

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**VPLIV OKOLJA IN BIVALNIH NAVAD NA RAVEN
RADONA V DOMOVIH**

DIPLOMSKO DELO

Miha LEBAN

Mentorici: dr. Asta Gregorič, prof. dr. Janja Vaupotič

Nova Gorica, 2013

IZJAVA

Izjavljam, da je diplomsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Rezultati, ki so nastali v okviru skupnega raziskovanja z drugimi raziskovalci, ali so jih prispevali drugi raziskovalci (strokovnjaki), so eksplicitno prikazani oziroma navedeni (citirani) v diplomskem delu.

Miha Leban

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoricama prof. dr. Janji Vaupotič in dr. Asti Gregorič za vse usmerjanje in pomoč pri izdelavi diplomske naloge ter vso podporo.

POVZETEK

Cilj diplomske naloge je statistično obdelati rezultate raziskave o radonu v zraku v bivalnem okolju, ki je potekala v obdobjih november 2011 – april 2012 in maj 2012 – oktober 2012 v 400 domovih po Sloveniji, in ovrednotiti dejavnike, ki vplivajo na koncentracijo radona v domovih. Poleg same meritve sem imel na voljo tudi vprašalnik, v katerem so gospodinjstva odgovarjala na vprašanja glede bivalnih navad in lastnosti domovanja. V prvem obdobju so bile koncentracije radona v bivalnem okolju v območju od 19 do 8616 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 340 ± 55 Bq m⁻³, v drugem obdobju pa v območju od 17 pa do 4196 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 158 ± 24 Bq m⁻³. Aritmetična srednja vrednost koncentracije radona v celotnem obdobju merjenja je bila 249 ± 40 Bq m⁻³. Koncentracija radona v zgradbi je odvisna od letnega časa, geološke podlage, na kateri stoji zgradba, nadstropja, v katerem je prostor, od tesnjenja oken in od bivalnih navad stanovalcev.

Ključne besede: bivalne navade, domovi, geologija, lastnosti zgradbe, notranji zrak, radon

SUMMARY

The goal of this study was to statistically process results of the research on radon in indoor air in 400 homes, performed in the periods November 2011 – April 2012 and May 2012 – October 2012, and to evaluate parameters influencing indoor radon concentrations. The evaluation was also based on the questionnaires on the building characteristics and living habits filled in by the inhabitants. Radon concentrations in the first period were in range of 19 – 8616 Bq m⁻³ with the arithmetic mean of 340 ± 55 Bq m⁻³, and in the second period, in range of 17 – 4196 Bq m⁻³ with the arithmetic mean of 158 ± 24 Bq m⁻³. Arithmetic mean during the entire period of measurements was 249 ± 40 Bq m⁻³. Indoor air radon concentration depends on the yearly season, geology of the ground on which the building is lying, building characteristics, floor of the room surveyed, air tightness of windows, and living habits of residents.

Key words: building characteristics, geology, homes, indoor air, living habits, radon

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 Kratka predstavitev problema radona	1
1.2 Cilji diplomskega dela.....	2
2 TEORETIČNE OSNOVE.....	3
2.1 Radioaktivnost.....	3
2.2 Radon in njegove fizikalno-kemijske lastnosti	4
2.3 Izvor radona	5
2.4 Migracija radona od nastanka do površja	6
2.4.1 Emanacijski koeficient.....	6
2.4.2 Propustnost.....	7
2.4.3 Difuzija	7
2.4.4 Advekcija	8
2.4.5 Konvekcija	8
2.4.6 Ekshalacija.....	8
2.5 Viri radona v bivalnem okolju.....	9
2.6 Vstop radona v bivalno okolje.....	9
2.7 Časovna nihanja koncentracije radona v bivalnem okolju	10
2.8 Vpliv litologije zemljišča na koncentracijo radona v bivalnem okolju	11
2.9 Vpliv radona na zdravje	11
2.10 Geologija in tektonika Slovenije.....	12
2.11 Dosedanje raziskave o radonu v Sloveniji	13
3 EKSPERIMENTALNI DEL	15
3.1 Merilna tehnika.....	15
3.2 Izbira lokacij	16
3.3 Določanje litologije zemljišča	17
3.4 Obdelava rezultatov	18
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	20
4.1 Povprečne koncentracije radona v vseh domovih.....	20
4.1.1 Logaritemsko-normalna porazdelitev	20
4.1.2 Koncentracije radona glede na litološko podlago	21
4.1.3 Koncentracije radona glede na starost zgradbe	22
4.1.4 Koncentracija radona glede na nadstropje merjenja.....	24
4.1.5 Koncentracija radona glede na tesnjenje oken.....	25

4.1.6	Koncentracija radona glede na starost oken	26
4.1.7	Koncentracija radona glede na pogostost prezračevanja	27
4.1.8	Primerjava koncentracij radona med hladnim in toplim obdobjem merjenja.	27
4.1.9	Primerjava koncentracij radona med hladnim in toplim obdobjem merjenja v domovih, ki stojijo na flišni ali karbonatni podlagi	28
4.2	Povprečne koncentracije radona v domovih s preseženimi mejnimi vrednostmi	30
4.2.2	Koncentracije, višje od 400 Bq m^{-3} glede na starost zgradbe.....	32
4.2.3	Koncentracije, višje od 400 Bq m^{-3} , glede na nadstropje merjenja	32
4.2.4	Koncentracije, višje od 400 Bq m^{-3} , glede na tesnjenje oken	33
4.2.5	Koncentracije, višje od 400 Bq m^{-3} , glede na prezračevalne navade	33
4.2.5	Koncentracije radona, višje od 400 Bq m^{-3} , glede na starost oken.....	34
4.3	Prostorska porazdelitev radona	35
5	ZAKLJUČKI	37
6	VIRI	39

