

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE
STOPNJE STAVBARSTVO**

Ljubljana, 2020

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Magistrsko delo št.:

Graduation - Master thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE

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

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	546.296:628.8(497.4)(043.3)
Avtor:	Barbara Virant, dipl. inž. grad. (UN)
Mentor:	doc. dr. Mateja Dovjak
Somentor:	izr. prof. dr. Marjana Šijanec Zavrl
Naslov:	Vpliv stopnje prezračevanja na koncentracijo radona v notranjem okolju
Tip dokumenta:	Magistrsko delo – B
Obseg in oprema:	71 str., 12 pregl., 22 sl., 10 graf.
Ključne besede:	stopnja prezračevanja, kakovost notranjega zraka, radon, negativni zdravstveni izidi

Izvleček:

Magistrsko delo obravnava vpliv stopnje prezračevanja na koncentracijo radona v notranjem okolju. Želeli smo ugotoviti, ali so zahtevane količine svežega zunanjega zraka, ki so predpisane ali priporočene po slovenski zakonodaji, zadostne za zagotavljanje mejnih vrednosti koncentracij radona. V ta namen smo izvedli simulacije s programskim orodjem CONTAM 3.2 in rezultate verificirali z že izvedenimi meritvami v spalnici, ki se nahaja na območju Idrije. Na temo kakovosti notranjega zraka s stališča radona ter vpliva načina in stopnje prezračevanja na koncentracije radona v notranjem okolju, smo izvedli tudi sistematični pregled študij. Na osnovi rezultatov, dobljenih po pregledu raziskav, smo opredelili mogoč vpliv radona na zdravje uporabnika stavbe. Z dobljenimi rezultati magistrskega dela smo prišli do zaključka, da je zagotovitev kakovostnega notranjega zraka nujno potrebna za zdravje in udobje uporabnika. Pogosto uporabljena minimalna predpisana stopnja prezračevanja po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 s spr., ki znaša $0,5 \text{ h}^{-1}$, ne zadosti ustrezne kakovosti notranjega zraka. Na območjih z visoko izpostavljenostjo radonu bi morali za obravnavana referenčna prostora upoštevati večjo količino, ki je odvisna od namembnosti prostora. Z optimalno količino svežega zraka v prostor zagotavljamo, da koncentracije radona ostanejo pod zakonsko določeno mejno vrednostjo 300 Bq/m^3 , navedeno v Uredbi o nacionalnem radonskem programu, Uradni list RS, št. 86/2018, ali pod priporočeno vrednostjo 100 Bq/m^3 , ki je navedena v slovenskem standardu SIST EN 16798-1:2019. S tem hkrati zmanjšujemo tveganje za negativne zdravstvene izide pri uporabnikih, kar dokazujejo tudi mnoge raziskave. Verifikacija in validacija modela sta pokazali ujemanje med 6 % in 16 %, odvisno od izbranega meseca v letu. Do večjega odstopanja pride le v mesecu oktobru. Predlagamo učinkovito ter konstantno prezračevanje prostorov, hkrati pa se je potrebno zavedati, da gre le za trenutni ukrep. V primeru visokih koncentracij radona je potrebno problematiko reševati celostno, in sicer z radonsko sanacijo samih virov radona. Celovit pristop preprečevanja in obvladovanja tveganja je potrebno upoštevati v vseh fazah gradnje novih ali prenovljenih objektov.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	546.296:628.8(497.4)(043.3)
Author:	Barbara Virant, B. Sc.
Supervisor:	doc. dr. Mateja Dovjak
Co-supervisor:	izr. prof. dr. Marjana Šijanec Zavrl
Title:	Impact of Ventilation Rate on Radon Concentration in the Indoor Environment
Document type:	M. Thesis
Notes:	71 p., 12 tab., 22 fig., 10 graph.
Key words:	ventilation rate, indoor air quality, radon, negative health outcomes

Abstract:

The aim of this master thesis is to investigate the impact of the ventilation rate on radon concentration in an indoor environment. We wanted to determine whether the required quantities of fresh air, prescribed or recommended by Slovenian legislation, are sufficient to ensure the concentration of radon in the limit values. For this purpose, we performed simulations using the CONTAM 3.2 software tool and verified the results with measurements already carried out in a bedroom located in the Idrija area. We also conducted a systematic review of studies on indoor air quality from the radon point of view and the potential impact of ventilation rate on radon indoor concentration. Based on the results of the research review, we have identified the potential impact of radon on human health. With the results of the master thesis, we concluded that the provision of quality indoor air is necessary for users' health and comfort. The most often used minimum prescribed ventilation rate which, according to the Rules on ventilation and air-conditioning of buildings equals $0,5 \text{ h}^{-1}$, is not sufficient to ensure indoor air quality. In areas with high radon exposure, a larger amount, depending on the intended use, should be considered for the kindergarten classroom and the office, which were the subjects of my research. With the optimal amount of outdoor fresh air into the room, we ensure that radon concentrations remain below the limit of 300 Bq/m^3 , stated in the Decree on the National Radon Program, or below the recommended value of 100 Bq/m^3 , stated in the Slovenian standard SIST EN 16798-1: 2019. This also reduces the risk of negative health outcomes for users, which many studies have shown. Model verification and validation showed a match between 6% and 16%, depending on the selected month of the year. A major deviation occurs in October. We suggest efficient and constant ventilation of closed rooms, but at the same time, it is necessary to be aware that this is an immediate measure only. In the case of high concentrations of radon, the problem must be solved entirely, that is, by an anti-radon system. A complete risk prevention and management approach must be followed at all stages of construction of both new and refurbished facilities.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Mateji Dovjak za pomoč, potrpežljivost in koristne nasvete pri pisanju magistrskega dela. Za strokovno pomoč se zahvaljujem somentorici izr. prof. dr. Marjani Šijanec Zavrl.

Zahvaljujem se tudi dr. Janji Vaupotič za sodelovanje, prijaznost in posredovane informacije.

Iz srca se zahvaljujem družini in Denisu za podporo in spodbudo tekom celotnega študija.

Hvala sošolkam in sošolcem, zaradi katerih je bil študij prijeten in zabaven.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VII
KAZALO PREGLEDNIC	XI
KAZALO SLIK.....	XII
KAZALO GRAFIKONOV.....	XIII
LIST OF TABLES.....	XIV
LIST OF FIGURES	XV
LIST OF CHARTS	XVI
OKRAJŠAVE	XVII
1 UVOD	- 1 -
1.1 Opredelitev problema	- 1 -
1.2 Namen naloge	- 3 -
1.3 Cilji in hipoteze	- 3 -
2 TEORETIČNE OSNOVE.....	- 4 -
2.1 Kakovost notranjega zraka	- 4 -
2.1.1 Onesnaževala notranjega zraka	- 4 -
2.2 Osnove o sevanju radioaktivnih snovi	- 5 -
2.3 Radon.....	- 6 -
2.3.1 Fizikalno-kemijske lastnosti radona	- 6 -
2.3.2 Prehod radona na površje	- 7 -
2.3.3 Radon v notranjem okolju	- 7 -
2.3.4 Vpliv radona na zdravje	- 10 -
3 RADON V SLOVENIJI.....	- 13 -
3.1 Radon v zunanjem zraku	- 14 -
3.2 Radon v rudnikih.....	- 15 -
3.3 Radon v kraških jamah	- 15 -
3.4 Radon v šolah in vrtcih.....	- 16 -
3.5 Radon v domovih.....	- 18 -
3.6 Radon v bolnišnicah	- 18 -

4 UKREPI ZA ZMANJŠEVANJE KONCENTRACIJ RADONA	- 19 -
4.1 Vzpostavitev podtlaka pod talno ploščo ali sistem aktivnega prezračevanja zemljine (ASD – "Active Sub-slab depressurization").....	- 20 -
4.2 Sistem z nadtlakom.....	- 22 -
4.3 Prezračevanje prostorov	- 22 -
5 PREGLED ZAKONODAJE.....	- 24 -
5.1 Zakonski okvir s področja prezračevanja in klimatizacije stavb	- 24 -
5.2 Zakonski okvir s področja radona.....	- 26 -
6 PREGLED ŠTUDIJ	- 29 -
6.1 Metoda pregleda.....	- 29 -
6.2 Kakovost notranjega zraka s stališča radona	- 29 -
6.3 Vpliv načina in stopnje prezračevanja na koncentracije radona v notranjem okolju ..	- 36 -
6 SIMULACIJE	- 42 -
6.1 Metoda.....	- 42 -
6.2 Referenčni prostor	- 42 -
6.3 Verifikacija in validacija simulacij.....	- 44 -
7 REZULTATI.....	- 49 -
7.1 Učilnica vrtca	- 49 -
7.2 Pisarna	- 51 -
7.3 Primerjava rezultatov simulacij.....	- 52 -
7.4 Verifikacija in validacija rezultatov	- 55 -
8 RAZPRAVA.....	- 55 -
9 ZAKLJUČEK	- 63 -
10 VIRI.....	- 65 -

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Koncentracije radona v gradbenih materialih [Bq/kg] [32].	- 8 -
Preglednica 2: Količine zunanjega zraka za prezračevanje po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02).	- 25 -
Preglednica 3: Najmanjša količina zraka za človeka po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02).	- 25 -
Preglednica 4: Rezultati pregleda literature.	- 29 -
Preglednica 5: Povzetek izbranih študij na temo kakovosti notranjega zraka s stališča radona.	- 31 -
Preglednica 6: Rezultati pregleda literature.	- 36 -
Preglednica 7: Povzetek izbranih študij na temo vpliva prezračevanja na koncentracije radona.	- 38 -
Preglednica 8: Osnovne karakteristike radona.	- 42 -
Preglednica 9: Količine dovedenega zunanjega zraka za primer učilnice vrtca.	- 43 -
Preglednica 10: Količine dovedenega zunanjega zraka za primer pisarne.	- 43 -
Preglednica 11: Izračunani povprečni dotok radona v prostor na podlagi že izvedenih meritev [71], [72].	- 45 -
Preglednica 12: Najmanjša in največja izmerjena koncentracija radona [Bq/m ³] [71].	- 48 -

KAZALO SLIK

Slika 1: Razpadni niz radona [2].....	6 -
Slika 2: Prehod radona [2], [4].....	9 -
Slika 3: Svetovno povprečje letne doze sevanja [22].....	10 -
Slika 4: Povprečne letne doze sevanja za Slovenijo [33].....	11 -
Slika 5: Evropska karta radona s povprečnimi koncentracijami radona v domovih [27]. ...	13 -
Slika 6: Radon v zunanjem zraku v Sloveniji [34].	14 -
Slika 7: Odvisnosti med zunanjo temperaturo in koncentracijami radona znotraj Postojnske jame [44].....	15 -
Slika 8: Koncentracije radona v prostorih vrtcev in šol [Bq/m^3] [13].	16 -
Slika 9: Geologija Slovenije [19].....	17 -
Slika 10: Ukrepi za zmanjševanje radona v prostoru.....	19 -
Slika 11: Protiradonski sistem [76].	20 -
Slika 12: Radonske zbirne cevi [76].	21 -
Slika 13: Brezno za zbiranje radona [76].....	21 -
Slika 14: Načini prezračevanja [74].	23 -
Slika 15: Zakonski okvir na področju prezračevanja in klimatizacije stavb.....	24 -
Slika 16: Zakonski okvir na področju radona.....	27 -
Slika 17: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA.....	30 -
Slika 18: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA.....	37 -
Slika 19: Urne koncentracije radona [Bq/m^3] za mesec januar 2018 [71].....	46 -
Slika 20: Urne koncentracije radona [Bq/m^3] za mesec maj 2018 [71].....	46 -
Slika 21: Urne koncentracije radona [Bq/m^3] za mesec julij 2018 [71].	47 -
Slika 22: Urne koncentracije radona [Bq/m^3] za mesec oktober 2018 [71].....	47 -

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Rezultati stacionarnih simulacij koncentracij radona pri štirih variantah prezračevanja, za primer učilnice vrtca.	- 49 -
Grafikon 2: Vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v učilnici vrtca.	- 50 -
Grafikon 3: Rezultati stacionarnih simulacij koncentracij radona pri štirih variantah prezračevanja, za primer pisarne.	- 51 -
Grafikon 4: Vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v pisarni.	- 52 -
Grafikon 5: Primerjava rezultatov stacionarnih simulacij koncentracij radona pri štirih variantah prezračevanja za primer učilnice vrtca in pisarne.	- 53 -
Grafikon 6: Primerjava rezultatov vpliva stopnje prezračevanja na koncentracije radona v učilnici vrtca in pisarni.	- 54 -
Grafikon 7: Vpliv stopnje prezračevanja [h^{-1}] na koncentracije radona [Bq/m^3] za izbrana dneva v januarju 2018.	- 55 -
Grafikon 8: Vpliv stopnje prezračevanja [h^{-1}] na koncentracije radona [Bq/m^3] za izbrana dneva v maju 2018.	- 56 -
Grafikon 9: Vpliv stopnje prezračevanja [h^{-1}] na koncentracije radona [Bq/m^3] za izbrana dneva v juliju 2018.	- 57 -
Grafikon 10: Vpliv stopnje prezračevanja [h^{-1}] na koncentracije radona [Bq/m^3] za izbrana dneva v oktobru 2018.	- 58 -

LIST OF TABLES

Table 1: Radon concentrations in building materials [Bq/kg] [32].	- 8 -
Table 2: Amounts of outside air for ventilation [38].	- 25 -
Table 3: Minimum amount of air for humans [38].	- 25 -
Table 4: Results of the literature review.	- 29 -
Table 5: Summary of selected studies on indoor air quality from a radon.	- 31 -
Table 6: Results of literature review.	- 36 -
Table 7: Summary of selected studies on the effect of ventilation on radon concentrations.	- 38 -
Table 8: Basic radon characteristics.	- 42 -
Table 9: Amounts of outside air supplied to the kindergarten classroom.	- 43 -
Table 10: Amounts of outside air supplied to the office.	- 43 -
Table 11: Calculated average radon inflow into the room based on measurements [71], [72] ...	- 45 -
Table 12: Minimum and maximum measured radon concentrations [Bq/m ³] [71].	- 48 -

LIST OF FIGURES

Figure 1: Decay series of radon [2].	- 6 -
Figure 2: The transport of radon [2], [4].	- 9 -
Figure 3: World average annual radiation doses [22].	- 10 -
Figure 4: Slovenian average annual radiation doses [33].	- 11 -
Figure 5: European map of radon with average radon concentrations in homes [27].	- 13 -
Figure 6: Radon in Slovenian outdoor air [34].	- 14 -
Figure 7: Relationship between the outdoor temperature and radon concentrations in the Postojna Cave [44].	- 15 -
Figure 8: Radon concentrations in kindergartens and schools [Bq/m ³] [13].	- 16 -
Figure 9: Geology of Slovenia [19].	- 17 -
Figure 10: Radon reduction measures.	- 19 -
Figure 11: Anti-radon system [76].	- 20 -
Figure 12: Radon collector pipe system [76].	- 21 -
Figure 13: Chasm for radon collection [76].	- 21 -
Figure 14: Ventilation modes [74].	- 23 -
Figure 15: Building ventilation and air-conditioning legislation.	- 24 -
Figure 16: Radon legislation.	- 27 -
Figure 17: Results of the literature review according to the PRISMA methodology.	- 30 -
Figure 18: Results of the literature review according to the PRISMA methodology.	- 37 -
Figure 19: Radon concentrations [Bq/m ³] for every hour in January 2018 [71].	- 46 -
Figure 20: Radon concentrations [Bq/m ³] for every hour in May 2018 [71].	- 46 -
Figure 21: Radon concentrations [Bq/m ³] for every hour in July 2018 [71].	- 47 -
Figure 22: Radon concentrations [Bq/m ³] for every hour in October 2018 [71].	- 47 -

LIST OF CHARTS

Chart 1: Results of stationary simulations of radon concentrations in four ventilation variants, for the kindergarten classroom.....	- 49 -
Chart 2: Impact of ventilation rate on radon concentrations in the kindergarten classroom.....	- 50 -
Chart 3: Results of stationary simulations of radon concentrations in four ventilation variants, for office.....	- 51 -
Chart 4: Impact of ventilation rate on office radon concentrations.....	- 52 -
Chart 5: Comparison of stationary simulations results for the kindergarten classroom and the office.....	- 53 -
Chart 6: Comparison of results of the impact of ventilation rate on radon concentrations in the kindergarten classroom and office.....	- 54 -
Chart 7: Impact of ventilation rate [h^{-1}] on radon concentrations [Bq/m^3] for selected days in January 2018.....	- 55 -
Chart 8: Impact of ventilation rate [h^{-1}] on radon concentrations [Bq/m^3] for selected days in May 2018.....	- 56 -
Chart 9: Impact of ventilation rate [h^{-1}] on radon concentrations [Bq/m^3] for selected days in July 2018.....	- 57 -
Chart 10: Impact of ventilation rate [h^{-1}] on radon concentrations [Bq/m^3] for selected days in October 2018.....	- 58 -

OKRAJŠAVE

EM	elektromagnetno
EPA	Agencija za varstvo okolja (<i>ang. Environmental Protection Agency</i>)
EU	Evropska Unija
IAEA	Mednarodna agencija za atomsko energijo (<i>ang. International Atomic Energy Agency</i>)
ICRP	Mednarodna komisija za radiološko zaščito (<i>ang. The International Commission on Radiological Protection</i>)
IR	infrardeče
n	stopnja prezračevanja
PE	polietilen
PVB	polivinilbutiral
Rn	radon
RnDP	radonski kratkoživi produkti (<i>ang. Radon Decay Products</i>)
RS	Republika Slovenija
UV	ultravijolično
WHO	Svetovna zdravstvena organizacija (<i>ang. World Health Organization</i>)
ZDA	Združene države Amerike

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema

Onesnažen zrak ima negativni vpliv na zdravje. Našega zdravja v tolikšni meri ne načenjajo onesnaževalci okolja, ki jih dobro poznamo, kot so na primer izpušni plini vozil ali emisije iz industrije. Našemu zdravju nevarni onesnaževalci prihajajo ravno od tam, kjer se ljudje počutimo najbolj varne. V varnih zaprtih prostorih doma in pisarn preživimo ure in ure. V zaprtih prostorih namreč preživimo kar 90 % svojega časa [21]. Med najbolj pogosta onesnaževala notranjega okolja spadajo radon, tobačni dim, plesen, ogljikov monoksid, dušikov oksid, organski plini, nanodelci, formaldehid, pesticidi in azbest [1].

Z gradnjo zrakotesnih stavb želimo zagotoviti, da bodo nekontrolirane toplotne izgube zaradi nekontrolirane izmenjave zraka čim manjše. Pri tem se pogosto prične slabšati kakovost notranjega zraka. Na to nas opozarjajo že številne raziskave [41]. Da se v prostorih zagotovi zadostna kakovost notranjega zraka, je potrebno v prostore dovesti zadostno količino svežega zunanega zraka. Vrednosti so za Slovenijo podane v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb [38], kjer je podana tudi mejna vrednost koncentracije radona, ki je predmet te naloge. Ta znaša 400 Bq/m^3 ⁽¹⁾. Z 21. 3. 2018 je začela veljati Uredba o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48], ki podaja referenčno raven povprečne letne koncentracije radona v zaprtih bivalnih in delovnih prostorih, katera znaša 300 Bq/m^3 . Priporočena vrednost koncentracije radona v prostoru, ki je določena s strani WHO (Svetovna zdravstvena organizacija, *ang. World Health Organization*), in znaša 100 Bq/m^3 , je definirana tudi v slovenskem standardu SIST EN 16798-1:2019 [49]. Radon (Rn-222) je žlahten radioaktiven plin, ki nastane v zemeljski skorji v razpadnem nizu urana (U-238). Poleg Rn-222 (t.i. radon) sta najbolj znana izotopa še Rn-220 (t.i. toron), ki nastaja v razpadnem nizu torija (T-232) in Rn-219 (t.i. aktinon), ki nastaja v razpadnem nizu aktinija (U-235). Razlikujejo se glede na razpadni niz v katerem so nastali in razpolovni čas. Najdaljšo razpolovni dobo ima izotop Rn-222 (3,82 dni). Ker se atomi gibljejo relativno prosto, mu to omogoča, da ima dovolj časa priti na površje in se pomešati z zunanjim zrakom [2]. Zaradi sprememb v zračnem tlaku, ki jih povzročijo temperaturne razlike med zunanostjo in notranostjo, veter, ogrevanje in prezračevanje, radon prehaja iz tal tudi v stavbo. Tam se koncentrira v zaprtih, predvsem pritličnih in kletnih prostorih. Manjši izvor radona v bivalnem okolju predstavljajo tudi gradbeni material, voda in plin za ogrevanje stavb. Ker ga ne zaznamo in ne povzroča takojšnjih simptomov, je nevaren za naše zdravje [2], [3], [4]. Raziskave kažejo, da se v zaprtih prostorih nakopiči kar trikrat več radona kot ga je v naravnem okolju [5].

Na koncentracije radona v zaprtih prostorih v glavni meri vplivajo geološka sestava tal in kemične lastnosti kamnine in zemlje oziroma vsebnost urana v njih. Poleg geologije lokacije objekta so pomembne tudi kakovost gradbenega objekta, velikost in oblika stavbe, tip gradbene konstrukcije, vgrajeni materiali, podnebje in življenjske navade uporabnika stavbe [2], [3], [4], [6].

Fizikalno-kemijske lastnosti radona omogočajo tudi njegovo uporabo v znanosti. Uporablja se pri odkrivanju nahajališč uranove rude, saj je tam koncentracija radona v zunanjem zraku višja

¹ Enota Bq/m^3 oziroma becquerel na kubični meter zraka nam pove, koliko radioaktivnih razpadov atomov radona in njegovih potomcev se zgodi v vsaki sekundi v vsakem m^3 zraka.

kot drugje [7]. Njegovo uporabo zasledimo tudi pri napovedovanju potresne aktivnosti [8], [9] pri študijah aktivnosti prelomov [10], študiji aktivnosti vulkanov, iskanju geotermalnih virov energije [9], pri odkrivanju zračnih tokov in gibanju morske vode [7] ter z uporabo medicinske aplikacije radona celo pri zdravljenju malignih tumorjev [9].

Glavni razlog, ki je sprožil vprašanja o radonu in njegovih razpadnih produktih, je pojavnost pljučnega raka pri rudarjih v ZDA. Že v 16. stoletju je zaradi pljučnega raka v tamkajšnjih rudnikih prišlo do visoke stopnje smrtnosti med delavci. Šele po letu 1950 je bilo ugotovljeno, da je do prekomerne obolezlosti za pljučnim rakom v ZDA prihajalo pri rudarjih urana. V splošnem so kasnejše izvedene študije med različnimi rudarskimi skupinami začetne ugotovitve samo potrdile [6].

Iz tega izhaja tudi, da so se leta 1976 s strani ICRP (Mednarodna komisija za radiološko zaščito, ang. *The International Commission on Radiological Protection*) [11] podala prva priporočila o koncentracijah radona za delavce v rudnikih urana. Omenjena komisija je uvedla kontrolo nad koncentracijami radona v rudnikih, uporabo filtrov in dihalnih mask, kjer so koncentracije večje od 3000 pCi/l ⁽²⁾, dodatno skrajšan delovnik v območjih koncentracij med 300 pCi/l in 3000 pCi/l ter vidno signalizacijo v predelih, kjer so povišane koncentracije radona. Leta 1983 [12] je bila podana priporočena zgornja vrednost koncentracije radona, ki znaša 100 Bq/m³.

Prav tako so bile v Sloveniji leta 1969 opravljene prve meritve radona ravno na območju Žirovskega vrha, v tamkajšnjem rudniku urana. Kasneje so se izvedle tudi meritve v Mežici in Idriji [13], [14]. Poleg premogovnikov so bile koncentracije radona izmerjene tudi v kraških jamah po Sloveniji [13], [17], [18], kjer so bile izmerjene najnižje koncentracije v jami Pekel in Pivka (do približno 100 Bq/m³), drugje pa so bile koncentracije bistveno višje. V Postojnski jami so namerili nad 1000 Bq/m³ [18].

Ker večino časa preživimo v notranjih prostorih, se mnoge države po svetu posvečajo preiskavam radona. V Sloveniji so bile prve meritve koncentracij radona izvedene med letoma 1990 in 1994, ko je bilo pregledanih 730 vrtcev in 890 šol. Meritve so bile opravljene s strani Instituta Jožef Stefan v okviru Nacionalnega radonskega programa, ki se je začel izvajati leta 1990. Rezultati so pokazali, da je mejna vrednost 400 Bq/m³ presežena v 45 vrtcih in 78 šolah [13], [19]. V tisočih domovih so prve meritve izvedli leta 1994 in so trajale tri mesece. Rezultati so pokazali, da ima 4,5 % domov višjo koncentracijo radona od mejne [13], [20]. Po letu 1995 so bile raziskave usmerjene tudi v delovna okolja [13]. Raziskava na tem področju je potekala tudi v času med novembrom 2011 in oktobrom 2012, in sicer v 400 domovih po Sloveniji. Raziskava je bila izvedena s strani Centra za radon v Odseku za znanosti o okolju na Institutu Jožef Stefan [2].

Radon ne reagira z drugimi elementi, pač pa z njegovim radioaktivnim razpadom nastajajo kratkoživi produkti, in sicer polonij (Po-218 in Po-214), svinec (Pb-214) in bizmut (Bi-214). Ti se v zraku vežejo na aerosole in z njimi pridejo v naša pljuča. Usedajo in nabirajo se na stenah naše dihalne poti. Pri radioaktivnih preobrazbah pride do sproščanja energije, ki se absorbira v tkivu in ga poškoduje. Radon in njegove kratkožive produkte mnogi uvrščajo kot drugi

² Enota pCi/l oziroma picocuries na liter zraka nam pove, koliko radioaktivnih razpadov atomov radona in njegovih potomcev se zgodi v vsaki sekundi v vsakem litru zraka. 1 pCi/L = 37 Bq/m³.

najpogostejši vzrok za nastanek pljučnega raka [5], [15], [16], takoj za kajenjem, oziroma kot prvi vzrok za nastanek pljučnega raka pri nekadilcih.

1.2 Namen naloge

Namen magistrskega dela je preučiti vpliv stopnje prezračevanja na notranje koncentracije radona v prostoru. Želeli smo ugotoviti, ali so zahtevane količine svežega zraka, ki so predvidene v slovenski zakonodaji, zadostne za zagotavljanje koncentracij pod mejno vrednostjo ter podati priporočila za zmanjševanje koncentracij z vidika prezračevanja. V smeri celovitega preprečevanja in obvladovanja tveganja je potrebno poudariti pomen celovitih ukrepov.

1.3 Cilji in hipoteze

Cilj 1: Izvesti sistematičen pregled študij na tematiko kakovosti notranjega zraka z vidika radona.

Hipoteza 1: Pregled raziskav bo pokazal, da imata največji vpliv na koncentracije radona v prostoru lokacija ter način gradnje stavbe. Težnja k manjši rabi energije v stavbah, t. j. visoki zrakotesnosti stavb, vodi k slabši kakovosti notranjega zraka in ima negativni vpliv na zdravje uporabnika.

Metoda 1: Sistematični pregled literature v bazah Science Direct in Pub Med po metodi PRISMA.

Cilj 2: Izvesti sistematičen pregled raziskav na tematiko obvladovanja koncentracij radona, kjer smo se osredotočili na vidik prezračevanja in njegovega vpliva na koncentracije radona v notranjem okolju.

Hipoteza 2: Pregled raziskav bo pokazal, da se koncentracija radona z večanjem stopnje prezračevanja zmanjšuje.

Metoda 2: Sistematični pregled literature v bazah Science Direct in Pub Med po metodi PRISMA.

Cilj 3: S simulacijami ugotoviti vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v izbranem prostoru ter ugotoviti ali predpisane vrednosti količine dovedenega zunanega zraka v prostor po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 zagotavljajo koncentracije radona v mejnih vrednostih.

Hipoteza 3: Koncentracija radona se s povečanjem stopnje prezračevanja zmanjšuje. Vse predpisane vrednosti v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002 o količinah dovedenega zunanega zraka ne bodo zadostile zahtevanim in priporočenim vrednostim koncentracij radona v prostoru.

Metoda 3: Izvedba simulacij s programskim orodjem CONTAM 3.2.

Cilj 4: Verificirati rezultate simulacije izbranega prostora s predhodno že opravljenimi meritvami v spalnici na območju Idrije.

Hipoteza 4: Izmerjene in simulirane vrednosti bodo primerljive, kar potrjuje pravilno interpretacijo in izvedbo simulacij v programskem orodju.

Metoda 4: Izvedba verifikacije rezultatov simulacij ter rezultatov izvedenih meritev.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Kakovost notranjega zraka

V začetku sedemdesetih let se je začela t. i. energijska kriza, ki temelji na varčevanju energije. Današnji način gradnje stremi k čim manjši rabi energije in visoki zrakotesnosti stavb, zaradi katere je zmanjšana intenziteta prezračevanja prostorov [21]. Z vsemi energetske učinkovitimi ukrepi se je poslabšala kakovost notranjega zraka, kar vpliva na zdravje uporabnikov stavbe. Energetska učinkovitost in dobro, zdravo notranje okolje se ne smeta izključevati.

Kakovost zraka se nanaša na koncentracijo ene ali več škodljivih primesi v zraku. Je indikator vrste in količine onesnaževalcev, ki lahko uporabniku prostora povzročijo neugodje ali celo predstavljajo tveganje za njegovo zdravje. Kakovosten zrak je nujen pogoj za kakovostno bivanje in delo. Čisti zrak je poleg toplote, ustrezne osvetljenosti prostora in primerne ravni hrupa eden izmed najpomembnejših dejavnikov, od katerega je odvisno udobje človeka v prostoru. Kakovost zraka v prostoru ni konstantna, lahko pa jo nadzorujemo s kontroliranimi viri onesnaževanja zraka in s prezračevanjem [1].

Zavedati se moramo, da je lahko notranji zrak v zaprtem prostoru tudi do 10-krat bolj onesnažen od zunanjega [21]. Na njegovo kakovost med drugim vplivajo zunanji zrak iz okolice, vgrajeni gradbeni materiali, vgrajene naprave, prezračevalna oprema, umazanija in aktivnost uporabnikov. Glede na vpliv onesnažil na zdravje ljudi in z zaznavanjem kakovosti zraka, so določene zahteve za prezračevanje [1].

2.1.1 Onesnaževala notranjega zraka

V nadaljevanju so predstavljena najpomembnejša onesnaževala notranjega zraka, ki slabšajo njegovo kakovost in imajo negativen vpliv na zdravje ljudi. Med njimi je tudi radon, kateremu je v nadaljevanju namenjeno več pozornosti.

CO – ogljikov monoksid

Je brezbarven plin, ki nastaja pri popolnem izgorevanju ogljikovodikov, goriv, lesa in cigaret. Pri manjših koncentracijah povzroča glavobole in slabost. Pri visokih koncentracijah lahko povzroči tudi nezavest ali smrt [1].

NO_x – dušikovi oksidi

Najbolj poznan in problematičen je dušikov dioksid, ki nastane pri gorenju goriv pri zvišani temperaturi. Povzroča zmanjšan prehod dihalnih poti in težave z dihanjem [1].

HCHO – formaldehid

Formaldehid se uporablja v papirni in tekstilni industriji ter industriji izolacijskih materialov. Gradbeni materiali, ki oddajajo formaldehid, so iverne in vezane plošče, urea-formaldehidne pene za izolacijo in različna lepila. Pri ljudeh povzroča draženje sluznice ter pekoče grlo. Je karcinogen [1].

VOC – hlapne organske spojine

Hlapne organske spojine med drugim najdemo v gospodinjskih čistilih, barvah in oblogah. Povzročajo kronične in akutne bolezni. Nekatere spojine med njimi so tudi karcinogene [1].

Vonjave, cigaretni dim, lebdeči trdni delci

Vonjave nastanejo zaradi navzočnosti in aktivnosti ljudi, s kuhanjem, sanitarnimi dejavnostmi in odpadki. Povzročajo občutek nelagodja. Cigaretni dim nastaja s kajenjem in draži oči, nosne sluznice, povzroča pa tudi glavobol ter vnetje grla. Kajenje predstavlja prvi vzrok za nastanek pljučnega raka. Draženje sluznice, nosu, oči in žrela ter slabšanje dihalnih funkcij povzroča navzočnost lebdečih trdnih delcev (prah, dim, aerosoli) [1].

Rn – radon

Radon je radioaktiven plin brez okusa in vonja, ki se pojavlja v naravi. Nastane z razpadom radija. Povzroča huda pljučna obolenja in predstavlja drugi najpomembnejši vzrok za nastanek pljučnega raka [1].

2.2 Osnove o sevanju radioaktivnih snovi

Sevanje je del narave in življenja s katerim se srečujemo vsakodnevno. Gre za pojav, pri katerem se energija iz določenega vira širi v obliki delcev ali valovanja v prostor. Poznamo tri vrste sevanja, in sicer mehansko sevanje, elektromagnetno sevanje in sevanje delcev.

Pri mehanskem sevanju vir oddaja mehansko valovanje, ki se širi samo skozi snov, kot so plin, tekočina ali trdnina. EM (elektromagnetno) sevanje povzroča EM valovanje različnih valovnih dolžin. Viri so lahko radijski valovi, IR ali toplotni valovi, svetloba, UV žarki, rentgenski žarki in žarki gama. Sevanje gama predstavlja valovne dolžine krajše od 1 milijardinke mm. Nastane pri razpadu nestabilnega atomskega jedra. Pri t. i. radioaktivnem razpadu (neuravnovešeno število protonov in nevtronov v jedru) se del energije sprosti v obliki EM sevanja gama. Ob radioaktivnem razpadu jeder se poleg EM sevanja gama sproščajo tudi delci sestavljeni iz 2 protonov in 2 nevtronov. Imenujemo jih elektroni in helijeva jedra. Gre za ionizirajoči sevanji beta in alfa. Od tod sledijo trije različni razpadi radioaktivnih jeder – razpad alfa, beta in gama [22].

Radioaktivne snovi oddajajo sevanje z različno prodornostjo. Sevanje alfa ima veliko energije, delci pa imajo veliko hitrost, vendar kratek doseg. Delce zaustavi vsaka ovira. Tako sevanje skozi kožo ne prodre. Zdravje človeka lahko ogroža le, če sevalci alfa z dihanjem ali hrano pridejo v telo, kjer razpadejo. Zaradi veliko sproščene energije v telesu poškodujejo notranje organe.

