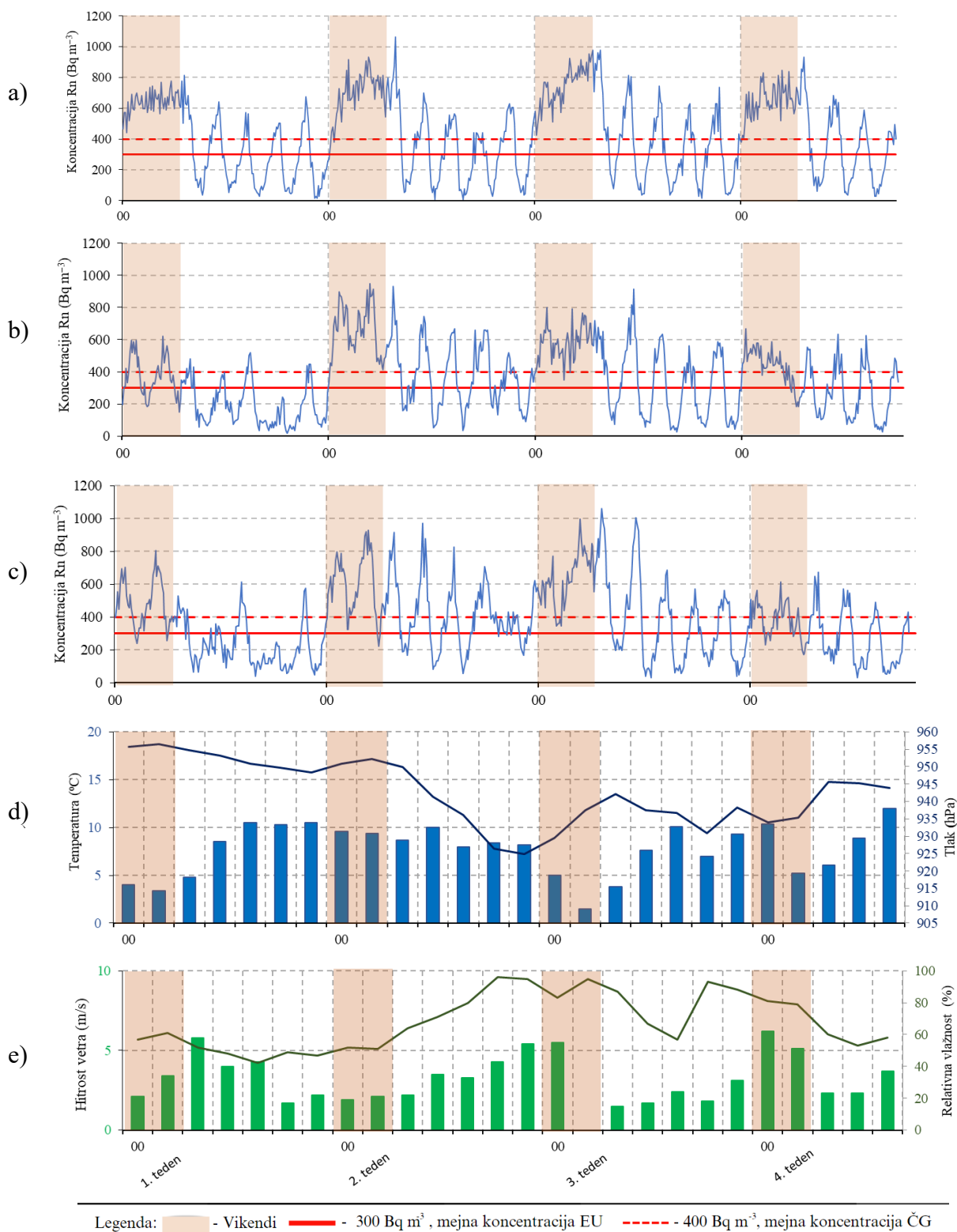
Časovni poteki koncentracije Rn za igralnici in garderobo (I1_ME-1, I1_ME-2, G1_ME-2) so prikazani na sliki 22a, b in c. Podobno kot na sliki 18 tudi tukaj oranžno osenčeni deli pomenijo čas vikendov, neosenčeni pa delovnike. Vidimo podoben potek vseh treh krivulj; med delovnimi dnevi se Rn kopiči čez noč, najvišje koncentracije so zjutraj in najnižje v popoldanskem času. Vzrok za ostro padanje koncentracije v času obratovanja je prezračevanje prostorov, ki poteka kontrolirano, naravno – z odpiranjem oken in vrat. Po prezračenju koncentracija zopet narašča, se strmo zviša ponoči in ostaja povišana med vikendi, zato ne preseneča, da ponedeljkova jutra še posebej izstopajo po visoki koncentraciji. Na sliki 22a vidimo, da je med vikendi koncentracija v I1_ME-1 ves čas visoka, za razliko od I1_ME-2 in G1_ME-2 (slika 22b, c), kjer imamo značilno (četudi manj izrazito) dnevno dinamiko Rn. Vzrok je lahko v slabši kakovosti oken v I1_ME-2 in G1_ME-2 in večji izmenjavi notranjega zraka z zunanjim v dnevnem času ali (manj verjetno) v prezračevanju. Meritve smo opravili v času, ko povprečna temperatura zunanjega zraka (slika 22d) običajno čez dan rahlo narašča, kar privede do nižanja koncentracije Rn, česar pa nismo zaznali ne pri temperaturi in ne pri koncentraciji Rn. Če primerjamo povprečni tlak (slika 22e) vidimo, da je v zadnjem tednu nižji kot v prvem. To je lahko razlog za vlek z Rn bogatega talnega zraka v prostor in podobne koncentracije v začetku in ob koncu merilnega obdobja. Če primerjamo koncentracije Rn v vseh treh igralnicah, vidimo visoke vrednosti v času vikendov (največkrat med 400 in 800 Bq m^{-3}), te pa so povišane tudi v jutranjih urah med delovniki (največkrat med 400 in 600 Bq m^{-3}), kar je presežena referenčna raven koncentracije Rn 400 Bq m^{-3} v Črni gori (Vukotić in sod., 2019a) in 300 Bq m^{-3} v EU (Direktiva 2013/59/Euratom). Vendar pa povprečna koncentracija med delovniki ni presegla referenčnih vrednosti, kot bomo podrobneje pojasnili v poglavju 5.3.

V igralnici I1_ME-1 (klasična zidana stavba iz kamna in opeke, naravno prezračevanje) je bila najvišja koncentracija Rn 1064 Bq m^{-3} (ponedeljek, 28. 3., ob 6.30 zjutraj, drugi teden, slika 22a). Istočasno je to tudi najvišja koncentracija med delovnim časom v tej igralnici in najvišja koncentracija v vseh treh prostorih v celotnem obdobju meritev. Na sliki 22d in e je v noči iz nedelje na ponedeljek viden padec tlaka in temperature zunanjega zraka, kar je verjetno glede na geološko podlago lokacije in manj tesen ovoj stavbe v stiku z zemljino vplivalo na vlek talnega zraka v prostor in kopičenje Rn v prostoru. Kot rečeno, sta v igralnici v celotnem obdobju med vikendi in v jutranjih urah med delovniki preseženi mejni koncentraciji Rn.

V igralnici I1_ME-2 (klasična betonska stavba, naravno prezračevanje) je bila najvišja koncentracija Rn 949 Bq m^{-3} (nedelja, 27. 3., ob 9. uri zjutraj, drugi vikend, slika 22b), med delovnim časom pa 913 Bq m^{-3} (torek, 5. 4., ob 8. uri zjutraj, tretji teden, slika 22b). V garderobi G1_ME-2 iste stavbe je

bila najvišja koncentracija 1061 Bq m^{-3} med delovnikom (ponedeljek, 4. 4., ob 3. uri zjutraj, tretji teden, slika 22c), skoraj enaka tudi naslednje jutro, in sicer 1007 Bq m^{-3} (torek, 5. 4., ob 6. uri zjutraj), ostala jutra v tednu je pa nekoliko nižja, a še vedno okrog 600 Bq m^{-3} . Opazimo tudi, da imamo v garderobi nekoliko večja nihanja koncentracije med posameznimi dnevi kot v igralnicah, kar pripisujemo drugačnemu dnevnemu ritmu zračenja z večjo intenziteto odpiranja vrat. V stavbi ME-2 je bila mejna koncentracija Rn presežena vsako jutro, razen 24. 3. 2022, ko je ostala pod 300 Bq m^{-3} .

Če primerjamo časovne poteke koncentracije Rn v obeh igralnicah in garderobi, vidimo, da se najvišje vrednosti pojavijo v I1_ME-1 (slika 22a). Stavba je zidana iz kamna in opeke, ima naravno prezračevanje, spremenili pa so ji namembnost (zasnovana je bila kot družinska hiša). Poleg geoloških značilnosti lokacije in meteoroloških dejavnikov povišani koncentraciji Rn zagotovo največ prispeva sama stavba in njeni materiali, ki so opisani v poglavju 4. 2. Ker je bila stavba ME-1 zgrajena leta 1950, stavbni ovoj pa ni bil toplotno izoliran, predvidevamo, da so v stiku stavbe z zemljino preboji in razpoke, ki omogočajo talnemu zraku lažji vstop v stavbo. Ker je talni zrak bogat z Rn, se ta v stavbi lahko kopiči in doseže visoke koncentracije, še posebej med vikendi.



Slika 22: Časovni potek koncentracije R_n v zraku igralnic in garderobe v Črni gori v obdobju 18. 3.–14. 4. 2022: a) I1_ME-1, b) I1_ME-2, c) G1_ME-2 (garderoba), d) temperatura zunanjega zraka (°C) in tlak (hPa), e) hitrost vetra ($m s^{-1}$) in relativna vlažnost zunanjega zraka (%). Rdeča polna črta označuje mejno koncentracijo R_n 300 Bq m^{-3} v Sloveniji, črtkana pa 400 Bq m^{-3} v Črni gori.

Detektorji jedrskih sledi Radosys, so bili izpostavljeni od 24. 3. do 4. 5. 2022. Detektorske folije so kemično obdelali še isti dan, rezultati so predstavljeni v preglednici 5. Vidimo, da so povprečne koncentracije Rn višje v stavbi ME-1 kot v stavbi ME-2, kar so pokazale tudi kontinuirne meritve koncentracije Rn. Povprečna koncentracija Rn v zunanjem zraku v bližini stavbe ME-1 je 37 Bq m^{-3} , v bližini stavbe ME-2 pa 41 Bq m^{-3} , kar sta praktično identični vrednosti (v okviru merilne negotovosti).