SEZNAM SLIK

Slika 1: Razpadni niz radona.....	5
Slika 2: Shematski prikaz emanacije radona in različne poti odrinjenega atoma radona in njegove končne točke v mediju.	7
Slika 3: Prehajanje radona iz zemlje v zunanji in notranji zrak.....	10
Slika 4: Delež obsevanosti prebivalstva v Sloveniji od posameznih vrst virov sevanj .	12
Slika 5: Evropski radonski atlas.....	14
Slika 6: Detektorji jedrskih sledi Gammadata proizvajalca Landauer Nordic.....	15
Slika 7: Mikroskopska slika folije v detektorju jedrskih sledi.....	15
Slika 8: Lokacije meritev	16
Slika 9: Litološke enote in lokacije meritev	18
Slika 10: Logaritemsko normalna porazdelitev povprečnih koncentracij radona v 316 domovih.....	20
Slika 11: Povprečne celoletne koncentracije radona v 316 domovih glede na litološko podlago pod zgradbo	22
Slika 12: Povprečne letne koncentracije radona v 311 domovih glede na leto izgradnje	23
Slika 13: Povprečna letna koncentracija radona v 305 domovih glede na nadstropje merjenja.....	24
Slika 14: Povprečna letna koncentracija radona v 313 domovih glede na tesnjenje oken.....	25
Slika 15: Povprečna letna koncentracija radona v 313 domovih glede na starost oken	26
Slika 16: Povprečna letna koncentracija radona v 312 domovih glede na pogostost prezračevanja	27
Slika 17: Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplem obdobju (C_{Rn}^T).....	28
Slika 18: Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplem obdobju (C_{Rn}^T) pri 111 domovih, ki stojijo na karbonatni podlagi.....	29
Slika 19: Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplem obdobju (C_{Rn}^T) pri 28 domovih, ki stojijo na flišni podlagi	29
Slika 20: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m ⁻³ , glede na litološko podlago.....	31
Slika 21: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m ⁻³ , glede na obdobje izgradnje	32
Slika 22: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m ⁻³ , glede na tesnjenje oken	33
Slika 23: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m ⁻³ , glede na pogostost prezračevanja.....	34
Slika 24: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m ⁻³ , glede na starost oken.....	35
Slika 25: Lokacije meritev v domovih in velikostni razred povprečne celoletne koncentracije v njih	36
Slika 26: Prostorska porazdelitev povprečnih celoletnih koncentracij radona v domovih	36

SEZAM PREGLEDNIC

Preglednica 1: Statistični parametri povprečnih celoletnih koncentracij radona v 316 domovih glede na litološko podlago	21
Preglednica 2: Statistični parametri povprečnih letnih koncentracij radona v 311 domovih glede na obdobje izgradnje.....	23

SEZNAM OKRAJŠAV

Bq m⁻³ = becquerel na kubični meter

GIS = geografski informacijski sistem

RnDP = radonovi razpadni produkti

UVOD

1.1 Kratka predstavitev problema radona

Radioaktivni žlahtni plin radon nastaja z α -radioaktivno preobrazbo radija, v naravnih radioaktivnih nizih urana (^{238}U), aktinija (^{235}U) ali torija (^{232}Th). Izmed treh izotopov radona (^{222}Rn -radon, ^{219}Rn -aktinon, ^{220}Rn -toron) ima ^{222}Rn najdaljšo razpolovno dobo (3,82 dni) in ga, če ni drugače navedeno, imenujemo radon. Kot žlahtni plin ne reagira z ostalimi elementi, pač pa z njegovo α -radioaktivno preobrazbo nastajajo radioaktivni kratkoživi produkti (RnDP): ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi in ^{214}Po . Ti se v zraku vežejo na aerosolne delce in pridejo z dihanjem v pljuča, kjer se jih del usede na stene dihalnih poti. Energija, ki se sprošča pri njihovih radioaktivnih preobrazbah, se absorbira v tkivu in ga poškoduje. To lahko vodi do pojava raka. Tako je radon skupaj z RnDP drugi najpogostejši vzrok za pljučnega raka (UNESCAR, 2000) in je zato postal predmet številnih raziskav. Njegove fizikalno-kemijske lastnosti, kot so inerten žlahtni plin, ki lahko potuje tudi na daljše razdalje, mu omogočajo tudi drugo raznoliko uporabo v znanosti. Tako se uporablja v povezavi z napovedovanjem potresne aktivnosti (Gregorič A. in sod., 2012) odkrivanju nahajališč uranove rude, kot sledilo pri odkrivanju zračnih tokov in gibanju morske vode (Nero Jr. A.V., 1988), pri študijah aktivnosti prelomov (Hočevar M., 2005).

Izvirov radona v notranjem zraku, to je v zraku v zgradbah, je več. To je geološka podlaga pod stavbo, gradbeni material, iz katerega je stavba zgrajena, voda in zemeljski plin. Geološka podlaga je pomembna z vidika litologije, ki opredeljuje kamnine glede na njihovo sestavo ter teksturo in strukturne geologije, ki opredeljuje prisotnost prelomnih con. Iz zemeljskega plina se radon sprošča med gorenjem, pri vodo oskrbi pa med dejavnostmi, kot so prhanje in pomivanje posode. Kljub vsemu njun prispevek k celotni koncentraciji radona v notranjem zraku ni bistven. Gradbeni material je lahko drugi največji vir radona v notranjem okolju. Običajno imajo gradbeni materiali določeno koncentracijo radionuklidov, vendar je pri večini ta zelo nizka in ne prispeva pomembneje k visokim koncentracijam radona. Drugače pa je z materiali, ki vsebujejo povišano koncentracijo radionuklidov uranovega radioaktivnega niza, kot je na primer elektrofilska opeka. Največji vir radona v notranjem zraku je geološka podlaga pod stavbo (Nero Jr. A.V., 1988; Cosma C. in sod., 2013). Uran je v različnih koncentracijah razširjen povsod v zemeljski skorji, kar pomeni, da je tudi radon splošno razširjen. Velikost mineralnih zrn v katerih radon nastaja, in razporeditev radija v zrnih, propustnost tal in vsebnost vlage v kamnini-zemljišču, poleg seveda radioaktivne preobrazbe radona, so glavni dejavniki, ki določajo prehod radona skozi kamnine proti površju, in s tem v zgradbe. Radon potuje z difuzijo in konvekcijo, pri čemer na daljših razdaljah prevladuje konvekcija. Po prihodu v ozračje se njegova koncentracija hitro zmanjša. To pa ne velja za zaprte prostore, kjer se kopiči in lahko dosega visoke koncentracije. Povprečne koncentracije v talnem zraku so od nekaj kBq m^{-3} pa vse do nekaj MBq m^{-3} , v zunanem zraku so do nekaj 10 Bq m^{-3} , v notranjem zraku pa od nekaj 10 Bq m^{-3} pa vse do nekaj kBq m^{-3} (UNESCAR, 2000).