Bolj prodorno je sevanje beta, ki nosi manj energije in povzroči manj škode. Tovrstno sevanje zaustavimo s tanko aluminijasto ali stekleno ploščo. Prav tako je sevanje beta za človeka škodljivo le v primeru, ko sevalce beta vnesemo v telo.

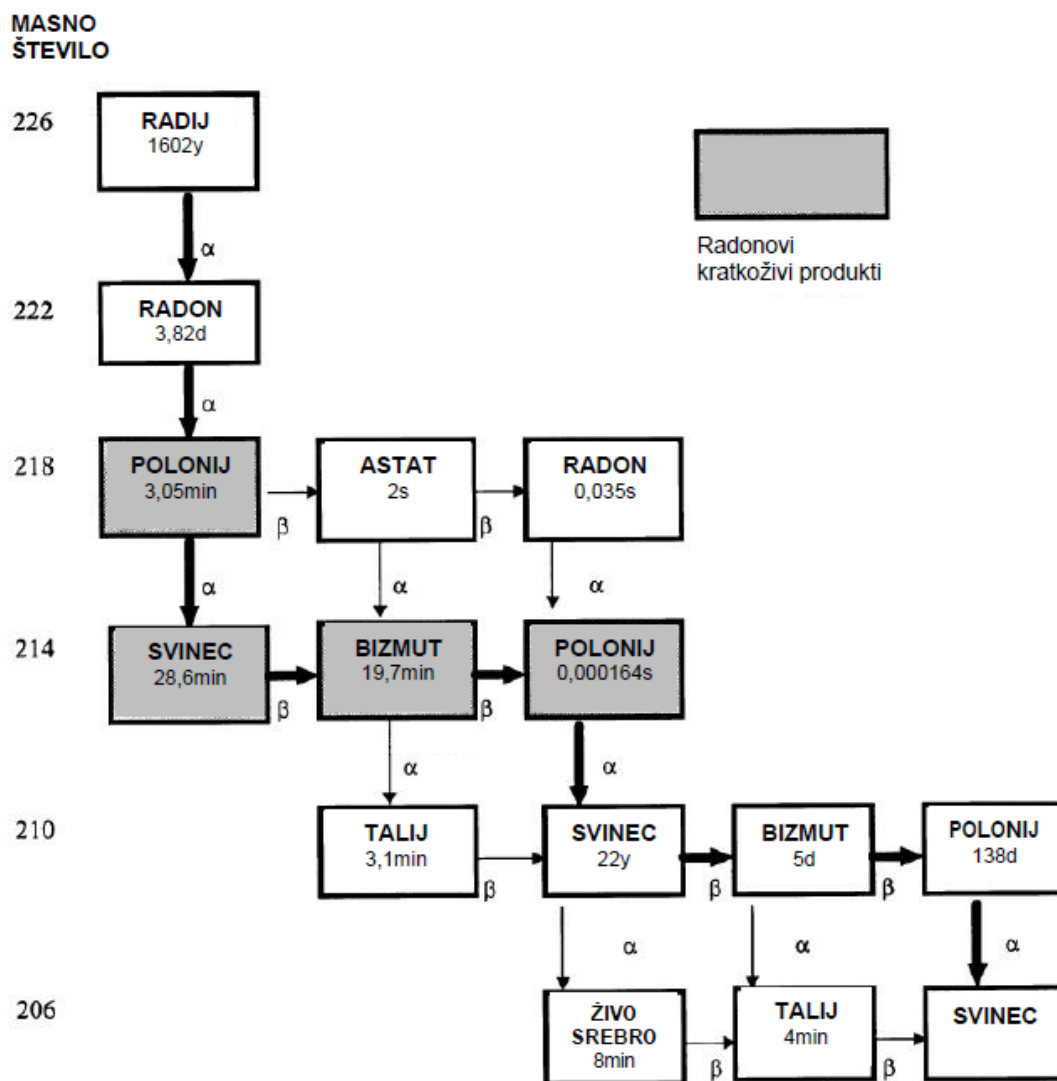
EM valovanje zelo kratih valovnih dolžin imenujemo sevanje gama. To sevanje prodre najdlje v globino in ga ustavimo šele z debelo plastjo snovi, ki vsebuje atome težkih elementov (npr. posebne vrste betona, svinec) [22].

2.3 Radon

Magistrska naloga se osredotoča na radon kot enega izmed parametrov kakovosti notranjega zraka, kateremu se danes namenja vse več pozornosti.

2.3.1 Fizikalno-kemijske lastnosti radona

Radon je radioaktivni žlahtni plin. Človek ga ne zazna, saj je brez barve, vonja in okusa. Je najtežji plin v naravi, s specifično gostoto $9,73 \text{ kg m}^{-3}$. Njegovo vrelišče je pri $-61,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tališče pa pri $-71 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Ker ima uran (U-238) težko nestabilno jedro, ta šele preko niza radioaktivnih preobrazb doseže stabilno obliko. Del razpadnega niza U-238, od radija (Ra-226) do stabilnega svinca (Pb-206), ki vključuje Rn-222 in njegove kratkožive produkte, je prikazan na Sliki 1. Izmed več kot dvajset radonovih izotopov sta poleg Rn-222 (t.i. radon) bolj znana še Rn-220 (t.i. toron) ter Rn-219 (t.i. aktinon). Toron nastaja v razpadnem nizu torija (Th-232), aktinon pa v razpadnem nizu aktinija (U-235). Razlikujejo se v razpadnem nizu, v katerem so nastali, in razpolovnem času. Najdaljšo razpolovno dobo ima izotop Rn-222 (3,82 dni) [2], [9].



Slika 1: Razpadni niz radona [2].

Figure 1: Decay series of radon [2].

Radon nastaja neposredno iz radija, ki je splošno razširjen element. Radij (Ra-226) nastaja v nizu urana-238, ki ga najdemo v vseh kamninah. V povprečju je koncentracija urana v granitu 63 Bq kg^{-1} , peščenjaku 6 Bq kg^{-1} , cementu 46 Bq kg^{-1} , betonu iz apnenca 31 Bq kg^{-1} , v opeki pa 111 Bq kg^{-1} [22]. V svetovnem merilu zemeljska skorja v povprečju vsebuje 37 Bq kg^{-1} , prst pa za $25,94 \text{ Bq kg}^{-1}$ urana [23].

2.3.2 Prehod radona na površje

Prva faza, v kateri radon nastaja iz kamnine, se imenuje emanacija. Emanacijski koeficient karakterizira fizikalno vedenje radona v materialih, ko deli atomov radona uhajajo iz mineralnih zrn v sosednji porni prostor [24]. Po nastanku lahko radon potuje med zrn in porami kamnine z difuzijo [9]. Naslednja faza prehoda iz zemlje na površje je prepustnost. Po razpadu radija so atomi radona prešli v pore. Od tu dalje lahko potujejo z molekularno difuzijo ali s konvekcijskim tokom skozi različne medije proti površju. Koncentracija radona v stavbah je odvisna od prepustnosti kamnine temeljnih tal stavbe. Prepustnost je odvisna od velikosti in oblike zrn, deleža in usmerjenosti por ter vlažnosti kamnine. Večja je velikost zrn, večje so pore, več je medzrnih prostorov in večja je prepustnost [26]. Ekshalacija predstavlja končno fazo potovanja radona proti površju, na katero vpliva količina vlage, velikost delcev in temperatura prsti, poroznost ter razlika v tlaku. Meri se v $\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ali $\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in pove množino radona, ki iz tal (prst, gradbeni material) prehaja v zrak (zunanji zrak ali zrak v prostoru) [9].

2.3.3 Radon v notranjem okolju

2.3.3.1 Viri radona v notranjem okolju

Večina ljudi je največji izpostavljenosti radona izpostavljena doma. Viri radona v bivalnem okolju so:

- zemljina pod stavbo,
- gradbeni material,
- voda,
- zemeljski plin.

Koncentracija radona v talnem zraku (merjeno do globine 1 m) je med 100 in 500 kBq/m^3 . V zraku se hitro redči in tako redkokdaj preseže koncentracijo 50 Bq/m^3 .

V kolikor tla in stene niso dovolj dobro izdelane in izolirane, radon prehaja tudi v prostor. V notranjem prostoru so po navadi koncentracije radona do 100 Bq/m^3 , v kakšnih primerih lahko dosežejo tudi nekaj 1000 Bq/m^3 [28].

Problem radona v pitni vodi se pojavi predvsem v kolikor se pitna voda pridobiva iz virov podzemne vode, kot so izviri, vodnjaki in vrtine. Ta voda ima običajno večjo vsebnost radona kot voda pridobljena iz rezervoarjev, rek in jezer. Zelo majhen delež tega dobimo z uporabo vode v gospodinjstvu. Velja, da je voda vir radona le, če so njegove koncentracije ekstremne. Voda predstavlja le okoli 2 % celotne koncentracije radona v stavbi [30].

Radon v notranje okolje pride tudi z zemeljskim plinom, ki se v zrak spušča z gorenjem. Zemeljski plin vsebuje med 40 in 4000 Bq/m^3 radona. Njegov prispevek glede na celotno

koncentracijo znotraj stavbe je največkrat zanemarljiv [30]. V Ljubljani je bila izmerjena koncentracija radona 60 Bq/m^3 , kar je majhen delež v primerjavi s celotno koncentracijo radona v bivalnih prostorih [29].

Les, opeka, beton, omet, steklo in keramične ploščice so najbolj pogosti gradbeni materiali, ki jih najdemo v vsaki stavbi. Izvor radona teh materialov je v količini radija surovin, ki se uporabljajo za njih. Gradbeni material je drugi najpomembnejši vir radona v bivalnem okolju, vendar je njihov prispevek v večini majhen. Večje koncentracije se lahko pojavijo pri starejših stavbah ali pri uporabi gradbenega materiala, ki je sestavljen iz recikliranih produktov elektrofiltrskega pepela, premoga, sadre in nekaterih žlinder [31].

V Preglednici 1 so navedene tipične in maksimalne koncentracije radona $[\text{Bq/kg}]$, ki jih najdemo v pogosto uporabljenih gradbenih materialih [32].

Preglednica 1: Koncentracije radona v gradbenih materialih $[\text{Bq/kg}]$ [32].

Table 1: Radon concentrations in building materials $[\text{Bq/kg}]$ [32].

Material	Tipična koncentracija ^{226}Ra $[\text{Bq/kg}]$	Maksimalna koncentracija ^{226}Ra $[\text{Bq/kg}]$
Beton	40	240
Lahki beton	60	2600
Glinena opeka	50	200
Peščeno-apnenčasta opeka	10	25
Naravni gradbeni kamen	60	500
Naravni mavec	10	70

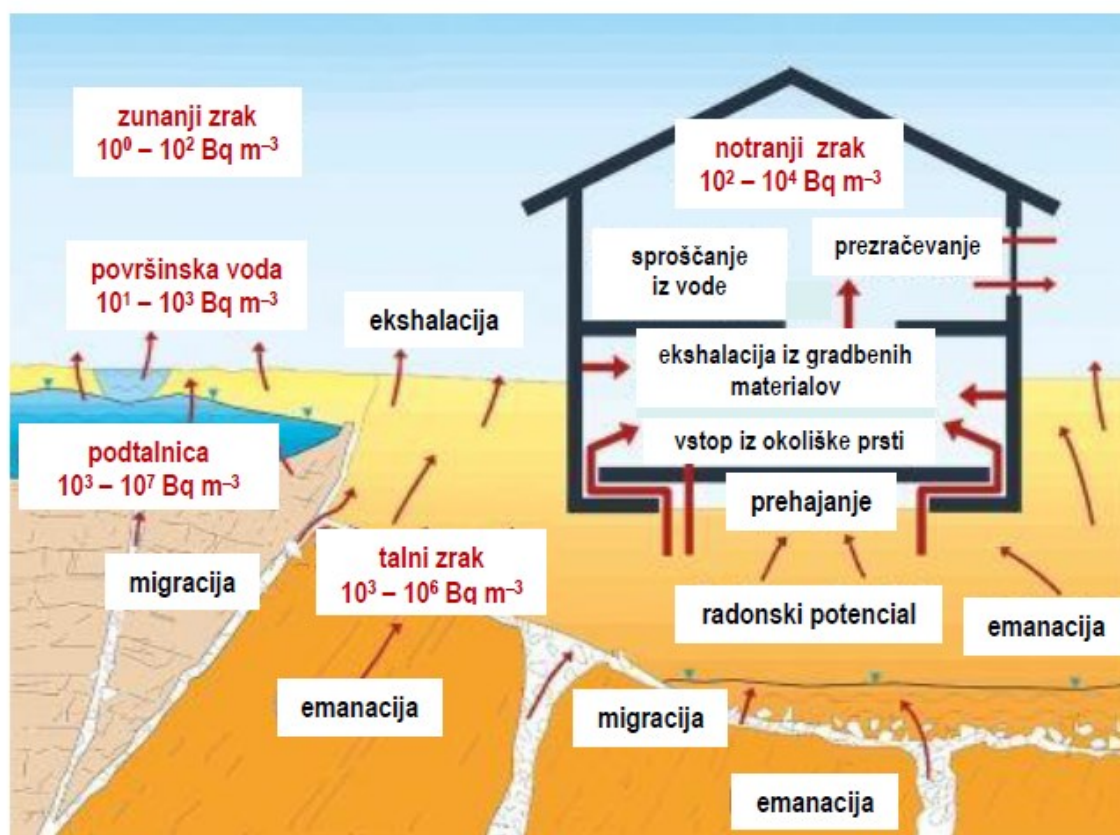
Glavni vir radona v notranjem okolju predstavlja zemljina pod objektom. Koncentracija v zaprtem prostoru je tako odvisna od količine urana v zemljini pod stavbo, možnosti poti radona iz zemljine do bivalnega prostora ter stopnji prezračevanja (to je odvisno od konstrukcije stavbe, uporabnikov in zrakotesnosti stavbe) [2], [5]. Svetovna povprečna koncentracija radija (Ra-226) v zemeljski skorji je približno 40 Bq/kg [32].

2.3.3.2 Dejavniki, ki vplivajo na koncentracije radona v notranjem okolju

Dejavniki, ki vplivajo na koncentracije radona v prostoru so [2], [3], [72]:

- geološki dejavniki (geološke značilnosti terena, koncentracija urana v tleh),
- meteorološki dejavniki,
- način, tip in kakovost gradnje (vgrajeni materiali, zrakotesnost, podkletenost, število nadstropij, razpoke in špranje, jaški),
- režimi prezračevanja prostorov in bivalne navade uporabnika.

Radon vstopa v stavbo na različne načine, kot prikazuje Slika 2. Največ ga vstopi skozi špranje in razpoke talne konstrukcije stavbe, ki meji na zemljino. Prav tako lahko potuje skozi pore v zidu ali špranje, ki nastajajo zaradi prebojev kablov, cevi in vijakov.



Slika 2: Prehod radona [2], [4].

Figure 2: The transport of radon [2], [4].

Kot je bilo omenjeno, predstavlja glavni vir radona v notranjem okolju zemljina pod stavbo. V stavbah grajenih na terenu z visoko koncentracijo urana in radija v tleh, lahko pričakujemo višje koncentracije radona v notranjih prostorih. Povprečna koncentracija radona v notranjem okolju bo pričakovano višja v stavbah grajenih na karbonatnih kamninah, ki imajo zaradi razpok in podzemnih jam visoko prepustnost [2], [19].

Koncentracija radona v notranjem okolju se spreminja dnevno in z letnimi časi, prav tako kot se spreminja koncentracija radona v zunanjem zraku in tleh. Med meteorološke dejavnike, ki vplivajo na koncentracije radona spada temperaturna razlika med notranjo temperaturo v prostoru ter zunanjo temperaturo tal, zračni tlak in smer vetra [2], [3].

Na privetni strani stavbe se ob pihanju vetra ustvarja zračni nadtlak. S tem je onesnaženemu zraku omogočen vstop v kletne prostore stavbe. Na zavetrni strani stavbe se tvori podtlak, ki pospešuje izhajanje zraka iz hiše. S tem omogoča, da se notranji zrak nadomesti z zrakom, ki vsebuje radon. Na povišano koncentracijo radona vpliva tudi močno deževje. Ob tem pojavu pride do zmanjšanja prepustnost tal v okolici stavbe, v primerjavi s prepustnostjo zemljine pod stavbo. To povzroči kratkotrajno zmanjšanje izhajanja radona iz zemlje v okolici in poveča izhajanje radona iz zemlje pod stavbo [3].

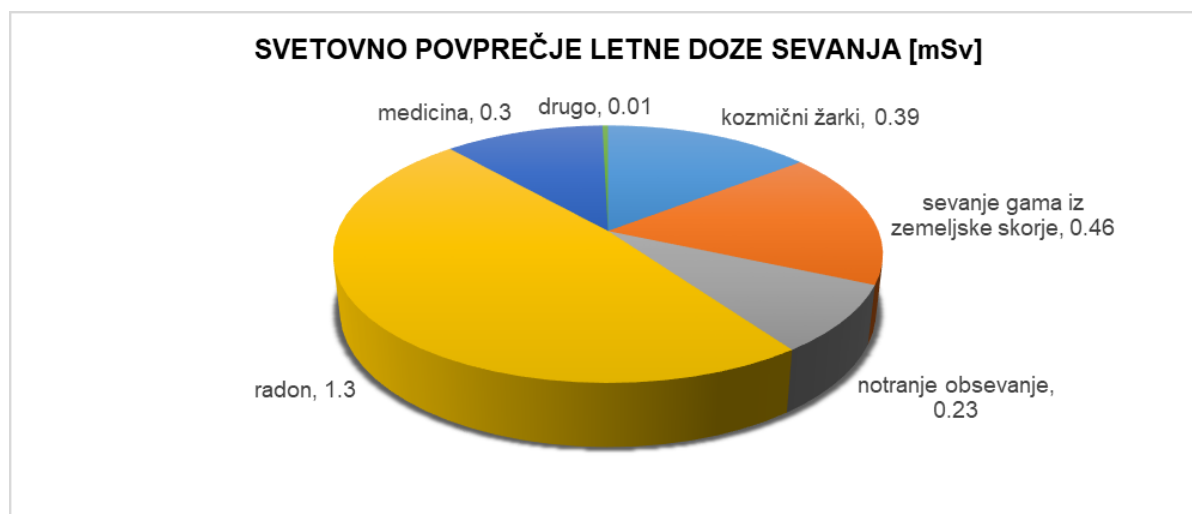
Na koncentracije radona v notranjem okolju vplivajo tudi vgrajeni materiali, zrakotesnost, prisotnost kleti stavbe, število nadstropij, razpoke, špranje, jaški. Koncentracije radona niso enakomerno porazdeljene po stavbi. Po navadi je največja koncentracija v kletih in z višjimi nadstropji pada [2], [4], [5]. Večje koncentracije se lahko pojavijo pri starejših stavbah ali pri uporabi gradbenega materiala, ki je sestavljen iz recikliranih produktov elektrofiltrskega

pepela, premoga, sadre in nekaterih žlinder [31]. Prav tako so večje koncentracije radona prisotne v prostorih novogradenj, ki veljajo za bolj zrakotesne stavbe [2].

Pomemben dejavnik predstavljajo tudi življenjske navade uporabnika stavbe [2], [19]. V splošnem so višje koncentracije radona dosežene v zimskem letnem času, saj takrat prostore zračimo bistveno manj pogosto kot poleti. Prav tako z bolj tesnimi okni pripomoremo k dvigu ravni radona znotraj stavbe [2]. Na raven radona vpliva tudi uporaba prezračevalnih in ogrevalnih naprav. V bolj ogrevanih domovih, kjer je zrak v zaprtih prostorih toplejši in manj gost od zunanjega zraka, pride zaradi razlike v tlaku do vleka in vstopa onesnaženega talnega zraka, bogatega z radonom, v stavbo. Zaradi tega je koncentracija radona v bolj ogrevanih bivalnih prostorih višja [3].

2.3.4 Vpliv radona na zdravje

Vsi smo izpostavljeni raznovrstnim sevanjem (mehansko, elektromagnetno, ionizirajoče). Pri radonu gre za sevanje delcev, zato bi izpostavila t. i. ionizirajoče sevanje, ki obsega sevanje iz naravnih virov, kot so radioaktivna jedra v zemeljski skorji, izhajanje radona iz zemlje, kozmični žarki, radionuklidi v lastnem telesu in tudi umetno sevanje, katerega največji delež predstavlja medicina. Kot prikazuje Slika 3, glavnino vsega sevanja (skoraj 90 %), ki ga človek prejme, predstavlja sevanje iz naravnih virov. Iz umetnih virov prejmemo le dobrih 11 % vsega sevanja. Skupni svetovni letni prispevek doze sevanja je 2,69 mSv⁽³⁾. Radon predstavlja 1,3 mSv (48,3 %) povprečnega svetovnega letnega prispevka [22].

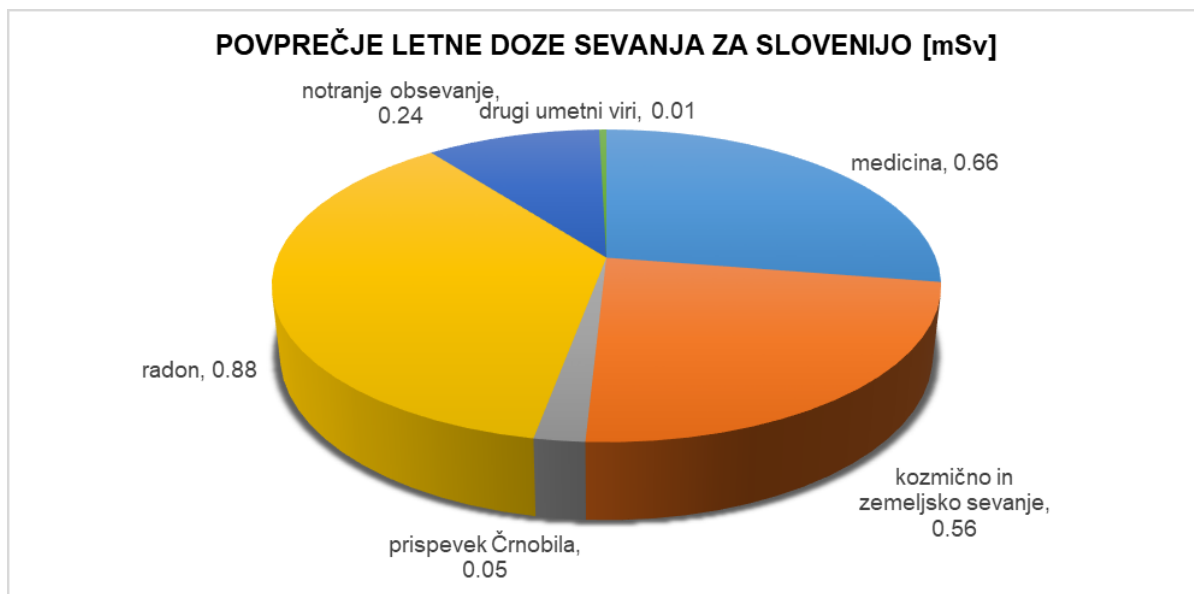


Slika 3: Svetovno povprečje letne doze sevanja [22].

Figure 3: World average annual radiation doses [22].

V Sloveniji meritve zunanjskega sevanja kažejo (Slika 4), da je celotna povprečna letna doza sevanja okrog 2,4 mSv. Od tega radon predstavlja 0,88 mSv (36,7 %) [33].

³ Enota Sv oziroma Sievert je merilo zdravstvenega učinka nizkih ravni ionizirajočega sevanja na človeško telo.



Slika 4: Povprečne letne doze sevanja za Slovenijo [33].

Figure 4: Slovenian average annual radiation doses [33].

Radon v zemeljski skorji nastaja iz radija v razpadni verigi urana [28]. Rezultat preobrazbe je nastanek radonovih kratkoživih produktov, ki se po nevtralizaciji z molekulami zraka pojavijo kot molekularne gruče, ki so po velikosti manjše od 10 nm ali pa se vežejo na aerosolne delce v zraku, ki so v velikosti od 200 nm do 600 nm [2], [9]. Ljudem so škodljivi predvsem aerosoli, ki jih vdihavamo in se usedajo na dihalne poti ter pljučno tkivo. Pri radioaktivnih preobrazbah radona se sprošča energija, ki se absorbira v tkivu in ga poškoduje. To lahko pri dolgotrajni izpostavljenosti privede do rakave okužbe [28].

WHO [5] uvršča radon in njegove RnDP (radonski kratkoživi produkti) kot drugi najpogostejši vzrok pljučnega raka, in sicer takoj za kajenjem, oziroma kot prvi vzrok pljučnega raka pri nekadilcih. Ta povzroči kar med 3 in 14 % vseh diagnosticiranih pljučnih rakov v državi, kar je odvisno od povprečne koncentracije radona in pogostosti kajenja države [5]. Ocenjujejo, da je vsak deseti rak na pljučih posledica radona. Da bi zmanjšali stopnjo pljučnega raka po vsem svetu, je WHO začela mednarodni radonski projekt, s katerim bi državam pomagala povečati ozaveščenost, zbirati podatke in spodbujati ukrepe za zmanjševanje tveganja, povezanega z radonom. EPA (Agencija za varstvo okolja, *ang. Environmental Protection Agency*) [16] ocenjuje, da zaradi pljučnega raka, povezanega z radonom, umre približno 21.000 ljudi letno. Približno 2900 teh smrti se zgodi med nekadilci. Če koncentracije radona, katerim je človek izpostavljen dalj časa, znašajo 148 Bq/m^3 , lahko povzamemo, da za pljučnim rakom zboli 62 ljudi od 1000. Iz tega sledi, da je tveganje za nastanek raka zaradi izpostavljenosti radonu 5-krat večja od tveganja za smrt zaradi prometne nesreče [16].

Največji porast pljučnega raka je bilo najprej zaznati pri rudarjih, ki so bili izpostavljeni visoki koncentraciji radona v svojem delovnem okolju – rudnikih urana [6]. V študiji primera Ruano-Ravina in sod. [35], kjer so sodelovale vse bolnišnice v španski provinci Galicija in ena iz Asturije, so na podlagi odvzema krvi in meritev koncentracij radona v domovih 79 pacientov poročali o koncentracijah radona v stanovanjih nekadilcev. Prišli so do rezultata, da je bila povprečna koncentracija radona v stanovanjih 237 Bq/m^3 . Posebne povezave med koncentracijo radona in spolom ter starostjo stanovalcev ni bilo. Opaziti je bilo povezavo med višjimi koncentracijami radona in diagnosticiranim majhnoceličnim in velikoceličnim

karcinomom. V Združenem kraljestvu je študija Gray in sod. [36] pokazala, da je približno 1100 smrti letno povezanih z izpostavljenostjo radonu. Študija je temeljila na epidemioloških podatkih o tveganju za nastanek pljučnega raka zaradi radona v notranjem prostoru in kajenja.

Jing Chen je v svoji študiji [37] z uporabo podatkov iz številnih radonskih raziskav ocenil, da so povprečne koncentracije radona v kanadskih domovih 3-krat višje kot v šolah, 4,7-krat višje kot v javnih zgradbah in notranjih delovnih okoljih ter 12-krat višje kot koncentracije radona v zunanjem zraku. Kanadska statistika kaže, da večina prebivalcev 70 % svojega časa preživi doma, 20 % v zaprtih prostorih in 10 % na prostem. Zaradi relativno visoke koncentracije radona v stanovanjih in časa, ki ga ljudje preživijo doma v zaprtih prostorih, izpostavljenost radonu prispeva k 90 % večjemu tveganju za nastanek pljučnega raka. Glede na različne modele tveganja obolenja za pljučnim rakom, je prišel tudi do rezultatov, da je pri moških 13 % smrti zaradi pljučnega raka povzročenih zaradi dolgotrajne izpostavljenosti radonu v zaprtih prostorih. Pri ženskah je ta delež za 1 % višji.

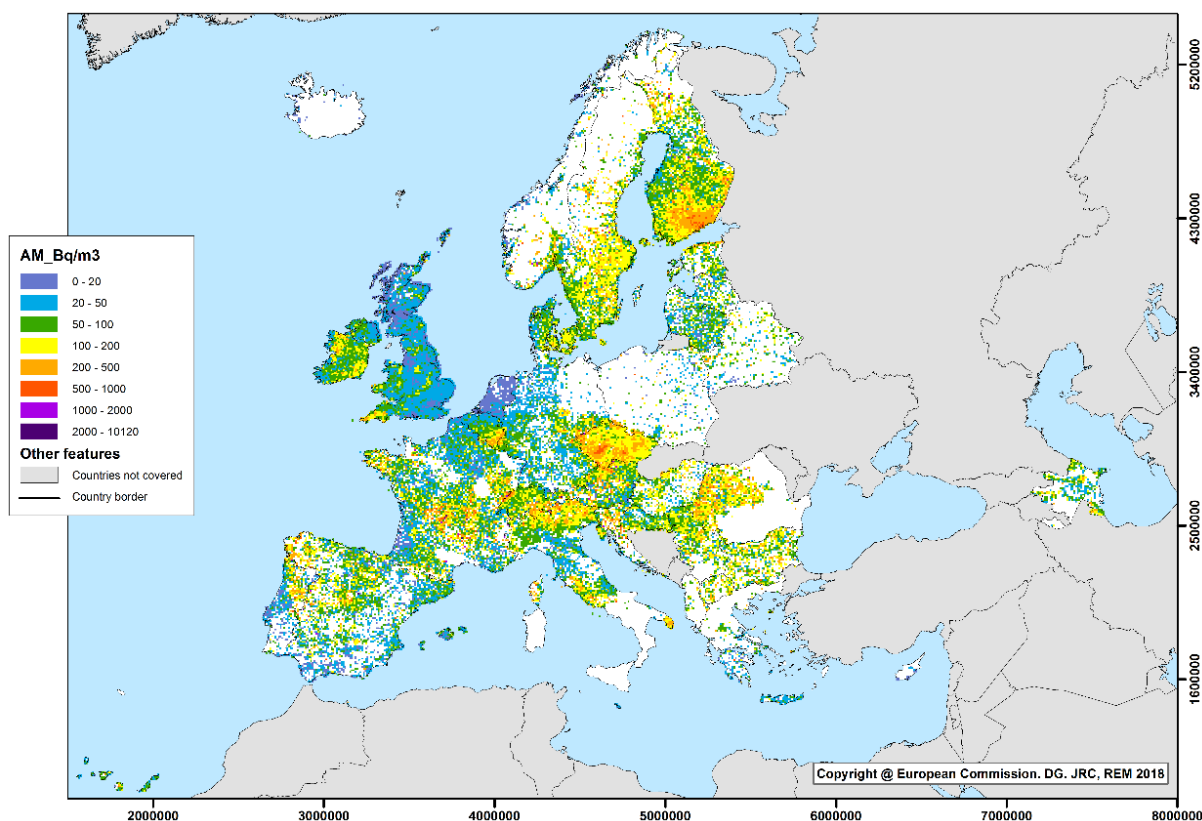
Tveganje za obolenje pljučnega raka se povečuje za 16 % na 100 Bq/m³ večanja povprečne koncentracije radona [5], [76]. Torej, tveganje narašča proporcionalno z naraščanjem izpostavljenosti radonu [5].

Svetnik z Uprave RS za varstvo pred sevanji, dr. Tomaž Šutej, je v okviru posveta o radonu v stavbah, ki je potekal oktobra 2019, izpostavil, da v Sloveniji letno zaradi radona umre od 90 do 180 ljudi. Temu so bolj izpostavljeni kadilci, med katerimi jih zaradi posledic izpostavljenosti radonu umre med 70 in 130, medtem ko med nekadilci umre 20 do 50 ljudi. Za primerjavo navaja, da v prometnih nesrečah umre med 90 in 150 ljudi letno, za pljučnim rakom pa okoli 1300 ljudi letno [70].

3 RADON V SLOVENIJI

Povezava med radonom in njegovimi razpadlimi produkti ter tveganjem za zdravje pri ljudeh je bila izpostavljena že leta 1920, ko sta Lorensen in Ludvig, in nekaj let kasneje tudi Behounek, na podlagi opažanj umrljivosti med rudarji od leta 1500 dalje ugotovila, da je radon odločilen dejavnik pri povečanju umrljivosti zaradi pljučnih bolezni [25]. Povezava med radonom, prisotnim v rudnikih in jamah, ter pljučnim rakom pri rudarjih je bila leta 1950 tudi potrjena z različnimi epidemiološkimi študijami, ki so bile izvedene pri ameriških, češko-slovaških in kanadskih rudarjih, ki so delali v rudnikih urana [50], [51], [46]. Prav tako so se prve meritve v Sloveniji začele odvijati v rudnikih urana, kasneje v kraških jamah ter nazadnje v zaprtih bivalnih in delovnih prostorih. Prve meritve v notranjem okolju so bile opravljene v letih 1985 in 1986. Obsegale so 10 do 30 domov v šestih urbanih in delovnih okoljih. Izvajale so se spomladi, jeseni in pozimi. Meritve niso bile obsežne, saj so bile izvedene le za prepoznavanje problematike pri nas in za določanje osnove za pripravo nadaljnjega programa zmanjševanja koncentracij radona v zaprtih prostorih [13].

Slovenski radonski program se je začel odvijati leta 1990. Od takrat do začetka 21. stoletja so bile koncentracije radona in njegovih kratkoživih produktih izmerjene v 730 vrtcih, 890 šolah, 1000 naključnih domovih, 5 večjih zdraviliščih, 26 večjih bolnišnicah, 10 vodovodih in 8 vinskih kletah [13]. Meritve so bile osnova za izdelavo karte radona za vrtce in šole, domove ter za in zunanji [18] in talni [45] zrak. Evropska komisija pripravlja radonski atlas v katerem je vključena tudi Slovenija. Ta je prikazan na Sliki 5.



Slika 5: Evropska karta radona s povprečnimi koncentracijami radona v domovih [27].