Preglednica 5: Povprečne koncentracije Rn za obdobje 24. 3.–5. 5. 2022, izmerjene z detektorji jedrskih sledi Radosys v stavbah ME-1 in ME-2 VVZ v Črni gori ($\bar{C}$: povprečna koncentracija Rn, ΔC : merilna negotovost) (CETI, 2023).

Stavba ME-1	$\bar{C}$ (Bq m^{-3})	ΔC	$(C_1+C_2)/2$ (Bq m^{-3})	Stavba ME-2	$\bar{C}$ (Bq m^{-3})	ΔC	$(C_1+C_2)/2$ (Bq m^{-3})
I1_ME-1*	514	37	516 ± 37	I1_ME-2*	322	23	319 ± 23
	518	37			315	22	
I2_ME-1	558	40	550 ± 39	I2_ME-2	283	21	296 ± 21
	541	38			306	21	
Zunanji zrak	38	5	37 ± 5	Zunanji zrak	41	5	41 ± 5
	35	5			/	/	

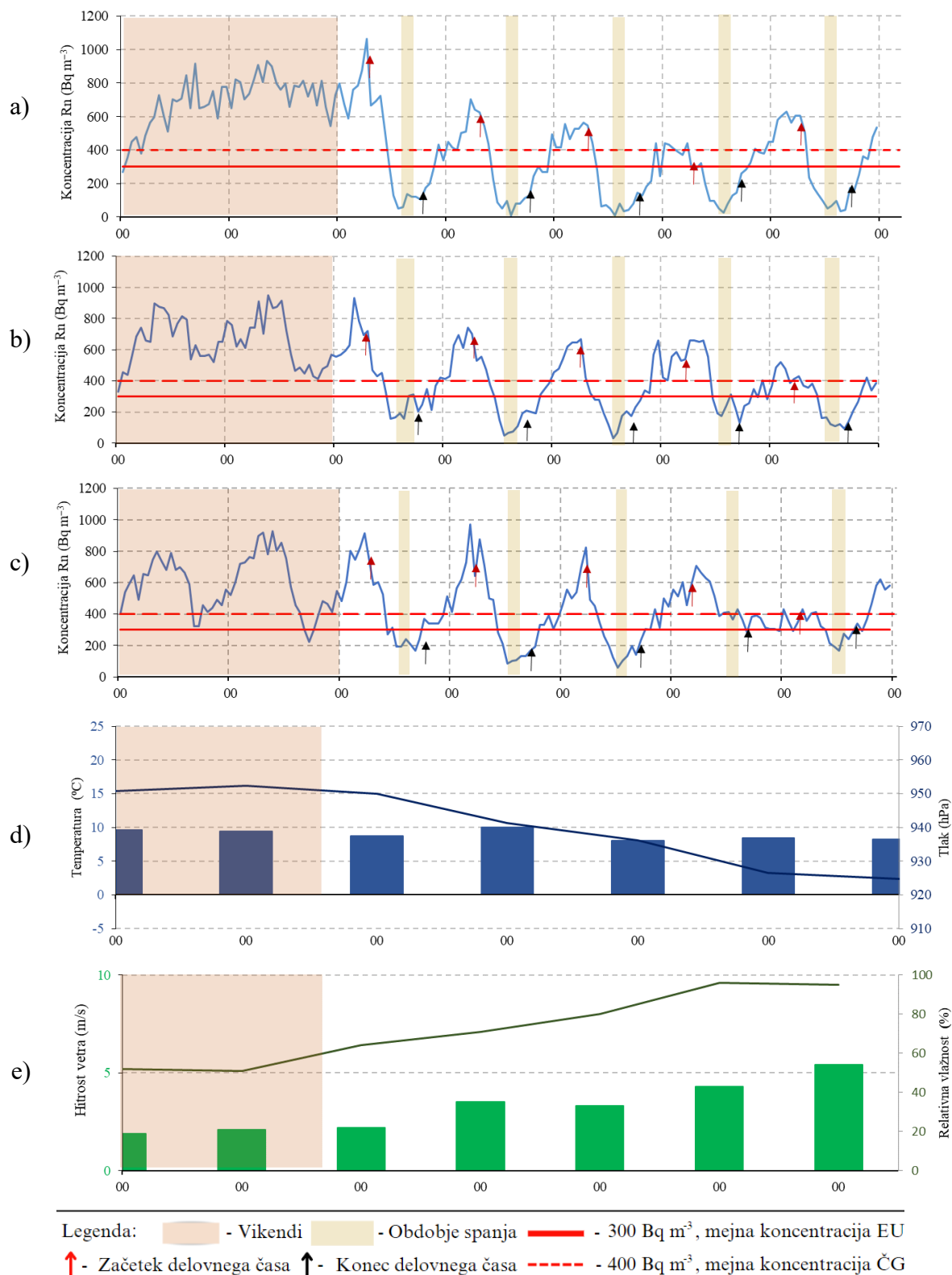
* igralnice, v katerih so postavljeni tudi kontinuirni merilniki Radon Scout

5.2.1 Koncentracije ^{222}Rn v stavbah VVZ v Črni gori v izbranem tednu

Potek koncentracije Rn med vikendom in delovnimi dnevi predstavljamo bolj podrobno za izbrani teden, in sicer od 26. 3. do 1. 4. 2022. V obdobju enega tedna je bolj nazorno vidna dinamika Rn, potek krivulje Rn v delovnem času pa odraža prezračevalne navade. Slika 23a, b, c kaže potek koncentracije Rn v obeh igralnicah in garderobi, slika 23 d temperaturo zunanjega zraka in tlak, slika 23e pa relativno vlažnost zraka in hitrost vetra. Kot na sliki 20 za izbrani teden predstavitev koncentracij Rn v Sloveniji tudi tukaj oranžno osenčeni deli grafa predstavljajo vikend, neosenčeni deli delovne dneve. Rumeno osenčeni deli predstavljajo čas spanja otrok, rdeče puščice pomenijo začetek, črne pa konec delovnega dne.

V igralnici I1_ME-1 (zidana stavba iz kamna in opeke, naravno prezračevanje) je bila najvišja koncentracija Rn med delovniki v ponedeljek zjutraj ob 6.30, in sicer 1064 Bq m^{-3} , med vikendom pa 934 Bq m^{-3} , in sicer v nedeljo ob 8.30 (slika 23a). V igralnici I1_ME-2 (klasična betonska stavba, naravno prezračevanje) je bila najvišja koncentracija 949 Bq m^{-3} , in sicer med vikendom (nedelja ob 9. uri zjutraj), med delovnikom pa je ta bila 932 Bq m^{-3} (ponedeljek ob 4. uri zjutraj, slika 23b). V garderobi G1_ME-2 je bila najvišja koncentracija 970 Bq m^{-3} (torek ob 5. uri zjutraj), med vikendom pa 929 Bq m^{-3} (nedelja, ob 10. uri zjutraj, slika 23c). V vseh prostorih je dnevna dinamika Rn podobna z izjemo vikenda, ko je v ME-1 koncentracija ves čas povišana, v ME-2 pa le-ta kaže značilen dnevni cikel, le da je minimalna koncentracija med vikendom višja kot ostale dneve. V G1_ME-2 vidimo, da ima krivulja med delovnimi dnevi v jutranjih urah bolj strm padec, kar kaže na hitrejše znižanje koncentracije Rn kot v igralnicah, to pa pripisujemo bolj intenzivnemu zračenju zaradi odpiranja vrat ob prihodu otrok. V obeh igralnicah je najvišja koncentracija Rn v ponedeljek zjutraj pred zračenjem, kar ne preseneča, saj se je Rn kopičil ves vikend. Vidimo tudi, da koncentracija pade pod referenčno raven vse delovne dni šele po 10. uri zjutraj, kar je posledica pomanjkljivega zračenja zgodaj zjutraj.

Rahel porast koncentracije R_n je viden tudi v času spanja otrok (rumeno osenčeni deli), ko v igralnici zaprejo vsa okna in vrata, ta pa začne zopet padati, ko se otroci zbudijo, čemur sledi zračenje.



Slika 23: Časovni potek koncentracij R_n v Črni gori v obdobju 26. 3.–1. 4. 2022 v prostorih enot: a) igralnica I1_ME-1, b) I1_ME-2, igralnica, c) G1_ME-2, garderoba ter izmerjene vrednosti parametrov d) temperature zraka (°C), tlaka (hPa), e) hitrosti vetra ($m\ s^{-1}$) in relativne vlažnosti zraka (%). Z rdečima črtama sta označeni mejni vrednosti.

5.3 Povzetek opisa stavb in rezultatov meritev za izbrane VVZ v Sloveniji in Črni gori

V preglednici 6 podajamo primerjavo glavnih gradbenotehničnih značilnosti stavb VVZ v Sloveniji in Črni gori. Podroben opis smo predstavili v poglavju 4.4.2.

Preglednica 6: Pregled gradbenotehničnih značilnosti stavb VVZ v Sloveniji in Črni gori.

Koda VVZ	SI-1	SI-2	ME-1	ME-2
Geološke značilnosti področja	Kraško polje, dolomit, tektonski prelomi		Visoki kras, nahajališča boksita	
Neto velikost stavbe	448 m ²	1289 m ²	420 m ²	994 m ²
Leto izgradnje	2010	1953	1950	1971
Število nadstropij	P, modul nad terenom	P + 1 + M	P	P
Število zaposlenih	12	56	14	39
Število otrok	64	106	129	200
Stavbni ovoj	Prefabricirani montažni moduli, toplotno izoliran ovoj	Klasična betonska, toplotno izoliran ovoj	Zidana, kamen, opeka, betonska talna plošča, toplotno neizoliran ovoj	Klasična betonska, toplotno neizoliran ovoj
Vrsta oken okvir/zasteklitev	PVC-okvir, dvoslojna zasteklitev	PVC-okvir, troslojna zasteklitev	Leseni okvir, dvoslojna zasteklitev	Leseni okvir, dvoslojna zasteklitev
Zrakotesnost (opisno)	Srednja	Visoka	Nizka	Nizka
Preboji, razpoke	Niso vidni	Niso vidni	Vidni	Vidni
Način prezračevanja	Naravno	Hibridno	Naravno	Naravno
Način ogrevanja/hlajenja	Centralno ogrevanje	Centralno ogrevanje	Centralno ogrevanje, elektrika, klimatska naprava	Centralno ogrevanje, klimatska naprava

V preglednici 7 povzemamo pregled rezultatov statistične analize časovnih vrst koncentracije Rn v obeh državah.