Številne raziskave radona v notranjem zraku povsod po svetu in tudi pri nas so potrdile obstoj številnih dejavnikov, od katerih je odvisna koncentracija radona v notranjem zraku. Ugotovili so vpliv vremena, geološke podlage (litologije in prisotnosti prelomov) pod stavbo, kakovosti izgradnje, nadstropja preiskovanega prostora, bivalnih navad stanovalcev in druge. Za radon v notranjem zraku je značilno, da se njegova koncentracija periodično spreminja z letnimi časi in z urami dneva (Miles J.C., 2001). To nam ponuja nekaj možnosti, kako in kdaj znižati

koncentracijo. Ker doma preživimo dolgo časa, mnoge države posvečajo preiskavam radona v domovih resno skrb (EC, 2005). V Sloveniji so leta 1994 izvedli trimesečne meritve koncentracije radona v tisoč domovih (Humar in sod., 1992). Še pred tem, v obdobju 1991 do 1994, je bil opravljen pregled radona v vseh vrtcih in večini šol (skupaj 1620 zgradb), po letu 1995 pa se je preiskovanje usmerilo predvsem v delovna okolja (Vaupotič J., 2003). Poleg zaprtih prostorov so preiskali radon tudi v zraku kraških jam (Kobal in sod., 1987; Vaupotič J., 2010a) in premogovnikov (Kobal I. in sod., 1990). Sistematično so izmerili koncentracije radona tudi talnem zraku kot najpomembnejšem izviru radona (Vaupotič J. in sod., 2006).

Najnovejša raziskava je potekala v obdobju november 2011 – oktober 2012 v 400 domovih po Sloveniji, ki jo je izvedel Institut "Jožef Stefan". Rezultate te raziskave sem statistično obdelal v svoji diplomski nalogi.

1.2 Cilji diplomskega dela

Cilji te diplomske naloge so bili poiskati in ovrednoti dejavnike, ki vplivajo na koncentracijo radona v zraku v domovih po Sloveniji. Tako sem statistično obdelal koncentracijo radona glede na: obdobje merjenja, litološko podlago, leto izgradnje, pogostost prezračevanja, kakovost tesnjenja oken, starost oken in nadstropje merjenja. Posebej sem obdelal koncentracije, ki presegajo zakonsko določeno mejno vrednost 400 Bq m^{-3} (ULRS, 2004) in so zaradi vpliva na zdravje prebivalcev še posebej pomembne. Na koncu sem izdelal zemljevid s prostorsko razporeditvijo koncentracij radona. Končni cilj je bil določiti dejavnike, ki so skupni visokim koncentracijam radona v notranjem zraku in na katere morajo biti prebivalci domov še posebej pozorni.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Radioaktivnost

Radioaktivnost je spontan proces, pri katerem se nestabilno jedro atoma preobrazi tako, da odda energijo z izsevanjem bodisi delca ali elektromagnetnih valov.

Poznamo tri glavne vrste radioaktivnih preobrazb:

- alfa (α)
- beta (β)
- gama (γ)

Pri preobrazbi α se sprosti delec α , ki je helijevo jedro, in je sestavljen iz dveh protonov in dveh nevtronov in ima masno število štiri. Zaradi izsevanja delca α ima novo jedro Y masno število manjše za štiri in vrstno število manjše za dve glede na prvotno jedro X, torej:



Preobrazbi β sta dve: β^- in β^+ . Pri prvi se sprošča delec β^- , to je negativni elektron (negatron e^-), pri drugi pa delec β^+ , to je pozitivni elektron (pozitron e^+). Reakcijo preobrazb zapišemo kot:



Pri preobrazbah α in β so jedra novo nastalih atomov pogosto vzbujena. Da bi prišla v stanje z nižjo energijo, sevajo fotone elektromagnetnega valovanja, kar se imenuje sevanje γ .

Pri preobrazbi γ , ki je elektromagnetno valovanje kratkih valovnih dolžin, se ne spremeni niti masno niti vrstno število jedra, temveč se mu le zmanjša energija.

Število jeder radioaktivnega elementa se s časom zaradi radioaktivnega razpada manjša. Hitrost radioaktivne preobrazbe imenujemo aktivnost (A) in ima enoto 1 Bq, kar pomeni 1 preobrazba na sekundo.

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (4)$$

Pri čemer je λ konstanta radioaktivne preobrazbe in ima enoto s^{-1} . N je število jeder elementa, t pa čas.

Zgornjo enačbo lahko preuredimo in zapišemo kot:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (5)$$

Z rešitvijo in integracijo te diferencialne enačbe dobimo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Pri čemer je N število jeder, ki so po preteku časa (t) preostala od prvotnega števila (N_0) radioaktivnih jeder.

Iz te enačbe lahko izpeljemo tudi enačbo za aktivnost po določenem času (t):

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Tu je A aktivnost po preteku določenega časa (t), A_0 pa je začetna aktivnost.

Razpolovni čas ($t_{1/2}$) nam pove, v kolikšnem času pade začetna aktivnost elementa na polovico:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (8)$$

2.2 Radon in njegove fizikalno-kemijske lastnosti

Radon je radioaktivni žlahtni plin in je pri normalnih pogojih brez barve, vonja in okusa. Njegova specifična gostota je $9,73 \text{ kg m}^{-3}$, zaradi česar je najtežji plin v naravi. Tališče ima pri -71°C , vrelišče pa pri $-61,8^\circ\text{C}$. V naravi se pojavljajo trije radonovi izotopi: ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (toron), ^{219}Rn (aktinon) (slika 1). Vsi so sevalci α (Wilkening M., 1990).