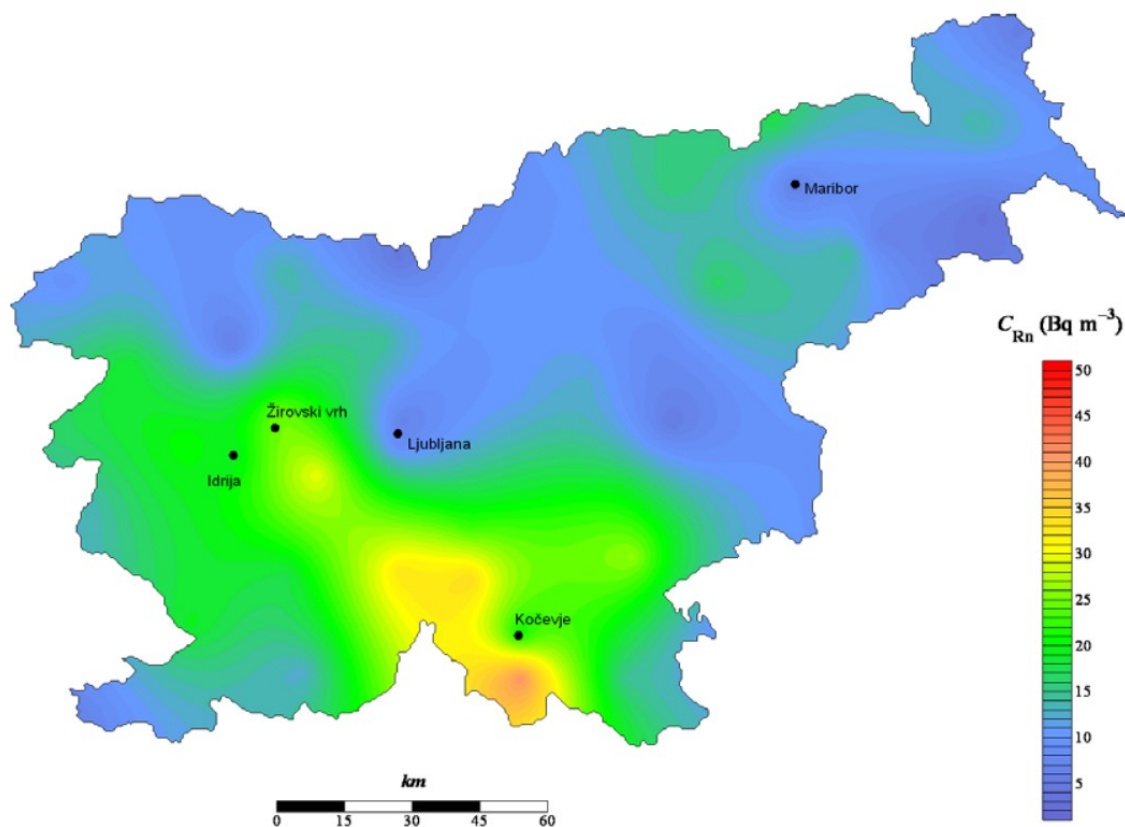
Figure 5: European map of radon with average radon concentrations in homes [27].

Nacionalna raziskava, opravljena med letoma 2011 in 2012, navaja, da so povprečne koncentracije radona v prostorih v hladnem obdobju 340 Bq/m^3 , v toplem obdobju pa 158 Bq/m^3 . Najvišje povprečne koncentracije so bile izmerjene nad karbonatnimi tlemi in so znašale 404 Bq/m^3 . Z ustrezno gradnjo ali sanacijo lahko dosežemo nižje vrednosti v prostorih. Zakonsko predpisana koncentracija v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb – Priloga 1, tabela 7 (Ur.l.RS št. 42/02) [38] znaša 400 Bq/m^3 . Priporočena vrednost je 200 Bq/m^3 . V letu 2018 je začela veljati tudi Uredba o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48], ki podaja referenčno raven povprečne letne koncentracije radona v zaprtih bivalnih in delovnih prostorih, katera znaša 300 Bq/m^3 . Priporočena vrednost koncentracij radona v prostoru, ki je določena s strani WHO, znaša 100 Bq/m^3 (včasih 300 Bq/m^3 za posamezno državo) in je definirana tudi v standardu SIST EN 16798-1:2019 [49].

V obdobju od 2006 do 2017 je bilo z detektorji sledi v 487 objektih opravljenih 1102 meritev koncentracij radona. 912 meritev je bilo opravljenih v 480 šolah in vrtcih, 169 meritev v 49 javnih stavbah ter 21 meritev v 12 stanovanjih. Rezultati so pokazali, da je bila v kar 33 % vseh izbranih objektov izmerjena koncentracija radona višja od 300 Bq/m^3 [73].

3.1 Radon v zunanjem zraku

Zunanje koncentracije radona v splošnem niso problem, saj se nivo koncentracije v povprečju giblje med 5 in 15 Bq/m^3 . Koncentracije radona v zunanjem zraku za Slovenijo prikazuje Slika 6. Večje koncentracije se nahajajo znotraj stavbe, kjer so te med 10 in več kot 10000 Bq/m^3 [5].



Slika 6: Radon v zunanjem zraku v Sloveniji [34].

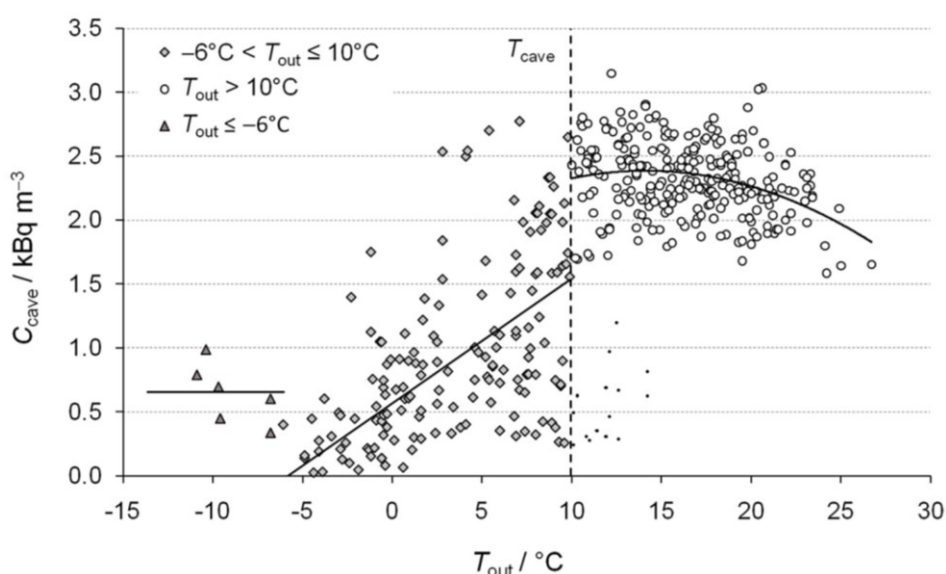
Figure 6: Radon in Slovenian outdoor air [34].

3.2 Radon v rudnikih

Prve meritve radona na območju Slovenije so bile leta 1969 opravljene s strani Instituta Jožef Stefan, in sicer v rudniku urana na Žirovskem vrhu [13]. Kasneje so se izvedle tudi meritve v Mežici ter Idriji [14].

3.3 Radon v kraških jamah

Drugi sklop meritev se je izvajal v slovenskih kraških jamah. Leta 1978 so se opravljale prve meritve v Postojnski jami in v Škocjanskih jamah. Sedem let kasneje so sledile meritve še v ostalih turističnih jamah po Sloveniji. Poleg turističnih kraških jam so bile koncentracije radona preverjene tudi v 26 drugih jamah. Ugotovljeno je bilo, da je imela Postojnska jama v tistem času v vseh kontroliranih točkah koncentracije radona nad 1000 Bq/m^3 , medtem ko so bile koncentracije radona v Škocjanskih jamah pod 600 Bq/m^3 . Najnižje koncentracije so bile izmerjene v jamah Pekel in Pivka. Izmed ostalih turističnih jam je najvišje koncentracije radona imela jama Tabor. Tekom daljšega obdobja raziskav v Postojnski jami je bila ugotovljena odvisnost koncentracij radona in zunanje temperature. Temperatura znotraj jame je tekom celega leta približno konstantna, in sicer med 9°C in 10°C . Raziskava je pokazala, da so bile koncentracije radona intenzivno povečane v poletnih mesecih. Prav tako je bilo ugotovljeno, da so v poletnem času koncentracije radona v popoldanskem času za približno dvakrat večje od jutranjih koncentracij [18]. Razlog za nižje koncentracije pozimi je t. i. pojav učinka dimnika, saj je v hladnih mesecih temperatura v jami višja od zunanje temperature. Zaradi temperaturne razlike se ustvari t. i. efekt dimnika, pri katerem zrak zakroži in se skozi vertikalne odprtine in razpoke odvede v zunanost. Poleti je ravno obratno, saj se onesnažen zrak kopiči znotraj jame. Iz grafičnega prikaza na Sliki 7 je razvidno, da povprečne koncentracije radona linearno naraščajo med -6°C ter 10°C . Na točki, kjer je temperatura v notranjosti jame in v zunanosti enaka, torej 10°C , povprečne koncentracije radona naenkrat narastejo [34], [44]. Od leta 1995 je v Postojnski jami vzpostavljen konstantni monitoring koncentracij radona.

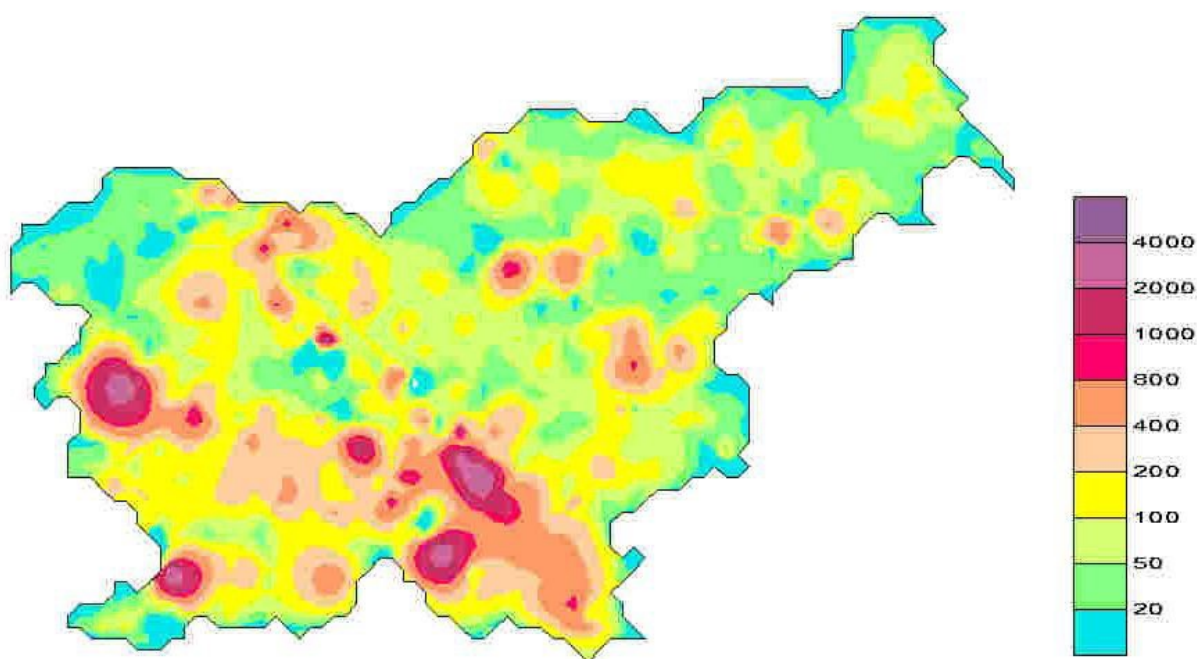


Slika 7: Odvisnosti med zunanjo temperaturo in koncentracijami radona znotraj Postojnske jame [44].

Figure 7: Relationship between the outdoor temperature and radon concentrations in the Postojnska Cave [44].

3.4 Radon v šolah in vrtcih

Strokovnjaki Instituta Jožef Stefan so v okviru Nacionalnega radonskega programa Slovenije med letoma 1990 in 1994 opravili prve sistematske meritve koncentracij radona v 730 vrtcih in 890 šolah po Sloveniji. Ugotovili so, da ima 72 % vrtcev in 67 % šol koncentracijo radona v notranjem okolju nižjo od 100 Bq/m^3 . Iz tega je sledilo, da 45 vrtcev (6,2 %) in 78 šol (9,0 %) presega mejno vrednost 400 Bq/m^3 . Kot je razvidno iz karte radona na Sliki 8, pride do najvišjih koncentracij v južnem in jugozahodnem delu Slovenije (območje Novega mesta, Kočevja, Idrije in Sežane), kjer izstopajo kraške značilnosti narave. Razlogi so lokalna sestava tal, njena visoka prepustnost in tip tal ter kemične sestave zemljine (vsebnost urana). Koncentracije radona v severo-vzhodnem delu Slovenije so nižje, saj vodno nasičene glinene plasti sedimentnih plasti preprečujejo gibanje zemeljskega plina, ki vsebuje radon.



Slika 8: Koncentracije radona v prostorih vrtcev in šol [Bq/m^3] [13].

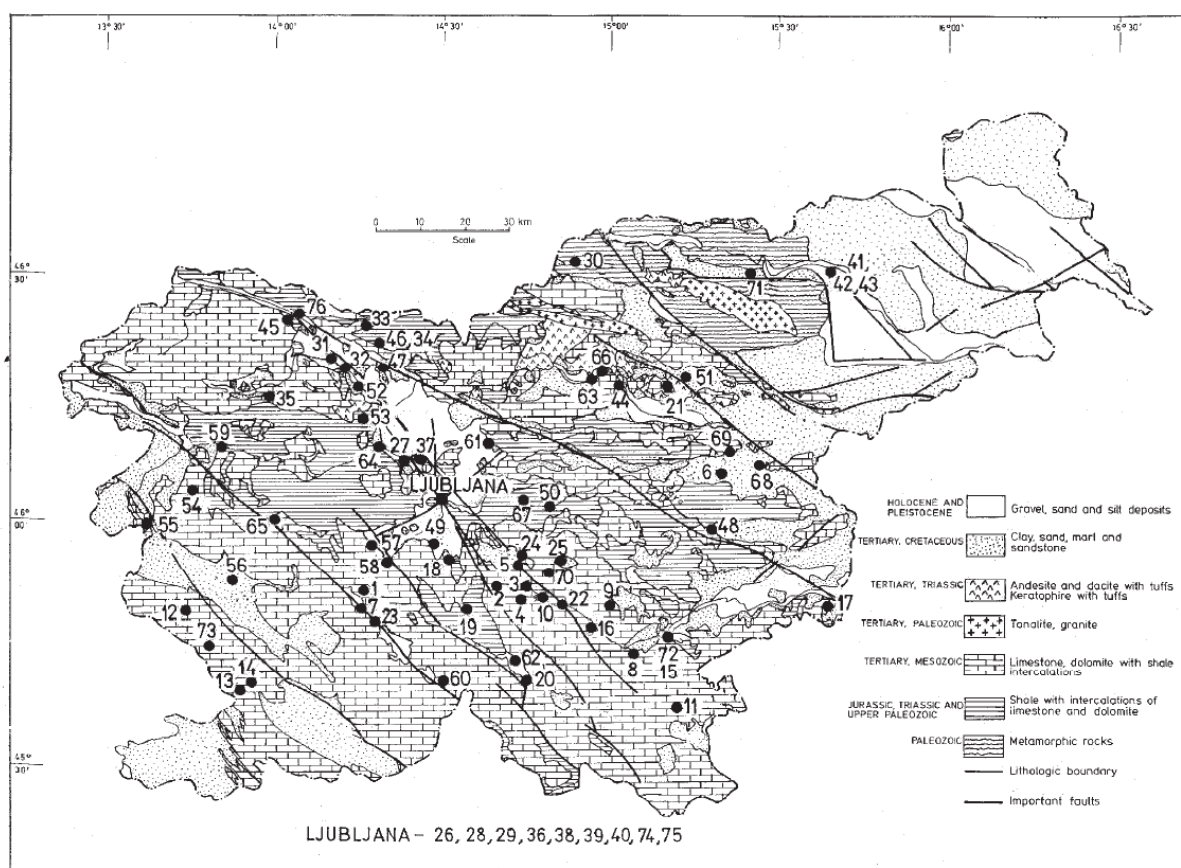
Figure 8: Radon concentrations in kindergartens and schools [Bq/m^3] [13].

Izpostaviti je potrebno tudi najvišje izmerjene koncentracije radona, ki so v vrtcu znašale 5600 Bq/m^3 , v šoli pa 4680 Bq/m^3 . Ugotovljeno je bilo tudi, da so koncentracije narastle tekom delovnega časa. Nad 400 Bq/m^3 so bile izmerjene v 44,5 % vrtcev in 41 % šol [13].

Nadaljnje študije vrtcev in šol z najvišjimi koncentracijami radona in RnDP Popitove in Vaupotičeve [19] so pokazale povezavo med koncentracijami in sestavo tal, na katerih so grajeni objekti (Slika 9). Povprečne letne koncentracije radona v zaprtih prostorih med 400 Bq/m^3 in 600 Bq/m^3 so se pojavile v objektih, ki stojijo na tleh iz kremenovih peščenjakov, fliša ter glinastem kamnu z vmesnimi plastmi tufa. Koncentracije med 600 Bq/m^3 in 1000 Bq/m^3 so bile v vrtcih in šolah, lociranih na ledeniških sedimentih ter klastičnih kamninah. V objektih zgrajenih na karbonskih kamninah so koncentracije znotraj prostora presegle 1000 Bq/m^3 . V vseh primerih je bil prisoten kraški apnenec. Do ugotovitve, da so koncentracije za približno

dvakrat nižje v domovih grajenih na flišu od tistih grajenih na karbonatih, je prišel tudi Leban [2] v svoji diplomski nalogi.

V 89 % stavb je bila kot gradbeni material uporabljena glinena opeka. Zaradi vgrajenega materiala v stavbah meritve niso pokazale povišanih ravni. Glede na starost stavbe, so se višje ravni radona pojavile v stavbah starejših od 50 let. To povezujemo s slabšo kvaliteto gradnje. Po drugi strani, povišane ravni radona v stavbah mlajših od 50 let povezujemo z litološkimi značilnostmi temeljnih tal. Tako je bilo ugotovljeno, da so povišane koncentracije prisotne v zaprtih prostorih stavbe na Pohorju, katerega sestavljajo magmatske in metamorfne kamnine ter na območju Ljubljane, kjer najdemo kvartarne sedimente. Povišane koncentracije so bile opazne tudi v stavbah, ki ležijo na tektonski prelomnici, saj prelomi in razpoke omogočajo lažji prehod radona [19].



Slika 9: Geologija Slovenije [19].

Figure 9: Geology of Slovenia [19].

Zadnje poročilo Zavoda za varstvo [73] pri delu podaja rezultate 154 meritev koncentracije radona, ki so bile opravljene v letu 2017, katerih naročnik je Uprava RS za varstvo pred sevanji. V 96 šolah in vrtcih je bilo postavljenih 135 detektorjev sledi. V 43 prostorih je bila izmerjena koncentracija radona višja od 400 Bq/m^3 . V 8 prostorih je bila izmerjena koncentracija med 300 in 400 Bq/m^3 . V ostalih 84 prostorih so bile koncentracije nižje od 300 Bq/m^3 . V obdobju med letoma 2006 in 2017 je bilo v 480 šolah in vrtcih opravljenih 912 meritev. Med njimi so bile koncentracije radona, višje od 300 Bq/m^3 , izmerjene v 120 šolah in vrtcih [73].

3.5 Radon v domovih

Leta 1994 so bile izvedene meritve v 1000 naključno izbranih slovenskih domovih. Vrednosti koncentracij radona so se gibale med 7 Bq/m^3 in 1890 Bq/m^3 . V 4,5 % primerov je bila raven večja od priporočljive, ki znaša 400 Bq/m^3 [13]. Raziskava, ki obsega 400 slovenskih domov, je potekala med novembrom 2011 in oktobrom 2012. Takrat so bile koncentracije v hladnejšem obdobju leta med 19 do 8616 Bq/m^3 , v toplejšem delu leta pa med 17 in 4196 Bq/m^3 [2]. Iz tega je razvidno, da so bile koncentracije radona v domovih v zimskem času okoli dvakrat višje kot v poletnem času. Leban [2] v svoji diplomski nalogi navaja, da sta razloga bivalne navade uporabnikov stavb in vreme. V zimskem času bistveno manj pogosto prezračujemo prostore kot v poletnem času. Z manjšim prezračevanjem omogočimo kopičenje radona v zaprtih prostorih, medtem ko v poletnem času koncentracijo radona nižamo z bolj pogostim prezračevanjem. Za približno 50% nižjo povprečno letno koncentracijo radona najdemo v stavbah s srednje pogostim prezračevanjem prostorov. Prav tako so rezultati pokazali, da so povprečne letne koncentracije radona za približno dvakrat manjše v domovih, grajenih na flišu, v primerjavi z domovi, grajenimi na karbonatih. V raziskavi ni bilo ugotovljene bistvene povezave med koncentracijo radona in starostjo stavbe. Opaženo je bilo, da se višja raven radona pojavi v kletih. Tam je okoli 25 % višja od ravni, izmerjene v pritličju stavbe. Vzrok za povišanje koncentracij radona v bivalnih prostorih je tudi tesnjenje stavbe. Danes so te bistveno bolj zrakotesne kot nekoč. Pričakovano bi bilo, da imajo stavbe z novejšim vgrajenim stavbnim pohištvom višje koncentracije radona kot stavbe z okni starimi deset ali več let, vendar so rezultati raziskave pokazali ravno obratno. Leban [2] to pripisuje številnim drugim dejavnikom, ki vplivajo na raven radona, kot na primer drugačne bivalne navade, izbira temeljnih tal in ustrezna uporaba izolacije temeljne plošče. Glede na to, da se gradnja z leti izboljšuje, je pričakovano, da bodo koncentracije radona čedalje manjše. Rezultati raziskave so pokazali, da najvišje koncentracije radona najdemo ravno v domovih, ki so bili zgrajeni med letoma 2000 in 2010. Morebiten razlog je v tem, da se ljudje premalo zavedajo nevarnosti visokih ravni radona. Prav tako so današnje hiše bolj zrakotesne zaradi tesnejšega stavbnega pohištva in posledično manj pogosto prezračene [2]. Načrtovalcem novih zgradb je iskanje kompromisa med energetske učinkovito in zdravo stavbo lahko pravi izziv. Pri tem je potrebno vedno paziti, da se zagotovi optimalna kakovost notranjega okolja.

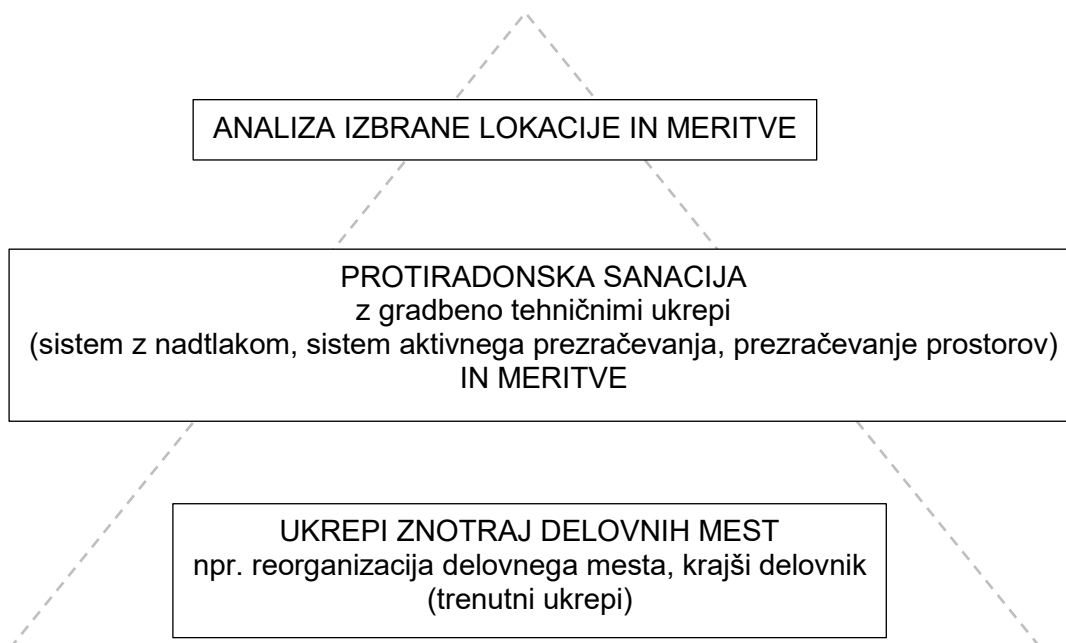
V sklopu programa Zavod za varstvo pri delu [43], v sodelovanju z Ministrstvom za zdravje, se izvaja projekt brezplačnih preventivnih meritev radona v domovih na območjih občin, ki so prepoznane kot območja z več radona. Ker je povpraševanje veliko, so 1 – 2 mesečne brezplačne meritve na voljo tudi v letu 2019.

3.6 Radon v bolnišnicah

Konstantne mesečne meritve radona v 186 sobah v 26 večjih bolnišnicah so pokazale, da so ravni radona precej nizke. Višjim koncentracijam so bili izpostavljeni le v sedmih sobah, kjer je bila v enem primeru izmerjena raven celo 15000 Bq/m^3 . Bolniki in zaposleni so bili vse leto izpostavljeni sevanjem med 2,1 in $7,3 \text{ mSv}$ [13]. Najnovejši rezultati meritev iz leta 2017 kažejo, da so bile koncentracije radona višje od 1000 Bq/m^3 izmerjene v dveh zdravstvenih domovih (Loški potok in Ribnica) izmed 8 javnih stavb. V petih prostorih so bile koncentracije nižje od 1000 Bq/m^3 , vendar višje od 300 Bq/m^3 . V ostalih 7 prostorih so bile koncentracije nižje od 300 Bq/m^3 [73].

4 UKREPI ZA ZMANJŠEVANJE KONCENTRACIJ RADONA

Za Slovenijo so podane Smernice za gradnjo radonsko varnih novih stavb novogradenj [76]. Izdelane so bile leta 2017 s strani Uprave Republike Slovenije za varstvo pred sevanji ter z Zavodom za gradbeništvo Slovenije. Slika 10 prikazuje hierarhijo ukrepov za zmanjševanje koncentracij radona v prostorih.



Slika 10: Ukrepi za zmanjševanje radona v prostoru.

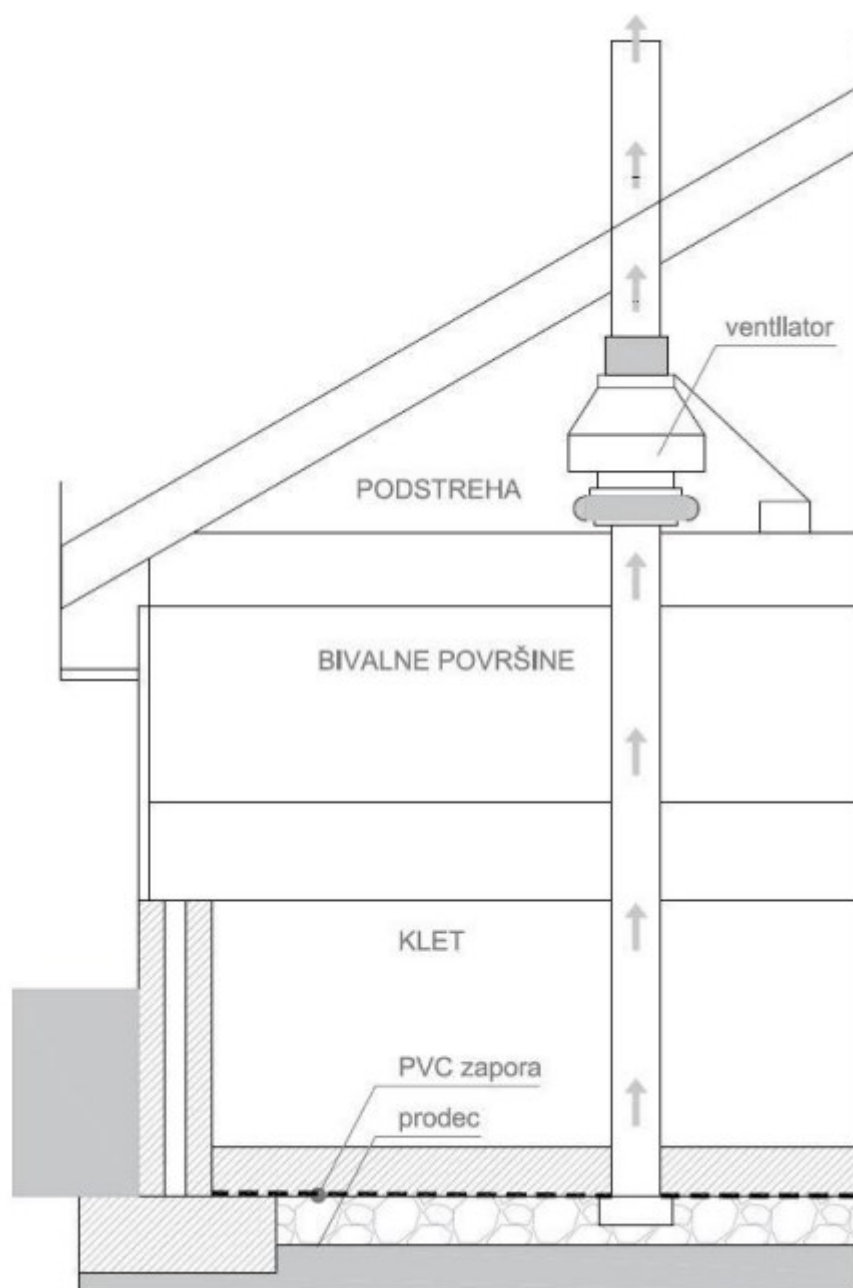
Figure 10: Radon reduction measures.

V prvi vrsti je ključnega pomena sistematično pregledovanje in izvajanje meritev radona, ki ga v Sloveniji zagotavlja Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji. Ukrepi za zmanjšanje koncentracij radona načeloma niso potrebni v stavbah, kjer koncentracije radona ne presegajo 300 Bq/m^3 [75]. Ukrepi za zmanjševanje izpostavljenosti delavcev lahko obsegajo reorganizacijo delovnih mest in prilagojen delovni čas. Če so potrebni večji posegi v samo konstrukcijo, mora to zagotoviti lastnik objekta. V primeru vzgojno-varstvenih, kulturnih, zdravstvenih ali izobraževalnih ustanov izvedbo posegov za zmanjševanje izpostavljenosti zagotovi država. Za vzgojno izobraževalne ustanove so izdana Navodila v primeru zaznanih povečanih koncentracij radona v stavbah [75], ki so bila izdelana s strani Ministrstva za izobraževanje, znanost in šport v sodelovanju z Zavodom za gradbeništvo Slovenije. V primeru novogradenj je potrebno zagotoviti, da so načrtovane in grajene tako, da v njih koncentracije radona ne presegajo referenčne ravni 300 Bq/m^3 [48], [75].

V nadaljevanju so predstavljeni možni ukrepi za zmanjševanje koncentracij radona v prostoru.

4.1 Vzpostavitev podtlaka pod talno ploščo ali sistem aktivnega prezračevanja zemljine (ASD – "Active Sub-slab depressurization")

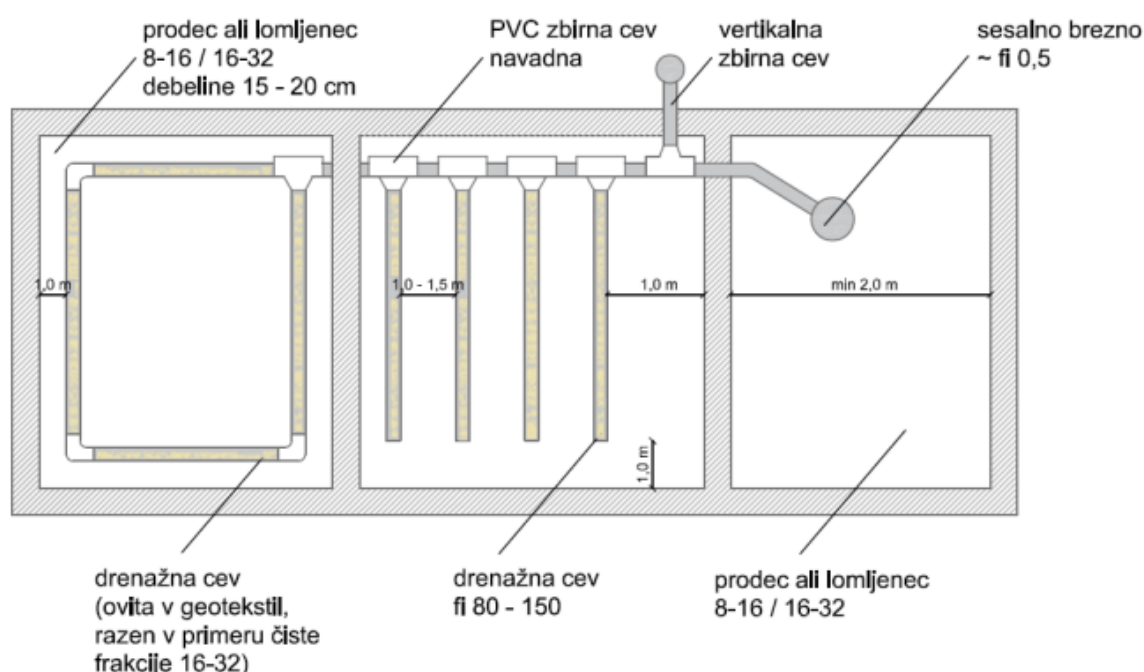
Uprava RS za varstvo pred sevanji je skupaj z Zavodom za gradbeništvo Slovenije leta 2017 izdelala Smernice za gradnjo radonsko varnih novih stavb novogradenj [76]. Kot glavni ukrep protiradonske sanacije navaja prezračevanje zemljine pod talno ploščo. S prisilnim ventilacijskim sistemom prezračujemo prostor pod talno ploščo, kjer se zbira radon (cevi, brezna, kinete). Koncept protiradonskega sistema sestavlja pasivni sistem, ki se glede na rezultate meritev lahko nadgradi z aktivnim sistemom prezračevanja zemljine [76]. Predstavljen je na Sliki 11.



Slika 11: Protiradonski sistem [76].