Preglednica 7: Minimalna, maksimalna in povprečna koncentracija (AM) Rn ter razmerja koncentracije Rn za
a) Slovenijo in b) Črno goro.

a) SLOVENIJA		Koncentracija Rn (Bq m ⁻³)			Razmerje	
		min	max	AM ± ASD	d8* / c24**	c24 / v24***
SI-1 Igralnica I1_SI-1	ponedeljek–petek (delovniki, 8 ur)	2	334	109 ± 65	0,91	–
	ponedeljek–petek (celodnevno, 24 ur)	2	444	120 ± 76		0,50
	sobota–nedelja (celodnevno, 24 ur)	6	614	241 ± 105	–	
SI-2 Igralnica (lokalno prezračevanje ne deluje) I2_SI-2	ponedeljek–petek (delovniki, 8 ur)	2	310	69 ± 57	0,66	–
	ponedeljek–petek (celodnevno, 24 ur)	2	460	105 ± 79		0,47
	sobota–nedelja (celodnevno, 24 ur)	12	435	223 ± 71	–	
SI-2 Igralnica (lokalno prezračevanje deluje) I1_SI-2	ponedeljek–petek (delovniki, 8 ur)	2	320	79 ± 68	0,79	–
	ponedeljek–petek (celodnevno, 24 ur)	2	386	100 ± 76		0,49
	sobota–nedelja (celodnevno, 24 ur)	5	452	206 ± 72	–	

a) ČRNA GORA		Koncentracija Rn (Bq m ⁻³)			Razmerje	
		min	max	AM ± ASD	d8* / c24**	c24 / v24***
ME-1 Igralnica I1_ME-1	ponedeljek–petek (delovniki, 8 ur)	9	1064	227 ± 207	0,71	–
	ponedeljek–petek (celodnevno, 24 ur)	9	1064	318 ± 223		0,41
	sobota–nedelja (celodnevno, 24 ur)	268	977	680 ± 125	–	
ME-2 Igralnica I1_ME-2	ponedeljek–petek (delovniki, 8 ur)	17	913	264 ± 191	0,92	–
	ponedeljek–petek (celodnevno, 24 ur)	17	932	288 ± 192		0,56
	sobota–nedelja (celodnevno, 24 ur)	149	949	512 ± 169	–	
ME-2 Garderoba G1_ME-2	ponedeljek–petek (delovniki, 8 ur)	33	1007	290 ± 208	0,92	–
	ponedeljek–petek (celodnevno, 24 ur)	33	1061	316 ± 205		0,61
	sobota–nedelja (celodnevno, 24 ur)	174	995	521 ± 180	–	

*delovniki, 8 ur; **celodnevno, 24 ur (ponedeljek–petek); ***celodnevno 24 ur (sobota–nedelja)

Kot vidimo v preglednici 7, so min in max koncentracije Rn v zraku prostorov v Sloveniji nižje kot v zraku prostorov v Črni gori. Tudi povprečne koncentracije v času varstva (delovniki, 8 ur), celodnevno med delovniki (celodnevno, 24 ur) in med vikendi (celodnevno, 24 ur) so v Sloveniji nižje kot v Črni gori. Najpomembnejše so koncentracije v času obratovanja vrtcev v igralnicah (odebeljene vrednosti v preglednici 10), ki so naslednje: 109 Bq m^{-3} v I1_SI-1, 69 Bq m^{-3} v I2_SI-2 in 79 Bq m^{-3} v I1_SI-2 (v Sloveniji) in 227 Bq m^{-3} v I1_ME-1 in 264 Bq m^{-3} v I2_ME-1 (v Črni gori). Če primerjamo povprečne vrednosti med delovnim časom v igralnicah ugotovimo, da so koncentracije v Črni gori v povprečju višje skoraj za faktor 3 kot v Sloveniji. Če primerjamo stanje v igralnicah med vikendi, ko so vrtci zaprti, vidimo, da je povprečna koncentracija v Sloveniji 223 Bq m^{-3} , v Črni gori pa 596 Bq m^{-3} . V igralnicah v Črni gori je med vikendi koncentracija Rn višja za faktor okrog 2,7. Razlike so najverjetneje odraz zrakotesnosti stavbnega ovoja, ki je v Sloveniji srednja do visoka, v Črni gori pa nizka. Še posebej je pomembna zrakotesnost ovoja med temeljno ploščo in zemljino, kjer v stavbo vstopa talni zrak, ki je bogat z Rn.

Razmerja med koncentracijo Rn med delovnim časom (8 ur) in celodnevno (24 ur) med delovnim tednom so podobna: 0,66, 0,79 in 0,91 (v Sloveniji) in 0,71, 0,92 in 0,92 (v Črni gori) in so odraz prezračenosti prostorov, ki je v Sloveniji nekoliko boljša. Razmerja med celodnevno koncentracijo med delovnimi dnevi (24 ur) in vikendi (24 ur) so prav tako podobna: 0,47, 0,49 in 0,50, in tudi ta razmerja kažejo na dobro prezračenost prostorov v času obratovanja vrtcev. Čeprav so vrtci v splošnem dobro prezračeni, pa je dotok svežega Rn s talnim zrakom v igralnice v Črni gori preobilen, da bi lahko stanje nadzorovali samo z rednim prezračevanjem.

6 DISKUSIJA

Na osnovi kart tveganja za radon smo v Sloveniji in Črni gori izbrali po dve stavbi VVZ, kjer smo izvedli raziskavo Rn (v Sloveniji tudi CO₂). Zanimale so nas koncentracije Rn v zraku igralnic in dnevna dinamika Rn (in CO₂) v odvisnosti od: (i) geoloških značilnosti lokacije in meteoroloških dejavnikov, (ii) gradbenotehničnih značilnosti stavbe in (iii) režima dela in prezračevalnih navad.

6.1 Vloga stavbe pri koncentracijah ²²²Rn in CO₂ v VVZ v Sloveniji in Črni gori glede na geološke značilnosti lokacije in meteorološke dejavnike

Stavbi VVZ v Sloveniji (SI-1 in SI-2) se na karti tveganja za radon nahajata na področju zmernega tveganja za Rn (slika 8). Področje Grosuplja je tipično kraško polje, v celoti oblikovano na dolomitu, ki leži na tektonskem prelomu (Občina Grosuplje, 2022). Na tem področju v dosedanjih raziskavah niso našli visokih koncentracij Rn (Vaupotič in sod., 1994a; Vaupotič, 2007), zato jih tudi mi na izbranih lokacijah SI-1 in SI-2 nismo pričakovali. Stavbi VVZ v Črni gori (ME-1 in ME-2) se na karti tveganja za radon nahajata na področju visokega tveganja. Za Nikšičko polje je značilen visoki kras, kjer so prisotni jezerski sedimenti, pesek, prod in glina (Radojčić, 1996) ter nahajališča boksita (Vukotić in sod., 2019b). Glede na litološko podlago in dosedanje raziskave, v katerih so poročali o visokih koncentracijah Rn v povezavi z zemljiščem (Antović in sod., 2007; Vukotić in sod., 2008), smo na izbranih lokacijah stavb ME-1 in ME-2 pričakovali povišane koncentracije Rn. Običajno so kamnine, ki se nahajajo na kraških območjih, zelo porozne in dobro prepustne, saj imajo v svoji strukturi veliko razpok, po katerih talni zrak, bogat z Rn, hitro potuje proti površju. Z gradientom tlaka in s pomočjo nosilnih plinov (CO₂, CH₄ ali N₂) lahko Rn prepotuje razdaljo tudi več 10 m (Wilkening, 1990; Etiope in Martinelli, 2002).

Vstop Rn v stavbo je močno odvisen od meteoroloških dejavnikov. Če je v stavbi nižji tlak v primerjavi z okoliško zemljino in zunanjim zrakom, je v stavbi prisoten podtlak, ki nastane zaradi temperaturne razlike. Ker je toplejši zrak v hiši redkejši kot atmosferski, prihaja do vdiranja talnega in atmosferskega zraka v stavbo (Gopalakrishnan in Jeyanthi, 2022). Vpliv sprememb tlaka in temperature zunanjega zraka na dinamiko Rn v stavbah VVZ lahko potrdimo kot glavna meteorološka dejavnika v naši raziskavi. Kot primer navajamo igralnico I1_ME-1, ko je koncentracija Rn narasla na 1064 Bq m⁻³ (ponedeljek, 28. 3., ob 6.30 zjutraj, drugi teden, slika 22a, d). V noči na ponedeljek je namreč viden padec tlaka (iz 953 na 948 hPa), temperaturna razlika med zunanjim in notranjim zrakom pa je znašala 9,5 °C (zunaj 8 °C, v igralnici 17,5 °C), kar je po vsej verjetnosti (glede na geološko podlago lokacije in manj tesen ovoj stavbe v stiku z zemljino) vplivalo na vlek talnega zraka v prostor in kopičenje Rn. Drugi primer je garderoba G1-ME-2 (2.–3. 4, tretji teden, slika 22c, d), ko je padec temperature med vikendom prav tako povzročil kopičenje Rn. Temperaturna razlika med zunanjim in notranjim zrakom je bila 13 °C (zunaj 2 °C, v garderobi 15 °C), maksimalna koncentracija Rn pa je v ponedeljek zjutraj dosegla 1061 Bq m⁻³. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi v raziskavi Malathi in sod. (2007), ki navajajo, da so koncentracije Rn v prostoru sorazmerne temperaturnemu gradientu. Silva in sod. (2022) poudarjajo, da razlike v zračnem tlaku povzročijo, da stavba deluje kot 'sesalnik', ki vleče talni zrak v stavbo in povzroči povišano koncentracijo Rn. Riley in sod. (1996) pa pravijo, da je eden izmed pomembnih meteoroloških dejavnikov, ki vplivajo na koncentracije Rn v stavbah, tudi veter. Tudi mi smo v raziskavi preučevali vpliv vetra; hitrosti vetra v Sloveniji so bile od 1 do 7,3 m s⁻¹, v Črni gori pa