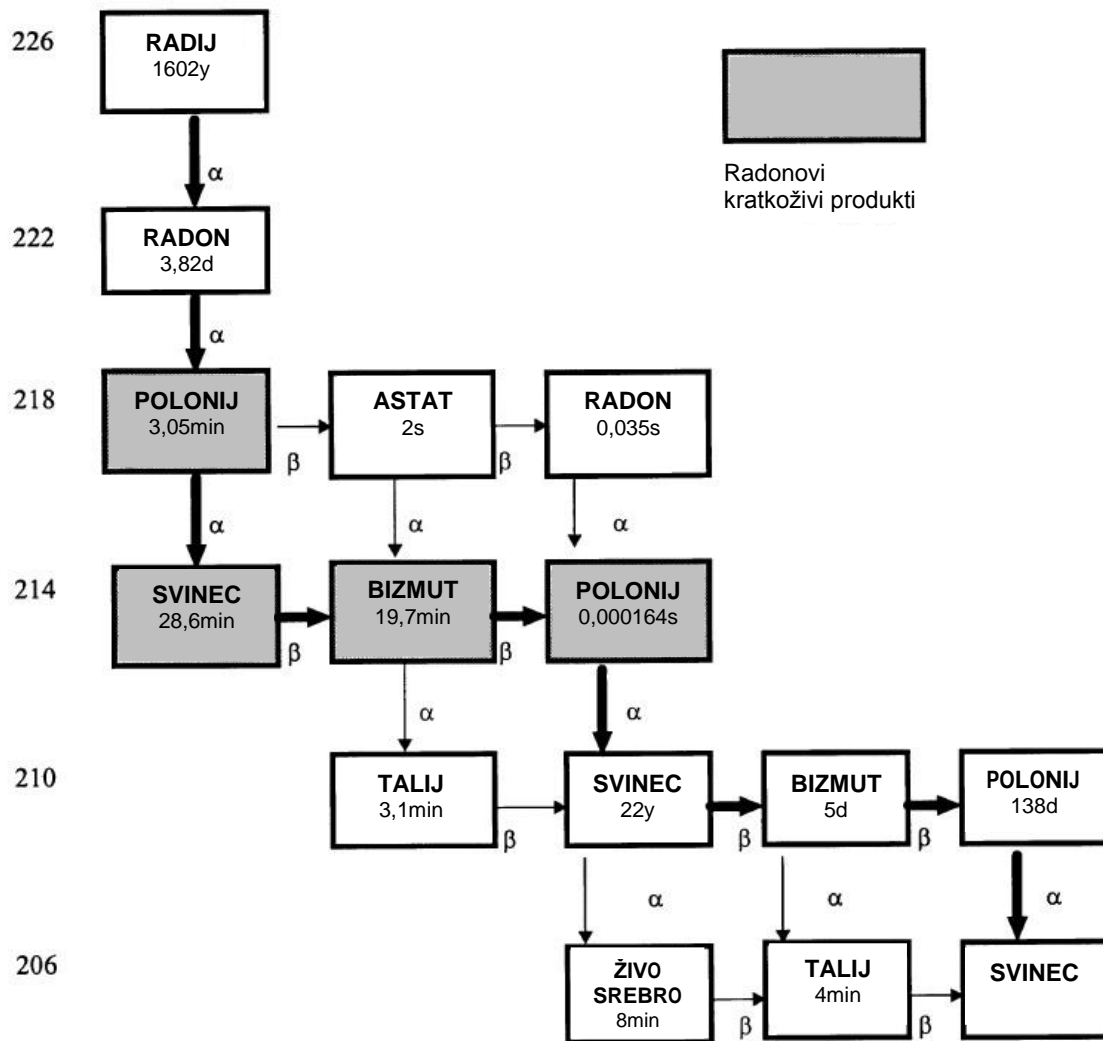
^{222}Rn nastaja z α -preobrazbo ^{226}Ra v naravnem radioaktivnem nizu ^{238}U . Njegov razpolovni čas je 3,82 dni, kar mu omogoča, da od svojega nastanka v zemeljski skorji prepotuje razdaljo do površja in se kopiči v notranjem okolju.

^{220}Rn nastaja iz ^{224}Ra v nizu ^{232}Th in ima razpolovni čas 55,6 sekund, zaradi česar je njegov delež v zraku bistveno manjši kot ^{222}Rn .

^{219}Rn nastaja iz ^{223}Ra v nizu ^{235}U in ima razpolovni čas 3,9 sekund. Ker je njegov razpolovni čas tako kratek, je njegova koncentracija v okolju zanemarljiva (Font L. in Baixeras C., 2003).

Z α -preobrazbo ^{222}Rn nastanejo radioaktivni kratkoživi produkti (RnDP): ^{218}Po (sevalec α , $t_{1/2} = 3,11 \text{ min}$), ^{214}Pb (sevalec β in γ , $t_{1/2} = 26,8 \text{ min}$), ^{214}Bi (sevalec β in γ , $t_{1/2} = 19,7 \text{ min}$) in ^{214}Po (sevalec α , $t_{1/2} = 164 \mu\text{s}$). V tej diplomski nalogi obravnavam samo izotop ^{222}Rn in ga imenujem 'radon'.

MASNO ŠTEVILO



Slika1: Razpadni niz radona: puščice usmerjene navzdol označujejo razpad α , vodoravne puščice usmerjene v desno pa razpad β (povzeto po NRC, 1988)

2.3 Izvor radona

Radon izvira neposredno iz ^{226}Ra . Radij je splošno razširjen element in ima razpolovno dobo 1602 let. Nastaja v nizu ^{238}U , ki ima razpolovno dobo $4,51 \times 10^9$ let. Uran je splošno razširjen element v zemeljski skorji in ga v večjih ali manjših koncentracijah najdemo v vseh kamninah. Deleži uranovih izotopov so: ^{238}U – 99,28 %, ^{235}U – 0,71 %, ^{234}U – 0,0054 %. Povprečna koncentracija urana v svetovnem merilu je na primer v granitu $52,2 \text{ Bq kg}^{-1}$, v bazaltu pa $11,1 \text{ Bq kg}^{-1}$. Svetovno povprečje za kamnine v zemeljski skorji je 37 Bq kg^{-1} , za prst pa $25,9 \text{ Bq kg}^{-1}$ (NCRP, 1984).