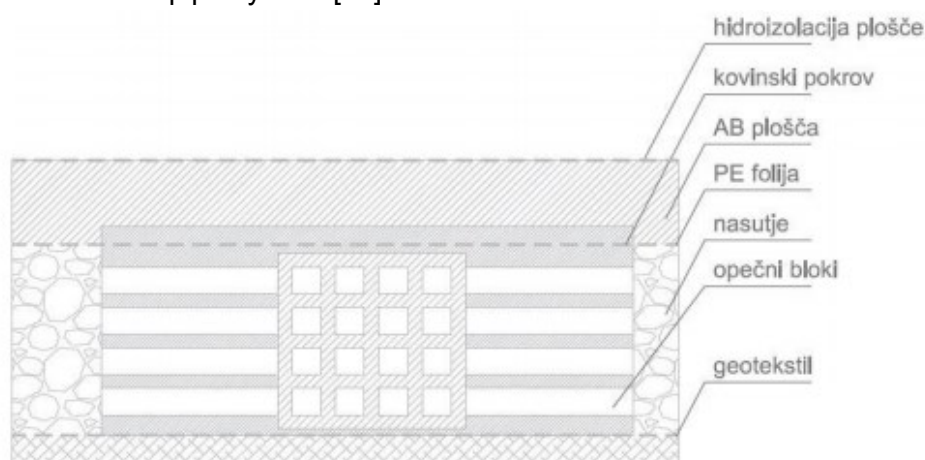
Figure 11: Anti-radon system [76].

Radon se zaradi tlačne razlike po zemljini prenaša s konvekcijo. Osnova protiradonskih ukrepov v stavbi je kontrolirana prepustnost slojev zemljine pod stavbo. Ustvarjen mora biti sloj zemljine z nizko upornostjo, da se radon lažje pretaka, robovi pa morajo biti omejeni z ustrezno radonsko oviro (bitumenska hidroizolacija z aluminijastim vložkom ali PVB folija). Tako lahko radon na neki točki zberemo in ga varno vodimo na prosto. Plast agregata iz prodca ali lomljenca čistih frakcij 8 - 16 mm in 16 - 32 mm pod talno konstrukcijo mora biti za protiradonske sisteme debela minimalno 10 cm oziroma je priporočena med 15 in 20 cm. Debelina je odvisna od sistema in načina zbiranja radona v tleh. Med slojem agregata in temeljno ploščo je potrebno namestiti PE folijo debeline 0,15 mm ali dva sloja PE folije 0,10 mm, ki poleg vdora betona pri vgradnji preprečuje tudi konvekcijsko širjenje radona skozi špranje plošče v notranje prostore. V sloju agregata lahko radon zbiramo v zbirne cevi ali radonska brezna kot prikazujeta Slika 12 in Slika 13.



Slika 12: Radonske zbirne cevi [76].

Figure 12: Radon collector pipe system [76].



Slika 13: Brezno za zbiranje radona [76].

Figure 13: Chasm for radon collection [76].

Radon, ki potuje po ceveh, ali se zbere v radonskih brezni je potrebno odvesti. Za to je potrebno vzpostaviti radonski razvod, ki ga sestavljata glavni horizontalni zborni vod, na katerega se priključujejo zanke ali brezna, ter vertikalni dvižni vod. Vertikalni dvižni vod lahko poteka zunaj ali znotraj stavbe, pri čemer je notranje vodenje voda ugodnejše. V kolikor so cevi speljane po notranjosti stavbe, se je v primeru napake sistema potrebno zavedati morebitnega tveganja. V primeru aktivnih sistemov z vgrajenim ventilatorjem v radonski varni coni, ki je praviloma postavljen na podstrešju, se temu lahko izognemo. V kolikor imamo pasivni sistem lahko pride ob napaki in paku cevi do iztekanja radona v varno cono.

Tesnjenje ni predviden samostojni ukrep za zmanjševanje koncentracij radona v prostoru, saj je glede na izkušnje izvedba le-tega zamudna in pogosto slabo izvedena. Uporablja se lahko le kot dodatni ukrep v kombinaciji s protiradonskim sistemom. Tesnjenje se lahko izvede po obodu talne konstrukcije z izvedbo hidroizolacije ali posebnim slojem, pri čemer se med drugim tesnijo preboji ter cevni razvodi [76], [74].

4.2 Sistem z nadtlakom

Smernica za gradnjo radonsko varnih novih stavb, izdelana na pobudo Uprave RS za varstvo pred sevanji pri Ministrstvu za zdravje RS [76], kot ukrep protiradonske sanacije navaja tudi sistem z nadtlakom. Vzpostavljanje nadtlaka v stavbi preprečuje vdor radona v stavbo, vendar v smernicah ni zajet kot samostojen ukrep, saj na voljo ni dovolj izkušenj. Nadtlak dosežemo, če v prostor dovedemo več zraka kot ga izsesamo iz prostora. Nadtlak lahko pri manjših enostavnih sistemih za enodružinske hiše vzdržujemo s prezračevalnim sistemom, vendar je pri tem potrebno:

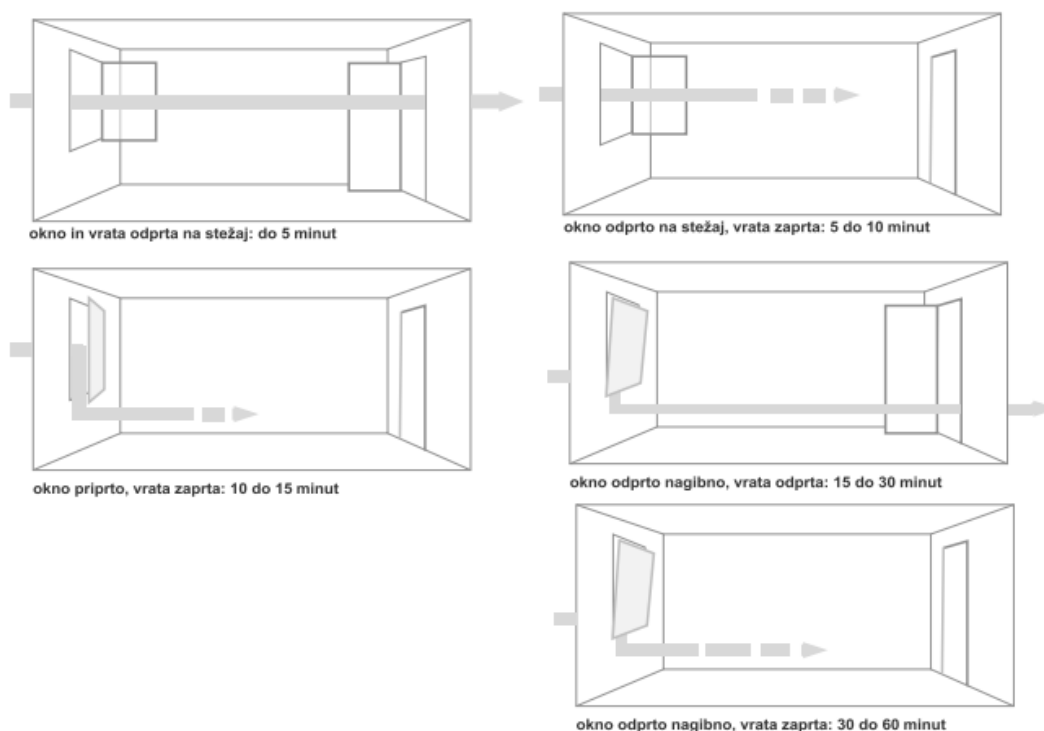
- sistem načrtovati tako, da bodo vsi spodnji prostori v nadtlaku, nekaj pa glede na spodaj ležečo zemljino, s tem, da upoštevamo tudi vzgonski vlek po stavbi,
- se izogibati razvodu cevi pod talno ploščo, saj lahko radon v primeru poškodb prosto vstopa v prostore,
- dobro in trajno tesnjenje vseh prebojev in spojev prezračevalnega sistema,
- imeti dovolj tesno stavbo,
- upoštevati vse ostale predpise,
- zagotavljati zadostno količino svežega zraka,
- zagotavljati redno vzdrževanje sistema [76].

4.3 Prezračevanje prostorov

Prezračevanje prostorov ob povečanju koncentracij radona v notranjih prostorih velja za takojšnji ukrep. Je najbolj enostaven in učinkovit ukrep za zmanjševanje koncentracij radona v prostoru. Zaradi njegovega vpliva na povečanje toplotnih izgub, prepiha, zmanjšanje izolacije pred zunanjim hrupom, varnostnega tveganja in tveganja poškodb objekta v primeru odprtih oken, to ne more biti dolgoročna rešitev stanja. Pomembno je, da se zavedamo, da je prezračevanje zgolj takojšen in trenuten ukrep za zmanjševanje koncentracij radona v prostoru. Vsekakor je v primeru konstantnih visokih koncentracij radona objekt potrebno protiradonsko sanirati in pri tem upoštevati tudi ostale, že navedene ukrepe.

Zagotavljanje zadostne količine svežega zraka tako v bivalnih kot tudi v vzgojno-izobraževalnih objektih je pomembno ne glede na koncentracije. To se lahko zagotavlja z naravnim

prezračevanjem, hibridnimi sistemi ali z mehanskim načinom prezračevanja. Priporočljivo je križno zračenje prostora, pri katerem se zračni tok vzpostavi po celem prostoru. Pri takšnem zračenju je intenzivnost izmenjave zraka reda v velikosti 10 h^{-1} . Iz tega sledi, da za zamenjavo zraka v prostoru zadošča 5 minut zračenja vsako šolsko uro [74]. Različni načini prezračevanja so prikazani na Sliki 14.



Slika 14: Načini prezračevanja [74].

Figure 14: Ventilation modes [74].

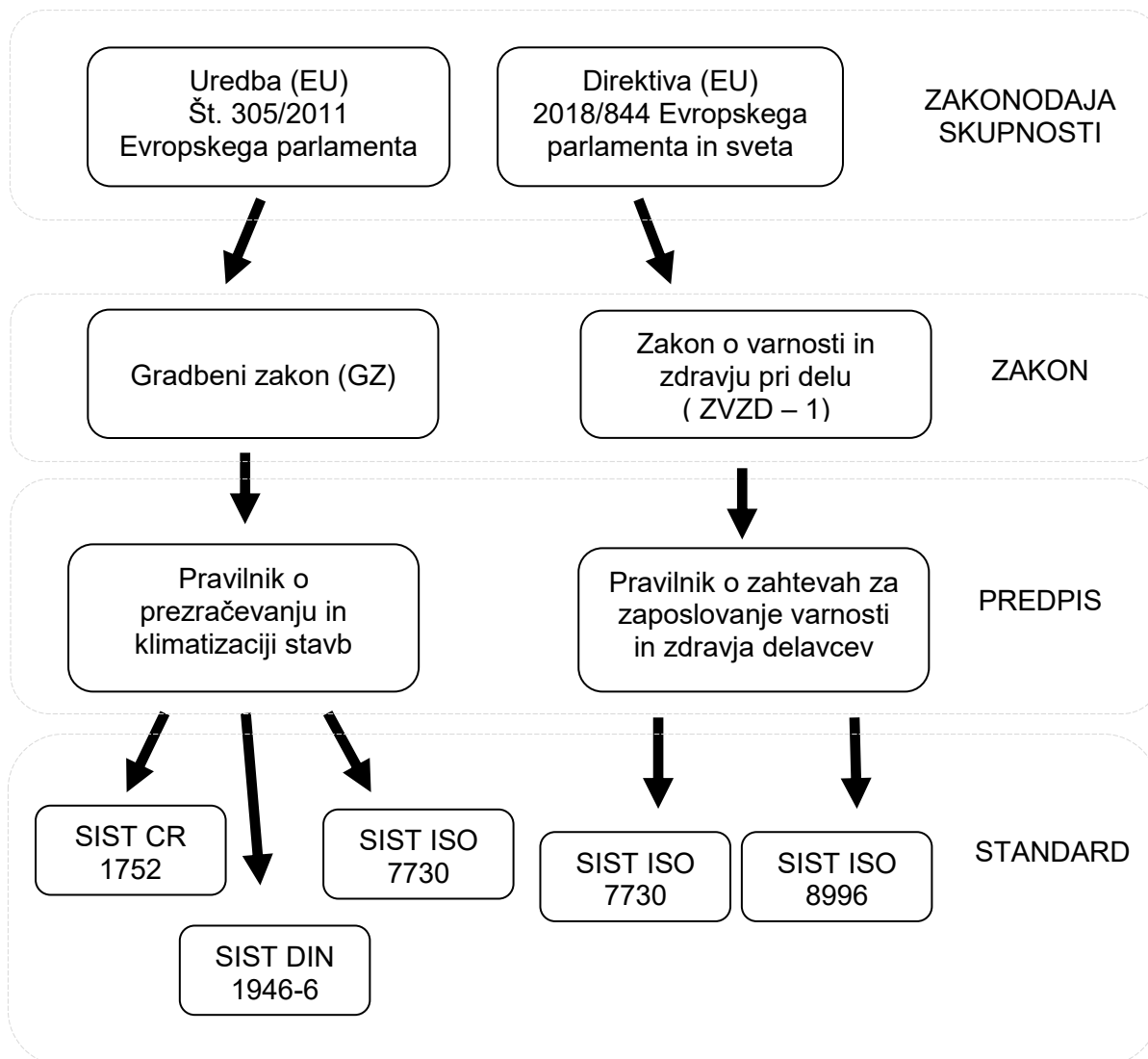
V nadaljevanju magistrske naloge se bomo osredotočili ravno na ta ukrep in ovrednotili vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v prostoru.

Kot primer, povzet po besedah Tomaža Šuteja [70], navajam učinkovito sanacijo enega razreda v šoli, v katerem so učiteljica in 24 učencev. Pred sanacijo so bile vrednosti radona 1000 Bq/m^3 , po izvedeni sanaciji pa so se zmanjšale na 100 Bq/m^3 . Ocenjena letna doza sevanja pred sanacijo je bila $2,7 \text{ mSv}$, po njej pa $0,27 \text{ mSv}$. Iz tega je sledil izračun ocene zdravstvene škode, ki je za 25 oseb znašala 67.500 €/leto . Če se poslužujemo prezračevanja kot ukrep za zmanjševanje koncentracij radona v prostoru, se ta strošek razpolovi, v kolikor objekt ustrezno saniramo pa se strošek zmanjša za vsaj 10-krat. Iz tega sledi, da je strošek sanacije učilnice upravičen tudi pri vsebnosti radona nižji od 1000 Bq/m^3 [70].

5 PREGLED ZAKONODAJE

5.1 Zakonski okvir s področja prezračevanja in klimatizacije stavb

V nadaljevanju so na Sliki 15 predstavljeni mednarodni in nacionalni pravni akti, priporočila in smernice na področju prezračevanja in klimatizacije stavb.



Slika 15: Zakonski okvir na področju prezračevanja in klimatizacije stavb.

Figure 15: Building ventilation and air-conditioning legislation.

Področje prezračevanja stavb v Sloveniji pokriva Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38]. V njem so določene tehnične zahteve za prezračevanje in klimatizacijo stavb ter tehnične zahteve za mehanske prezračevalne sisteme. Pravilnik obravnava notranje okolje z vidika kakovosti zraka ter toplotnega okolja. Sklicuje se na standarde SIST CR 1752, SIST DIN 1946-6 in SIST ISO 7730. Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38] navaja, da mora biti zrak v prostoru svež in prijeten, brez vonjav in ne sme ogrožati zdravja ljudi v prostoru. V fazi projektiranja in gradnje stavbe je potrebno upoštevati, da so viri onesnaževanja notranjega zraka gradbeni materiali, pohištvo,

oprema in prezračevalni sistemi. Če povzamemo, stavba sama sebi predstavlja vir onesnaževanja notranjega zraka. Drugi vir onesnaževanja predstavljajo uporabniki prostora.

Za prostore, kjer kajenje ni dovoljeno in ob neupoštevanju drugih virov onesnaževanja ter pri učinkovitosti onesnaževanja ena, je definiran najmanjši potreben vtok zunanjega zraka, ki znaša $15 \text{ m}^3/\text{h}$ na osebo. V členu 8 [38] je navedena najpogosteje upoštevana minimalna volumska izmenjava zraka, ki znaša $0,5 \text{ h}^{-1}$, in velja v času prisotnosti ljudi v prostorih stavbe, ki so namenjeni delu in bivanju. V času odsotnosti uporabnikov stavbe je potrebno zagotoviti in vzdrževati izmenjavo zraka najmanj $0,2 \text{ h}^{-1}$. S tem zagotovimo, da se iz prostora izločijo vse emisije stavbe ter preprečimo pojav kondenzacije [38].

Količina zunanjega svežega zraka se lahko določi tudi na podlagi talne površine. Ta mora znašati najmanj $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ na kvadratni meter površine tal prostora, pri čemer se ne upošteva drugih virov onesnaževanja zraka [38].

Glede na posamezne prostore v objektih so v prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38] definirane priporočene količine zunanjega zraka za prezračevanje, ki so navedene v Preglednici 2.

Preglednica 2: Količine zunanjega zraka za prezračevanje po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02).

Table 2: Amounts of outside air for ventilation [38].

	Ocenjena največja gostota [ljudi/100 m ²]	Količina zraka [m ³ /h*oseba]
Pisarne	7	35
Igralni prostori	70	45
Učilnica	50	30

Glede na namembnost prostora je v prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38] definirana najmanjša količina zraka za človeka. Vrednosti za izbrane prostore so navedene v Preglednici 3. V Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38] je v Prilogi 1, Tabela 6 navedena tudi najmanjša dodatna količina zraka (za stavbo), ki se razlikuje glede na emisijo stavbe. V primeru posamične pisarne, učilnice ali otroškega vrta za nizko emisijsko stavbo znaša $1,4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ter za nenizko emisijsko stavbo $2,9 \text{ m}^3/\text{hm}^2$.

Preglednica 3: Najmanjša količina zraka za človeka po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02).

Table 3: Minimum amount of air for humans [38].

Namembnost stavbe/prostora	Najmanjša količina zraka (za človeka) [m ³ /hm ²]
Posamična pisarna	1,5
Učilnica	7,2
Otroški vrtec	8,7

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38] v svoji Prilogi 1 ter Tabeli 7 definira tudi dopustne koncentracije notranjih onesnaževalcev zraka, med katerimi je tudi radon. Dopustna koncentracija radona v notranjem zraku znaša 400 Bq/m^3 . To je povprečna letna koncentracija radona v stanovanjskih objektih. Priporočena vrednost koncentracij je 200 Bq/m^3 .

Zahteve za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev, ki jih mora upoštevati delodajalec pri načrtovanju, opremljanju in vzdrževanju delovnih mest, so opredeljene v Pravilniku o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih (Uradni list RS, št. 89/1999) [39]. Določeno je, da mora delodajalec glede na delovne postopke in fizične obremenitve delavca z ustreznimi ukrepi vedno zagotoviti dovolj svežega zraka. Minimalne vrednosti dovedene količine zunanjega zraka, kadar je prostor prezračevan s prezračevalno ali klimatsko napravo in kadar razen prisotnih oseb ni drugih onesnaževalcev, so $20 - 40 \text{ m}^3/\text{h}$ na delavca, ki delo opravlja sede, $40 - 60 \text{ m}^3/\text{h}$ na delavca, ki delo opravlja pretežno stoje, ter več kot $65 \text{ m}^3/\text{h}$ na delavca, ki opravlja težko fizično delo. V kolikor so prisotne dodatne obremenitve zraka z neprijetnimi vonjavami ali cigaretnim dimom, morajo biti zagotovljene dodatne količine svežega zraka.

5.2 Zakonski okvir s področja radona

Izpostavljenost radonu in njegovim kratkoživim produktom doma ter na delovnem mestu predstavlja eno izmed večjih, če ne celo največje tveganje ionizirajočega sevanja. Na letni ravni vodi izpostavljenost tveganju do tisoče smrti, katerih vzrok je obolelost za rakom zaradi izpostavljenosti radonu in še posebej njegovim kratkoživim produktom. Ker radon predstavlja tveganje za naše zdravje, je le-to potrebno omejiti. Da bi dosegli takšen cilj, je pomembno, da se nacionalni organi problema zavedajo in o tem obvestijo javnost, uvedejo zakonodajo in izdajo smernice, katerih cilj je omejiti izpostavljenost radonu, ter sprejeti ukrepe proti radonu, kjer so tveganja velika.

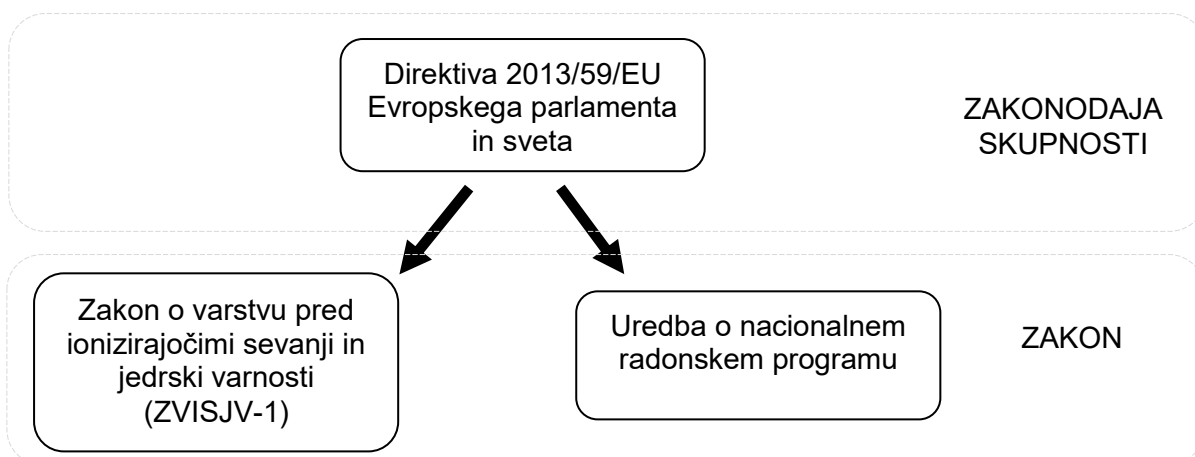
ICRP, WHO in IAEA (Mednarodna agencija za atomsko energijo, ang. *International Atomic Energy Agency*) so le nekatere izmed organizacij, ki so države večkrat spodbujale k oblikovanju programov za radon. Med drugim so jih spodbujale tudi k izdaji nasvetov in mejnih vrednosti oziroma ravni koncentracij radona v domovih, na delovnem mestu ter izdajo smernic za lociranje stavb in uvedbo omejitev koncentracij naravnih radioaktivnih elementov v gradbenih materialih. Mednarodne smernice težijo k zmanjšanju radona pod 100 Bq/m^3 oz. stremijo k zmanjšanju koncentracij radona, če presegajo $100 - 300 \text{ Bq/m}^3$ [5].

Informacije o radonu, priporočila, smernice, direktive in zakonodaja so bile določene tudi v okviru evropskega projekta, imenovanega Evropska raziskava radona v gradbeništvu (ERRICCA). Projekt je prevzel pobudo za pošiljanje vprašalnika vsem članicam EU (Evropske Unije), drugim evropskim državam in izbranim neevropskim državam. Eden izmed ciljev vprašalnika je bil, da pri ljudeh spodbudijo razmišljanje preko primerov in idej, kako radon vpliva na zdravje in kakšna je njegova vloga v gradbeništvu. Hkrati dobijo tudi predstavo o tem, v kolikšni meri so po svetu prišli do vključevanja radona v svojo zakonodajo in uradne direktive ter smernice do konca leta 1998. Med državami, katerim je bil poslan vprašalnik, je svoje odgovore poslala tudi Slovenija, ki do takrat radona ni imela vključenega v nobeno zakonodajo, smernice ali priporočila, a je v tistem času izvajala meritve in nadzirala koncentracije radona.

Slovenija je prvič podala tudi priporočeno mejno vrednost 400 Bq/m^3 , ki velja za nova stanovanja ter vrednost 1000 Bq/m^3 , ki velja za nova delovna mesta [25].

Referenčna vrednost koncentracij radona v notranjem prostoru je bila tako za Slovenijo prvič definirana v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38], ki ima definirano dopustno povprečno letno koncentracijo radona v stanovanjskih objektih 400 Bq/m^3 . Priporočena vrednost je 200 Bq/m^3 .

V nadaljevanju so na Sliki 16 predstavljeni mednarodni in nacionalni pravni akti, priporočila in smernice na področju radona.



Slika 16: Zakonski okvir na področju radona.

Figure 16: Radon legislation.

Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti (ZVISJV-1) (Ur. l. RS, št. 76/17) [47] radonu namenja pozornost med 66. in 73. členom. V 66. členu navaja, da mora organ, ki je pristojen za varstvo, pred sevanji s sistematičnim pregledovanjem in izvajanjem meritev radona in drugih ustreznih količin zagotavljati prepoznavanje izpostavljenosti zaradi radona v vzgojno-varstvenih, izobraževalnih, kulturnih in zdravstvenih objektih, bivalnih prostorih, zunanjih prostorih že obstoječih objektov zaradi uporabljenih gradbenih materialov ter v primerih, kjer je mogoče pričakovati višje povprečne koncentracije radona (npr. toplice, jame in rudniki). Meritve izvajajo pooblaščen izvajalci meritev radona. V primeru delovnih prostorov mora delodajalec v treh letih po razglasitvi območij z več radona zagotoviti meritve radona na delovnih mestih v pritličnih in kletnih prostorih. Zagotovljene morajo biti tudi meritve na območju celotne države, pri čemer je mogoče pričakovati povišane koncentracije med drugim v toplicah, kopališčih, jamah ter rudnikih. V kolikor so koncentracije radona povišane, je potrebno oceniti izpostavljenost delavcev in prebivalcev. V 68. členu je navedeno, da lahko ljudje v javnih stavbah ali delavci na delovnih mestih zaradi izpostavljenosti radonu prejmejo letno efektivno dozo, ki je večja od 6 mSv . V kolikor je ta vrednost presežena, je potrebno izvesti ukrepe za zmanjšanje izpostavljenosti, kot so prezračevanje prostorov, premestitev ljudi v druge prostore, prenehanje uporabe prostorov in gradbeni posegi. Kot ukrep se šteje tudi reorganizacija delovnih nalog in delovnega časa. Za novogradnje velja, da morajo biti načrtovane in grajene tako, da koncentracija radona v njih ne presega referenčne ravni [47].

V 73. členu [47] je navedeno, da vlada sprejme nacionalni radonski program za obvladovanje dolgoročnih tveganj za zdravje zaradi izpostavljenosti radonu. Tako je z 21. 3. 2018 začela veljati Uredba o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48], ki prenaša določbe Direktive Sveta 2013/59/Euratom. Ta podaja referenčno raven povprečne letne koncentracije radona v zaprtih bivalnih in delovnih prostorih, ki znaša 300 Bq/m^3 . Navaja tudi občine z večjo koncentracijo radona: Bloke, Cerknica, Črnomelj, Divača, Dobropolje, 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. Zahteva je po letnem pregledovanju 50 objektov, ki so namenjeni vzgoji, izobraževanju, kulturi ali zdravstvu. V delovnih okoljih mora meritve radona zagotavljati delodajalec, in sicer v pritličnih ali kletnih prostorih na območjih z več radona ter na lokacijah, kjer je mogoče pričakovati višje koncentracije radona (npr. jame, rudniki, toplice in kopališča).

Priporočena vrednost koncentracij radona v prostoru, ki je določena s strani WHO in znaša 100 Bq/m^3 , je definirana tudi v slovenskem standardu SIST EN 16798-1:2019 [49].

6 PREGLED ŠTUDIJ

6.1 Metoda pregleda

V poglavju je izveden sistematičen pregled literature, za katerega smo uporabili deskriptivno raziskovalno metodo PRISMA (*ang. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*) [42] s pregledom literature v podatkovnih bazah Science Direct in Pub Med. V prvem delu so predstavljeni rezultati pregleda literature s tematiko o kakovosti notranjega zraka s stališča radona. Uporabljeno je bilo napredno iskanje z naslednjimi kombinacijami ključnih besed: "indoor air quality, radon concentration, buildings", "indoor air quality, radon concentration, school", "indoor air quality, radon concentration, kindergarten". V drugem delu se tematika osredotoča na način prezračevanja ter na vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v prostoru. Uporabljene kombinacije ključnih besed so bile "air conditioning, indoor radon", "ventilation rate, indoor radon", "ventilation system, indoor radon".

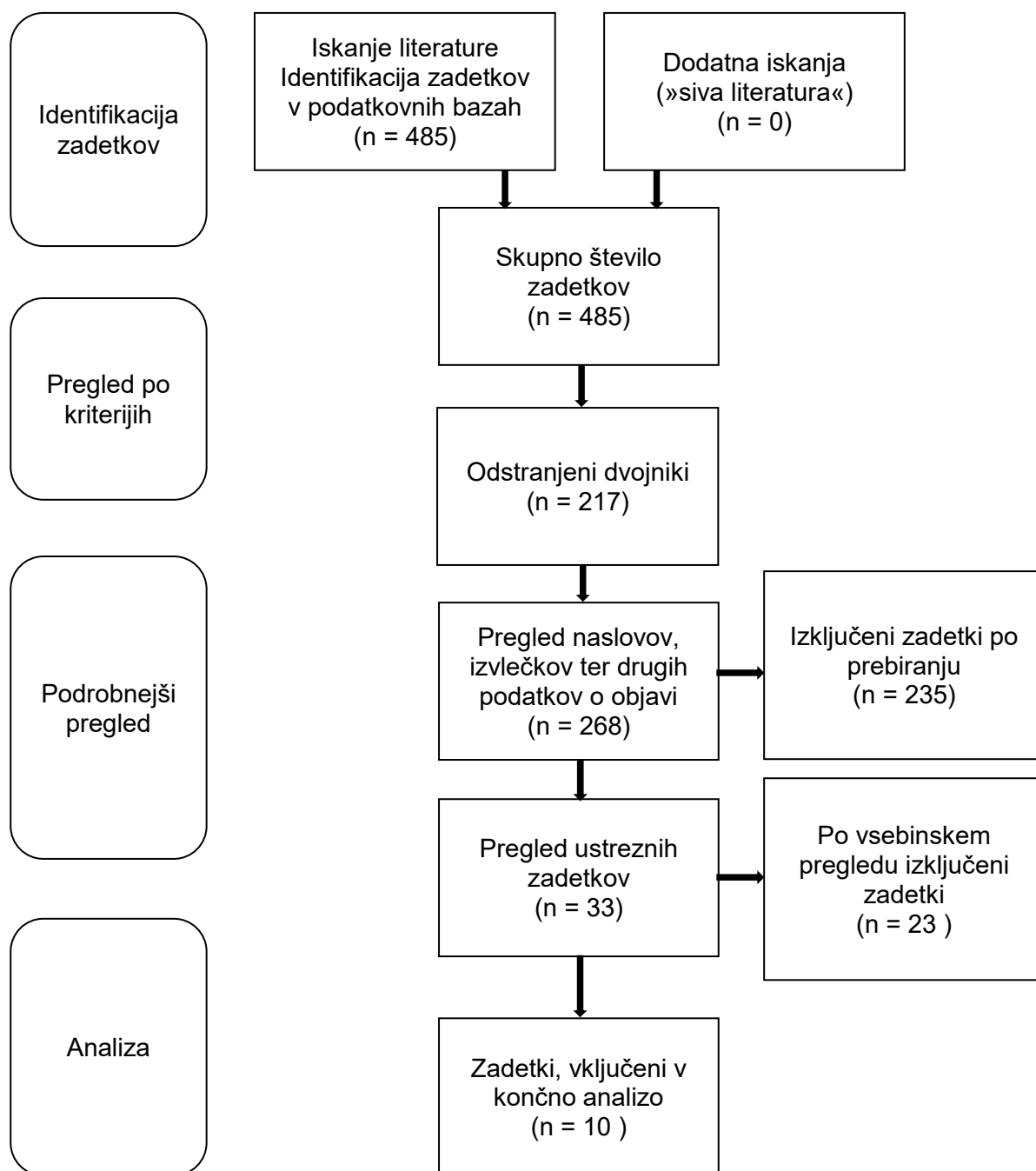
6.2 Kakovost notranjega zraka s stališča radona

V Preglednici 4 so predstavljeni rezultati pregleda literature posamezne podatkovne baze skupaj s številom zadetkov posameznih iskalnih ključnih besed. V podatkovni bazi PubMed je bilo skupno najdeno 444 zadetkov, medtem ko v podatkovni bazi Science Direct le 41. Potek pridobivanja relevantnih člankov glede na tematsko ustreznost je prikazan na Sliki 17. V podatkovnih bazah je bilo na izbrano tematiko skupno najdenih 485 zadetkov. Siva literatura ni bila vključena. Po odstranjenih dvojnikih smo pregledali 268 zadetkov. Pregledani so bili naslovi in izvlečki, na podlagi katerih smo v nadaljnjo analizo vključili 33 zadetkov. Zaradi vsebinske neustreznosti smo izločili 23 zadetkov. V končno analizo smo vključili 10 zadetkov.

Preglednica 4: Rezultati pregleda literature.

Table 4: Results of the literature review.

Podatkovne baze	Ključne besede	Število zadetkov
ScienceDirect	"indoor air quality, radon concentration, buildings"	34
	"indoor air quality, radon concentration, school"	2
	"indoor air quality, radon concentration, kindergarten"	5
PubMed	"indoor air quality, radon concentration, buildings"	265
	"indoor air quality, radon concentration, school"	15
	"indoor air quality, radon concentration, kindergarten"	164



Slika 17: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA.

Figure 17: Results of the literature review according to the PRISMA methodology.

V Preglednici 5 so na temo kakovosti notranjega zraka s stališča radona sistematično prikazani povzetki študij, vključenih v končno analizo.

Preglednica 5: Povzetek izbranih študij na temo kakovosti notranjega zraka s stališča radona.
Table 5: Summary of selected studies on indoor air quality from a radon.

Avtor in leto študije	Naslov	Namen/cilj	Metoda	Rezultat
Vasilyev A. in sod., 2017 [58]	Radon safety in terms of energy efficiency classification of buildings	Opredeliti problem radona v modernih energetsko učinkovitih stavbah v Rusiji.	Meritve koncentracij radona.	Koncentracije Rn so tudi za dvakrat večje v stavbah, ki so klasificirane v energetskem razredu B, B+, B++ od koncentracij v stavbah, klasificiranih v razredu C.
Baeza, A. in sod., 2018 [59]	Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: A case study	Analizirati različne tipe konstrukcij stanovanj hiš od leta 1700 do leta 2014 na območju Španije in opredeliti njihov vpliv na koncentracije radona v zaprtih prostorih.	Meritve koncentracij radona.	Koncentracije Rn so v stavbah, ki so grajene tradicionalno (1729–1940), bistveno manjše od tistih v novejših stavbah ali prenovljenih tradicionalno grajenih stavbah.
Derbez, M. in sod., 2017 [60]	Indoor air quality in energy-efficient dwellings: Levels and sources of pollutants	Opisati IAQ za 72 novozgrajenih in obnovljenih nizkoenergijskih stanovanj.	Meritve onesnažil v času ogrevane in neogrevane sezone ter anketa.	Povprečne koncentracije Rn so nižje v novozgrajenih stavbah kot v konvencionalnih.