od 0 do $9,2 \text{ m s}^{-1}$, a pomembnejšega vpliva na koncentracijo Rn v prostorih nismo opazili. Na splošno pa veter lahko prispeva k povišanju koncentracije Rn v stavbi, saj pod stavbo (oviro) zaradi vetra nastaja povečan zračni tlak, ki pritiska atmosferski zrak v tla, kar na drugi strani povečuje vdiranje talnega zraka, bogatega z Rn, v notranjost stavbe. Na drugi strani stavbe (ovire) nastaja podtlak, ki lahko povzroči vlek (črpanje) zraka iz stavbe, posledično pa prihaja do vleka talnega zraka iz okoliške zemljine v stavbo (Otton, 1992; Cinelli in sod., 2011; Gopalakrishnan in Jeyanthi, 2022). Pri meteoroloških dejavnikih obravnavamo običajno več faktorjev skupaj. Tako so Nazaroff in sod. (1985) v svoji raziskavi spremljali vplive različnih zunanjih dejavnikov na koncentracije Rn v dveh hišah v Illinoisu (ZDA). Ugotovili so, da temperaturni gradient oz. majhna temperaturna razlika med notranjim in zunanjim zrakom skupaj z visokimi hitrostmi vetra, zvišajo koncentracije Rn v prostoru. Poudarjajo tudi, da velika temperaturna razlika skupaj z majhno hitrostjo vetra prav tako vpliva na koncentracije Rn v prostoru. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi v naši raziskavi. Ko je v igralnici I1_SI-1 (slika 18a) v zadnjem tednu koncentracija Rn narasla na 440 Bq m^{-3} , je bila temperaturna razlika med zunanjim in notranjim zrakom majhna (zunaj $15,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, v igralnici $19 \text{ }^{\circ}\text{C}$), hitrost vetra pa 7 m s^{-1} , kar bi lahko vplivalo na višje koncentracije Rn v toplejši sezoni. Obratno pa je v isti igralnici I1_SI-1 (slika 18a), v prvem tednu koncentracija Rn dosegla le 31 Bq m^{-3} , ko je bila temperaturna razlika med zunanjim in notranjim zrakom večja (zunaj $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, v igralnici $21,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$), hitrost vetra pa podobna, in sicer $7,3 \text{ m s}^{-1}$. Kljub številnim raziskavam (Nazaroff in sod. 1985; Arnold 1990; Turk in sod. 1990; Ward in sod., 1993; Scott 1985), v katerih so preučevali vpliv vetra na koncentracijo Rn, je težko oceniti samo pomen vetra, saj meteorološki dejavniki delujejo sočasno. Poleg meteoroloških dejavnikov, ki vplivajo na dnevno dinamiko Rn, pa je potrebno vsekakor omeniti še sezonska nihanja koncentracije, in sicer je faktor razmerja zima/poletje v vrtcih in šolah od 1,05 do 2,06 (Vaupotič, 2011).

Z gradbenotehničnega vidika imajo pomemben vpliv na koncentracijo Rn izvedba in kakovost gradnje (etažnost, zrakotesnost ovoja), izvedba stikov in detajlov ter prebojev, učinkovitost tehničnih sistemov za prezračevanje in bivalne navade (Vaupotič in sod., 1994b, Popit in Vaupotič 2002; Vukotić in sod., 2019b). Vse štiri obravnavane stavbe VVZ so pritlične, kar pomeni, da talni zrak, ki je bogat z Rn, direktno vstopa v igralnice in druge prostore vrtcev. Stavba SI-1 je narejena iz montažnih prefabriciranih modulov, tla so nad terenom, ovoj je srednje toplotno izoliran (srednja zrakotesnost). Stavbi SI-2 in ME-2 sta klasični betonski. V letu 2016 je bila izvedena energetska sanacija toplotnega dela stavbnega ovoja stavbe SI-2 (visoka zrakotesnost). Toplotni ovoj ME-2 je neizoliran (nizka zrakotesnost). Za razliko od SI-2 in ME-1, je stavba ME-2 zidana iz kamna in opeke in nima toplotno izoliranega ovoja (nizka zrakotesnost). Tla stavbe SI-2 se nahajajo na terenu, zato imajo veliko kontaktne površine z zemljiščem pod stavbo (talna plošča), v primerjavi s stavbo SI-1, ki ima tla nad terenom.. Povzetek opisa stavb je v preglednici 4. Vse te gradbenotehnične značilnosti lahko vplivajo na koncentracije Rn v prostorih vrtcev.

Pri ogledu prostorov stavb VVZ smo posebno pozornost posvetili identifikaciji kritičnih točk (jaški in razpoke), ki so vstopne točke za Rn v prostor (Vaupotič in sod., 1994a) in ki pomembno vplivajo na koncentracijo le-tega v prostoru. V primeru stavbe SI-1 bi so viri Rn lahko bili preboji in sifoni umivalnika, ki se nahaja v sanitarijah v igralnici ali stiki in razpoke med moduli kontejnerjev, vendar pa je bila povprečna koncentracija med vikendi (ko se Rn v neprezračenih prostorih kopiči) le 241 Bq m^{-3} , zato jim ne pripisujemo večjega pomena. Povprečni koncentraciji Rn sta bili med vikendi podobni tudi v SI-2, in sicer 223 Bq m^{-3} v I2_SI-2 in 206 Bq m^{-3} v I1_SI-2 (preglednica 6). Glede na srednjo

zrakotesnost ovoja v SI-1 in visoko zrakotesnost v SI-2 (preglednica 4) so relativno nizke povprečne koncentracije Rn pričakovane.

Kot že rečeno, ovoja stavb ME-1 in ME-2 v Črni gori nista toplotno izolirana in imata zato nižjo zrakotesnost od ovojev SI-1 in SI-2 v Sloveniji. V igralnicah in garderobi ME-1 in ME-2 smo identificirali kritične točke; razpoke na stikih sten in tal, razpoke in odprtine okrog stikov med okenskim okvirjem in zunanjo steno, razpoke okrog cevi radiatorja in vgradnih omar (preglednici 4 in 6). Vse opisane točke vplivajo na povišane koncentracije Rn, ki so med vikendi (ko se Rn v zaprtih prostorih kopiči) naslednje: 680 Bq m^{-3} v I1_ME-1, 512 Bq m^{-3} v I1_ME-2 in 521 Bq m^{-3} v G1_ME-2 (preglednica 7). Če primerjamo stanje v igralnicah med vikendi, je povprečna koncentracija Rn v SI-1 in SI-2 v Sloveniji 223 Bq m^{-3} , v ME-1 in ME-2 v Črni gori pa 596 Bq m^{-3} , kar je za faktor okrog 2,7 višja vrednost. Še bolj kot povišane povprečne koncentracije Rn v ME-1 in ME-2 med vikendi so zaskrbljujoče visoke jutranje koncentracije med delovniki, ki so običajno od 600 do 1000 Bq m^{-3} (slika 22a, b, c). Čeprav so povprečne koncentracije nižje (I1_ME-1 $227 \pm 207 \text{ Bq m}^{-3}$, I1_ME-2 264 ± 191 , G1_ME-2 $290 \pm 208 \text{ Bq m}^{-3}$, preglednica 7) vidimo, da lahko ob upoštevanju standardnega odmika presežejo referenčno raven 400 Bq m^{-3} v Črni gori (Vukotić in sod., 2019a). V zimskih mesecih, ko naravno prezračevanje običajno še nekoliko zmanjšamo, bi bilo stanje lahko slabše, kot je bilo v marcu in aprilu, ko smo izvedli meritve. Bochicchio in sod. (2005) poročajo o razmerju zima/poletje od 1,23 do 1,71, ki temelji na meritvah koncentracije Rn v 5631 domovih v vseh italijanskih regijah v hladni in topli polovici leta. Vaupotič (2011) poroča o razmerju zima/poletje od 1,27 do 2,06, ki se nanaša na podatke vrtcev in šol v sedmih državah (Italija, Japonska, Kosovo, Pakistan, Slovaška, Slovenija, Španija). Kot vidimo v preglednici 7, je v garderobi G1_ME-2 med delovnim časom povprečna koncentracija Rn nekoliko višja kot v igralnici I1_ME-2, čeprav bi pričakovali obratno, saj so garderobe v vrtcih običajno bolje prezračene zaradi odpiranja vhodnih vrta stavbe. Vzrok za to so poškodbe tal, razpoke med stiki sten in tal ter razpoke okrog garderobnih omaric, skozi katere vstopa Rn neovirano v prostor. Podobne so ugotovitve Vaupotič (2002) pri iskanju izvorov Rn v dvajsetih šolah s povišanimi koncentracijami po Sloveniji, ko je v eni od šol Rn iz garderobe povišal koncentracijo v igralnici. Ker je iz G1_ME-2 tudi vhod v sanitarije, bi izhajanje Rn iz odtokov lahko bil dodaten vir povišanja njegove koncentracije (Vukotić in sod., 2019).

Dodaten vir Rn lahko predstavlja tudi kamnita fasada (ME-1), ki je zelo prepustna za Rn. Številne raziskave (Antović in sod., 2007; Vukotić in sod., 2008; Vukotić in sod., 2019a; Vukotić in sod. 2020a; Vukotić in sod. 2020b) poročajo o povišanih koncentracijah Rn v hišah, šolah in vrtcih, ki so zgrajene iz kamna. Stavba ME-2 ima izveden ovoj iz litega betona. Obe stavbi, ME-1 in ME-2, sta brez toplotne izolacije in imata nizko zrakotesnost ovoja. Sta starejši stavbi z vidnimi razpokami v prostorih. Predvsem stavba ME-2 lahko glede na tip zemljišča pod stavbo, ki je tudi na seizmično aktivnim področju, znatno prispeva k kopičenju Rn v prostorih, kar pojasni njegove visoke koncentracije (Vaupotič in sod., 1998; Popit in Vaupotič, 2002; Vaupotič, 2003, Antović in sod., 2007).

V Črni gori smo v nekaj izbranih prostorih stavb ME-1 in ME-2 ter v zunanjem zraku izmerili povprečne koncentracije Rn z detektorji jedrskih sledi Radosys (CETI, 2003). V obeh igralnicah vrtca ME-1 sta povprečni koncentraciji višji od nacionalne referenčne vrednosti 400 Bq m^{-3} (Vukotić in sod., 2019a): 516 Bq m^{-3} v I1_ME-1 in 550 Bq m^{-3} v I2_ME-1 (preglednica 5). Če za I1_ME-1 primerjamo povprečno

koncentracijo Rn detektorja jedrskih sledi Radosys (550 Bq m^{-3}) s povprečno koncentracijo kontinuirnega merilnika Radon Scout za celoten čas meritve (422 Bq m^{-3}), vidimo dobro ujemanje (faktor 0,77), še posebej, ker se obdobji meritev le delno prekrivata. V stavbi ME-2 sta povprečni koncentraciji Rn v igralnicah: 319 Bq m^{-3} v I1_ME-2 in 296 Bq m^{-3} v I2_ME-2 (preglednica 5), kar so nižje vrednosti kot v ME-1 za faktor okrog 0,6.