2.4 Potovanje radona od mesta nastanka do površja

2.4.1 Emanacijski koeficient

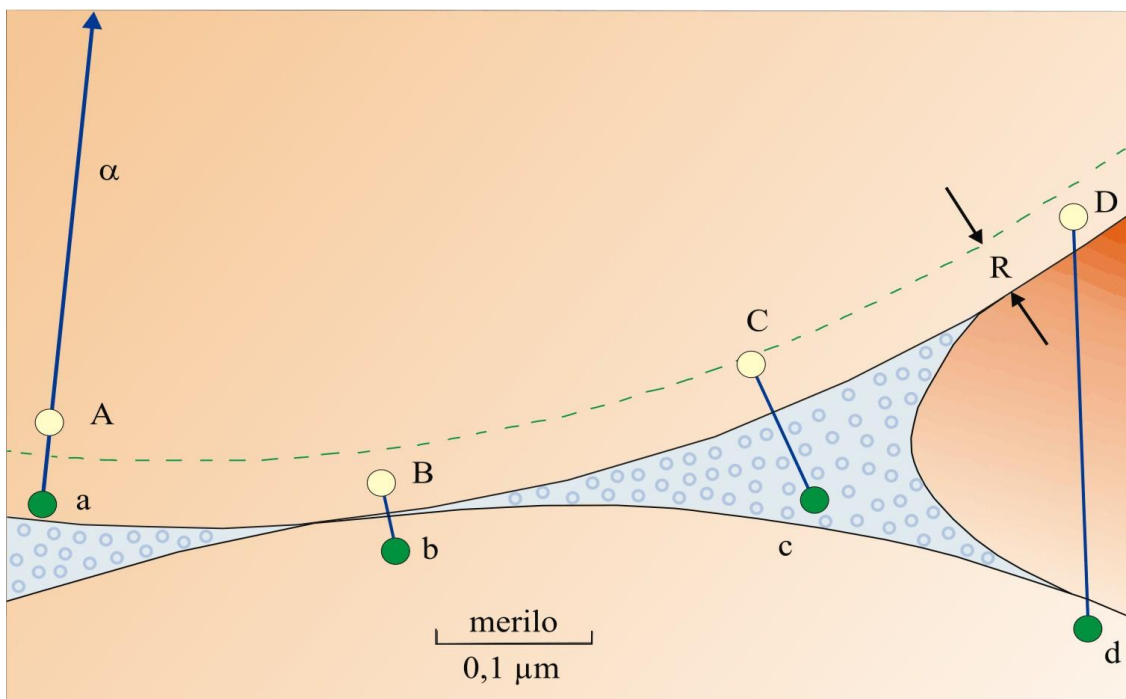
Samo del radona, ki nastane v kamnini, jo zapusti in preide v pore. Ta delež je poznan tudi kot emanacijski delež ali emanacijski koeficient. Poskusi so pokazali, da se emanacijski koeficient za tipične kamnine in prst giblje med 0,05 in 0,70 (Schumann R. R. in Gundersen C.S., 1996). Pri nastanku z α -preobrazbo pridobita atoma radona in torona 86 keV oziroma 103 keV kinetične energije. Radonov atom in α -delec se po nastanku gibljeta vsak v svojo smer. Atom radona bo na svoji poti oddajal energijo snovi, ki ga obdaja, zato je dolžina njegove poti odvisna od snovi, skozi katero potuje. V večini mineralov je ta dolžina od 20 do 70 nm, v vodi 100 nm in v zraku 63 μ m (Hassan N.M. in sod., 2009). Po nastanku radon (slika2): (i) z difuzijo potuje, a ostane v istem mineralnem zrnju (ii) lahko mu uspe uiti iz zrna čez poro in ostane ujet v drugem zrnju, (iii) obstane v pori med zrnji ali (iv) preide čez poro z zrakom iz enega zrna v drugega. Če je v porah tekočina, lahko ta zaustavi radonov atom in zato se emanacijski koeficient poveča (Hassan N.M. in sod., 2009).

Na emanacijski koeficient vplivajo porazdelitev radija v mineralnem zrnju, prisotnost vode, temperatura in velikost mineralnih zrn. Radij v mineralnih zrnjih ni nujno razporejen enakomerno, pač pa je lahko skoncentriran ob površini. Večja kot je koncentracija radija v bližini površja zrnca, večji je emanacijski koeficient, saj lahko več radona doseže pore med zrnji (Hassan N. M. in sod., 2009).

Kapilarna voda ima pomemben vpliv na emanacijski koeficient, kar je bilo dokazano v številnih študijah. Z večanjem vsebnosti kapilarne vode se večja tudi emanacijski koeficient. To lahko pojasnimo z dejstvom, da voda upočasni in zaustavlja radonove atome, ki so prispeli v pore. Tako je večja verjetnost, da bo radon ostal ujet v porah namesto da bi svojo pot končal v drugem zrnju. Emanacijski koeficient je pri popolnoma suhih kamninah majhen in se večja z vsebnostjo kapilarne vode. Pri večji vsebnosti kapilarne vode se emanacijski koeficient ne poveča, voda pa vpliva na transport radona proti površju in končno vstop v zgradbe (Nazarof W.W., 1992). V kamnini, bogati z vodo, je lahko velik delež radona ujet v vodni fazi v porah, kar pomeni, da je na voljo manj radona za plinasto fazo. To nima nikakršnega vpliva na emanacijski koeficient, pač pa lahko močno vpliva na koncentracijo radona v plinski fazi ter nadaljnji transport in končno vstop v zgradbe (Schumann R.R. in Gundersen C.S., 1996).

Temperatura prav tako vpliva na emanacijski koeficient, saj se z njenim višanjem viša tudi emanacijski koeficient. To lahko pojasnimo s tem, da se pri višji temperaturi zmanjša absorpcija plinov. Tako se manj radona ponovno absorbira nazaj v kamnino.