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 5

Pampuri Luca in sod., 2018 [61]	Effect of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions	Vpliv sanacije stavbe na kakovost notranjega zraka ter primerjava rezultatov meritev radona pred in po energetski sanaciji stavbe.	Izvedene meritve koncentracij radona pred in po energetski sanaciji 154 stavb na območju Švice.	Največji prirastek koncentracij Rn (+33 %) se pojavi ob menjavi oken. V kolikor se sanira le ovoj stavbe, je prirast koncentracij nekoliko manjši (+11 %).
Bjørn Petter Jelle, 2012 [62]	Development of a model for radon concentration in indoor air	Razvoj poenostavljenega modela za izračun koncentracij radona v zraku zaprtega prostora.	Izračun z modelom.	Nizke koncentracije Rn v zaprtih prostorih zagotavljamo z zrakotesnostjo radonske pregrade, izogibanjem perforacijam in zadostno zračnostjo.
Cucos A., in sod., 2015 [63]	Indoor radon exposure in energy-efficient houses from Romania	Preučiti vpliv modernih trendov gradbeništva na kvaliteto notranjega zraka.	Meritve koncentracij radona v 50 sobah v 25 energetsko varčnih hišah v Romuniji ter vprašalnik.	Višje koncentracije Rn se pojavijo v novozgrajenih stavbah v primerjavi s stavbam grajenih med 1940–1990, v pritličju stavb ter v hišah brez kleti.

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

Collignan Bernard in sod., 2016 [68]	Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics	Oceniti vpliv energetske sanacije in ostalih karakteristik stavbe na koncentracije radona.	Meritve in vprašalnik na območju Francije.	Hiše grajene iz granita in kamna imajo višje koncentracije Rn v prostorih kot hiše grajene iz opeke in betona. Višje koncentracije Rn v hišah s temeljno ploščo kot s pasovnimi temelji ter v hišah, ki so bile energetske sanirane.
Azara A., in sod., 2018 [64]	Indoor radon exposure in Italian schools	Oceniti koncentracijo radona v šolah na zahodu Italije.	Izvedena dvofazna okoljska študija v 19 šolskih ustanovah v zahodni Italiji.	Najvišja srednja koncentracija Rn 952,8 Bq/m ³ v učilnici osnovne šole.
Branco P., in sod., 2016 [65]	Children's Exposure to Radon in Nursery and Primary Schools	Oceniti izpostavljenost otrok koncentracijam Rn v zaprtih prostorih vrtcev in šol ob upoštevanju različnih dejavnikov.	Meritve radona v 15 vrtcih in šolah na Portugalskem.	Ugotovljena presežanja mednarodnih standardov, ki predpisujejo referenčne koncentracije radona.
Vaupotič J., in sod., 2012 [66]	Radon and thoron doses in kindergartens and elementary schools	Ugotoviti kolikšnim koncentracijam radona in torona so izpostavljeni otroci v vrtcih.	Meritve radona in torona v 7 vrtcih in 18 osnovnih šolah v Sloveniji, ki so potekale februarja in marca 2007.	Vrednosti koncentracij radona v vrtcih so bile od 145 do 798 Bq/m ³ in v šolah od 70 do 770 Bq/m ³ .

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

Vaupotič J., 2002 [67]	Search for radon sources in buildings – kindergartens	Določiti vire radona v desetih vrtcih.	Meritve radona z različnimi tehniki v desetih vrtcih v Sloveniji, ki so potekale v začetku leta 2000.	Ugotovljena nepopolno zgrajena temeljna plošča, kjer radon iz zemlje v prostore vstopa skozi razpoke, luknje.
------------------------------	--	--	--	---

Danes se vse pogostejše srečujemo z neprimerno kakovostjo notranjega zraka v stanovanjih, izobraževalnih ustanovah ter delovnih okoljih, kjer ljudje preživimo največ časa. V ospredje prihaja tudi problem radona v zaprtih prostorih in njegov vpliv na zdravje uporabnika. Visoke koncentracije radona v prostorih med drugim povzročajo tudi značilnosti zasnove in delovanje same stavbe, ki izhaja iz samega načina in tipa gradnje, ter uporabljenih gradbenih materialov. Da so koncentracije radona bolj odvisne od značilnosti stavbe in zunanjih vplivov kot pa od navad uporabnika in ostalih notranjih virov, se je izkazalo tudi v francoski raziskavi, kjer so v 72 francoskih stanovanjih merili onesnaževalce notranjega okolja v času ogrevane in neogrevane sezone. Koncentracije radona so bile merjene v dnevni sobi in spalnici. Znašale so med 7 in 66 Bq/m³. V celoti gledano, so bile koncentracije radona v dnevni sobi višje kot v spalnici zaradi same lokacije prostora, saj se je dnevna soba nahajala v pritličju, spalnica pa v nadstropju stanovanja. Glede na sezono merjenja so se višje koncentracije pojavile v jesenskem in zimskem času, najnižje pa spomladi [60].

Po izdelani politiki energetske učinkovitosti stavb v gradbeništvu, se pojavljajo vprašanja o problematiki kopičenja onesnaževal v stavbah ter tako imenovanem sindromu bolnih stavb. Problematika je podrobneje predstavljena tudi v članku Dovjak, Kuček [42]. Vzpostavitev novih standardov na področju učinkovite rabe energije v stavbah je privedla do večje toplotne izolativnosti ovoja, zrakotesnosti stavb, minimalne infiltracije zraka in ostalih gradbenih rešitev, ki zmanjšujejo rabo energije, potrebne za delovanje stavbe, vendar po drugi strani povečujejo kopičenje onesnaževal in s tem slabšajo kakovost notranjega zraka ter zmanjšujejo človekovo ugodje. Da navedene gradbene rešitve za zagotavljanje učinkovite rabe energije stavbe vodijo k višjim koncentracijam onesnažil notranjega prostora, med katerimi je tudi radon, so pokazali tudi rezultati izvedene raziskave. Te podajajo ugotovitve, da avtorji [58], [59], [61], [62], [63] v večini navajajo povišane koncentracije radona v prostorih energetske obnovljenih stavb kot pa pred samo obnovo ter v novozgrajenih stavbah v primerjavi z konvencionalno zgrajenimi stavbami. Do drugačnega zaključka so prišli le Derbez, M. in sod. [60], kjer se je izkazalo, da so povprečne koncentracije radona v bolj zrakotesnih stavbah nižje od koncentracij v opečnati konvencionalni stavbi z višjo zračno prepustnostjo stavbnega ovoja. Potrebno se je zavedati, da je v teh primerih bilo omogočeno konstantno mehansko prezračevanje prostorov na maksimalni stopnji.

Baeza, A. je s sodelavci [59] analiziral različne tipe konstrukcij stanovanjskih hiš od leta 1700 do 2014 na območju Španije in opredelil njihov vpliv na koncentracije radona v zaprtih prostorih. V tradicionalnih stavbah, ki niso bile obnovljene, je bila izmenjava zraka zaprtega prostora v povprečju 0,7 h⁻¹. V stavbah, ki so bile deležne energetske obnove, se je izmenjava zraka zaprtega prostora gibala med 0,16 in 0,26 h⁻¹, kar je podobno srednji vrednosti za nove stavbe, ki znaša 0,32 h⁻¹. Temu primerno so visoke normirane letne koncentracije radona, ki

so v povprečju za tradicionalne stavbe 360 Bq/m^3 , za obnovljene 440 Bq/m^3 ter za nova stavbe 1040 Bq/m^3 . V vsakem tipu stavbe je mogoče najti tudi nizke vrednosti koncentracij, kljub temu pa je opaziti, da od starejše do novejšje stavbe narašča delež koncentracij višjih od 300 Bq/m^3 . Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Cucos A. s sodelavci [63], kjer so se na račun izboljšanja toplotne izolativnosti fasadnega ovoja [63] v novozgrajenih stavbah pojavile za 27 % višje koncentracije radona kot v starejših stavbah, grajenih pred letom 1990. Za 21 % višje koncentracije so se pojavile tudi v energetsko saniranih hišah na območju Francije [68], za 22 % višje pa so bile koncentracije radona po sanaciji fasade v Švici [61]. Še več, rezultati so pokazali, da imajo hiše, grajene iz granita in kamna, za približno 67 % višje koncentracije radona v prostorih v primerjavi s hišam, grajenim iz opeke in betona. Glede načina temeljenja se je izkazalo, da imajo hiše s temeljno ploščo v prostorih za 54 % višje koncentracije radona kakor hiše s pasovnimi temelji [68]. Rezultati švicarske študije [61] so pokazali, da se ob menjavi oken pojavi največji prirastek koncentracij R_n , saj so se te povečale za 33 %. V primeru dodatne izolacije ovoja (brez menjave oken) je bil prirastek koncentracij nekoliko manjši in je znašal 11 % [61].

Glede na klasifikacijo stavb v energijske razrede je bilo na primeru meritev, ki so potekale pet let, dokazano, da so koncentracije radona v stavbah razreda B, B+ in B++ tudi dvakrat večje od koncentracij v stavbah razreda C [58]. Bistveno pozornost zahtevajo zaprti prostori v pritličju ali kletah stavbe. V prostorih pritličja, kjer spodaj ni kleti, so bile vrednosti 1,6-krat višje kot v prostorih pritličja pod katerimi se nahaja tudi klet. Rezultati so bili primerljivi s predhodno študijo, kjer so bile koncentracije radona v spalnici, ki se je nahajala v pritličju, 1,4-krat višje od koncentracij v spalnici, ki je bila nad kletjo [63].

Posebno pozornost je potrebno nameniti tudi otrokom, ki so lahko visokim koncentracijam izpostavljeni že v vrtcih, in kasneje šolah, kar lahko dolgoročno vpliva na večjo verjetnost pojava pljučnega raka v starejših letih. Avtor Branco s sodelavci [65] je v raziskavi izpostavljenosti otrok koncentracijam radona v zaprtih prostorih 15 vrtcev in šolah v dveh regijah na Portugalskem ugotovil preseganja mednarodnih standardov, ki predpisujejo referenčno koncentracijo radona. V okrožju Porto naj bi bili dojenčki izpostavljeni višjim koncentracijam radona v primerjavi s predšolskimi in starejšimi šolskimi otroci, kljub temu da so bili na območju okrožja Bragança rezultati ravno obratni. Višje koncentracije so bile izmerjene v prostorih, ki se nahajajo v pritličju, kar se ujema z rezultati ostalih avtorjev [64], [67]. Rezultati so pokazali tudi višje koncentracije radona po končanju aktivnosti in nočnem času, kar je posledica zaprtega prostora tekom zaprtja vrtcev in šol. Ugotovljeno je bilo, da so ti vzorci v skladu s tipičnimi dnevnimi vzorci, o katerih poročajo tudi drugi avtorji [64], [65], [66]. V italijanski raziskavi [64] izpostavljenosti otrok v 19 izobraževalnih ustanovah je bilo ugotovljeno, da so bile koncentracije radona v večini pod predpisano referenčno mejo 500 Bq/m^3 . Izstopal je en prostor, kjer je bila najvišja izmerjena koncentracija 1147 Bq/m^3 . Višje koncentracije so se pojavile tekom noči in v zgodnjih jutranjih urah ter med odmori. Na podlagi rezultatov so bila podana priporočila, da šolske oblasti nemudoma ukrepajo in povečajo naravno prezračevanje prostora pred in med šolskimi dejavnostmi.

Do preseženih koncentracij radona v vrtcih prihaja tudi v Sloveniji. V letu 2000 so potekale meritve v desetih vrtcih [66], kjer je bil v treh primerih zaznan močan vir radona. V dveh vrtcih je radon v igralnice vstopal skozi slabo narejeno temeljno ploščo, v enem vrtcu pa je bil vir blizu umivalnika na stranišču. Po popravilu umivalnika in tesnjenju razpok je povprečna koncentracija radona ostala pod 400 Bq/m^3 . V enem izmed vrtcev je bila v celoti narejena nova

plošča. Koncentracije radona so bile pod 300-400 Bq/m³ v vseh sobah. Tudi v tem primeru je bilo zaznati višje koncentracije radona tekom noči in zgodaj zjutraj ter v obdobju spanja in počitka otrok, kjer so okna popolnoma zaprta [66]. Do povišanih koncentracij radona nad referenčno mejo, še posebej v nočnem in jutranjem času, so prišli tudi avtorji Vaupotič in sodelavci [67] leta 2007, ko so v 7 vrtcih izmerili koncentracijo radona med 145 in 798 Bq/m³ ter v 18 šolah, kjer so bile izmerjene koncentracije radona med 70 in 770 Bq/m³.

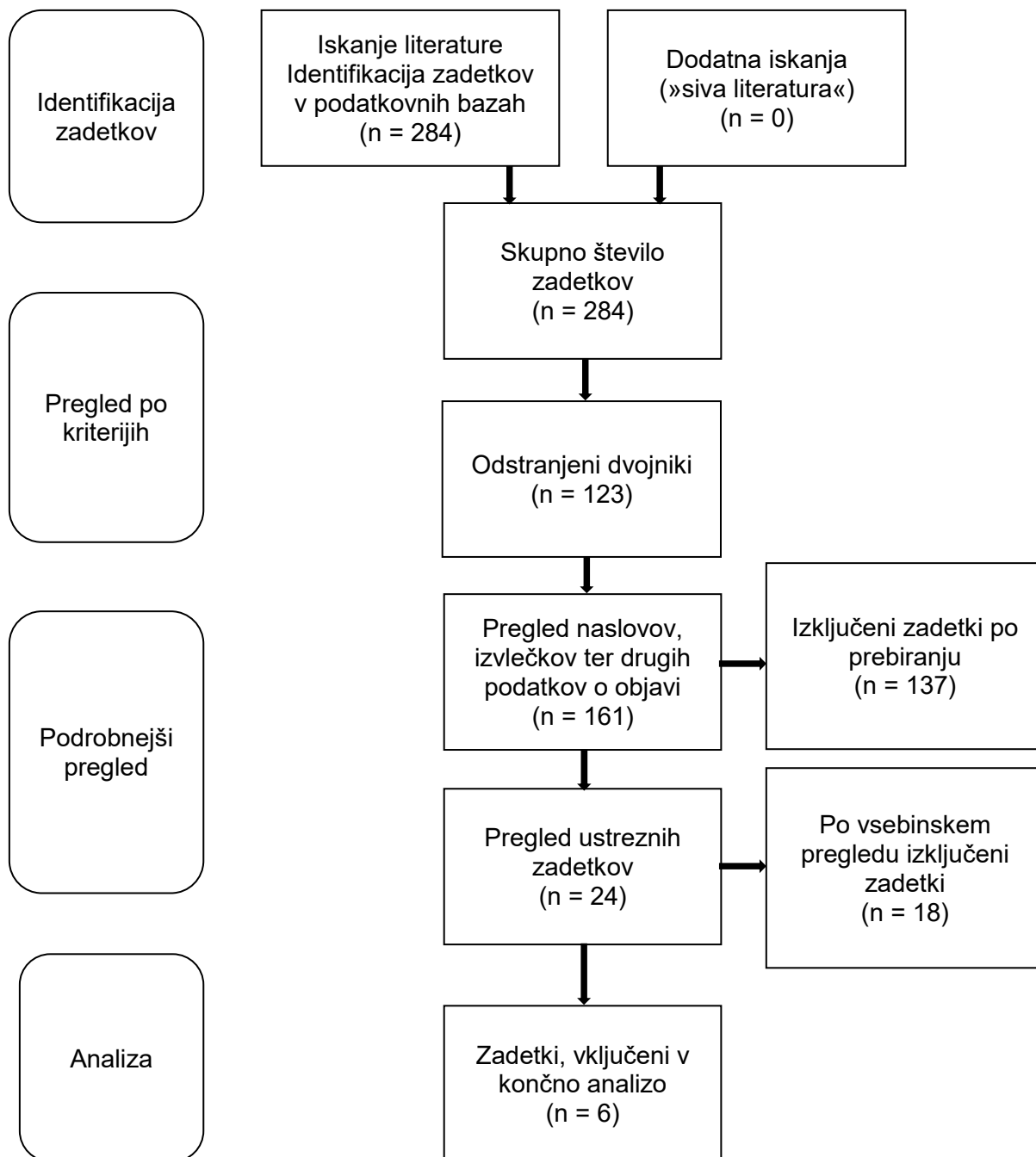
6.3 Vpliv načina in stopnje prezračevanja na koncentracije radona v notranjem okolju

V Preglednici 6 so predstavljeni rezultati pregleda literature posamezne podatkovne baze s številom zadetkov posameznih iskalnih ključnih besed. V podatkovni bazi Science Direkt je bilo najdeno nekoliko več zadetkov, in sicer 151. V podatkovni bazi PubMed je bilo le-teh 133. Potek pridobivanja relevantnih člankov glede na tematsko ustreznost je prikazan na Sliki 18. Po metodi PRISMA je bilo v podatkovnih bazah na izbrano tematiko skupno najdenih 284 zadetkov. Siva literatura ni bila vključena. Po odstranjenih dvojnikih smo pregledali 161 zadetkov. Na podlagi pregledanih naslovov in izvlečkov je bilo v nadaljnjo analizo vključenih 24 zadetkov. Glede na vsebinsko neustreznost smo izločili 18 zadetkov ter v končno analizo vključili 6 zadetkov.

Preglednica 6: Rezultati pregleda literature.

Table 6: Results of literature review.

Podatkovne baze	Ključne besede	Število zadetkov
ScienceDirect	"air conditioning, indoor radon"	18
	"ventilation rate, indoor radon"	82
	"ventilation system, indoor radon"	51
PubMed	"air conditioning, indoor radon"	24
	"ventilation rate, indoor radon"	58
	"ventilation system, indoor radon"	51



Slika 18: Rezultati pregleda literature po metodologiji PRISMA.

Figure 18: Results of the literature review according to the PRISMA methodology.

V Preglednici 7 so sistematično prikazani povzetki študij, vključenih v končno analizo, na temo vpliva načina prezračevanja ter stopnje prezračevanja na koncentracije radona v notranjem okolju.

Preglednica 7: Povzetek izbranih študij na temo vpliva prezračevanja na koncentracije radona.
Table 7: Summary of selected studies on the effect of ventilation on radon concentrations.

Avtor in leto študije	Naslov	Namen/cilj	Metoda	Rezultat
Collignan B., Powaga E., 2019 [52]	Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration	Preučiti vpliv stopnje prezračevanja in prezračevalnih sistemov na IRnAC	Primerjava različnih prezračevalnih sistemov.	Mehansko prezračevanje je bolj učinkovito kot hibridno in naravno prezračevanje.
Dominik Grządziel in sod., 2016 [53]	The influence of air-conditioning changes on the effective dose due to radon and its short-lived decay products	Določiti vpliv prezračevalnega sistema na koncentracije radona.	Meritve izvedene v avditoriju na Lublinski tehnološki univerzi na Poljskem.	Izklop prezračevalnega sistema čez noč povzroči naraščanje koncentracij radona v prostoru. Sprememba delovanja AC sistema iz ON na ON/OFF je povzročil znatno povečanje koncentracij radona.
Keramatollah Akbari in sod., 2013 [54]	Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house	Določiti vpliv notranjih pogojev okolja (n, T, RH) na koncentracije radona.	Numerična simulacija, meritve in analitična metoda študije primera enodružinske hiše v Stockholmu.	Notranji pogoji okolja (n, T, RH) imajo velik vpliv na koncentracije radona v prostoru. Rezultati so pokazali, da ima stopnja prezračevanja neposreden vpliv na nivo radona.

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 7

K. C. Lee, T., 2000 [55]	Effects of air conditioning, dehumidification and natural ventilation on indoor concentrations of ^{222}Rn and ^{220}Rn	Ugotoviti možne načine zmanjševanja koncentracij radona v prostorih s strani uporabnika.	Eksperiment v spalnici.	Ugotovljeno je, da je najučinkovitejši način za znižanje koncentracij radona v prostoru naravno prezračevanje, kateremu sledi klimatska naprava.
Wallner, P. in sod., 2015 [56]	Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings	Primerjava kakovosti notranjega zraka energetske učinkovitih hiš z mehanskim prezračevalnim sistemom in običajnih hiš.	Pol-eksperimentalna terenska študija izpostavljenosti ljudi iz dveh vrst stavb (mehansko oz. naravno prezračevanje) onesnaževalom v zaprtih prostorih.	Skoraj dvakrat višje koncentracije radona v stavbah z naravnim prezračevanjem kot pa v stavbah z mehanskim prezračevanjem.
Ingvild E. Finne in sod., 2019 [57]	Significant reduction in indoor radon in newly built houses	Oceniti učinek zmanjšanja radona, ki vključuje uvedbo pravno zavezujočih zahtev za preprečevanje radona v novih stavbah na Norveškem.	Meritve koncentracij radona in anketa.	Uravnoteženo prezračevanje znižuje koncentracije radona v prostoru.

Notranja koncentracija radona je pomembna predvsem na lokacijah z visokim potencialom radona v temeljnih tleh. Nedavna raziskava Collignan B. in Powaga E. [52] navaja, da so parametri, ki vplivajo na koncentracije radona v zaprtih prostorih, predvsem zmanjševanje tlaka v stavbi in stopnja prezračevanja. Iz tega sledi, da je uporaba prezračevalnih naprav ključnega pomena pri zagotavljanju svežega zraka v stavbah. S pomočjo računalniškega orodja ter numeričnega modela so bili v študiji primerjani različni tipi prezračevanja, ki so najbolj značilni za Francijo, in sicer brez prezračevanja, naravno prezračevanje ter trije tipi mehanskega prezračevanja (mehanski dovod zraka, mehanski odvod zraka, mehanski dovod in odvod zraka). V kalkulacijo niso bile zajete uporabnikove navade, kot je na primer odpiranje oken. Rezultati so pokazali, da odvodni ventilatorji ustvarjajo velik podtlak v stavbah. Takemu načinu prezračevanja sledi naravno prezračevanje, temu pa mehansko prezračevanje z

dovodnimi ventilatorji. V starih, netesnih stavbah, je bil način prezračevanja z odvodnimi ventilatorji še nekoliko sprejemljiv, kar pa ne velja za današnje nove, zrakotesne stavbe. Ko odvodni ventilator ustvari podtlak v prostoru, se ustvarijo pogoji, da v prostor vstopi nezaželen in onesnažen zrak iz drugih prostorov. Iz tega sledi, da tak način prezračevanja prostora povečuje koncentracije vseh onesnaževalcev zraka, prav tako pa se povečajo koncentracije radona. Da je pri zagotavljanju z radonom neonesnaženega zraka bolj učinkovita uporaba dovodnega ventilatorja kakor uporaba dovodnega ventilatorja, je v omenjeni študiji tudi dokazano. Avtorja navajata tudi povprečne koncentracije IRnAC za različne načine prezračevanja pri različni zračni prepustnosti stavbe. Pri količini dovedenega zraka $1,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ je prezračevanje z odvodnim ventilatorjem učinkovitejše od naravnega prezračevanja. Razlog za to je bolj konstantno zagotavljanje odvoda onesnaženega zraka iz prostora skozi celotno leto v primerjavi z naravnim prezračevanjem. Še nižje ravni IRnAC lahko dobimo z uporabo uravnoteženega mehanskega sistema prezračevanja, kjer je zrak doveden in odveden s pomočjo naprave.

S povečano zrakotesnostjo stavb, oziroma zmanjšanjem zračne prepustnosti stavb, vplivamo na znižanje stopnje prezračevanja, kar privede do naraščanja koncentracij IRnAC. To velja še posebej za stavbe z naravnim prezračevanjem ali za stavbe, katere se ne prezračuje. To potrjujejo tudi rezultati pol-eksperimentalne terenske študije izpostavljenosti ljudi v energetsko učinkovitih stavbah z mehanskim tipom prezračevanja ter v konvencionalnih stavbah avtorja Wallner, P. in sod. [56], kjer se ljudje največkrat poslužujemo naravnega prezračevanja skozi okna. Skoraj dvakrat višje koncentracije radona se pojavijo v prostorih, kjer se prezračuje naravno v primerjavi s prostori, kjer je prezračevanje mehansko.

Do zaključka, da uravnoteženo mehansko prezračevanje zagotavlja najnižje ravni radona v stavbi, so prišli tudi Ingvid E. Finne in sod. [57], ki so v svoji študiji med drugim primerjali tudi rezultate koncentracij radona v domovih zgrajenih v obdobju med letoma 2000 in 2007 (študija "Radon 2008") ter v novogradnjah grajenih med letoma 2012 in 2015 (študija "Radon 2016"). Prav tako se je za slabši prezračevalni sistem izkazalo prezračevanje z odvodnim ventilatorjem, pri uporabi katerega so bile povprečne ravni radona v stavbah celo višje od uporabe naravnega prezračevanja. Rezultati so pokazali, da so se povprečne koncentracije radona v primeru uporabe uravnoteženega mehanskega sistema zmanjšale za skoraj 50 %, medtem ko je ta delež v primeru naravnega prezračevanja nekoliko nižji.

Pri uporabi klimatske naprave lahko izbiramo med ON/OFF sistemom ter inverterskim sistemom z avtomatsko regulacijo moči. Rezultati primerjave teh dveh sistemov na podlagi meritev koncentracij radona v avditoriju tehnološke univerze na Poljskem, v okviru raziskave določevanja vplivov prezračevalnega sistema na koncentracije radona, avtorja Grządziel in sod. [53], so pokazali, da je sprememba delovanja klimatske naprave iz avtomatskega sistema na sistem ON/OFF povzročila znatno povečanje koncentracij radona z 1,2 na 5 Bq/m^3 . Razlika v koncentracijah privede v tem primeru do kar 3-krat večje efektivne doze sevanja. Pri povečanju količine dovedenega zraka iz 5400 na $7200 \text{ m}^3/\text{h}$ ni prišlo do bistvene razlike v koncentracijah radona v prostoru, medtem ko je povečanje količine dovedenega zraka na $9000 \text{ m}^3/\text{h}$ povzročila znižanje srednjih vrednosti koncentracij radona z 17 na 12 Bq/m^3 . V nočnem času so bile zabeležene nekoliko višje vrednosti od dnevnih.

V študiji primera enodružinske hiše v Stockholmu, ki so jo izvedli Keramatollah in sodelavci [54], so bile za določitev vpliva notranjih pogojev okolja na koncentracije radona uporabljene kar tri metode dela, in sicer analitična metoda, meritve ter numerična simulacija. V vseh treh izračunih je bilo ugotovljeno, da večanje stopnje prezračevanja vodi k zmanjšanju koncentracij

radona v prostoru. V kolikor je bila $n = 0 \text{ h}^{-1}$, so bile koncentracije radona v prostoru okoli 3500 Bq/m^3 . Ko se je stopnja prezračevanja zvišala na $0,25 \text{ h}^{-1}$, so se koncentracije zmanjšale na okoli 100 Bq/m^3 . Pri $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ so vrednosti koncentracij radona padle na okoli 50 Bq/m^3 , pri $n = 1,2 \text{ h}^{-1}$ pa so znašale približno 20 Bq/m^3 . Iz tega sledi, da so ravni radona v prostoru obratno sorazmerne s stopnjo prezračevanja. Do podobnih rezultatov je prišel tudi Javier García-Tobar v svoji študiji [69], v kateri so bili primerjani rezultati dveh stanovanj s podobnimi koncentracijami radona. V prostoru, kjer so se pojavile najvišje koncentracije radona, se je s podvojitvijo pretoka zraka skozi ventilator z 2 L/s/m^2 na 4 L/s/m^2 koncentracija radona zmanjšala za približno 50 %.

Da je potrebno zagotoviti veliko število izmenjav zraka na uro ali vsaj nekaj nad minimalno vrednostjo, da se ohranijo nizke koncentracije radona, je dokazal tudi Bjørn Petter Jelle [62], ki je razvil poenostavljen model za izračun koncentracij radona v zaprtem prostoru. Model upošteva različne parametre, med njimi koncentracijo radona v tleh, odpornost proti difuziji radonske bariere, prepustnost zraka tal in prezračevanje temeljnih tal pod stavbo. Kot glavni razlog vira radona v zaprtem prostoru je izpostavljeno puščanje zraka, onesnaženega z radonom, skozi konstrukcijo. Ker je v redkokaterem norveškem stanovanju upoštevana predpisana minimalna izmenjava zraka na uro, ki je 0,5, je privzeta izmenjava zraka za izračune $0,25 \text{ h}^{-1}$. S takšnim prezračevanjem se še lahko vzdržuje koncentracija radona, ki je pod 200 Bq/m^3 . V kolikor se prostor prezračuje manj, te koncentracije hitro narastejo.

Glede na današnje predpise in smernice o učinkoviti rabi energije, je za povečanje izmenjave zraka in zmanjšanje rabe energije morda priporočljivo uporabiti rekuperacijo toplote v prezračevalnih sistemih. Potrebno se je zavedati, da takšna izbira prezračevalnega sistema ne zadostuje v kolikor je sistem pomanjkljivo načrtovan, ne deluje pravilno, se ne čisti, ali pa ga uporabnik ne uporablja pravilno. V takšnem primeru nima nobene prednosti pred naravnim prezračevanjem. Ne glede na izbran tip prezračevanja, je za kakovosten notranji zrak potrebno zagotoviti zadostno in konstantno prezračevanje prostorov.

6 SIMULACIJE

6.1 Metoda

Vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v notranjem prostoru smo analizirali s pomočjo izvedenih simulacij v programu CONTAM 3.2 [40]. Računalniški program je namenjen preučevanju kvalitete notranjega zraka in analizi prezračevanja prostora. Z njegovo pomočjo se lahko določijo pretok zraka, koncentracija onesnaževalcev prisotnih v zraku ter izpostavljenost uporabnikov prostora. Gre za stacionarno analizo, ki upošteva osnovne karakteristike radona predstavljene v Preglednici 8.

Preglednica 8: Osnovne karakteristike radona.

Table 8: Basic radon characteristics.

Molekulska masa [kg/kmol]	222
Difuzijski koeficient [mm²/s]	5,91
Razpolovna doba [dni]	3,8
Specifična toplota [J/gK]	0,09

Poleg omenjenih osnovnih karakteristik radona, je potrebno definirati tudi hitrost dotoka radona v prostor (v nadaljevanju: generacija radona) [Bq/h]. Ker vrednosti nikjer niso konkretno podane, smo imeli s tem nekaj težav. Za prvi sklop izvedenih analiz smo za vrednost generacije radona uporabili predpostavljen podatek iz španske študije Garcia-Tobar J. [69], kjer so analizirali vpliv prezračevanja na koncentracije radona v prostoru. Predpostavljena vrednost generacije radona je 800/m²/h.

6.2 Referenčni prostor

Za izvedbo simulacij sta bila izbrana dva modelna referenčna prostora:

- Učilnica vrtca s skupino 14 otrok in 2 vzgojiteljicama. Površina učilnice vrtca je 45 m² in ima prostornino 135 m³. Prostor ima odprtine za prezračevanje na eni strani, v skupni velikosti 1,5 m x 6 m, kar znaša 9 m².
- Pisarna za eno osebo v velikosti 16 m² in s prostornino 48 m³. Okenska odprtina je v velikosti 1,5 m x 1 m, kar znaša 1,5 m².

V Preglednici 9 so prikazani vhodni podatki v simulacijah o količini dovedenega zunanjskega zraka [m^3/h] za primer učilnice vrtca.

Preglednica 9: Količine dovedenega zunanjskega zraka za primer učilnice vrtca.

Table 9: Amounts of outside air supplied to the kindergarten classroom.

Varianta	Predpisane in priporočene vrednosti po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb [38]	Izračunana količina dovedenega zunanjskega zraka za igralnico [m^3/h]
I	minimalna stopnja prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$	67,5
II	najmanjši vtok zunanjskega zraka na osebo $15 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{oseba}$	240
III	najmanjša količina zraka za človeka $8,7 \text{ m}^3/\text{hm}^2 \cdot$	391,5
IV	priporočena količina zunanjskega zraka za prezračevanje v učilnici $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{oseba}$	480

* Ni upoštevana najmanjša dodatna količina zraka (za stavbo).

V Preglednici 10 so prikazani vhodni podatki v simulacijah o količini dovedenega zunanjskega zraka [m^3/h] za primer pisarne.

Preglednica 10: Količine dovedenega zunanjskega zraka za primer pisarne.

Table 10: Amounts of outside air supplied to the office.

Varianta	Predpisane in priporočene vrednosti po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb [38]	Izračunana količina dovedenega zunanjskega zraka za pisarno [m^3/h]
I	minimalna stopnja prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$	24
II	najmanjši vtok zunanjskega zraka na osebo $15 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{oseba}$	15
III	najmanjša količina zraka za človeka $1,5 \text{ m}^3/\text{hm}^2 \cdot$	24
IV	priporočena količina zunanjskega zraka za prezračevanje v učilnici $35 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{oseba}$	35

* Ni upoštevana najmanjša dodatna količina zraka (za stavbo).

6.3 Verifikacija in validacija simulacij

Za drugi sklop izvedenih analiz smo uporabili rezultate meritev, pridobljene s strani Instituta Jožef Stefan, o koncentracijah radona v dveh stanovanjskih hišah v občini Idrija, ki jih v svoji magistrski nalogi pod mentorstvom dr. Janje Vaupotič [71] obravnava Monika Ferfolja [72]. Kontinuirane meritve radona v spalnici obeh hiš so bile izvedene s pasivnim merilnikom Radon Scout v obdobju med 1. 1. 2018 in 18. 11. 2018. Vrednosti radona so bile zabeležene vsako uro. Izbran prostor spalnice se nahaja v pritličju stanovanjske hiše 2, ki je bila zgrajena leta 1983. Uporabnika prostora sta zaposlena in večino časa preživita izven doma. Spalnica meri 16 m². Glede na model programa Contam 3.2, je prostornina spalnice 48 m³. V spalnici je le eno okno, v velikosti 1,5 m x 1 m. Okno je novo in zelo dobro tesni. Vrata spalnice so večino časa priprta. Kot v svoji magistrski nalogi navaja Monika Ferfolja [72], uporabnika spalnico prezračujeta po naslednjem režimu:

- pozimi prezračita zjutraj oziroma dopoldne, in sicer tako, da okno za petnajst minut odpreta na škarje, medtem ko v večernih urah okna v glavnem ne odpirata;
- spomladi dobro prezračita zjutraj oziroma dopoldne, v primeru suhega vremena in, če je zunaj dovolj toplo, pa zračita tudi v popoldanskem času in okno zapreta, ko gresta spat;
- poleti je okno odprto na škarje ves dan, tudi ponoči;
- jeseni okno za petnajst minut odpreta zjutraj, nato je čez dan v glavnem zaprto, ko prideta iz službe pa ga odpreta in zapreta, ko gresta spat.