V zunanjem zraku je povprečna koncentracija Rn 36 Bq m^{-3} na lokaciji ME-1 in 41 Bq m^{-3} na lokaciji ME-2. Povprečna koncentracija Rn v zunanjem zraku v Črni gori znaša 7 Bq m^{-3} (Vukotić in sod., 2019); vrednosti, ki smo ju izmerili v naši raziskavi, sta precej višji, in sicer za faktor 5,1 za ME-1 in 5,9 za ME-2 (preglednica 5). Če koncentraciji Rn iz naše raziskave primerjamo še s svetovnim povprečjem, ki znaša 10 Bq m^{-3} (Čeliković in sod., 2022), sta naši vrednosti višji za faktor 3,6 za ME-1 in 4,1 za ME-2. Če vrednosti iz Črne gore primerjamo s Slovenijo, kjer je na področju SI-1 in SI-2 povprečna letna koncentracija Rn $12,1 \text{ Bq m}^{-3}$ (Vaupotič in sod., 2010a), vidimo, da v Sloveniji med prezračevanjem dovajamo v prostore zunanji zrak, ki ima za okrog 3-krat nižjo koncentracijo Rn. Višje koncentracije Rn v zunanjem zraku na področju Nikšića ne presenečajo, saj je to področje visokega krasa (Radojičić, 1996), ki je bogato tudi z nahajališči boksita (Vukotić in sod., 2019a).

Ena glavnih karakteristik stavbe, ki lahko povzroči povišano koncentracijo Rn, je energetska učinkovitost. Kot smo že omenili, vstopa Rn v stavbo v glavnem s talnim zrakom (bogatom z Rn) iz zemljine pod stavbo. Imamo lahko: (i) visoko zrakotesen stavbni ovoj in otežen vstop Rn v stavbo, a tudi nižjo infiltracijo zunanjega zraka v stavbo, ki niža koncentracijo v stavbi; (ii) manj zrakotesen stavbni ovoj in neoviran vstop Rn v stavbo, a večjo infiltracijo zunanjega zraka, ki niža koncentracijo v stavbi; (iii) manj zrakotesen stavbni ovoj v stiku z zemljino (poškodbe v talni plošči in kletnih stenah, razpoke, preboji), a dobro zrakotesen v stiku z zunanjim zrakom (zunanje stene nad terenom, okna, vrata), potem Rn neovirano vstopa v stavbo in se ne zniža z infiltracijo zunanjega zraka, ker je ta zmanjšana. Stavbi ME-1 in ME-2 najbolj ustrezata opisu (ii), še posebej ME-2 (slika 22b, c), ko med vikendi koncentracija Rn ponoči zelo naraste (neoviran vstop talnega zraka iz zemljine v prostor), a se podnevi tudi delno zniža (zaradi infiltracije zunanjega zraka). Ker se nahaja ME-2 na področju visokega tveganja za Rn, je dotok Rn iz tal v stavbo večji kot nižanje z infiltracijo, zato se Rn kopiči. Najbolj neugodno je vsekakor stanje (iii), ki lahko privede do visokih koncentracij Rn v stavbah. O visoki zrakotesnosti stavbnega ovoja energetske učinkovitih stavb, in z njo povezani slabi kakovosti zraka z višjimi koncentracijami Rn, poročajo tudi Vasilyev in sod. (2015). Stavbi SI-1 in SI-2 v naši raziskavi imata vgrajena novejša okna z okenskimi okvirji iz PVC materialov, ki dodatno zatesnijo stavbni ovoj, vendar se nahajata na področju zmerne tveganja za radon in tudi kakovost stavbnega ovoja v stiku z zemljino je boljša kot v primeru ME-1 in ME-2, zato so koncentracije Rn nižje. Stavbi SI-1 in SI-2 še najbolj ustrezata stanju (i), saj imata toplotno izoliran stavbni ovoj in dvojno/trojno zasteklitev oken. Višje koncentracijah Rn v stavbah VVZ s PVC okenskimi okvirji navajajo tudi Vukotić in sod. (2020). Yarmoshenko in sod. (2020) so izvedli raziskavo na stavbah v Rusiji in ugotovili, da imajo stavbe s toplotno izoliranim ovojem (transparentni in netransparentni del) višje koncentracije Rn kot stavbe z neizoliranim stavbnim ovojem. Vse stavbe VVZ v naši raziskavi imajo dvoslojno zasteklitev (razen stavbe SI-2). Fojtikova in Navratilova Rovenska (2014) navajata povišane koncentracije Rn v stavbah vrtcev, ki imajo nova dvojno zastekljena okna v primerjavi s starimi. Symonds in sod. (2019) so v raziskavi domov v Združenem Kraljestvu ugotovili zvišanje koncentracij Rn za 32 % pri stavbah s toplotnim ovojem zunanjih sten, glede na stavbe, ki tega niso imele. Stavbi ME-1 in ME-2 v naši

raziskavi nimata toplotnega ovoja. Glede na zgornje ugotovitve lahko zaključimo, da bi delna sanacija, ki bi vključevala zgolj delno prenovo toplotnega ovoja (zunanje stene nad terenom, okna, vrata), brez celovite radanske sanacije (ki vključuje del stavbe v stiku z zemljino), lahko dodatno poslabšala trenutno stanje in še povišala koncentracije Rn.

6.2 Vloga prezračevanja pri koncentracijah ^{222}Rn in CO_2 v VVZ v Sloveniji in Črni gori

Prezračevanje prištevamo med pomembne ukrepe radonsko varne graditve stavb (Ur. l. RS, št. 14/22 in 55/23; TSG-1-007:2023). Učinkovitost znižanja koncentracij Rn in CO_2 je odvisna od časa in trajanja prezračevanja (naravno, mehansko, hibridno). Kot poudarjajo raziskave (Vaupotič in sod., 1998; Vaupotič, 2002a; Schubert in sod., 2018), morata čas in trajanje prezračevanja izhajati iz dnevne dinamike Rn, ki je prikazana na slikah 18 in 22. Najvišje koncentracije Rn v zraku igralnic se pojavijo v zgodnjih jutranjih urah, pred prihodom otrok in prvim zračenjem (slike 18, 20, 22, 23). Podobno ugotavljajo tudi raziskave Vaupotič (2002a, 2002d), Vaupotič in sod. (1998) ter Vukotić in sod. (2019a, 2019b). Na primer najvišje koncentracije Rn se v zraku igralnic SI-1 in SI-2 pojavijo ob 6. uri zjutraj in so običajno med 200 in 300 Bq m^{-3} . Zaradi učinkovitega jutranjega prezračevanja, koncentracije le redko presežejo mejno vrednost 300 Bq m^{-3} (Uredba o nacionalnem radonskem programu, 2018). Najvišje koncentracije Rn v zraku ME-1 in ME-2 se prav tako pojavijo ob 6. uri zjutraj in so običajno med 600 in 1000 Bq m^{-3} . Ne zadostno jutranje prezračevanje igralnic v ME-1 in ME-2 povzroči, da ostanejo koncentracije Rn v zraku visoke tudi po prihodu otrok (kar lahko traja tudi do 11. ure dopoldne).

Vpliv prezračevanja (naravnega in hibridnega) na koncentracijo Rn v zraku igralnic smo ugotavljali v stavbah SI-1 in SI-2. V hibridno prezračevanih igralnicah (I2_SI-2 in I1_SI-2) je bila povprečna koncentracija Rn v času delovnika nižja za faktorja 1,6 (I2_SI-2: $69 \pm 57 \text{ Bq m}^{-3}$) in 1,4 (I1_SI-2: $79 \pm 68 \text{ Bq m}^{-3}$) kot v naravno prezračevani igralnici (I1_SI-1: $109 \pm 65 \text{ Bq m}^{-3}$) (preglednica 7). Podobno ugotavljamo tudi s koncentracijami CO_2 . Povprečne koncentracije CO_2 so v zraku igralnice I2_SI-2 in I1_SI-2 nižje za faktorja 1,2 in 1,3 od koncentracij v I1_SI-1. Poleg vpliva načina prezračevanja smo preučili tudi vpliv delovanja lokalnega sistema prezračevanja z rekuperacijo (delovanje: I2_SI-2; nedelovanje: I1_SI-2). Pomembne razlike nismo zaznali, saj so zaposleni dodatno prezračevali prostor z odpiranjem oken (preglednica 7). Podobno kot pri koncentracijah Rn tudi pri koncentracijah CO_2 ne vidimo pomembne razlike v delovanju/nedelovanju lokalnega prezračevanja. Najvišje koncentracije v igralnicah stavbe SI-2 se razlikujejo le za okrog 100 ppm (I2_SI-2: 1910 ppm, I1_SI-2: 1815 ppm) (slika 19).

Sočasen vpliv (i) nezadostnega prezračevanja, (ii) geološke podlage (območje visokega tveganja za radon) z meteorološkimi dejavniki, in (iii) gradbenotehničnih značilnosti (nizka zrakotesnost ovoja, razpoke, preboji) povzroči, da so povprečne koncentracije Rn med delovnikom v stavbah VVZ v Črni gori (I1_ME-1: $227 \pm 207 \text{ Bq m}^{-3}$; I2_ME-1: $264 \pm 191 \text{ Bq m}^{-3}$; G1_ME-2: $290 \pm 208 \text{ Bq m}^{-3}$) za faktor okrog 3 višje kot v stavbah VVZ v Sloveniji (preglednica 7).

Zaradi ugodnejšega sočasnega vpliva faktorjev lokacija-stavba-prezračevanje so koncentracije Rn v igralnicah stavb SI-1 in SI-2 v Sloveniji sicer res nižje, vendar jutranje prezračevanje učinkovito zniža samo v nočnem času nakopičeni Rn. Po prihodu otrok se prične CO_2 kopičiti in v primeru neustreznega časa in trajanja prezračevanja (glede na zasedenost igralnic) koncentracije pogosto presežejo mejno

vrednost 1000 ppm (ASHRAE, 2013). Kot je prikazano na sliki 19a, b, c se to pojavi po zajtrku in v obdobju spanja otrok (med 1500 in 2700 ppm). Na problem visokih koncentracij CO₂ v VVZ opozarjajo tudi druge raziskave (Yang in sod., 2009; Kalimeri in sod., 2016; Muhič in Muhič, 2022). Ugotavljamo, da bi bilo v stavbah SI-1 in SI-2 potrebno optimizirati prezračevanje tako, da bi v delovnem času zagotavljalo zadovoljivo nizke koncentracije Rn in CO₂. Sedanji način prezračevanja učinkovito zniža jutranjo koncentracijo Rn, ne pa tudi koncentracijo CO₂ čez celoten delovnik.