Razlog, da velikost zrna vpliva na emanacijski koeficient, je v tem, da je razmerje med površino in prostornino pri večjih zrnjih manjše, kar pomeni, da je manjše število atomov radija dovolj blizu površine, da lahko atomi radona po α -preobrazbi radija dosežejo pore (Hassan N.M. in sod., 2009).



Slika 2: Shematski prikaz emanacije radona in različne poti atoma radona po radioaktivnem razpadu radija in njegove končne točke v mediju. Rumena krogička predstavlja radijski atom, zelen pa atom radona. V primeru A radon ostane v istem zrnju v katerem je nastal, v primeru B preide v drugo zrno, v primeru C ostane v porji z vodo, v primeru D pa preide čez poro z zrakom v drugo zrno. Modra puščica pri primeru A predstavlja pot α delca po α razpadu, črtkana črta (R) pa je razdalja od roba zrna, pri kateri radonov atom po nastanku še lahko doseže poro (prirejeno po Tanner A.B., 1978)

2.4.2 Prepustnost

Po tem, ko je radon po razpadu radija prešel v pore, lahko prične potovati skozi medije proti zemeljskemu površju. Veliko vlogo pri tem igra prepustnost medijev. Odvisna je od mikroskopskih karakteristik kamnine: velikost in oblika zrn, delež in usmerjenost por ter vlažnost. Kamine z velikimi zrnji imajo običajno večjo prepustnost, saj so njihove pore večje in vsebujejo večje prostorčke, napolnjene z vodo ali zrakom. Prepustnost kamnin se razteza za več kot 10 velikostnih razredov. Zato je za koncentracijo radona v stavbah zelo pomembno, kakšna je prepustnost kamnine pod njo. Pri kamninah z najnižjo prepustnostjo je prevladujoči način migracije radona molekularna difuzija, pri tistih z največjo prepustnostjo pa konvekcijski tok (Nazarof W.W., 1992).

2.4.3 Difuzija

Difuzija se pojavi zaradi koncentracijskega gradienta in je prevladujoč način potovanja radona tam, kjer ni gradienta tlaka, ampak obstaja gradient koncentracije v tekočinah ali plinih. Modeli, ki opisujejo transport z difuzijo, temeljijo na Fickovem zakonu (Hassan N.M. in sod., 2009). Pri tem pa moramo upoštevati tudi zmanjševanje števila atomov radona zaradi njegove radioaktivne preobrazbe. Posledica tega je, da radon samo z difuzijo ne more prepotovati dolgih razdalj. Opazovanja so potrdila, da lahko na

dolge razdalje potuje samo s konvekcijo in advekcijo ob prisotnosti nosilnih plinov (CO_2 , CH_4 , N_2) (Martinelli G., 1998).

S povečanjem množine vode v kamnini se zmanjša difuzijski koeficient. Z naraščanjem vsebnosti vode narašča število por, zapoljenih z vodo, ki ima manjši difuzijski koeficient kot zrak ali plin. Če je kamnina sestavljena iz manjših zrn, bo difuzijski koeficient v obeh medijih manjši. To je zaradi zmanjšane propustnosti in večjega upora kamnine z manjšimi zrn (Hassan N.M. in sod., 2009).

2.4.4 Advekcija

Premikanje toka plina zaradi razlike tlakov se imenuje advekcija. Primeri advekcijskega toka v naravi so na primer izparevanje, veter, odlaganje sedimentov, padavine in premikanje kontinentov. Da bi bil advekcijski tok sploh mogoč, je potrebna zadostna množina določene snovi na istem kraju ob istem času. Čeprav je koncentracija radona najvišja v tleh, pa je le-ta vseeno veliko prenizka, da bi omogočala samostojen advekcijski tok. Tako lahko radon potuje z advekcijo samo s pomočjo nosilnih plinov (CO_2 , CH_4 , N_2) (Etiope G. in Martinelli G., 2002).

2.4.5 Konvekcija

Konvekcija plinov se pojavi, če je temperaturni gradient dovolj velik. Ta je običajno okrog $300 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$, kar je dovolj, da aktivira konvekcijo v kamninah s propustnostjo do 10^{-8} in debelino nekaj sto metrov.

2.4.6 Ekshalacija

Končno fazo potovanja radona proti površju imenujemo ekshalacija, ki jo merimo v $\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ali $\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in poteka v prsti oz. preperelini v tleh (Hassan N.M. in sod., 2009). Na ekshalacijo vplivajo številni dejavniki, kot so: količina vlage, poroznost, velikost delcev prsti, temperatura prsti, razlika v tlaku.

Povečana količina vlage v prsti vodi do povečane ekshalacije v primerjavi s povsem suho prstjo. Ekshalacija se povečuje, dokler delež vode v prsti ne doseže 8 %. Nad to vrednostjo se začne ekshalacija zniževati. To lahko razložimo tako, da nad to vrednostjo voda povsem zapolni pore, kar pomeni, da morajo radonovi atomi difundirati skozi vodo. Difuzijski koeficient vode pa je veliko nižji kot difuzijski koeficient zraka.

Večja kot so zrna prsti, manjša je ekshalacija. To je posledica manjšanja razmerja površina-volumen zrn, zaradi česar se zmanjša emanacijski koeficient in s tem število razpoložljivih atomov radona.

Večanje temperature prsti povzroči tudi večanje ekshalacije. To je posledica termičnega raztezanja zraka v prsti, kar pomeni tudi večji koeficient molekularne difuzije. Pri povečani temperaturi se prav tako zmanjša množina absorbiranega zraka v prsti, kar prav tako poveča ekshalacijo.

Razlika v tlaku je opredeljena kot razlika v tlaku na površju v primerjavi s tlakom globlje v tleh. Negativa razlika (tlak na površju je manjši kot v globini) vodi k povečanim

koncentracijam radona v vrhnjih plasteh blizu površja, saj je z radonom bogat zrak iz globljih plasti potisnjen bliže k površini (Hassan N.M. in sod., 2009).

2.5 Viri radona v bivalnem okolju

Izvor radona v bivalnem okolju je zemljišče pod stavbo, gradbeni material ter voda in plin, ki ju rabimo.