Glede na to, da imamo le podatke o režimu prezračevanja prostora, lahko stopnjo prezračevanja zgolj predpostavimo, in sicer:

- Na podlagi enačbe $n \text{ [h}^{-1}\text{]} = n_{50} / 20$ definirane v SIST EN ISO 13789 [77] ter ob privzetju $n_{50} = 1,2$ lahko za skoraj zaprt prostor z dobro tesnjenimi okni predpostavimo stopnjo prezračevanja 0,06 h⁻¹.
- Abdallah A.M. in sod. [78] navajajo, da je soba slabo prezračevana v kolikor je $n < 0,3 \text{ h}^{-1}$. Zato za slabo prezračevan prostor predpostavimo stopnjo prezračevanja 0,3 h⁻¹.
- Glede na simulacijo naravnega prezračevanja obravnavanega prostora skozi celotno okno v programskem orodju CONTAM, lahko na podlagi dobljenih rezultatov popolnoma prezračevanega prostora predpostavimo stopnjo prezračevanja 4,2 h⁻¹.
- V primeru, da je obravnavan prostor cel dan prezračevan skozi kipno okno lahko ocenimo, da je stopnja prezračevanja približno 1,1 h⁻¹, kar pomeni četrtno stopnjo prezračevanja v kolikor bi bil prostor popolnoma prezračen skozi celotno odprto okno.

Za izbrano spalnico v stanovanjski hiši 2 je bila izmerjena trenutna koncentracija radona 1063±40 Bq/m³. Kot je razvidno iz ugotovitev Monike Ferfolja [72], je bila najvišja koncentracija radona v spalnici 2 izmerjena spomladi v času od 11. 3. 2018 do 4. 4. 2018 in je znašala 1667 Bq/m³. Povprečne koncentracije radona, izračunane na podlagi urnih koncentracij, so bile najvišje pozimi in so znašale 1522±605 Bq/m³.

Za pomoč pri določevanju generacije radona iz podatkov meritev, smo se obrnili na dr. Janjo Vaupotič iz Instituta Jožef Stefan [71], ki pojasnjuje, da se generacija radona [Bq/h] na podlagi meritev dobi na sledeč način:

$$\frac{(C_{max} - C_{min})}{t} = \text{povprečen dotok radona v prostor [Bq/m}^3\text{/h]}$$

$C_{\min}$... minimalna koncentracija radona popoldne [Bq/m^3]

$C_{\max}$... maksimalna koncentracija radona naslednje jutro [Bq/m^3]

t ... čas v katerem je koncentracija radona naraščala [h]

Če povprečen dotok radona v prostor pomnožimo s prostornino prostora, dobimo hitrost dotoka radona v prostor [Bq/h].

Obratno velja pri zniževanju radona v prostoru, kjer povprečni dotok radona v prostor predstavlja razliko med maksimalno jutranjo in minimalno popoldansko koncentracijo radona v določenem časovnem razponu.

Glede na meritve koncentracij radona v dveh stanovanjskih hišah v občini Idrija [71], ki jih v svoji magistrski nalogi obravnava Monika Ferfolja [72], sledi, da se hitrost dotoka radona v prostor spreminja tekom meseca in tekom leta. Koncentracija dotoka radona v prostor je odvisna od geoloških in meteoroloških dejavnikov, načina, tipa in kakovosti gradnje ter režima prezračevanja prostorov in bivalnih navad uporabnika, zato je določena hitrost dotoka radona v prostor zgolj posplošena in predpostavljena vrednost.

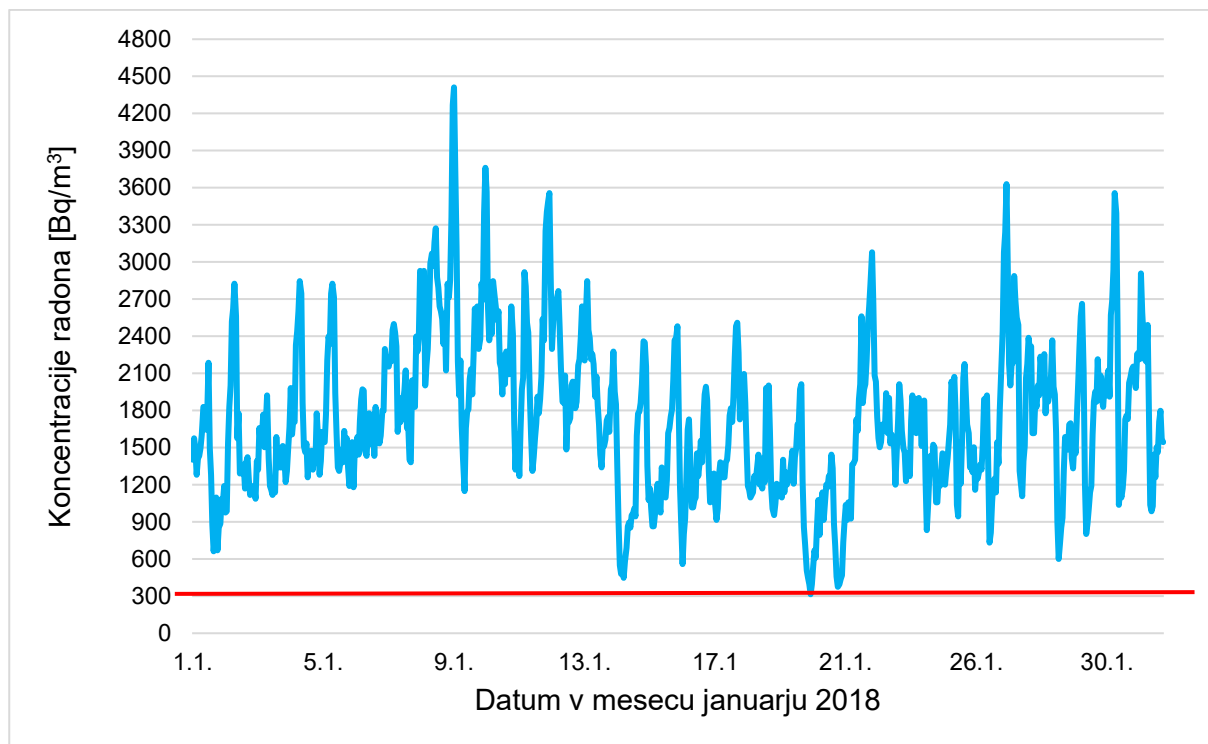
Preglednica 11 prikazuje izračunane povprečne dotoke radona v prostor na podlagi že opravljenih meritev v spalnici hiše 2 [71] za naključno izbrane dneve v letu. Iz tega je razvidno, da bo hitrost dotoka radona v prostor največja v zimskem času in najmanjša v poletnem času.

Preglednica 11: Izračunani povprečni dotok radona v prostor na podlagi že izvedenih meritev [71], [72].

Table 11: Calculated average radon inflow into the room based on measurements [71], [72].

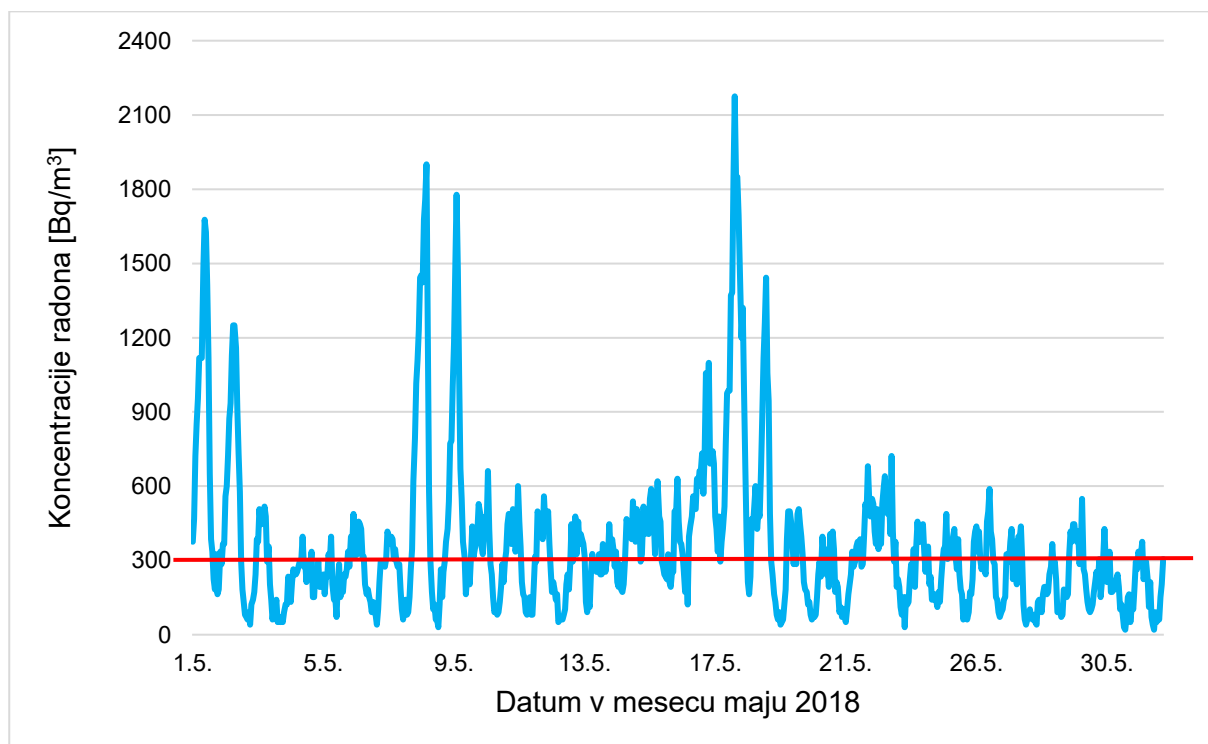
Datum meritev	$C_{\min}$ [Bq/m^3]	$C_{\max}$ [Bq/m^3]	t [h]	Povprečni dotok radona v prostor [$Bq/m^3/h$]	Povprečni dotok radona v prostor [$Bq/m^2/h$]	Generacija radona (za program) [Bq/h]
14. 1. – 15. 1. 2018	447	2358	15	127	381	6096
8. – 9. 5. 2018	30	1778	14	125	375	6000
24. – 25. 7. 2018	61	366	14	22	66	1056
6. – 7. 10. 2018	589	1606	15	68	204	3264

Rezultati kontinuiranih meritev v spalnici hiše 2 so za naključno izbrane mesece prikazani tudi grafično na Slikah 19, 20, 21 in 22, kjer je z rdečo barvo označena tudi še dopustna vrednost koncentracije radona $300 Bq/m^3$, ki jo predpisuje Uredba o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48].



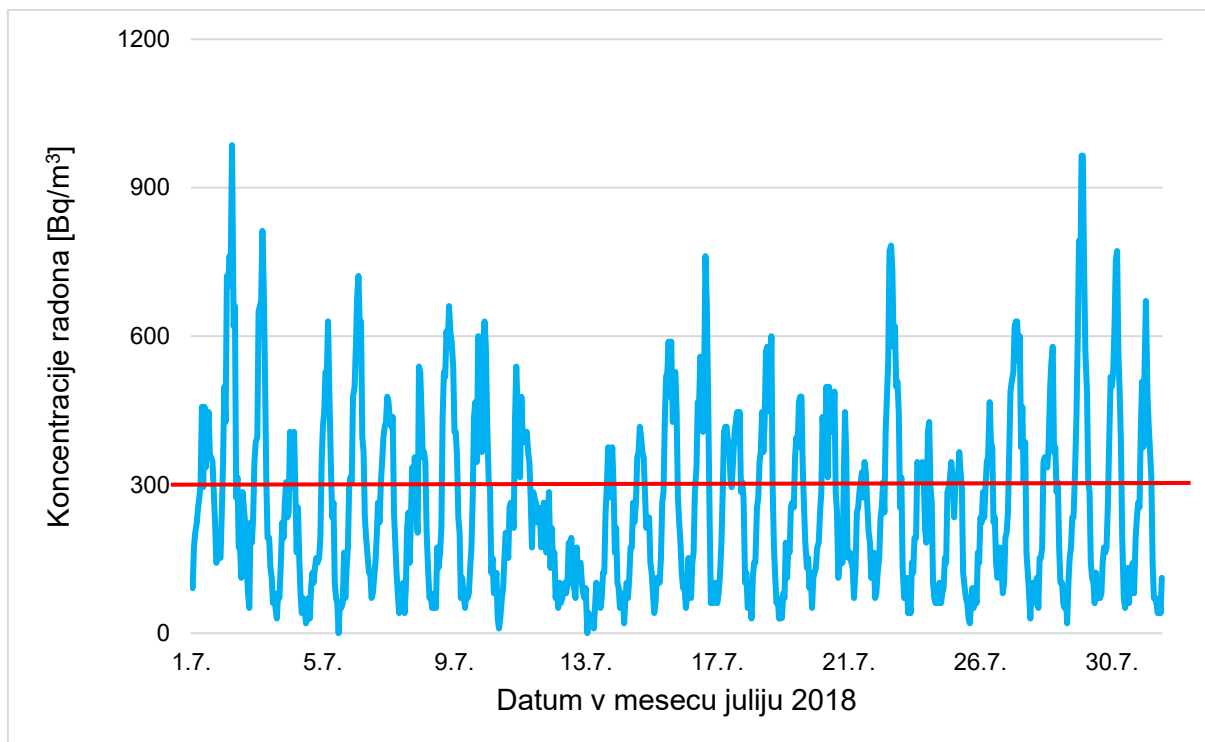
Slika 19: Urne koncentracije radona [Bq/m³] za mesec januar 2018 [71].

Figure 19: Radon concentrations [Bq/m³] for every hour in January 2018 [71].



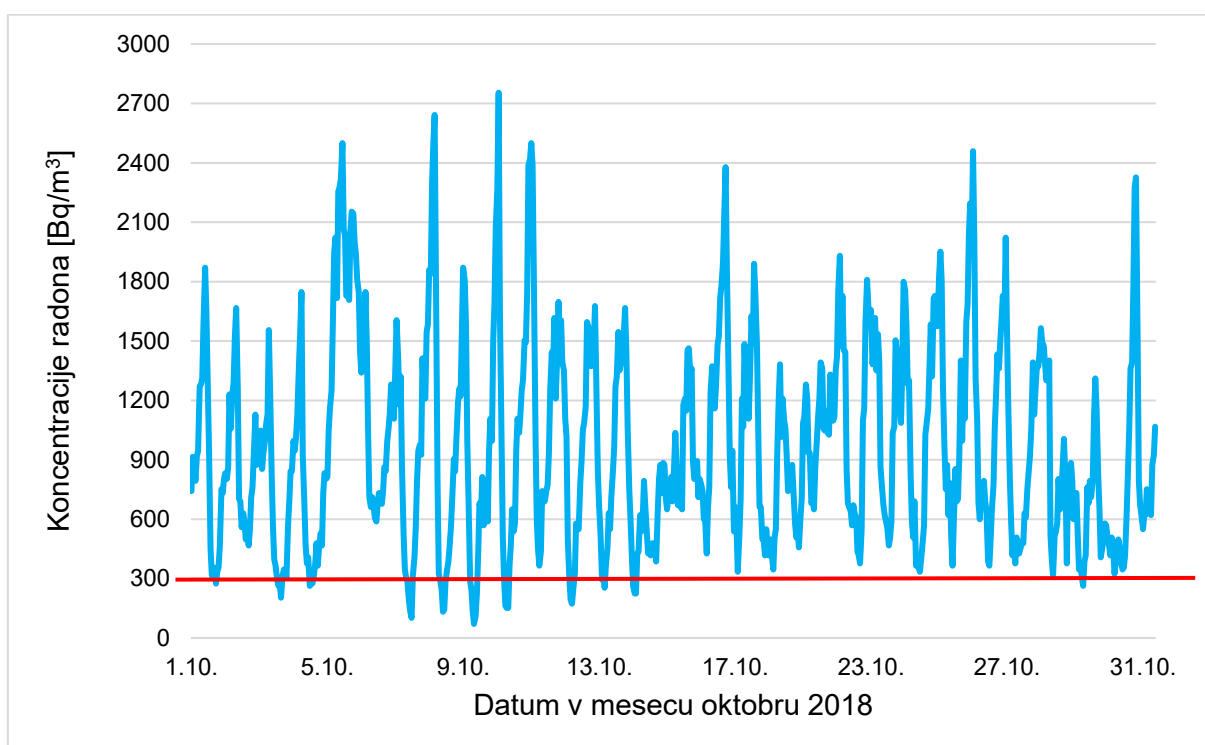
Slika 20: Urne koncentracije radona [Bq/m³] za mesec maj 2018 [71].

Figure 20: Radon concentrations [Bq/m³] for every hour in May 2018 [71].



Slika 21: Urne koncentracije radona [Bq/m³] za mesec julij 2018 [71].

Figure 21: Radon concentrations [Bq/m³] for every hour in July 2018 [71].



Slika 22: Urne koncentracije radona [Bq/m³] za mesec oktober 2018 [71].

Figure 22: Radon concentrations [Bq/m³] for every hour in October 2018 [71].

Preglednica 12 prikazuje najmanjšo in največjo izmerjeno koncentracijo v spalnici stanovanjske hiše 2, v dveh naključno izbranih dnevih v mesecih januarju, maju, juliju in oktobru.

Preglednica 12: Najmanjša in največja izmerjena koncentracija radona [Bq/m^3] [71].

Table 12: Minimum and maximum measured radon concentrations [Bq/m^3] [71].

Datum meritev	$C_{\min}$ [Bq/m^3]	$C_{\max}$ [Bq/m^3]
14. – 15. 1. 2018	447	2358
8. – 9. 5. 2018	30	1900
24. – 25. 7. 2018	20	427
6. – 7. 10. 2018	102	2002

Zavedati se moramo, da so dnevi za posamezni letni čas izbrani naključno. Glede na rezultate meritev za posamezni mesec, ki so prikazani grafično na Sliki 19, Sliki 20, Sliki 21 ter Sliki 22 lahko vidimo, da koncentracije radona tekom meseca precej nihajo. Iz tega sledi, da bi lahko bila vrednost povprečnega dotoka radona v prostor [$\text{Bq/m}^3/\text{h}$] za različne dneve v izbranem mesecu zelo drugačna od predpostavljene.

7 REZULTATI

V nadaljevanju so v poglavjih 7.1 *Učilnica vrtca* in 7.2 *Pisarna* prikazani rezultati variante I, II, III in IV prvega sklopa simulacij za posamezni prostor, katerih predpostavljena vrednost povprečne hitrosti dotoka radona v prostor je bila 800 Bq/m²/h. Izračunane koncentracije radona s simulacijo so primerjane z naslednjimi referenčnimi vrednostmi koncentracij radona:

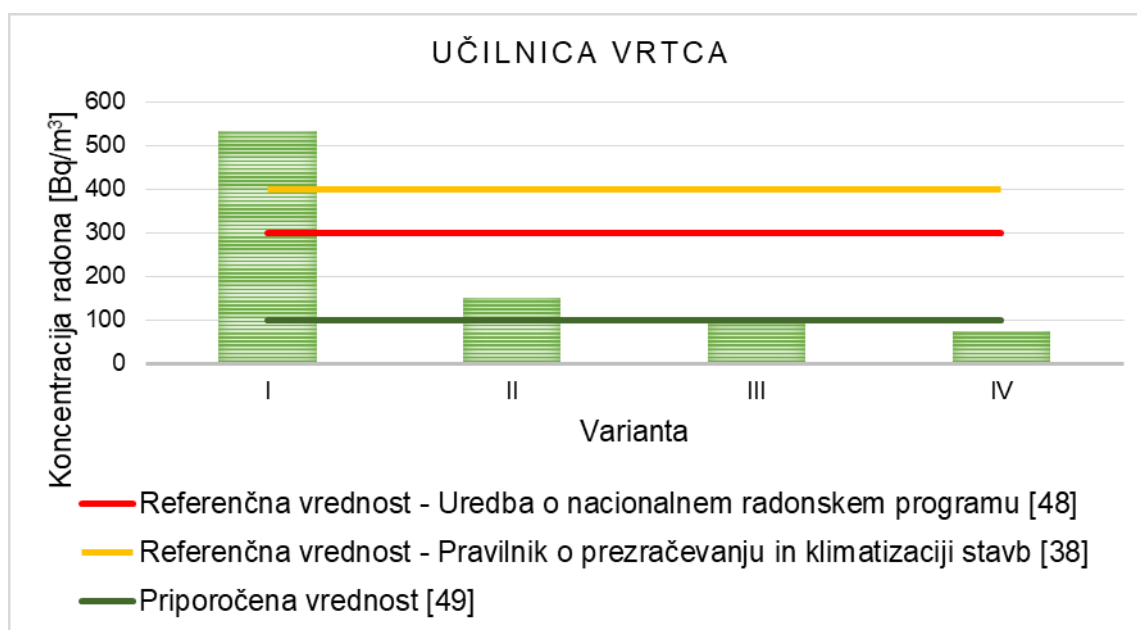
- Referenčna vrednost povprečne letne koncentracije radona v zaprtih bivalnih in delovnih prostorih 300 Bq/m³ je predpisana v Uredbi o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48].
- Referenčna vrednost koncentracij radona 400 Bq/m³ je predpisana v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38].
- Referenčna vrednost 100 Bq/m³ je priporočena vrednost na podlagi SIST EN 16798-1:2019 [49].

V poglavju 7.3 je izvedena primerjava rezultatov prvega sklopa simulacij.

Poglavje 7.4 *Verifikacija in validacija rezultatov* prikazuje rezultate simulacij, ki so primerljive z dejanskim stanjem na območju Idrije. Povprečna hitrost dotoka radona v prostor, ki smo jo upoštevali za posamezni mesec je prikazana v Preglednici 11. Rezultati so primerjani z meritvami, opravljenimi s strani Instituta Jožef Stefan [71], kateri so bili uporabljeni tudi v zaključni nalogi Monike Ferfolja [72].

7.1 Učilnica vrtca

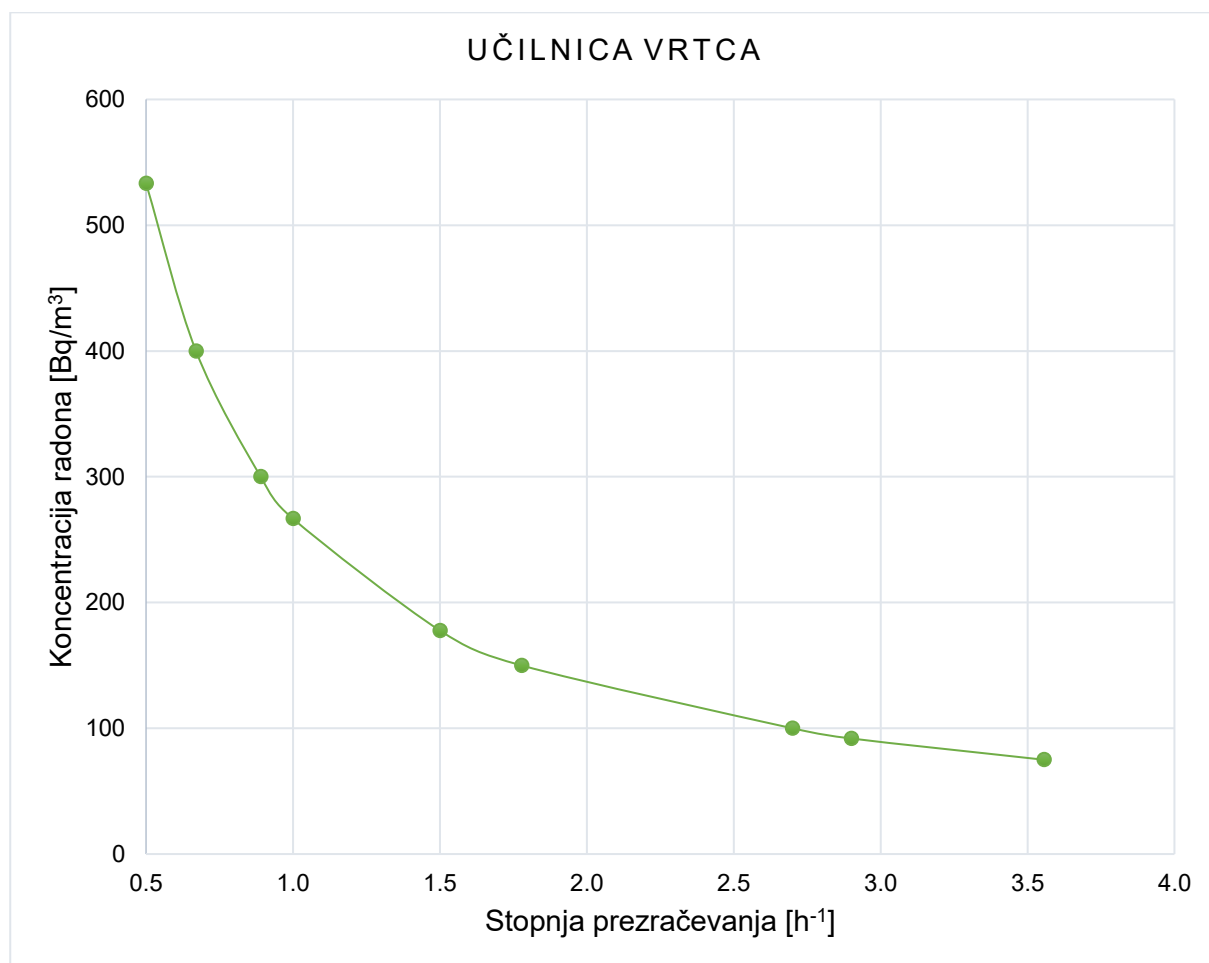
Na Grafikonu 1 so prikazani rezultati za primer učilnice vrtca, in sicer za vse štiri variante, ki so predstavljene v preglednici 10.



Grafikon 1: Rezultati stacionarnih simulacij koncentracij radona pri štirih variantah prezračevanja, za primer učilnice vrtca.

Chart 1: Results of stationary simulations of radon concentrations in four ventilation variants, for the kindergarten classroom.

Iz Grafikona 1 je razvidno, da se z večjo količino dovedenega zunanjega zraka koncentracija radona v prostoru manjša. Če v prostoru zadostimo kriteriju minimalne stopnje prezračevanja, ki po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38] znaša $0,5 \text{ h}^{-1}$ (varianta I), koncentracije radona presegajo vse predpisane in priporočene mejne vrednosti. V tem primeru gre za $67,5 \text{ m}^3/\text{h}$ dovedenega zunanjega zraka v prostor, koncentracija radona pa znaša 533 Bq/m^3 . Vrednost občutno presega vse tri mejne vrednosti koncentracij radona in ima negativni vpliv na zdravje otrok. Koncentracija radona tako za 78 % oziroma za skoraj 1,8-krat presega mejno vrednost 300 Bq/m^3 , določeno v Uredbi o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48]. V primeru variante II je izračunana količina dovedenega zraka v prostor enaka $240 \text{ m}^3/\text{h}$, kar je enakovredno 1,78 izmenjavi zraka vsako uro. Koncentracija radona v prostoru znaša 150 Bq/m^3 . Glede mejne vrednosti je zadoščeno nacionalni zakonodaji. Presežena je le priporočena referenčna raven radona 100 Bq/m^3 , definirana v SIST EN 16798-1:2019 [49]. Varianti III in IV imata zadostno količino dovedenega zunanjega zraka v prostor in znašata $391,5 \text{ m}^3/\text{h}$ in $480 \text{ m}^3/\text{h}$. Stopnji prezračevanja v tem primeru sta $2,9 \text{ h}^{-1}$ in $3,56 \text{ h}^{-1}$. Da bi zadostili tudi kriteriju maksimalne dopustne koncentracije radona v prostoru, ki je 300 Bq/m^3 , je potrebno v prostor dovesti $120 \text{ m}^3/\text{h}$ svežega zunanjega zraka. Iz tega sledi, da je potrebno zagotoviti minimalno stopnjo prezračevanja $0,9 \text{ h}^{-1}$ oziroma 1,8 - krat večjo od predpisane. V primeru, da bi želeli v prostoru ohranjati koncentracije radona pod 100 Bq/m^3 , je potrebno zagotoviti stopnjo prezračevanja $2,7 \text{ h}^{-1}$, ki je za 5,4 - krat večja od predpisane.



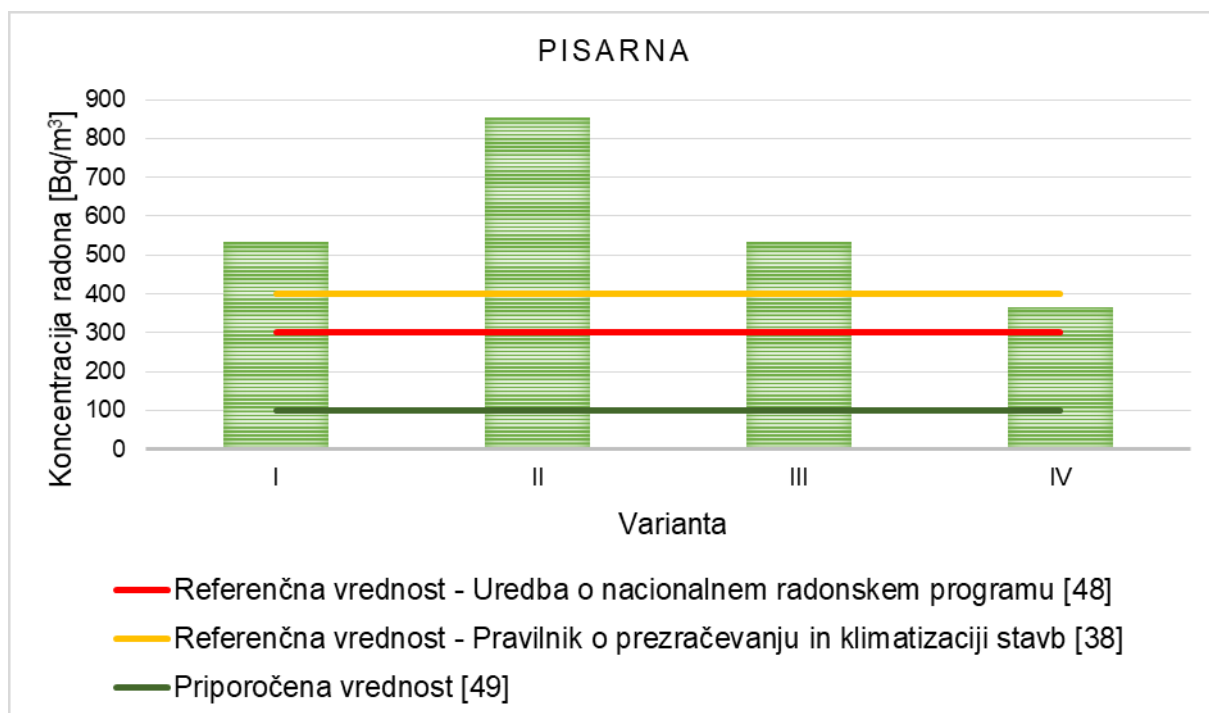
Grafikon 2: Vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v učilnici vrtca.

Chart 2: Impact of ventilation rate on radon concentrations in the kindergarten classroom.

Na Grafikonu 2 je za primer učilnice vrtca prikazan potek koncentracij radona v odvisnosti od stopnje prezračevanja. V primeru stopnje prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$ znaša koncentracija radona v prostoru 533 Bq/m^3 . V primeru povečanja stopnje prezračevanja za 5,8 - krat na $2,9 \text{ h}^{-1}$, se koncentracija radona v prostoru zmanjša za 5,8-krat in znaša približno 92 Bq/m^3 . Iz tega sledi, da so koncentracije radona obratno sorazmerne s stopnjo prezračevanja.

7.2 Pisarna

Na Grafikonu 3 so prikazani rezultati za primer učilnice vrtca, in sicer za vse štiri variante, ki so predstavljene v preglednici 11.

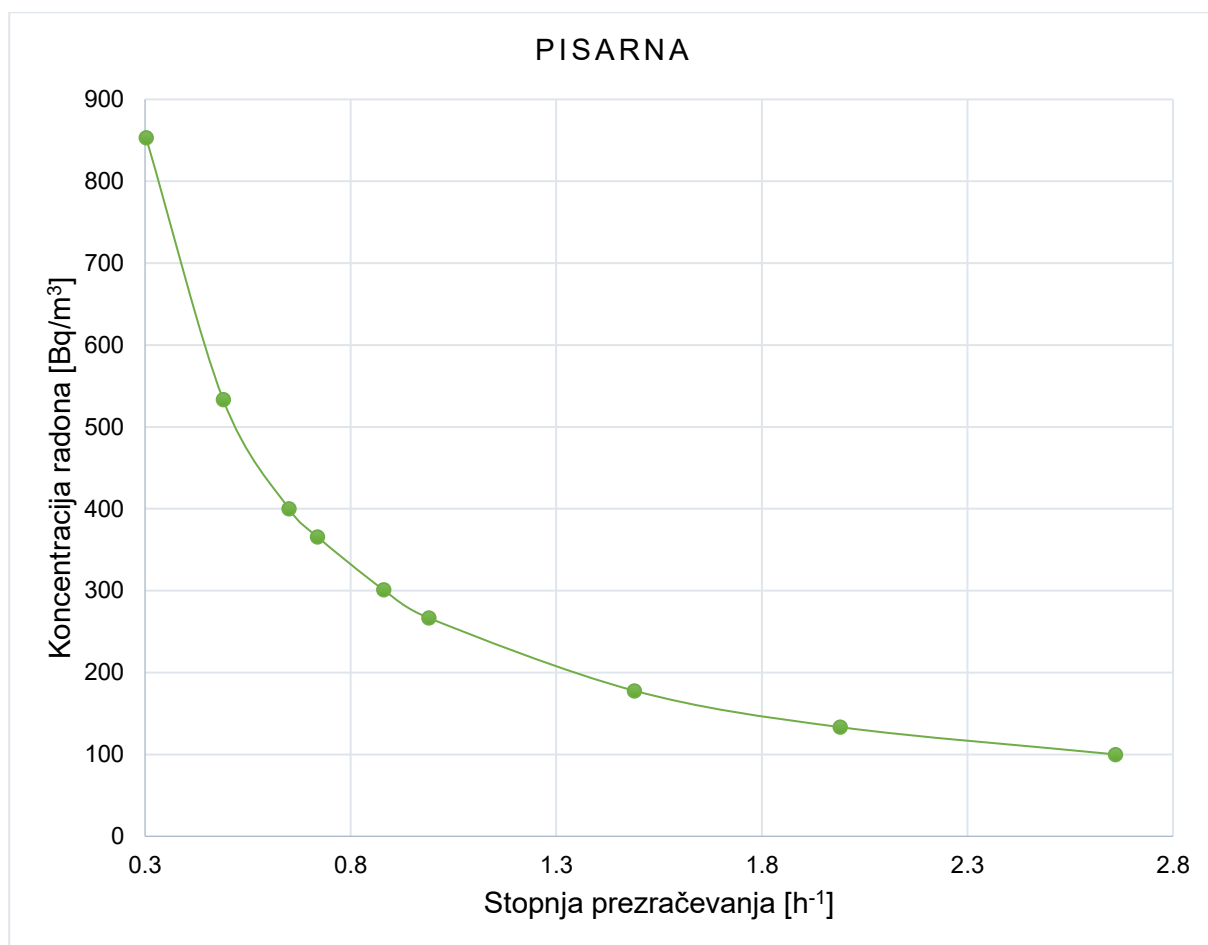


Grafikon 3: Rezultati stacionarnih simulacij koncentracij radona pri štirih variantah prezračevanja, za primer pisarne.