6.3 Predlogi za izboljšanje stanja ²²²Rn in CO₂ glede na gradbenotehnične značilnosti stavb in zakonodajo

Učinkovite ukrepe radonsko varne gradnje je potrebno določiti glede na individualne značilnosti lokacije z meteorologijo, stavbe in prezračevanja. Na osnovi analize podatkov časovnih vrst Rn lahko ugotovimo tipično dnevno dinamiko Rn in definiramo najbolj ustrezen čas in trajanje prezračevanja. To uskladimo še z aktivnostjo uporabnikov glede na namembnost VVZ.

Ugotovili smo, da v stavbah SI-1 in SI-2 VVZ v Sloveniji koncentracije Rn med delovnim tednom le redko presežejo nacionalno mejno vrednost 300 Bq m⁻³ (Uredba o nacionalnem radonskem programu, 2018). Ker smo učinkovitost prezračevanja preverili tudi z analizo časovnih vrst CO₂, ugotavljamo, da so koncentracije v zraku igralnic pogosto presegle mejno vrednost 1000 ppm. Še posebej je bilo to opazno v bolj zasedenih prostorih in ob aktivnostih, ki so potekale v prostoru (spanje, igra po zajtrku). Z namenom optimizacije bi bilo priporočljivo povečati pogostost in trajanje prezračevanja, ki ga določimo glede na zasedenost (metodološki pristop, ki vključuje optimalno količino svežega zraka na neto površino prostora/na neto volumen prostora/na uporabnika). Potrebni volumen svežega zraka dovajamo bodisi naravno bodisi mehansko oz. hibridno. Veliko uporabno vrednost imajo tudi optični javljalniki koncentracije CO₂, ki opozarjajo na prekoračitev mejne vrednosti z lučkami v barvi semaforja (REHVA, 2023: zelena do 800 ppm, rumena 800–1000 ppm, rdeča nad 1000 ppm). V primeru prekoračitve izvedemo naravno prezračevanje z odpiranjem oken ali mehansko s povečanimi volumni svežega zraka. V jutranjem času pred prihodom otrok je nujno igralnice dobro prezračiti in tako znižati koncentracijo Rn. Vendar pa optimalno prezračevnost prostorov dosežemo le tako, da merimo sočasno koncentracijo Rn in CO₂, saj imata različen izvor in drugačno dnevno dinamiko, zato sta učinkovita pokazatelj prezračevanja.

V stavbah ME-1 in ME-2 VVZ v Črni gori so koncentracije Rn višje in presegajo nacionalno mejno vrednost 400 Bq m⁻³ (Vukotić in sod., 2019a). Še posebej v jutranjem času pred prihodom otrok bi bilo nujno učinkovito prezračiti vse prostore, da bi znižali visoke koncentracije Rn. Ker so visoke koncentracije Rn odraz medsebojnega vpliva netesnega stavbnega ovoja (vidne razpoke, preboji) in nezadostnega prezračevanja, bi predlagali izvedbo celovitih ukrepov radonsko varne gradnje. Pri tem je potrebno še posebej poudariti kakovostno izvedbo stavbnega ovoja v stiku z zemljinjo, ki preprečuje vdor talnega zraka (bogatega z Rn) v stavbo, aktivno prezračevanje talne plošče ter kontrolirano prezračevanja prostorov. Posebej v luči morebitnih energetskih sanacij stavb je potrebno skrbno paziti, da niso izvedeni le delni ukrepi za doseganje višje zrakotesnosti toplotnega ovoja brez učinkovitega prezračevanja. To sicer zniža transmisijske toplotne izgube, vendar poveča koncentracije Rn, ki so na območjih visokega tveganja za radon že problematične. Energetsko in radonsko sanacijo je zato potrebno reševati vzajemno.

7 ZAKLJUČKI

Raziskava obravnava dinamiko radona (R_n) v zraku štirih stavb v odvisnosti od geološke podlage, gradbenotehničnih karakteristik stavbe, režima dela in prezračevalnih navad uporabnikov. Na osnovi radonskih kart smo izbrali po dve stavbi VVZ v Sloveniji (SI-1 in SI-2, zmerno tveganje za R_n) in Črni gori (ME-1 in ME-2, visoko tveganje za R_n). V stavbi SI-1 (prefabricirani montažni moduli), ki ima srednjo zrakotesnost stavbnega ovoja, smo izbrali igralnico I1_SI-1 (naravno prezračevanje). V stavbi SI-2 (klasična betonska), ki ima visoko zrakotesnost stavbnega ovoja, smo izbrali igralnico I2_SI-2 (lokalno prezračevanje z rekuperacijo je delovalo) in I1_SI-2 (lokalno prezračevanje z rekuperacijo ni delovalo). V stavbi ME-1 (zidana iz kamna in opeke) smo izbrali igralnico I1_ME-1, v stavbi ME-2 (klasična betonska) pa igralnico I1_ME-2 in garderobo G1_ME-2. Obe stavbi imata nizko zrakotesnost stavbnega ovoja in naravno prezračevanje. V SI-1 in SI-2 smo kontinuirno merili koncentracijo R_n in koncentracije CO_2 v obdobju 4. 2.–25. 4. 2022. V ME-1 in ME-2 pa smo kontinuirano merili koncentracijo R_n v obdobju 18. 3.–14. 4. 2022, dodatno pa še povprečno koncentracijo R_n v istih prostorih in v zunanjem zraku v obdobju 24. 3.–5. 5. 2022.

Na začetku raziskave smo predpostavili štiri hipoteze. Predvideli smo, da bodo glede na kategorijo tveganja na radonski karti Slovenije in Črne gore ter prezračevalne navade v obeh državah povprečne koncentracije R_n v igralnicah VVZ višje v Črni gori kot v Sloveniji. Hipotezo lahko v celoti potrdimo. Analiza podatkov, v kateri smo iz podatkov kontinuirnih meritev koncentracije R_n v zraku za vsak prostor izračunali povprečne vrednosti za delovni teden (samo za delovni čas (8 ur) in celodnevno (24 ur)) ter za vikende (24 ur), je pokazala, da so koncentracije v Črni gori višje za faktor 2–3,5 kot v Sloveniji. Glavni vzrok za to razliko je nizka zrakotesnost stavbnih ovojev ME-1 in ME-2, predvsem na stiku stavb z zemljino, ki omogoča neoviran vlek talnega zraka, bogatega z R_n , v stavbi. Ker sta stavbi ME-1 in ME-2 na območju visokega tveganja za R_n , kjer je zaradi geološke podlage radonski potencial v tleh povišan, to vodi v višje koncentracije v prostorih.

V drugi hipotezi smo predpostavili, da bodo povprečne koncentracije R_n v izbranih igralnicah VVZ višje v modularni stavbi SI-1 kot v klasično zidani stavbi SI-2 in višje v hibridno prezračevani stavbi (SI-2, kjer poleg lokalnega prezračevanja z rekuperacijo dodatno prezračujejo naravno) kot v naravno prezračevani stavbi (SI-1). Predpostavili smo tudi, da bodo koncentracije R_n nižje v igralnicah, ki imajo tesen stavbni ovoj in so učinkovito prezračevane. Hipoteze ne moremo v celoti niti potrditi niti zanikati, saj na koncentracijo R_n v zraku prostora vplivajo številni dejavniki. Poleg geološke podlage, je zagotovo najpomembnejša zrakotesnost stavbnega ovoja, ki v primeru ME-1 in ME-2 nista toplotno izolirana, kar vodi v visoke koncentracije R_n v zraku prostorov. V primeru SI-2 imamo visoko zrakotesnost stavbnega ovoja, v SI-1 pa srednjo zrakotesnost stavbnega ovoja. Pri primerjavi koncentracije R_n v delovnem času v modularni stavbi (109 Bq m^{-3}) in klasično zidani stavbi (69 Bq m^{-3} in 79 Bq m^{-3}) v Sloveniji, so koncentracije zelo podobne. Če bi primerjali klasično zidano stavbo (ME-2) v Črni gori, z modularno stavbo (SI-1) v Sloveniji, bi dobili večjo razliko, saj imata različni geološki podlagi in različno tveganje za R_n . Glede na del hipoteze, ki se nanaša na način prezračevanja, razlika med hibridno prezračevano stavbo (SI-2) in naravno prezračevano stavbo (SI-1) ni tako velika, da bi hipotezo lahko potrdili. Če pa primerjamo naravno prezračevano stavbo ME-1 (227 Bq m^{-3}) in ME-2 (264 Bq m^{-3} in 290 Bq m^{-3}) v Črni gori s hibridno prezračevano stavbo SI-2 (69 Bq m^{-3} in 79 Bq m^{-3}) v Sloveniji, dobimo večjo razliko, ki se nanaša na kakovost same stavbe.

V tretji hipotezi smo predpostavili dnevno dinamiko Rn s povišano jutranjo koncentracijo, ki je odraz kopičenja Rn preko noči, ter učinkovitim nižanjem koncentracije v delovnem času, ki je odraz prezračevanja. Hipotezo lahko v celoti potrdimo, saj je tudi z grafov razvidno, da se visoke jutranje koncentracije Rn učinkovito in hitro znižajo s prezračevanjem.

Zadnja hipoteza je predvidela, da na povišano koncentracijo Rn v vseh igralnicah VVZ vpliva predvsem geološka podlaga lokacije, medtem ko je vloga meteoroloških dejavnikov manj izrazita. To hipotezo lahko potrdimo, je pa potrebno zopet poudariti, da je bolj izrazit vpliv meteoroloških dejavnikov pri nizki zrakotesnosti stavbnega ovoja, kar smo opazili pri ME-1 in ME-2. Med meteorološkimi dejavniki so najpomembnejše spremembe tlaka in temperature zunanjega zraka, ki povzročajo vlek talnega zraka, bogatega z Rn, v stavbe, kar opazimo predvsem ponoči.

Kot smo ugotovili, sedanji način prezračevanja stavb SI-1 in SI-2 v Sloveniji učinkovito zniža koncentracije Rn v delovnem času, ne pa tudi koncentracij CO₂. Ker imata Rn in CO₂ različen izvor in različno dnevno dinamiko, so koncentracije Rn najvišje zjutraj, koncentracije CO₂ pa v času zasedenosti prostorov. Optimizacija prezračevanja v stavbah SI-1 in SI-2 bi morala uvesti bolj pogosta in morda nekoliko daljša ali bolj intenzivna prezračevanja v času delovnika, ko začne koncentracije CO₂ naraščati. Po drugi strani pa dodatno prezračevanje ne bi zadovoljivo znižalo koncentracij Rn v stavbah ME-1 in ME-2 v Črni gori, kjer bi bila najboljša rešitev radonska sanacija. Še posebej pazljivo in kakovostno bi bilo potrebno izvesti sanacijo stavbnega ovoja v stiku z zemljino, da bi preprečili vdor talnega zraka, ki je bogat z Rn, v stavbo.