Tipični gradbeni materiali, kot so les, opeka, keramične ploščice, beton, omet, steklo, imajo svoj izvor radona v radiju v surovinah, iz katerih so izdelani. Običajna vsebnost ^{226}Ra v opeki, keramičnih ploščicah in betonu je od 10 pa do 60 Bq kg^{-1} , če je povišana, pa lahko preseže 1000 Bq kg^{-1} (EC, 2001). Radon zlahka zapusti les, a koncentracija ^{226}Ra v njem je nizka (1 Bq kg^{-1}). Gradbeni materiali so drugi najpomembnejši vir radona v bivalnem okolju, kljub temu pa ne predstavljajo pomembnega prispevka, razen v primeru visoke vsebnosti ^{226}Ra . Tak primer je elektrofilska opeka, v kateri je povprečna koncentracija ^{226}Ra 180 Bq kg^{-1} , lahko pa doseže tudi 1100 Bq kg^{-1} (EC, 1999).

Voda je lahko zaznaven vir radona le v primeru, ko je koncentracija v njej zelo visoka. V zrak se sprosti med dejavnostmi, kot so prhanje in pomivanje posode. Kljub vsemu je prispevek vode h koncentraciji radona v bivalnem okolju ocenjen le na okrog 2 % (Wilkening M., 1990).

Zemeljski plin vsebuje od 40 Bq m^{-3} do 4 kBq m^{-3} . V bivalnem okolju se sprošča med gorenjem. Njegov prispevek h koncentraciji radona pa je največkrat zanemarljiv, saj se aktivnost radona na dolgi poti od izvira do uporabnika znatno zmanjša (Wilkening M., 1990).

2.6 Vstop radona v bivalno okolje

Glavni vir radona v bivalnem okolju je zemljišče, na katerem stoji stavba, zato bom v nadaljevanju opisal načine vstopa radona iz tal (slika 3). Ostali viri radona, kot so gradbeni material, vodooskrba in zemeljski plin, imajo druge načine vstopa v bivalno okolje in so bili opisani v prejšnjem poglavju.

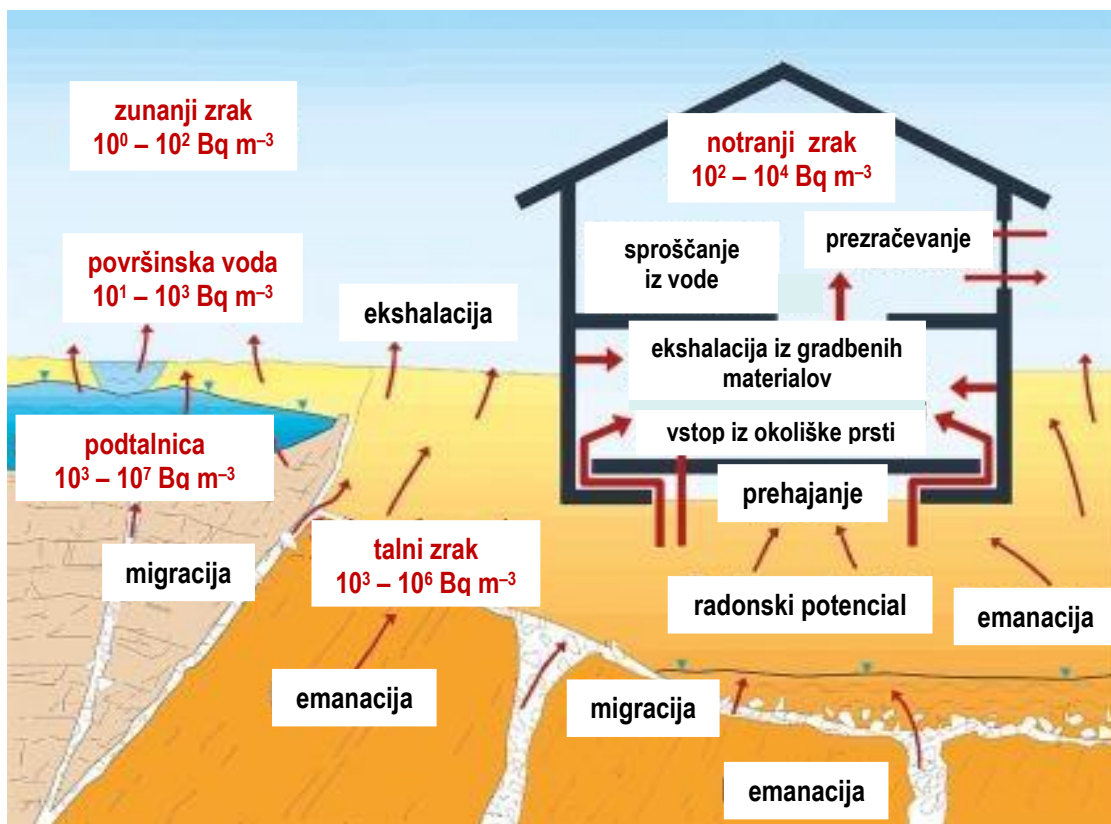
Advektivni prehod radona v stavbe povzroča majhna sprememba v zračnem tlaku, ki jo lahko povzročijo veter, ogrevanje, prezračevanje, temperaturne razlike med notranjostjo in zunanostjo.

Veter povzroča zračni nadtlak in podtlak med okolico in stavbo. Na privetni strani se ustvari nadtlak, ki vtiska zrak v tla in mu zmanjšuje vstop v kletne prostore. Na zavetrni strani hiše pa veter povzroči podtlak. Ta pospešuje izhajanje zraka iz hiše in s tem njegovo nadomeščanje z zrakom, bogatim z radonom, iz zemljišča, ki je v stiku z osnovno ploščo in zidovi zgradbe.

Zaradi ogrevanja je zrak v bivalnem okolju toplejši in s tem redkejši od talnega zraka. To povzroči podtlak in vdiranje talnega zraka v kletne prostore. Ta zrak je bogat z radonom in je zato zaradi ogrevanja koncentracija radona v bivalnih prostorih višja.