Chart 3: Results of stationary simulations of radon concentrations in four ventilation variants, for office.

Iz Grafikona 3 je razvidno, da vse izvedene variante presegajo maksimalno mejno vrednost povprečne letne koncentracije radona v zaprtih bivalnih in delovnih prostorih 300 Bq/m^3 , ki je predpisana v Uredbi o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48]. Varianta I in varianta III podata enake rezultate, saj izračunana količina dovedenega zraka v prostor v obeh primerih znaša $24 \text{ m}^3/\text{h}$. Koncentracija radona znaša 533 Bq/m^3 in za skoraj 1,8-krat presega nacionalno referenčno raven, ki znaša 300 Bq/m^3 . Varianta II zagotavlja najmanjši vtok zunanjega zraka na osebo, ki v tem primeru znaša $15 \text{ m}^3/\text{h}$. Koncentracije radona so za 60 % višje od koncentracij variant I in II ter znašajo 853 Bq/m^3 . Iz tega sledi, da 60 % večja količina dovedenega zraka v prostor povzroči padec koncentracij radona za 60 %. Varianta IV ima koncentracije radona pod referenčno vrednostjo 400 Bq/m^3 , ki jo predpisuje Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38], kljub temu pa koncentracija še vedno presega zakonodajno vrednost za 22 %. V prostoru je potrebno izvesti ustrezne ukrepe za zmanjševanje koncentracij radona. V kolikor se poslužujemo prezračevanja, je potrebno

zagotoviti stopnjo prezračevanja večjo od $0,9 \text{ h}^{-1}$, da koncentracije radona ne presežejo 300 Bq/m^3 .



Grafikon 4: Vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v pisarni.

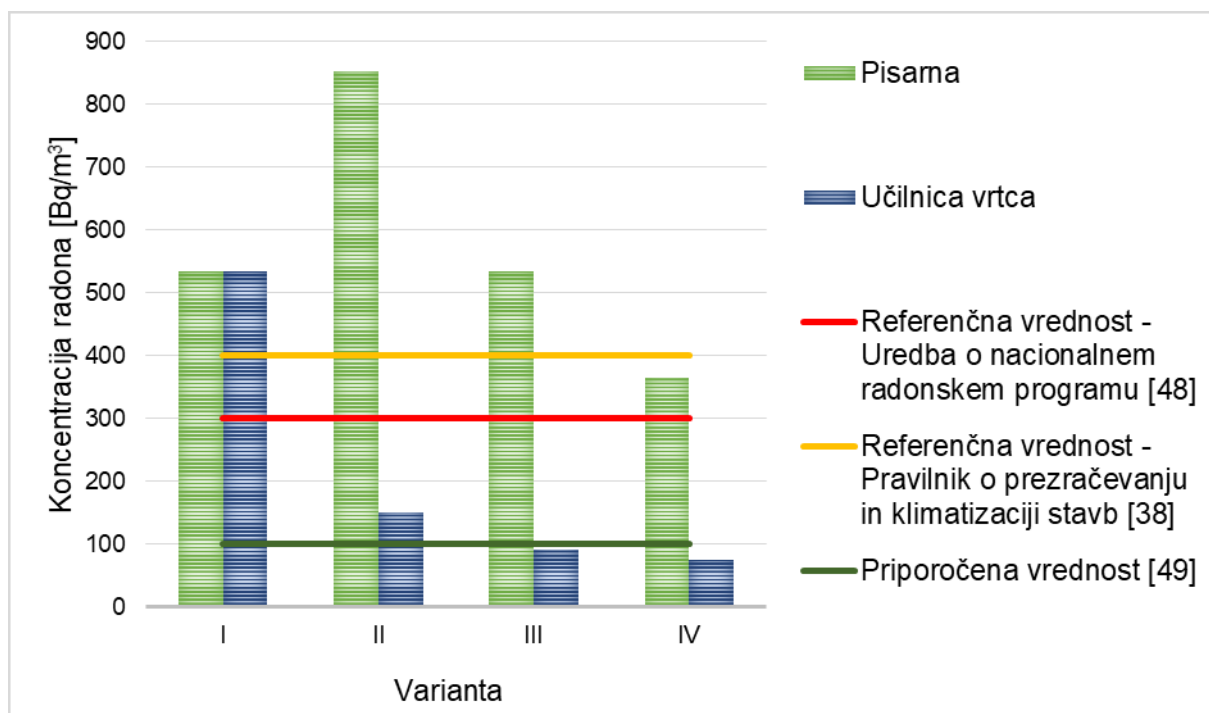
Chart 4: Impact of ventilation rate on office radon concentrations.

Grafikon 4 prikazuje potek koncentracij radona v odvisnosti od stopnje prezračevanja za primer pisarne, v kateri dela ena oseba. Iz grafikona je razvidno, da je v primeru zagotavljanja kriterija najmanjšega vtoka zunanjega zraka na osebo, ki znaša $15 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{osebo}$, izračunana stopnja prezračevanja za pisarno z eno osebo enaka $0,31 \text{ h}^{-1}$, kar je manj od predpisane minimalne stopnje prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$. Vsekakor je potrebno upoštevati vse predpisane kriterije zakonodaje oziroma najbolj neugodno zakonodajo za uporabnika prostora. Pri stopnji prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$ je koncentracija radona v prostoru enaka 533 Bq/m^3 . Če stopnjo prezračevanja povečamo za 1,45-krat na $0,73 \text{ h}^{-1}$, se koncentracija radona zmanjša za 1,45-krat na 367 Bq/m^3 .

7.3 Primerjava rezultatov simulacij

Na Grafikonu 5 so glede na posamezne izvedene variante prikazani vsi rezultati simulacij. Razvidno je, da se največje koncentracije radona pojavijo v pisarni, saj ima bistveno manjši volumen prostora kot učilnica vrtca, kljub temu da je v njej prisotna le ena oseba. Najnižje koncentracije radona v učilnici vrtca in pisarni so dosežene v primeru izvedene simulacije variante IV. To nam pove, da ima ta varianta najboljše rezultate pri upoštevanju priporočene

vrednosti dovedenega zunanjega zraka v prostor na osebo. Kljub temu so v primeru pisarne koncentracije še vedno višje od minimalne zahtevane vrednosti povprečnih letnih koncentracij radona v prostoru, ki znaša 300 Bq/m^3 .



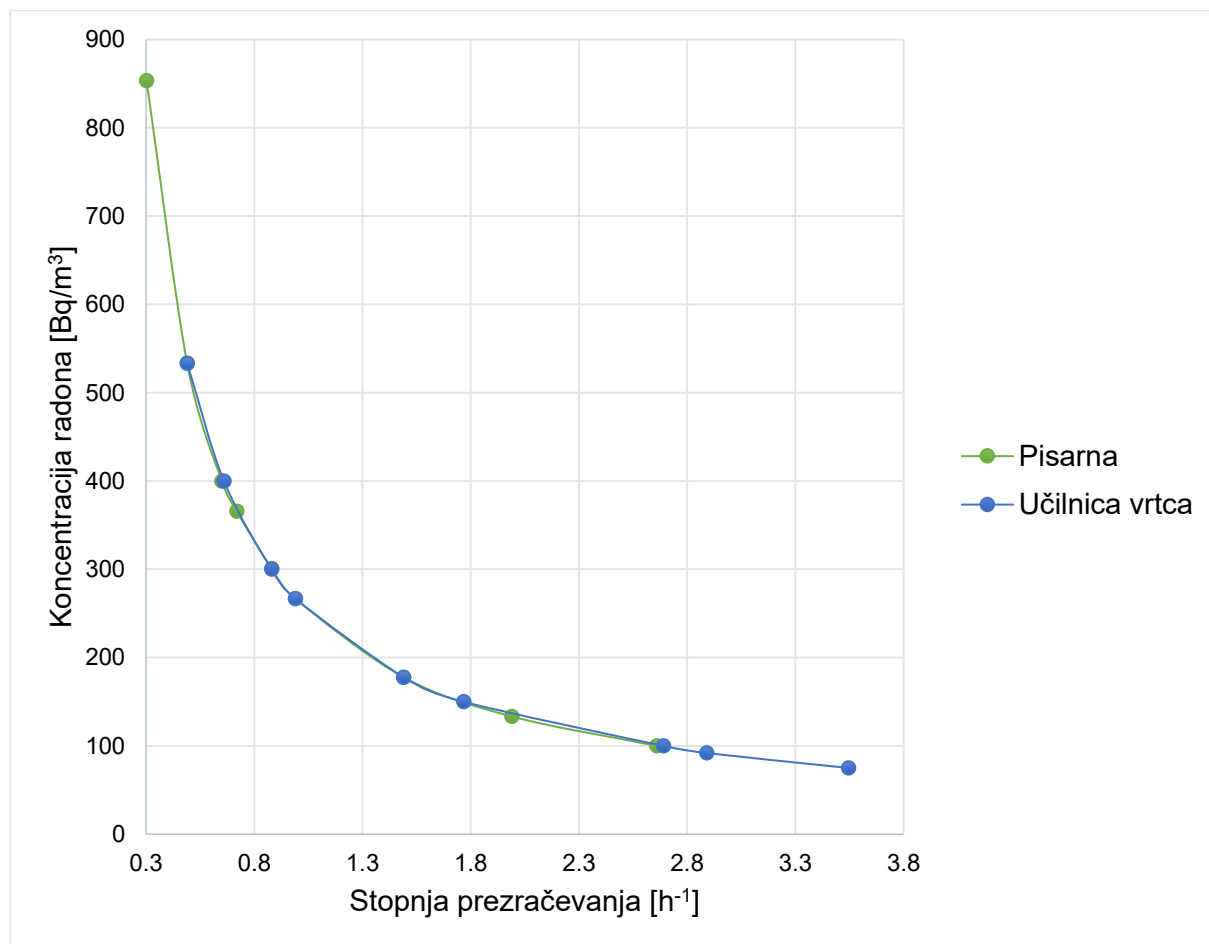
Grafikon 5: Primerjava rezultatov stacionarnih simulacij koncentracij radona pri štirih variantah prezračevanja za primer učilnice vrtca in pisarne.

Chart 5: Comparison of stationary simulations results for the kindergarten classroom and the office.

V primeru variante I sta izračunani koncentraciji radona v prostoru učilnice vrtca in pisarne enaki in znašata 533 Bq/m^3 . Iz tega sledi, da pri enaki stopnji prezračevanja pride do enakih koncentracij radona v prostoru, ne glede na velikost prostora in ob predpostavki, da je povprečna hitrost dotoka radona v prostor enaka. V kolikor je povprečna hitrost radona v prostor enaka, sta površina prostora [m^2] in generacija radona [Bq/h] premo sorazmerni količini. Zavedati se moramo, da v realnosti povprečna hitrost dotoka radona v posamezne prostore ni nikoli enaka, saj je med drugim odvisna od vgrajenih materialov, lokacije prostora v stavbi in navad uporabnika prostora. Koncentraciji radona v učilnici vrtca in pisarni tako odstopata od predpisane mejne vrednosti, zapisane v Uredbi o nacionalnem radonskem programu [48], za 78 %, kar je za skoraj 1,8 - krat. V kolikor primerjamo koncentracije z dopustno vrednostjo po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb [38], ta odstopa za 33 %, torej 1,33 - krat. Če želimo da so koncentracije pod 100 Bq/m^3 , jih je potrebno zmanjšati za dobrih 5 - krat. Glede na rezultate, izračun količine dovedenega zunanjega zraka na podlagi minimalne stopnje prezračevanja za učilnice in pisarne za eno osebo ni primeren. Glede na varianto I so se koncentracije v varianti II za primer pisarne povečale za 60 %, medtem ko so se koncentracije v učilnici vrtca zmanjšale za 72 %. Pri izvedeni analizi variante II smo prišli tudi do rezultata, da so koncentracije radona v pisarni izmed vseh situacij najvišje in presegajo predpisano vrednost 300 Bq/m^3 za 184 %. Iz tega lahko sklepamo, da je predpisana količina najmanjšega vtoka zunanjega zraka na osebo po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavbe premajhna za primer prostora z enim samim uporabnikom. Koncentracije v učilnici

vrta, v primeru variant II, III in IV, zadostijo še dopustnemu pogoju o koncentraciji radona po zakonodaji. V primeru pisarne so pri varianti III koncentracije radona za 78 % večje od dopustne nacionalne vrednosti in za 5,8 - krat večje od koncentracij v učilnici vrta. Razlog temu je za 5,8 - krat manjša predpisana najmanjša količina zraka za človeka na površino prostora, ki je zapisana v Prilogi 1 Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38]. Pri varianti IV so koncentracije radona v pisarni za 22 % večje od dopustne nacionalne vrednosti in za 4,9 - krat večje od koncentracij v učilnici vrta.

Največkrat se pri izračunu energijskih izgub, v sklopu standardnih pogojev uporabe stanovanjske stavbe uporabi stopnja izmenjave zraka $0,5 \text{ h}^{-1}$, kljub temu, da je po Pravilniku za prezračevanje in klimatizacijo stavb [38] potrebno projektirati stavbo skladno s potrebami glede kakovosti zraka. Če se pri projektiranju predvidi omenjena stopnja prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$ (varianta I), se to glede na dosežene koncentracije radona izkaže kot nezadostno. Na podlagi rezultatov simulacij lahko ugotovimo, da je pri projektiranju prostorov v stavbah potrebno obravnavati vsak prostor zase. Vsak prostor je potrebno analizirati in za vsakega določiti, katera količina dovedenega zunanjega zraka bo zadostila kriteriju po zadostnem dotoku svežega zunanjega zraka, hkrati pa bo koncentracije radona ohranila pod predpisanimi in/ali priporočenimi dopustnimi mejnimi vrednostmi.



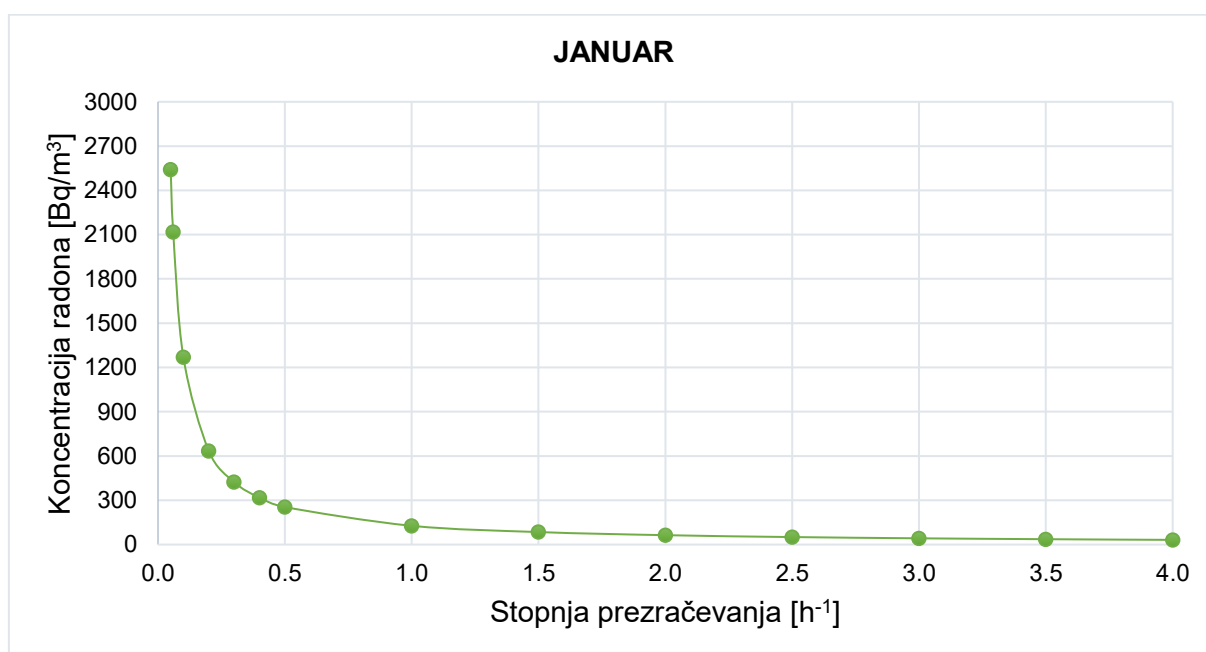
Grafikon 6: Primerjava rezultatov vpliva stopnje prezračevanja na koncentracije radona v učilnici vrta in pisarni.

Chart 6: Comparison of results of the impact of ventilation rate on radon concentrations in the kindergarten classroom and office.

Na Grafikonu 6 je prikazan potek koncentracij radona v učilnici vrtca in pisarni v odvisnosti od stopnje prezračevanja. Ob predpostavki, da je povprečna hitrost dotoka radona v prostor enaka za učilnico vrtca in pisarno, sta vrednost koncentracije radona v prostoru in stopnja prezračevanja v obratnem sorazmerju. Ker sta vrednosti generacije radona in prostornina prostora v premem sorazmerju, dobimo za enake stopnje prezračevanja enake vrednosti koncentracij ne glede na prostor.

7.4 Verifikacija in validacija rezultatov

Za naključno izbrana dneva v mesecu januarju, in sicer 14. 1. 2018 in 15. 1. 2018, ob upoštevanju izračunane povprečne hitrosti dotoka radona v prostor 6096 Bq/h, dobim za primer spalnice na območju Idrije rezultate prikazane na Grafikonu 7.

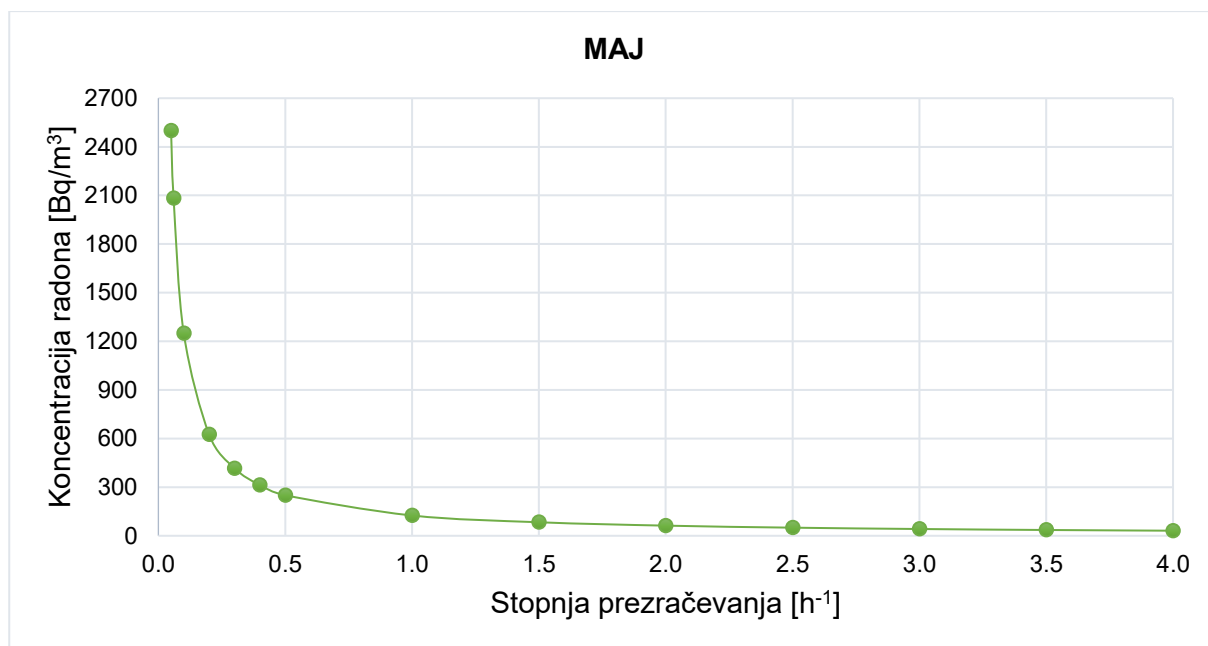


Grafikon 7: Vpliv stopnje prezračevanja [h⁻¹] na koncentracije radona [Bq/m³] za izbrana dneva v januarju 2018.

Chart 7: Impact of ventilation rate [h⁻¹] on radon concentrations [Bq/m³] for selected days in January 2018.

Uporabnika v zimskem času spalnico prezračita zjutraj tako, da okno odpreta na škarje za petnajst minut. Kot prikazuje Preglednica 12, je minimalna izmerjena koncentracija v dneh 14. 1. 2018 in 15. 1. 2018 znašala 447 Bq/m³, maksimalna pa je znašala 2358 Bq/m³. Ker je prostor zelo malo prezračevan in ker ima dobro tesnjena okna, lahko predpostavimo stopnjo prezračevanja na približno 0,3 h⁻¹ [78]. Izračun je pokazal, da koncentracija radona v prostoru pri stopnji prezračevanja 0,3 h⁻¹ znaša 422 Bq/m³, kar je za 6 % manjša od izmerjene. Za zaprt prostor predpostavimo minimalno stopnjo prezračevanja približno 0,06 h⁻¹ [77], pri kateri je izračunana koncentracija radona v prostoru 2112 Bq/m³ in je za približno 11 % manjša od maksimalno izmerjene.

Grafikon 8 prikazuje vpliv stopnje prezračevanja na koncentracije radona v času med 8. 5. 2018 in 9. 5. 2018 za primer izvedenih simulacij v spalnici na območju Idrije ter ob upoštevanju izračunane povprečne hitrosti dotoka radona v prostor, ki znaša 6000 Bq/h.

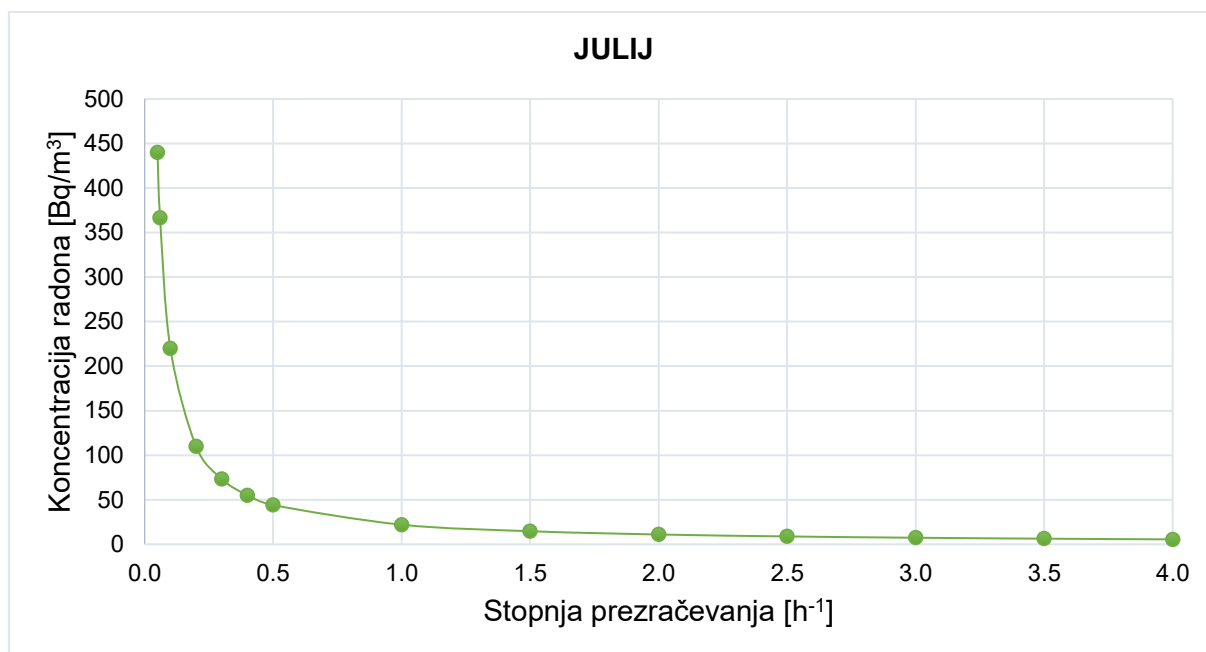


Grafikon 8: Vpliv stopnje prezračevanja [h^{-1}] na koncentracije radona [Bq/m^3] za izbrana dneva v maju 2018.

Chart 8: Impact of ventilation rate [h^{-1}] on radon concentrations [Bq/m^3] for selected days in May 2018.

V spomladanskem času uporabnika spalnico dobro prezračita zjutraj oziroma dopoldne. V kolikor je vreme suho zračita tudi popoldne in okno zapreta preden gresta spat. Največja izmerjena koncentracija naključno izbranih dni 8. 5. 2018 in 9. 5. 2018 je znašala 1900 Bq/m^3 , najmanjša pa 30 Bq/m^3 . Glede na rezultate simulacij (Grafikon 8), je razvidno, da je pri skoraj zaprtem prostoru, za katerega je predpostavljena stopnja prezračevanja 0,06 h^{-1} [77], izračunana koncentracija radona v prostoru znašala 2083 Bq/m^3 , kar je za dobrih 9 % večja od maksimalne izmerjene koncentracije. Ko se okno odpre na stežaj in se prostor v celoti prezračí, je glede na izračunano vrednost 30 Bq/m^3 , ki je enaka izmerjeni minimalni koncentraciji radona v prostoru, stopnja prezračevanja enaka 4,2 h^{-1} .

Za naključno izbrana dneva v mesecu juliju, in sicer 24. 7. 2018 in 25. 7. 2018, ob upoštevanju izračunane povprečne hitrosti dotoka radona v prostor 1056 Bq/h, dobim za primer spalnice na območju Idrije rezultate, ki so prikazani na Grafikonu 9.

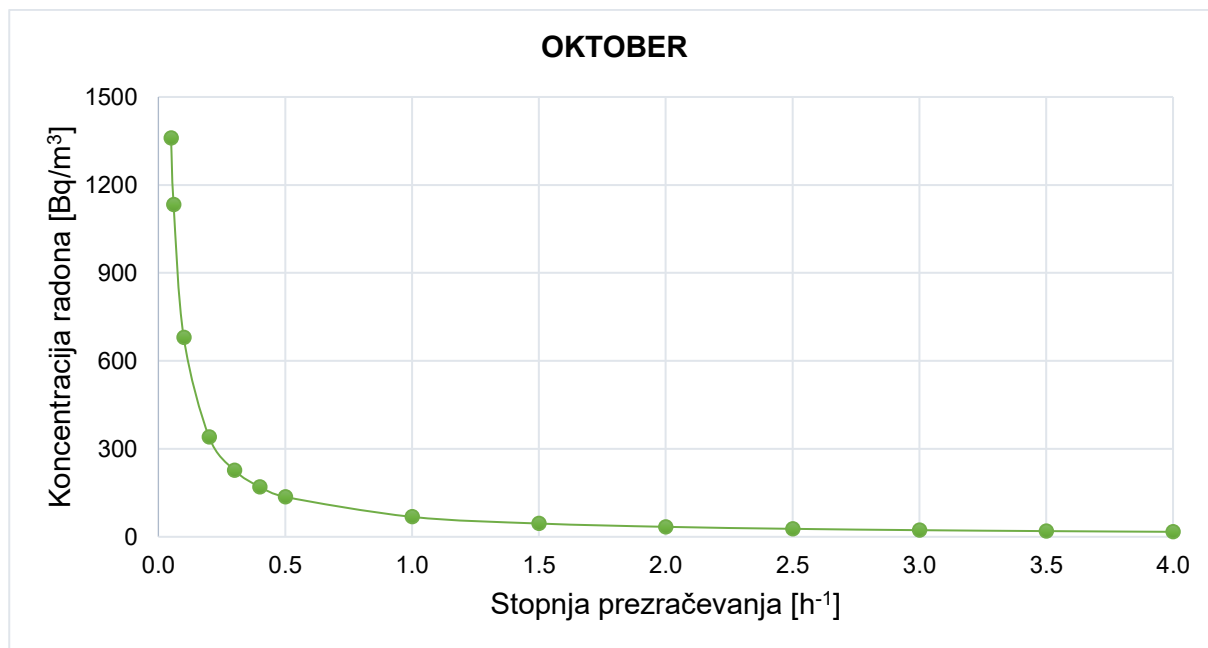


Grafikon 9: Vpliv stopnje prezračevanja [h⁻¹] na koncentracije radona [Bq/m³] za izbrana dneva v juliju 2018.

Chart 9: Impact of ventilation rate [h⁻¹] on radon concentrations [Bq/m³] for selected days in July 2018.

Glede na splošni poletni režim prezračevanja, je okno odprto na škarje cel dan in celo noč. Glede na meritve izbranih dni 24. 7. 2018 in 25. 7. 2018, je razvidno, da se okno pred spanjem zapre, saj začnejo koncentracije radona naraščati. Glede na izračunane koncentracije radona na Grafikonu 9 je razvidno, da je pri skoraj zaprtem prostoru oziroma stopnji prezračevanja 0,06 h⁻¹ [77] koncentracija radona 367 Bq/m³, kar je za dobrih 16 % manjša od dejansko izmerjene največje koncentracije v prostoru. Izmerjena minimalna koncentracija radona je bila 20 Bq/m³ in je glede na izračune dosežena pri stopnji prezračevanja 1,1 h⁻¹. Če upoštevamo, da predpostavka stopnje prezračevanje 4,2 h⁻¹ velja za prezračevanje skozi v celoti odprto okno, kot v primeru meseca maja, lahko predpostavimo, da je stopnja prezračevanja v primeru okna, odprtega na škarje, skozi cel dan približno četrtno le-te in znaša 1,1 h⁻¹. V tem primeru so rezultati simulacije in meritev med seboj primerljivi.

Za naključno izbrana dneva v mesecu oktobru, in sicer 6. 10. 2018 in 7. 10. 2018, ob upoštevanju izračunane povprečne hitrosti dotoka radona v prostoru 3264 Bq/h, dobim za primer spalnice na območju Idrije rezultate, ki so prikazani na Grafikonu 10.



Grafikon 10: Vpliv stopnje prezračevanja [h^{-1}] na koncentracije radona [Bq/m^3] za izbrana dneva v oktobru 2018.

Chart 10: Impact of ventilation rate [h^{-1}] on radon concentrations [Bq/m^3] for selected days in October 2018.

V jesenskem času se spalnica za 15 minut prezrači zjutraj, čez dan pa ostane zaprta. Prezrači se še pozno popoldne. Okno je v nočnem času zaprto. Maksimalna koncentracija 2002 Bq/m^3 , kot je prikazana v Preglednici 6, je bila izmerjena dne 6. 10. 2018 ob 0.57 uri in ni primerljiva z dobljenimi rezultati iz programa. Če vzamemo za primerjavo največjo koncentracijo, izmerjeno popoldne dne 7. 10. 2018, ki znaša 1606 Bq/m^3 je od izračunane vrednosti koncentracije 1133 Bq/m^3 pri skoraj zaprtem prostoru ($n = 0,06 \text{ h}^{-1}$) večja za skoraj 42 %. Glede na režim odpiranja oken, ki je podoben zimskemu, lahko predpostavimo stopnjo prezračevanja za primer hitrega zračenja na škarje zjutraj, na $0,3 \text{ h}^{-1}$ [78]. Izračunana koncentracija radona v prostoru pri tej predpostavki je 227 Bq/m^3 in od izmerjene minimalne vrednosti 102 Bq/m^3 odstopa za 22 %.

Iz rezultatov, ki so prikazani na Grafikonu 7, Grafikonu 8, Grafikonu 9 ter Grafikonu 10, je razvidno, da so koncentracije radona v primeru izbranega prostora, z zagotovitvijo minimalne stopnje prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$, kolikšna je določena v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38], v prostoru manjše od največje predpisane mejne vrednosti 300 Bq/m^3 , določena v Uredbi o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48]. Prav tako potrjujejo ugotovitev, da sta koncentracija radona in stopnja prezračevanja obratno sorazmerni. Relacija med generacijo radona, oziroma povprečno hitrostjo dotoka radona v prostor, in koncentracijo radona prostoru je premo sorazmerna.

Glede na rezultate in na njihovo primerjavo vidimo, da pride do večjih ali manjših odstopanj. Zavedati se moramo, da so koncentracije radona močno odvisne od režima prezračevanja in meteoroloških dejavnikov. Režim prezračevanja je bil opisno podan s strani uporabnika, medtem, ko o meteoroloških dejavnikov, ki vplivajo na koncentracije radona v prostoru nismo imeli podatkov. Zavedati se moramo, da je izmerjena koncentracija radona odraz vseh zunanjih in notranjih dejavnikov, zato so razlike med dnevi lahko zelo velike (glej Slika 19, Slika

20, Slika 21, Slika 22). Iz tega sledi, da je izračunan povprečni dotok radona v prostor prav tako zelo različen tekom meseca ter leta. Teh vplivov računalniški program ne zajema, saj temelji na stacionarni metodi izračuna koncentracij ob predpostavljenih vrednostih vhodnih podatkov. Ravno zaradi tega je potrebno v prvi vrsti izvesti meritve koncentracij radona v prostoru, saj je zelo težko predpostaviti dejansko situacijo. Do odstopanj med rezultati pride tudi zaradi samega načina izračuna in izvajanja meritev. Meritve so bile izvedene tekom celotnega leta, koncentracije pa so bile zabeležene vsako uro, s tem da so za izračun prevzeti stacionarni pogoji. Prav tako je bila na podlagi programa predpostavljena prostornina prostora, ki ni nujno popolnoma enaka dejanski.