VIRI

Antović, N., Vukotić, P., Zekić, R., Ilić, R. 2007. Indoor radon concentrations in the town of Niksic, Montenegro. Radiation Protection Dosimetry 124: 385–391. doi.org/10.1093/rpd/ncm225

Arvela, H. 2005. Review of seasonal variation in residential indoor radon concentrations. In Radioactivity in the Environment 7: 612–617. [doi.org/10.1016/S1569-4860\(04\)07074-3](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(04)07074-3)

ASHRAE 62.1-2013 Ventilation for acceptable Indoor Air Quality. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/62_1_2013_p_20150707.pdf (Pridobljeno 28. 10. 2023.)

Asimow, M. Fundamentals of Engineering Design: Introduction to Design, 1st ed., Prentice Hall Inc.: New York, NY, USA, 1962; p. 135.

Bohicchio, F., Campos-Venuti, G., Piermattei, S., Nuccetelli, C., Risica, S., Tommasino, L., Torri, G., Magnoni, M., Agnesod, G., Sgorbati, G., Bonomi, M., Minach, L., Trotti, F., Malisan R. M., Maggiolo, S., Gaidolfi, L., Giannardi, C., Rongoni, A., Lombardi, M., Cherubini, G., Dostilio, S., Cristofaro, C., Pugliese, M., Martucci, V., Crispino, A., Cuzzocrea, P., Santamaria Sansone, A., Cappai, M. 2005. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. Radiation Measurements 40: 686–694. doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.12.023

Cinelli, G., Tollefsen, T., Bossew, P., Gruber, V., Bogucarskis, K., De Felice, L., De Cort, M. 2019. Digital version of the European Atlas of natural radiation. Journal of Environmental Radioactivity 196: 240–252. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.008

Cinelli, G., Tondeur, F., Dehandschutter, B. 2011. Development of an indoor radon risk map of the Walloon region of Belgium, integrating geological information. Environmental Earth Sciences 62: 809–819. doi.org/10.1007/s12665-010-0568-5

Collignan, B., Le Ponner, E., Mandin, C. 2016. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. Journal of Environmental Radioactivity 165: 124–130. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.09.013

Cortina, D., Durán, I., Llerena, J. J. 2008. Measurements of indoor radon concentrations in the Santiago de Compostela area. Journal of Environmental Radioactivity 99: 1583–1588. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.004

Cosma, C., Cucos-Dinu, A., Papp, B., Begy, R., Sainz, C. 2013. Soil and building material as main sources of indoor radon in Băița-Ștei radon prone area (Romania). Journal of Environmental Radioactivity 116: 174–179. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.09.006

Čeliković, I., Pantelić, G., Vukanac, I., Krneta Nikolić, J., Živanović, M., Cinelli, G., Gruber, V., Baumann, S., Quindos Poncela, L.S., Rabago, D. 2022. Outdoor radon as a tool to estimate radon

priority areas—A Literature Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19: 662. doi.org/10.3390/ijerph19020662

Day, T. A., Gober, P., Xiong, F. S., Wentz, E. A. 2002. Temporal patterns in near-surface CO₂ concentrations over contrasting vegetation types in the Phoenix metropolitan area. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 229–245. [doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00288-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00288-X)

Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings.

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:en:PDF>

(Pridobljeno 17. 8. 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. 7. 2022.)

Dovjak, M., Shukuya, M., Krainer, A. 2018. User-centred healing-oriented conditions in the design of hospital environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15: 2140. doi.org/10.3390/ijerph15102140

Dovjak, M., Slobodnik, J., Krainer, A. 2020. Consequences of energy renovation on indoor air quality in kindergartens. *Building Simulation* 13: 691–708. doi.org/10.1007/s12273-020-0613-6

Dovjak, M., Virant, B., Krainer, A., Zavrl, M. Š., 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

Dubois, G. 2005. An overview of radon surveys in Europe. European Commission, 1–168. <https://shorturl.at/dsBOS> (Pridobljeno 13. 4. 2022.)

Economidou, M., Atanasiu, B., Despret, C., Maio, J., Nolte, I., Rapf, O., Laustsen, J., Ruyssevelt, P., Staniaszek, D., Strong, D., Zinetti, S. 2011. Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings. Netherlands. [HR_EU_B_under_microscope_study.pdf](https://hr.europa.eu/B_under_microscope_study.pdf) (bpie.eu) (Pridobljeno 16. 11. 2022.)

Etiopo, G., & Martinelli, G. 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 129: 185–204. [doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00292-8](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00292-8)

European Commission, Joint Research Centre. 2019, European Atlas of Natural Radiation: Radon, Chapter 5. Publications Office of the European Union, 2019.

Gopalakrishnan, P., Jeyanthi, J. 2022. Importance of radon assessment in indoor Environment-a review. *Materials Today: Proceedings* 56: 1495–1500. doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.534
Gradski portal. 2022. U Crnoj Gori ove školske godine radi 158 vrtića. <https://gradski.me/u-crnoj-gori-ove-skolske-godine-radi-158-vrtica> (Pridobljeno 18.6. 2022.)

Groves-Kirkby, C. J., Crockett, R. G., Denman, A. R., Phillips, P. S. 2015. A critical analysis of climatic influences on indoor radon concentrations: Implications for seasonal correction. *Journal of Environmental Radioactivity* 148: 16–26. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.05.027

Gruber, V., Bossew, P., De Cort, M., Tollefsen, T. 2013. The European map of the geogenic radon potential. *Journal of Radiological Protection* 33: 51. doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/51

Idso, S. B., Idso, C. D., Balling Jr, R. C. 2002. Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO₂ concentration within a residential sector of the urban CO₂ dome of Phoenix, AZ, USA. *Atmospheric Environment* 36: 1655–1660. [doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00159-0)

Kitto, M. 2014. Radon testing in schools in New York State: A 20-year summary. *Journal of Environmental Radioactivity* 137: 213–216. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.07.020

Krainer, A. 1993a. *Toward Smart Buildings*. European Commission, London.

Krainer, A. 1993b. *Vernacular Buildings in Slovenia: Genesis of Bioclimatic Growth of Vernacular Buildings in Slovenia*. European Commission, London.

Kullab, M. K., Al-Bataina, B. A., Ismail, A. M., Abumurad, K. M., Ghaith, A. 1997. Study of radon-222 concentration levels inside kindergartens in Amman. *Radiation Measurements* 28: 699–702. [doi.org/10.1016/S1350-4487\(97\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)00167-4)

Malanca, A., Fava, R., Gaidolfi, L. 1998. Indoor radon levels in kindergartens and play-schools from the province of Parma. *Journal of Environmental Radioactivity* 40: 1–10. [doi.org/10.1016/S0265-931X\(97\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(97)00067-2)

Malanca, A., Gaidolfi, L., Fava, R. 1997. Natural radioactivity in kindergartens and play schools of Parma, Italy. *Environment International* 23: 541–546. [doi.org/10.1016/S0160-4120\(97\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(97)00060-3)

Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., García-Cruz, A. 2015. Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 736–755. doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095

Markkanen, M., Arvela, H. 1992. Radon emanation from soils. *Radiation Protection Dosimetry* 45: 269–272. doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.269

Marley, F. 2001. Investigation of the influences of atmospheric conditions on the variability of radon and radon progeny in buildings. *Atmospheric Environment* 35: 5347–5360. [doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00272-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00272-2)

McGrath, J. A., Byrne, M. A. 2021. An approach to predicting indoor radon concentration based on depressurisation measurements. *Indoor and Built Environment* 30: 1042–1050. doi.org/10.1177/1420326X20924747

Ministarstvo održivog razvoja i turizma. 2018. Program zaštite od radona s akcionim planom za period 2019-2023. godine. <https://www.gov.me/dokumenta/92a5c7a9-4b47-4b90-a3ee-a500e8a94db8> (Pridobljeno 19. 12. 2020.)

Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport. 2022. Evidenca vzgojno-izobraževalnih zavodov in vzgojno-izobraževalnih programov. <https://paka3.mss.edus.si/registriweb/SeznamVrtei.aspx?Enote=1> (Pridobljeno 11. 1. 2022.)

Minkin, L., Shapovalov, A. S. 2008. Indoor radon entry: 30 years later. *Iranian Journal of Radiation Research* 6: 1–6. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54694124> (Pridobljeno 24. 3. 2023.)

Muhič, S., Muhič, T. 2022. Measurements of air quality in kindergartens and schools in the republic of slovenia before the Covid-19 epidemic. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 68: 290–299. doi.org/10.5545/sv-jme.2022.13

Občina Grosuplje, 2022. Predstavitev občine Grosuplje. <https://www.grosuplje.si/objave/175> (Pridobljeno 12. 6. 2022.)

Otton, J. K. 1992. The Geology of Radon. U.S. Department of the Interior / U.S. Geological Survey, Washington.

Pantelić, G., Čeliković, I., Živanović, M., Vukanac, I., Nikolić, J. K., Cinelli, G., Gruber, V. 2019. Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe. *Journal of Environmental Radioactivity* 204: 163–174. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.04.010

Poglajen, S. 2018. Analiza kakovosti notranjega okolja v izbrani vzgojno-varstveni ustanovi s predlogi izboljšav. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=105137> (Pridobljeno 20. 10. 2023.)

Popit, A., Vaupotič, J. 2002a. Indoor radon concentrations in relation to geology in Slovenia. *Environmental Geology* 42: 330–337. doi.org/10.1007/s00254-002-0526-y

Popit, A., Vaupotič, J. 2002b. The influence of geology on elevated radon concentrations in Slovenian schools and kindergartens. *Geologija* 45: 499–504. doi.org/10.5474/geologija.2002.055

Pratley & Partners, 2018. What are the different types of ventilation? <https://www.ljpratley.co.uk/blog/different-types-of-ventilation> (Pridobljeno 16. 7. 2022.)

Pravilnik o bližim uslovima za osnivanje ustanova u oblasti obrazovanja i vaspitanja. Službeni list RCG, br. 40/06. <https://www.gov.me/dokumenta/206b62e3-b107-42a4-aa8c-f53434e5c764> (Pridobljeno 17. 2. 2022.)

Pravilnik o normativih in minimalnih tehničnih pogojih za prostor in opremo vrtca. Uradni list RS št. 20/17. <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV3140> (Pridobljeno 10. 10. 2022.)

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb. Uradni list RS, št. 42/02. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV4223> (Pridobljeno 12. 4. 2023.)

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Uradni list RS št. 70/22. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV14331> (Pridobljeno 10. 10. 2022.)

Pravilnik o zaščiti pred hrupom v stavbah. Uradni list RS št. 10/12. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV10622> (Pridobljeno 11. 10. 2022.)

Prill, R. 2000. Why measure carbon dioxide inside buildings. Washington State University Extension Energy Program. <https://docplayer.net/6542806-Why-measure-carbon-dioxide-inside-buildings-by-rich-prill-washington-state-university-extension-energy-program.html> (Pridobljeno 12. 12. 2022.)

Radojičić B. 1996. Geografija Crne Gore: Prirodna Osnova. Unireks, Nikšić.

REHVA. 2023. COVID-19 ventilation and building services guidance for school personnel. https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_School_guidance_25112020.pdf (Pridobljeno 21. 11. 2023.)

Rey, J. F., Goyette, S., Gandolla, M., Palacios, M., Barazza, F., Goyette Pernot, J. 2022. Long-term impacts of weather conditions on indoor radon concentration measurements in Switzerland. Atmosphere 13: 92. doi.org/10.3390/atmos13010092

Sarad. 2021a. Manual Radon Scout Professional. https://www.sarad.de/cms/media/docs/datenblatt/ds-radon_scout_professional-en.pdf (Pridobljeno 20. 11. 2022.)

Sarad. 2021b. Manual Radon Scout. https://www.sarad.de/cms/media/docs/handbuch/man-radon_scout-en.pdf (Pridobljeno 19. 7. 2022.)

Schmid, K., Kuwert, T., Drexler, H. 2010. Radon in indoor spaces: an underestimated risk factor for lung cancer in environmental medicine. *Deutsches Arzteblatt International* 107: 181. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2010.0181>

School of PE. 2017. The importance of geology in structural engineering. <https://www.schoolofpe.com/blog/2017/05/importance-of-geology-in-structural-engineering.html> (Pridobljeno 11. 7. 2022.)

Schubert, M., Musolff, A., Weiss, H. 2018. Influences of meteorological parameters on indoor radon concentrations (^{222}Rn) excluding the effects of forced ventilation and radon exhalation from soil and building materials. *Journal of Environmental Radioactivity* 192: 81–85. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.06.011

Silva, J., Lopes, N., Curado, A., Nunes, L. J., Lopes, S. I. 2022. A pre-diagnosis model for radon potential evaluation in buildings: A tool for balancing ventilation, indoor air quality and energy efficiency. *Energy Reports* 8: 539–546. doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.100

Smernica za gradnjo radonsko varnih novih stavb novogradenj. <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Smernice-Radon/Radon-Smernice-za-novogradnje.pdf> (Pridobljeno 17. 11. 2023.)

Stabile, L., Buonanno, G., Frattolillo, A., Dell'Isola, M. 2019. The effect of the ventilation retrofit in a school on CO_2 , airborne particles, and energy consumptions. *Building and Environment* 156: 1–11. doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.001

Sundal, A. V., Henriksen, H., Soldal, O., Strand, T. 2004. The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Science of the Total Environment* 328: 41–53. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.02.011

Syarbaini and Pudjadi, E., 2015. Radon and Thoron Exhalation Rates from Surface Soil of Bangka - Belitung Islands, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience* 2: 35–42. doi.org/10.17014/ijog.2.1.35-42

Tehnična smernica za graditev glede zaščite pred radonom v stavbah TSG-1-007:2023. Uradni list RS, št. 199/21. <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Smernice-Radon/Tehnicna-smernica-za-graditev-Zascita-pred-radonom-v-stavbah-TSG-1-0072023.pdf> (Pridobljeno 10. 10. 2023.)

Tehnična smernica za graditev. Energijska učinkovitost stavb TSG-1-004: 2022. Uradni list RS št. 199/21. https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/TSG-1-004_2022_ure.pdf (Pridobljeno 10. 10. 2022.)

Tehnična smernica za zaščito pred hrupom v stavbah TSG-1-005: 2012. Uradni list RS št. 102/04. https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Graditev/tsg_005_zascita_pred_hrupom.pdf (Pridobljeno 12. 10. 2022.)

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> (Pridobljeno 19. 12. 2020.)

Vaupotič, J. 2002a. Do long-term average radon concentrations in schools and kindergartens differ from the average during working hours? *Health Physics* 83: 237–242. doi.org/10.1097/00004032-200208000-00008

Vaupotič, J. 2002b. Identification of sources of high radon levels in Slovenian schools. *Radiation Protection Dosimetry* 102: 75–80. doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006077

Vaupotič, J. 2002c. Search for radon sources in buildings—kindergartens. *Journal of Environmental Radioactivity* 61: 365–372. [doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00134-5](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00134-5)

Vaupotič, J. 2003. Indoor radon in Slovenia. *Nuclear Technology and Radiation Protection* 18: 36–43. doi.org/10.2298/NTRP0302036V

Vaupotič, J. 2007. Nano-size radon short-lived progeny aerosols in Slovenian kindergartens in wintertime. *Chemosphere* 69: 856–863. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.06.022

Vaupotič, J. 2010. Slovenian approach in managing exposure to radon at workplaces. *Nukleonika*, 55: 565–571. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ7-0014-0091/tab/summary> (Pridobljeno 19. 12. 2020.)

Vaupotič, J. 2011. Radon in Kindergartens and Schools: A Review. *Handbook of Radon: Properties, Applications and Health* 2: 477–523. https://www.researchgate.net/publication/286196963_Radon_in_kindergartens_and_schools-a_review/comments (Pridobljeno 16. 10. 2023.)

Vaupotič, J., Bezek, M., Kávási, N., Ishikawa, T., Yonehara, H., Tokonami, S. 2012. Radon and thoron doses in kindergartens and elementary schools. *Radiation Protection Dosimetry* 152: 247–252. doi.org/10.1093/rpd/ncs232

Vaupotič, J., Gregorič, A., Kobal, I., Žvab, P., Kozak, K., Mazur, J., Kochowska, E., Grządziel, D. 2010b. Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Ravne Fault in NW Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10: 895–899. doi.org/10.5194/nhess-10-895-2010

Vaupotič, J., Hunyadi, I., Baradács, E. 2001a. Thorough investigation of radon in a school with elevated levels. *Radiation Measurements* 34: 477–482. [doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00210-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00210-4)

Vaupotič, J., Kobal, I. 2001b. Radon exposure in Slovene kindergartens based on continuous radon measurements. *Radiation Protection Dosimetry* 95: 359–364.
doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006561

Vaupotič, J., Kobal, I. 2002. Radon dose estimates assisted by continuous measurements. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 253: 267–274. doi.org/10.1023/a:1019606027151

Vaupotič, J., Kobal, I. 2005. Radon exposure in Slovenian kindergartens and schools. *International Congress Series* 1276: 375–376. doi.org/10.1016/j.ics.2004.10.007

Vaupotič, J., Kobal, I., Križman, M. J. 2010a. Background outdoor radon levels in Slovenia. *Nukleonika* 55: 579–582.

Vaupotič, J., Kobal, I., Nicholson, H. F., Kross, B. C. 1996. Building and environmental factors associated with elevated radon levels in kindergartens in Slovenia. *IRPA9: 1996 International Congress on Radiation Protection. Proceedings* 2.
https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28007584 (Pridobljeno 13. 3. 2023.)

Vaupotič, J., Kobal, I., Planinić, J. 1998. Long-term radon investigation in four selected kindergartens in different geological and climate regions of Slovenia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 238: 61–66. doi.org/10.1007/bf02385356

Vaupotič, J., Križman, M., Planinić, J., Kobal, I. 1994a. Radon level reduction in two kindergartens in Slovenia. *Health Physics* 66: 568–572. doi.org/10.1097/00004032-199405000-00010

Vaupotič, J., Križman, M., Planinić, J., Pezdić, J., Adamič, K., Stegnar, P., Kobal, I. 1994b. Systematic indoor radon and gamma measurements in kindergartens and play schools in Slovenia. *Health Physics* 66: 550–556. doi.org/10.1097/00004032-199405000-00007

Vaupotič, J., Šikovec, M., Kobal, I. 2000. Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools. *Health Physics* 78: 559–562. doi.org/10.1097/00004032-200005000-00014

Vukotić, P., Antović, N. M., Zekić, R., Đurović, A., Anđelić, T., Svrkota, N., Mrdak, R., Dlabach, A. 2021. Influence of climate, building and residential factors on radon levels in ground-floor dwellings in Montenegro. *Nuclear Technology and Radiation Protection* 36: 74–84.
doi.org/10.2298/NTRP201225012V

Vukotić, P., Antović, N., Đurović, A., Zekić, R., Svrkota, N., Anđelić, T., Svrkota, R., Mrdak, R., Bjelica, N., Đurović, T., Dlabach, A., Bogičević, M. 2019a. Radon survey in Montenegro—A base to

set national radon reference and “urgent action” level. Journal of Environmental Radioactivity 196: 232–239. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.009

Vukotić, P., Antović, N., Đurović, A., Zekić, R., Svrkota, N., Anđelić, T., Svrkota, R., Mrdak, R., Bjelica, N., Đurović, T., Dlabac, A., Bogićević, M. 2019b. Main findings from radon indoor survey in Montenegro. Radiation Protection Dosimetry 185: 355–370. doi.org/10.1093/rpd/ncz022

Vukotić, P., Zekić, R., Anđelić, T., Svrkota, N. 2020a. Radon survey in the buildings of pre-university education in Montenegro. Contemporary Materials 11: 9–13. <https://doi.org/10.7251/COMEN2001009V>

Vukotić, P., Zekić, R., Anđelić, T., Svrkota, N., Bogićević, M., Dlabac, A. 2019c. Radon in Montenegrin schools and kindergartens – preliminary results. <https://www.rad2019.rad-conference.org/vs/Perko%20Vukotic.pdf>

Vukotić, P., Zekić, R., Anđelić, T., Svrkota, N., Đurović, A., Dlabac, A. 2020b. Radon on the ground floor in the buildings of pre-university education in Montenegro. Nukleonika, 65: 53–58. doi.org/10.2478/nuka-2020-0007

WHO. 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673> (Pridobljeno 2. 12. 2020.)

WHO. 2023. Radon and Health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health> (Pridobljeno 9. 2. 2023.)

Wilkening, M. 1990. Radon in the Environment, Studies in Environmental Science 40, Elsevier, Netherlands.

Zakon o vrtcih. Uradni list RS, št. 100/05. <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO447> (Pridobljeno 21. 12. 2022.)

Zakon o predšolskom vaspitanju i obrazovanju. Službeni list RCG, br. 80, 40/11. <https://www.gov.me/dokumenta/5302fffb-c588-4971-91db-be661a3febb4> (Pridobljeno 21. 12. 2022.)

»Ta stran je namenoma prazna«