8 RAZPRAVA

Cilj magistrskega dela je bil predstaviti problematiko na področju radona v bivalnem okolju in njegovemu vplivu na zdravje uporabnika ter ovrednotiti vpliv prezračevanja kot možen ukrep na zmanjševanje koncentracij radona v prostoru. Z metodo pregleda študij na tem področju smo dobili vpogled v nekatere že izvedene študije na področju kakovosti notranjega zraka ter na področju vpliva načina prezračevanja na koncentracije radona v prostoru. Veliko raziskovalcev je ugotovilo, da stopnja prezračevanja vpliva na koncentracije radona v notranjem okolju in prezračevanje predstavljajo kot enega izmed možnih ukrepov za zmanjševanje koncentracij radona v prostoru. Rezultati so med seboj lahko zelo različni, saj so koncentracije radona v zaprtih prostorih v veliki večini odvisne od lokacije objekta, prisotnega urana v zemljini pod objektom ter samega režima prezračevanja, kar nam podaja različne vrednosti povprečne hitrosti dotoka radona v prostor. Te se prav tako spreminjajo tekom leta.

Ob predpostavki povprečne hitrosti dotoka radona $800 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$, ki predstavlja najbolj neugodno situacijo, je za doseganje koncentracij radona, ki še zadoščajo maksimalni dopustni vrednosti 300 Bq/m^3 , zapisani v Uredbi o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48], v primeru pisarne in učilnice vrtca potrebna stopnja prezračevanja približno $0,9 \text{ h}^{-1}$. V primeru zagotavljanja minimalne stopnje prezračevanja prostora $0,5 \text{ h}^{-1}$, lahko koncentracije dosežejo tudi 500 Bq/m^3 in tako maksimalno mejno vrednost koncentracij radona v prostoru presežejo za 78 %. Iz tega sledi, da je pri projektiranju objekta in prostorov potrebno preverjati tako vse minimalne kriterije zakonodaje, glede na dotok zunanjega zraka v prostor, kot tudi dopustne vrednosti onesnaževalcev prostora. Na podlagi rezultatov izvedenih simulacij smo ugotovili, da so koncentracije radona v prostoru obratno sorazmerne s stopnjo prezračevanja, kar je razvidno iz Grafikona 2 in Grafikona 3. Ugotovitev se ujema z rezultati, do katerih so v svoji študiji prišli Keramatollah in sod. [54] ter Javier García-Tobar [69]. Iz rezultatov simulacij smo ugotovili, da so koncentracije radona najmanjše v primeru, ko je količina dovedenega zunanjega zraka izračunana iz priporočene količine zunanjega zraka na osebo, ki jo določa Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38]. V tem primeru so v primeru učilnice vrtca vrednosti koncentracij radona manjše od referenčne predpisane vrednosti v nacionalni zakonodaji. V primeru pisarne zaradi majhne prostornine prostora in visokega povprečnega dotoka hitrosti radona v prostor koncentracije radona to vrednost presegajo za 22 %.

V drugem sklopu simulacij, katerih rezultati so prikazani v poglavju 7.4 *Verifikacija in validacija rezultatov* za primer spalnice na območju Idrije, smo na podlagi smo na podlagi izmerjenih koncentracij radona, ki jih je opravil Institut Jožef Stefan, izračunali povprečno hitrost dotoka radona v prostor za naključno izbrane dneve v mesecu januarju, maju, juliju in oktobru. Izračunani povprečni dotok radona v prostor je v času med 14. 1. 2018 in 15. 1. 2018 znašal $381 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$, med 8. 5. 2018 in 9. 5. 2018 je znašal $375 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$, med 24. 7. 2018 in 25. 7. 2018 je znašal $66 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$ ter med 6. 10. 2018 in 7. 10. 2018 znašal $204 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$. V januarju je bila generacija radona za približno 2- krat manjša od prejšnje, predpostavljene v prvem sklopu simulacij. Iz rezultatov je bilo ugotovljeno premo sorazmerje med generacijo radona in koncentracijami radona v prostoru, zato so izračunane vrednosti koncentracij radona v spalnici za tolikokrat manjše kot je manjša generacija radona v primerjavi z generacijo radona v referenčnem prostoru pisarne.

Ob upoštevanih predpostavljenih stopnjah prezračevanja za izračun koncentracij radona v spalnici na območju Idrije, ki so znašale:

- $n = 0,06 \text{ h}^{-1}$ za skoraj zaprt prostor [77],
- $n = 0,3 \text{ h}^{-1}$ za slabo prezračevan prostor [78],
- $n = 4,2 \text{ h}^{-1}$ za popolnoma prezračevan prostor skozi celotno okno,
- $n = 1,1 \text{ h}^{-1}$ za celodnevno prezračevanje prostora skozi kipno okno,

sta verifikacija in validacija modela pokazali med 6 % in 16 % ujemanje z rezultati meritev, odvisno od izbranega meseca v letu.

Za naključno izbrana dneva v mesecu januarju je v primeru slabo prezračevanega prostora ($n = 0,3 \text{ h}^{-1}$) izračunana koncentracija radona v prostoru za 6 % manjša od izmerjene. Odstopanje med največjo izmerjeno koncentracijo radona in največjo izračunano koncentracijo radona pri pogoju skoraj zaprtega prostora ($n = 0,06 \text{ h}^{-1}$) je 11 %. V spomladanskem času pride do 9 % odstopanja izmerjenih in izračunanih koncentracijah radona v spalnici, v primeru skoraj zaprtega prostora ($n = 0,06 \text{ h}^{-1}$). Ko se prostor prezrači skozi celotno odprto okno ($n = 4,2 \text{ h}^{-1}$), se izmerjena in izračunana vrednost koncentracije radona popolnoma ujemata. V izbranih dnevih meseca julija se ob predpostavki celodnevnega prezračevanja skozi kipno okno ($n = 1,1 \text{ h}^{-1}$) izmerjena in izračunana koncentracija radona v prostoru ujemata. Do največjega odstopanja pride v izbranih dnevih meseca oktobra, ko največja ($n = 0,06 \text{ h}^{-1}$) izračunana koncentracija radona od izmerjene odstopa za 42 %, medtem ko v primeru slabega, hitrega, prezračevanja skozi kipno okno ($n = 0,3 \text{ h}^{-1}$) odstopa za 22 %. Višje koncentracije se pojavijo v odsotnosti uporabnika ter v nočnem času, in sicer kot posledica zaprtega prostora, kar potrjuje ugotovitve ostalih avtorjev [64], [65], [66], [67]. Opaženo je bilo tudi letno nihanje koncentracij, katere se močno razlikujejo glede na letni čas. Iz meritev je bilo razvidno, da do najvišjih povprečnih koncentracij radona prihaja v zimskem času, medtem ko do najnižjih prihaja v poletnem času. Vse to vpliva na izračun povprečne hitrosti dotoka radona v prostor, ki se v obdobju celega leta lahko močno spreminja (glej Preglednica 11). Glede na rezultate meritev in njihovo primerjavo vidimo, da pride do večjih ali manjših odstopanj. Zavedati se moramo, da so koncentracije radona močno odvisne od režima prezračevanja in meteoroloških dejavnikov. Režim prezračevanja je bil opisno podan s strani uporabnika, medtem, ko o meteoroloških dejavnikov, ki vplivajo na koncentracije radona v prostoru nismo imeli podatkov. Izmerjena koncentracija radona je odraz vseh zunanjih in notranjih dejavnikov, zato so razlike med dnevi lahko zelo velike. Iz tega sledi, da je izračunan povprečni dotok radona v prostor prav tako zelo različen tekom meseca ter leta. Teh vplivov računalniški program ne zajema, saj temelji na stacionarni metodi izračuna koncentracij ob predpostavljenih vrednostih vhodnih podatkov. Za večjo natančnost bi se morali poslužiti nestacionarne metode izračuna, ki zajema trenutne meteorološke razmere in predvsem vpliv uporabnika in njegovih navad prezračevanja.

Iz rezultatov simulacij spalnice na območju Idrije smo ugotovili, da je pogosto uporabljena minimalna stopnja prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$, ki je predpisana po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38], ustrezna, saj za izbrane dneve v izbranih mesecih zagotavlja koncentracije radona v prostoru manjše od največje predpisane mejne vrednosti 300 Bq/m^3 , kolikšna je predpisana po Uredbi o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48]. V kolikor se prostor prezračuje manj, lahko koncentracije hitro narastejo. Na to v svoji študiji opozarja tudi Bjørn Petter Jelle [62].

Koncentracije radona v notranjem okolju vplivajo na zdravje uporabnika. Zaradi relativno visoke koncentracije radona v zaprtih prostorih bivalnih in delovnih okoljih ter časa, ki ga ljudje

v njih preživimo, izpostavljenost radona prispeva k 90 % večjemu tveganju za nastanek pljučnega raka. Problem je, da samega radona z našimi čutili ne zaznamo in tako ne vemo, ali smo mu izpostavljeni. Tveganje za obolenje pljučnega raka se povečuje za 16 % z vsakim za 100 Bq/m³ povečanjem povprečne koncentracije radona [5], [76]. Iz tega sledi, da tveganje narašča proporcionalno z naraščanjem izpostavljenosti radonu. Raziskave so pokazale, da imajo na zdravje vpliv že koncentracije radona okoli 150 Bq/m³, če smo jim izpostavljeni dalj časa [16]. Zato svetovne smernice težijo k zmanjšanju koncentracij radona pod 100 Bq/m³. V primeru spalnice na območju Idrije bi za zagotavljanje koncentracije radona pod 100 Bq/m³ v mesecu januarju potrebovali prostor prezračevati vsaj s stopnjo prezračevanja 1,3 h⁻¹.

Z rezultati simulacij smo torej ugotovili, da pogosto uporabljena predpisana stopnja prezračevanja 0,5 h⁻¹, po Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38], za ohranjanje koncentracij radona pod predpisano največjo dovoljeno vrednostjo ne zadostuje vedno. Največji vpliv na koncentracije radona v prostoru ima povprečna hitrost dotoka radona v prostor, ki jo je težko določiti brez predhodno opravljenih meritev. Ta se razlikuje tudi glede na čas v letu, zato je potrebno najti najbolj neugodno trenutno situacijo za vsak prostor posebej. Iz tega sledi, da je v prvi vrsti ključnega pomena sistematično pregledovanje in izvajanje meritev radona, ki ga v Sloveniji zagotavlja Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji. Referenčna raven koncentracij radona, pod katero ukrepi za njegovo zmanjšanje načeloma niso potrebni, je 300 Bq/m³ [75], [48]. V kolikor se pojavijo višje koncentracije, je prostor potrebno ustrezno prezračiti, saj so rezultati študije [54] pokazali, da ima stopnja prezračevanja neposreden vpliv na nivo radona v prostoru, hkrati pa je potrebno zagotavljati tudi uravnoteženo prezračevanje [57]. To lahko potrdimo tudi z ugotovitvami na podlagi opravljenih simulacij. Še posebej je potrebno ustrezno zračiti prostore v pritličju in prostore v novozgrajenih stavbah ter energetsko saniranih stavbah. Da so koncentracije radona v teh dveh primerih stavb višje od koncentracij v tradicionalno zgrajenih stavbah, opozarjajo številne študije [58], [59], [63], [68], [61]. Glede na rezultate mnogih raziskovalcev ter naših ugotovitev, se največje koncentracije radona pojavljajo v hladnejših mesecih. V tem času odpiranje oken povzroči nelagodje v prostoru zaradi hladu in prepiha, zato bi bilo dobro, da se v prostorih zagotovi dodatno prezračevanje. V ta namen se lahko poslužujemo lokalnih prezračevalnih sistemov, ki ob rednem vzdrževanju zagotavljajo uravnoteženo kakovostno notranje okolje. Ker visokih koncentracij radona v prostoru uporabniki ne zaznajo, je prav tako pomembno, da se ljudi opozori, kdaj in koliko je potrebno prostor prezračiti. V pomoč so lahko razni merilniki koncentracij radona ali lokalni prezračevalni sistemi z vgrajenimi merilniki koncentracij radona, ki bi uporabnika opozorili, kdaj so koncentracije radona v prostoru presežene.

Magistrska naloga je osredotočena zgolj na ukrep prezračevanja za zmanjševanje koncentracij radona v zaprtih prostorih. V prvi vrsti je ključnega pomena sistematično pregledovanje in izvajanje meritev koncentracij radona v zaprtih prostorih, ki ga v Sloveniji zagotavlja Uprava Republike Slovenije za varstvo pred sevanji. V primeru visokih koncentracij je problematiko potrebno reševati celostno, z radonsko sanacijo samih virov radona. Celovit pristop preprečevanja in obvladovanja tveganja je potrebno upoštevati v vseh fazah gradnje novih ali prenovljenih objektov.

9 ZAKLJUČEK

Način gradnje danes stremi k čim manjši rabi energije in visoki zrakotesnosti stavb, zaradi katere je zmanjšana intenziteta prezračevanja prostorov. Z vsemi energetsko učinkovitimi ukrepi se je kakovost notranjega zraka poslabšala. Ta namreč predstavlja pomemben parameter, ki mora biti zagotovljen v notranjem okolju, saj uporabniku lahko povzroči neugodje ali celo predstavlja tveganje za njegovo zdravje. Energijska učinkovitost in dobro zdravo notranje okolje se ne smeta izključevati. S sistematičnim pregledom študij na tematiko kakovosti notranjega zraka s stališča radona smo ugotovili, da je kakovost notranjega zraka velikokrat neprimerna, saj koncentracije radona na izpostavljenih območjih presegajo zahtevane in priporočene mejne vrednosti. Potrdili smo hipotezo, da imata na koncentracije radona v prostoru velik vpliv sama lokacija objekta in prostora znotraj njega ter način gradnje. Na podlagi ugotovitev je potrebno posebno pozornost nameniti prostoru v novozgrajenih stavbah in energetsko saniranih stavbah, saj se tam pojavljajo višje koncentracije radona kakor v tradicionalno grajenih stavbah.

S sistematičnim pregledom študij na tematiko obvladovanja koncentracij radona, kjer smo se osredotočili na vidik prezračevanja in njegovega vpliva na koncentracije radona v notranjem okolju, ter z izvedenimi simulacijami za primer referenčne učilnice vrtca in pisarne, smo ugotovili, kako različna stopnja prezračevanja, določena na podlagi predpisanih in priporočenih vrednostih iz Pravilnika o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38], vpliva na koncentracije radona v notranjem okolju. Z dobljenimi rezultati smo potrdili hipotezo, da se koncentracija radona z večanjem stopnje prezračevanja zmanjšuje. Ugotovili smo, da sta stopnja prezračevanja in koncentracija radona v obratnem sorazmerju. Prav tako smo na podlagi rezultatov simulacij potrdili hipotezo, da vse predpisane vrednosti v Pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) [38] o količinah dovedenega zunanjega zraka ne bodo zadostile zahtevanim in priporočenim vrednostim koncentracij radona v prostoru. Pogosto uporabljena predpisana minimalna stopnja prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$ ne zadostuje v primerih, kjer se v prostoru z manjšo prostornino nahaja več oseb ali kjer je hitrost dotoka radona v prostor res velika. V našem primeru, ki obsega referenčno učilnico vrtca in pisarno, bi se ob predpostavki hitrosti dotoka radona v prostor $800 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$ morala upoštevati priporočena količina zunanjega zraka, ki znaša $30 \text{ m}^3/\text{h}$ na osebo v primeru učilnice in $50 \text{ m}^3/\text{h}$ na osebo v primeru pisarne, v kateri dela ena oseba. Kljub temu, da se pri izračunu energijskih izgub, v sklopu standardnih pogojev uporabe stanovanjske stavbe pogosto uporabi stopnja izmenjave zraka $0,5 \text{ h}^{-1}$, je potrebno projektirati stavbo skladno s potrebami glede kakovosti zraka.

Z rezultati meritev na območju Idrije smo verificirali rezultate simulacij. Ker so bile izračunane povprečne hitrosti dotoka radona v prostor manjše od začetne predpostavljene, smo v tem primeru ugotovili, da predpisana minimalna stopnja prezračevanja $0,5 \text{ h}^{-1}$ zagotavlja koncentracije radona v spalnici na naključno izbrane dneve v letu pod predpisano mejno vrednostjo 300 Bq/m^3 , kakršno narekuje Uredba o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48]. V kolikor se predpostavlja, da je stopnja prezračevanja skoraj zaprtega prostora $0,06 \text{ h}^{-1}$, slabo prezračevanega dobro tesnjenega prostora $0,3 \text{ h}^{-1}$, dobro prezračevanega skozi popolno odprto okno $4,2 \text{ h}^{-1}$ in prezračevanega skozi cel dan z odprtim oknom na škarje $1,1 \text{ h}^{-1}$, so rezultati simulacij primerljivi z izmerjenimi koncentracijami radona v dejanskem prostoru. Do odstopanj pride zaradi samega načina izvedbe simulacij, ki so

opravljene pri stacionarnih pogojih in ne vključujejo dnevna spreminjanja zunanjih in notranjih parametrov okolja ter režima prezračevanja uporabnika.

Z dobljenimi rezultati magistrskega dela smo prišli do zaključka, da je za ugodno in zdravo notranje okolje nujno potrebno zagotavljati ustrezno kakovost notranjega zraka. Da se izognemo visokim koncentracijam radona v prostoru, je v prvi vrsti potrebno ustrezno izobraziti in osveščati prebivalce na najbolj izpostavljenih območjih radona ter zagotoviti meritve koncentracij radona, saj so te odvisne od same lokacije objekta in ostalih geoloških značilnosti terena, načina in kakovosti gradnje, meteoroloških dejavnikov, režima prezračevanja in bivalnih navad uporabnika. Vsak prostor, ki je izpostavljen radioaktivnemu žlahtnemu plinu, je potrebno obravnavati zase, saj ni nujno, da bodo predpisane minimalne količine dovedenega zunanjega zraka v prostor zadoščale in zagotovile koncentracije radona, ki bi bile pod mejno vrednostjo 300 Bq/m^3 , kolikšna je definirana v Uredbi o nacionalnem radonskem programu (Ur. l. RS, št. 86/18) [48]. Mejna vrednost koncentracij radona v zaprtih prostorih se zaradi njegovega vpliva na zdravje zmanjšuje. Priporočena vrednost koncentracij radona v prostoru, ki je določena s strani WHO in znaša 100 Bq/m^3 , je definirana tudi v slovenskem standardu SIST EN 16798-1:2019 [49]. Ker radona v prostoru uporabnik ne zazna, podajamo predlog, da se v prostore namešča merilnike in senzorje, ki bi opozarjali na prekoračene vrednosti koncentracij radona. Minimalni trenutni ukrep, ki se lahko izvede, je ustrezno prezračevanje prostora. Za bolj uravnoteženo in kakovostno prezračevanje se lahko poslužujemo tudi namestitve lokalnega prezračevalnega sistema z vgrajenim senzorjem radona. Dolgoročno je na najbolj izpostavljenih območjih problem potrebno reševati z ustrezno protiradonsko sanacijo objekta.

10 VIRI

- [1] Dovjak, M. 2017. Kvaliteta notranjega zraka: IAQ. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [2] Leban, M. 2013. Vpliv okolja in bivalnih navad na raven radona v domovih. Diplomsko naloga. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju (samozaložba M. Leban): 42 str.
- [3] Keskikuru, T., Kokotti, H., Lammib, S., Kalliokoski, P. 2001. Effect of various factors on the rate of radon entry into two different types of houses. *Building and Environment* 36: 1091–1098.
- [4] Schmid, K., Kuwert, T., Drexler, H. 2010. Radon in indoor spaces: An underestimated risk factor for lung cancer in environmental medicine. *Deutsches Ärzteblatt International* 107: 181–186.
- [5] WHO
<http://www.who.int/en/> (Pridobljeno 11. 03. 2018.)
- [6] Nero Jr., A.V., Gadgil, A.J., Nazaroff, W.W., Revzan, K.L. 1990. Indoor radon and decay products: concentrations, causes, and control strategies. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
- [7] Nero Jr., A.V. 1988. Radon and its decay products in indoor air: an overview. V: *Radon and its Decay Products in Indoor Air*. Nazaroff, W.W., Nero Jr, A.V. (ur.). John Wiley and Sons, New York, str. 1–53.
- [8] Gregorič, A., Zmazek, B., Džeroski, S., Torkar, D., Vaupotič, J. 2012. Radon as an earthquake precursor – methods for detecting anomalies. *Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning*.
[doi: 10.5772/29108](https://doi.org/10.5772/29108)
- [9] Hassan, N.M., Hosoda, M., Ishikawa, T., Sorimachi, A., Sahoo, S.K., Tokonami, S., Fukushima, M. 2009. Radon migration process and its influence factors; review. *Japanese Journal of Health Physics* 44: 218–231.
<https://doi.org/10.5453/jhps.44.218>
- [10] Hočevár, M. 2005. Porazdelitev radona v tleh na labotskem prelomu pri Homcu. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehniška fakulteta (samozaložba M. Hočevár): 65 str.
- [11] ICRP 24, 1976. Radiation Protection in Uranium and other Mines. A Report of the Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 24. Pergamon Press.

- [12] ICRP 39, 1983: Principles for limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation. A Report of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 39. Pergamon Press.
- [13] Vaupotič, J. 2003. Indoor radon in Slovenia. Nuclear Technology & Radiation Protection 18: 36–43.
- [14] Kobal, I., Vaupotič, J., Udovč, H., Burger, J., Stropnik, B. 1990. Radon concentrations in the air of Slovene (Yugoslavia) underground mines. Environment International 16: 171–173.
- [15] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 2000. Report to the General Assembly, with scientific annexes. 2000. Vol. 1
- [16] EPA
<https://www.epa.gov/> (Pridobljeno 03. 11. 2019.)
- [17] Kobal, I., Smodiš, B., Burger, J., Škofljanec, M. 1987. Atmospheric ^{222}Rn in tourist caves of Slovenia, Yugoslavia. Health Physics 52: 473–479.
- [18] Vaupotič J. 2010. Radon levels in Karst caves in Slovenia. Acta Carsologica 39: 503–512
- [19] Popit, A., Vaupotič, J. 2002. The influence of geology on elevated radon concentrations in Slovenian schools and kindergartens. Geologija 45, 2: 499-504.
- [20] Humar, M., Šutej, T., Skvarč, J., Mljač, L., Radež, M., Ilić, R. 1992. Indoor and outdoor radon survey in Slovenia by etched track detectors. Radiation Protection Dosimetry 45: 549–552.
- [21] Butala, V. 1997. Kakovost zraka v prostoru - vzrok za zamenjavo toplovodnega s toplozračnim sistemom ogrevanja. Strojniški vestnik 43, 1-2: 42-56.
- [22] Mele, I. 2006. Raopis. Časopis Agencije za radioaktivne odpadke. ARAO. Vse o sevanju, kar ne veste, pa bi želeli: 36 str.
- [23] NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). 1984. Exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters. NCRP Report No. 77
- [24] Schumann R.R., Gundersen C.S. 1996. Geologic and climatic controls of radon emanation coefficient. 1996. Environment International 22: 439–446
- [25] Akerblom G., 1999. Radon Legislation and National Guidelines. Swedish Radiation Protection Inst., Stockholm.
- [26] Nazarof, W.W. 1992. Radon transport from soil to air. Reviews of Geophysics 30: 137–160.
- [27] European Commission.
https://ec.europa.eu/commission/index_en (Pridobljeno 10. 02. 2019.)

[28] Vaupotič, J., Gregorič, A. 2013. Radioaktivni žlahtni plin radon. Fokus: Vzgoja za trajnostni razvoj. Didakta: 21-22.

[29] Vaupotič, J. 1995. Koncentracija radona in njegovih razpadnih produktov v bivalnem okolju ter modelni izračun doz. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, oddelek za kemijo kemijsko tehnologijo: 123 str.

[30] Wilkening, M. 1990. Studies in Environmental Science 40. Radon in the Environment. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands.

[31] EC (European Commission). Radiation Protection 122. 2002. Part II: Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.

[32] EC (European Commision), 1999. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Radiation Protection 112, European Commission, Directorate-General, Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.

[33] Koželj, M., Erman, R., Istenič, R., Černilogar Radež, M. 2006. Delo z viri sevanj. Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana.

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

[35] Ruano-Ravina, A., Prini-Guadalupe, L., Barros-Dios, J., Abal-Arca, J., Leiro-Fernández, V., González-Silva, A., Golpe-Gómez, A., González-Barcala, F., Pena, C., Montero-Martínez, C., Martínez-González, C., Mejuto-Martí, M. and Veres-Racamonde, A. 2012. Exposure to Residential Radon and Lung Cancer in Never-smokers: The Preliminary Results of the LCRINS Study. Archivos de Bronconeumología 48, 11. 405-409.
[doi: 10.1016/j.arbres.2012.05.010](https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.05.010)

[36] Gray, A., Read, S., McGale, P. and Darby, S. 2019. Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them.
[doi: 10.1136/bmj.a3110](https://doi.org/10.1136/bmj.a3110)

[37] Chen, J. 2019. Risk assessment for radon exposure in various indoor environments. Radiation Protection Dosimetry 185, 2: 143-150.
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncy284>

[38] Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb. Uradni list RS št. 42/02, 105/02, 110/02 – ZGO-1 in 61/17 – GZ.
<http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV4223#> (Pridobljeno 13. 03. 2019.)

[39] Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih. Uradni list RS št. 89/99.
<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV418> (Pridobljeno 13. 03. 2019.)

[40] CONTAM 3.2.

<https://www.nist.gov/el/energy-and-environment-division-73200/nist-multizone-modeling/software-tools/contam> (Pridobljeno 13. 03. 2019.)

[41] Dovjak, M., Slobodnik, J., Krainer, A. 2019. Deteriorated indoor environmental quality as a collateral damage of present day extensive renovations. *Strojniški vestnik* 65, 1: 31-40.

[doi:10.5545/sv-jme.2018.5384](https://doi.org/10.5545/sv-jme.2018.5384)

[42] Kalender Smajlovič, S., Dovjak, M., Kuček, A. 2019. Pogostost sindroma bolnih stavb v bolnišnicah v povezavi z okoljskimi dejavniki: sistematični pregled literature. *Obzornik zdravstvene nege*, 53, 3: 221-231.

<https://doi.org/10.14528snr.2019.53.1.850>

[43] Zavod za varstvo pri delu.

<http://www.zvd.si/> (Pridobljeno 25. 11. 2019.)

[44] Gregorič, A., Zidanšek, A., Vaupotič, J. 2011. Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature. *Jožef Stefan Institute, Ljubljana. Nat. Hazards Earth System Sciences*, 11: 1523-1528.

[45] Vaupotič, J., Kobal, I., Dujmovič, P., Kotnik, P., Kocman, D., Barišič, D., Lovrenčič, I. 2006. Radonski potencial v tleh Slovenije. *Institut Jožef Stefan, Delovno poročilo IJS-DP-9457*.

[46] Sevc J., Kunz E., Placek Y., 1976: Lung cancer in uranium miners and long term exposure to radon daughter products. *Health Physics*, 30: 433-437.

[47] Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti. Uradni list RS št. 76/17.

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO7385> (Pridobljeno 13. 03. 2019.)

[48] Uredba o nacionalnem radonskem programu. Uradni list RS št. 86/18.

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7840> (Pridobljeno 09. 02. 2019.)

[49] SIST EN 16798-1:2019. Energijske lastnosti stavb – Prezračevanje stavb – 1.del: Vstopni podatki notranjega okolja za projektiranje in ocenjevanje energijskih lastnosti stavb glede kakovosti notranjega zraka, toplotnega okolja, razsvetljave in akustike – Modul M1-6.

[50] Archer, VE, Magnuson, HJ, Holaday DA, Lawrence PA. 1962: Hazards to health in uranium mining and milling. *Journal of Occupational Medicine*, 4: 55-60.

[51] Chovil A., 1981: The epidemiology of primary lung cancer in uranium miners in Ontario. *Journal of Occupational Medicine*, 23: 417-421.

[52] Collignan, B., Powaga, E. 2019. Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration. *Journal of Environmental Radioactivity*, 196: 268-273.

[doi: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.023](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.023)

[53] Grządziel, D., Kozak, K., Mazur, J., Polednik, B., Dudzińska, M., Bilska, I. 2016. The influence of air conditioning changes on the effective dose due to radon and its short-lived decay products. *Nukleonika*, 61, 3: 239-244.

[doi: 10.1515/nuka-2016-0040](https://doi.org/10.1515/nuka-2016-0040)

[54] Akbari, K., Mahmoudi, J., Ghanbari, M. 2013. Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house. *Journal of Environmental Radioactivity*, 116: 166-173.

[doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.08.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.08.013)

[55] Lee, T., Yu, K. 2000. Effects of air conditioning, dehumidification and natural ventilation on indoor concentrations of and. *Journal of Environmental Radioactivity*, 47, 2: 189-199.

[doi: 10.1016/S0265-931X\(99\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(99)00031-4)

[56] Wallner, P., Munoz, U., Tappler, P., Wanka, A., Kundi, M., Shelton, J., Hutter, H. 2015. Indoor environmental quality in mechanically ventilated, energy-efficient buildings vs. conventional buildings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 11: 14132-14147.

[doi: 10.3390/ijerph121114132](https://doi.org/10.3390/ijerph121114132)

[57] Finne, I., Kolstad, T., Larsson, M., Olsen, B., Prendergast, J., Rudjord, A. 2019. Significant reduction in indoor radon in newly built houses. *Journal of Environmental Radioactivity*, 196: 259-263.

[doi: 10.1016/j.jenvrad.2018.01.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.01.013)

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

[doi: 10.1088/1755-1315/72/1/012020](https://doi.org/10.1088/1755-1315/72/1/012020)

[59] Baeza, A., García-Paniagua, J., Guillén, J., Montalbán, B. 2018. Influence of architectural style on indoor radon concentration in a radon prone area: A case study. *Science of the total environment*, 610-611: 258-266.

[doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.056](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.056)

[60] Derbez, M., Wyart, G., Le Ponner, E., Ramalho, O., Ribéron, J., Mandin, C. 2017. Indoor air quality in energy-efficient dwellings: Levels and sources of pollutants. *Indoor Air*, 28, 2: 318-338.

[doi: 10.1111/ina.12431](https://doi.org/10.1111/ina.12431)

[61] Pampuri, L., Caputo, P., Valsangiacomo, C. 2018. Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions. *Sustainable Cities and Society*, 42: 100-106.

[62] Jelle, B. 2012. Development of a model for radon concentration in indoor air. *Science of the total environment*, 416: 343-350.

[doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.11.052](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.052)

[63] Cucos, A., Dicu, T. 2015. Indoor radon exposure in energy-efficient houses from Romania. Romanian Journal of Physics, 60, 9: 1574-1580.

[64] Azara, A., Dettori, M., Castiglia, P., Piana, A., Durando, P., Parodi, V., Salis, G., Saderi, L., Sotgiu, G. 2018. Indoor radon exposure in italian schools. international journal of environmental research and public health, 15, 4: 749.
[doi: 10.3390/ijerph15040749](https://doi.org/10.3390/ijerph15040749)

[65] Branco, P., Nunes, R., Alvim-Ferraz, M., Martins, F., Sousa, S. 2016. Children's exposure to radon in nursery and primary schools. International journal of environmental research and public health, 13, 4: 386.
[doi: 10.3390/ijerph13040386](https://doi.org/10.3390/ijerph13040386)

[66] Vaupotic, J., Bezek, M., Kavasi, N., Ishikawa, T., Yonehara, H., Tokonami, S. 2012. Radon and thoron doses in kindergartens and elementary schools. Radiation Protection Dosimetry, 152, 1-3: 247-252.

[67] Vaupotič, J. 2002. Search for radon sources in buildings — kindergartens. Journal of Environmental Radioactivity, 61, 3: 365-372.

[68] 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: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.013](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.09.013)

[69] García-Tobar J. A comparative study of indoor radon levels between two similar dwellings using CONTAM software. Environments 2018, 5: 59.
<https://www.mdpi.com/2076-3298/5/5/59> (Pridobljeno 31. 10. 2019.)

[70] Šutej, T. 2019. Radon – predpisi, izkušnje. Uprava RS za varstvo pred sevanji.
<http://www.rasr.si/si/files/default/CLEAN/Posvet%20o%20radonu/Uprava%20RS%20za%20varstvo%20pred%20sevanji,%20Toma%20c5%be%20%20c5%a0utej%20-%20Predpisi,%20izku%20a1nje.pdf> (Pridobljeno 01. 12. 2019.)

[71] Vaupotič, J. 2019. Meritve koncentracij radona v dveh stanovanjskih hišah na območju Idrije. Osebna komunikacija. (09. 12. 2019.)

[72] Ferfolja, M. 2019. Vpliv bivalnih navad na dinamiko radona v domovih. Magistrsko delo. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju (samozaložba M. Ferfolja): 47 str.

[73] Omahen, G. 2016. Sistematično pregledovanje delovnega in bivalnega okolja 2016. Zavod za varstvo pri delu. Ljubljana.
<https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Porocila-radon/0a6237b07f/Porocilo-Radon-2016.pdf> (Pridobljeno 15. 12. 2019.)

[74] Knez, F., Malovrh Rebec, K., Treppo Mekiš, B., Knez, N. 2017. Navodila v primeru zaznanih povečanih koncentracij radona v stavbah javnih vzgojno izobraževalnih zavodov (VIZ). Republika Slovenije Ministrstvo za zdravje, Uprava republike Slovenije za varstvo pred sevanji, Zavod za gradbeništvo Slovenije.

<https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Smernice-Radon/Radon-Smernice-za-sanacijo.pdf> (Pridobljeno 15. 12. 2019.)

[75] Zmanjševanje izpostavljenosti radonu. Republika Slovenije GOV.SI.

<https://www.gov.si teme/zmanjsevanje-izpostavljenosti-radonu/> (Pridobljeno 15. 12. 2019.)

[76] Knez, F., Malovrh Rebec, K., Knez, N. 2017. Smernica za gradnjo radonsko varnih novih stavb novogradenj. Republika Slovenije Ministrstvo za zdravje, Uprava republike Slovenije za varstvo pred sevanji, Zavod za gradbeništvo Slovenije.

<https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Smernice-Radon/Radon-Smernice-za-novogradnje.pdf> (Pridobljeno 15. 12. 2019.)

[77] SIST EN ISO 13789:2017. Toplotne značilnosti stavb - Toplotni koeficienti pri prenosu toplote in prezračevanju - Računska metoda.

[78] Abdallah, A.M., Mohery, M., Yaghmour, S.J., Alddinc, S.H. 2012. Radon exhalation and natural radiation exposure in low ventilated rooms. Radiation Physics and Chemistry, 81: 1710-1714.