Pokazalo se je, da se koncentracija radona v bivalnem okolju po močnem deževju zviša. Dež zmanjša prepustnost tal v okolici stavbe v primerjavi s propustnostjo tal pod

stavbo. To je povzročilo kratkotrajno zmanjšanje izhajanja radona iz zunanjega zemljišča in povečanje iz zemljišča pod zgradbo (Keskikuru T. in sod., 2001)



Slika 3: Prehajanje radona iz zemlje v zunanji in notranji zrak (povzeto po Schmid K. in sod., 2010)

2.7 Časovna nihanja koncentracije radona v bivalnem okolju

Koncentracija radona v zraku bivalnega okolja se spreminja dnevno in z letnimi časi, tako kot se tudi spreminja koncentracija v zunanjem zraku in v tleh. Običajno je višja ponoči in proti jutru, najnižja pa v popoldanskem času (Groves-Kirkby C.J. in sod., 2009).

Spremembe z letnimi časi so posledica vpliva hidro-meteoroloških dejavnikov na transport radona v prsti in drugačnih bivalnih navad pozimi kot poleti. Med meteorološkimi imajo pomembno vlogo temperaturna razlika med bivalnim okoljem in tlemi pod zgradbo, zračni tlak in smer vetra (Miles J.C., 2001).

Bivalne navade stanovalcev so odvisne od letnih časov. Tako na primer zaradi prezračevanja odpirajo okna pogosteje poleti kot pozimi, kar v splošnem pomeni višjo koncentracijo radona pozimi (Denman A.R. in sod., 2008). Poleg tega vpliva na raven radona tudi uporaba klimatskih naprav in centralne kurjave. Oboje povzroča temperaturno razliko med notranjostjo in okolico in s tem prezračevanja prostorov (Denman A.R. in sod., 2007).

Zaradi sprememb v koncentraciji radona z letnimi časi so potrebne dolgotrajne meritve (preko celotnega leta), če želimo pravilno oceniti izpostavljenost stanovalcev radonu. V

primeru, ko to ni mogoče, imajo v številnih državah predpisano uporabo faktorjev, s katerimi pomnožimo koncentracijo v nekem letnem času, da dobimo letno povprečno koncentracijo (Denman A.R. in sod., 2007).

2.8 Vpliv litološke sestave tal na koncentracijo radona v bivalnem okolju

Čeprav na emanacijo, migracijo in ekshalacijo radona vplivajo številni dejavniki, obstaja povezava med koncentracijo radona v talnem zraku in koncentracijo v bivalnem okolju (Vaupotič J. in sod., 2012). Tako lahko pričakujemo, da bo koncentracija radona v bivalnem okolju višja v zgradbah, ki stojijo na zemljišču z visoko koncentracijo radona v talnem zraku. Visoka koncentracija radona v talnem zraku skupaj s prepustnostjo tal predstavlja radonski potencial, ki ga je koristno upoštevati pri novogradnjah in sanaciji že obstoječih zgradb.

Za splošno oceno ogroženosti zaradi radona je v Nemčiji Kemski J. in sod. (2001) predlagal lestvico ogroženosti zaradi radonskega potenciala, in sicer: nizka ($<10 \text{ kBq m}^{-3}$), srednja ($10 - 100 \text{ kBq m}^{-3}$), povišana ($100 - 500 \text{ kBq m}^{-3}$) in visoka ogroženost ($>500 \text{ kBq m}^{-3}$). S pomočjo te lestvice je tudi izdelal zemljevid radonskega potenciala za Nemčijo. Z njim lahko ocenimo ogroženost posameznega objekta. Seveda pa je za boljšo oceno potrebna meritev na izbranem gradbenem zemljišču. Vseeno pa je to samo ocena, saj je koncentracija radona v bivalnem okolju odvisna od mnogih spremenljivk in jo je nemogoče zanesljivo napovedati samo na podlagi radonskega potenciala (Kemski J. in sod., 2001).

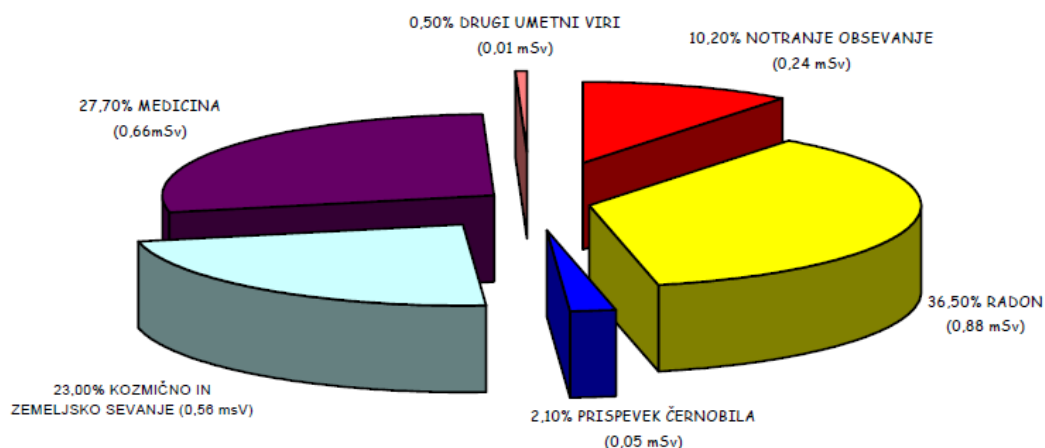
V Sloveniji so leta 2006 izvedeli meritve koncentracije radona v talnem zraku na 70 točkah, enakomerno porazdeljenih po Sloveniji. Poleg koncentracije so določili tudi geološko podlago tal na mestih meritev, na osnovi česar so opredelili strukturo in tip kamnin pod površjem. Po nemškem vzoru kategorizacije radonske ogroženosti zemljišč je slika v Sloveniji naslednja: 35 (50 %) točk v raziskavi spada med zemljišča z nizkim tveganjem, 34 (48,6 %) s srednjim tveganjem, 1 (1,4 %) s povišanim tveganjem. V tej raziskavi zemljišča z visokim tveganjem niso našli. Na podlagi rezultatov so izdelali tudi zemljevid radonskega potenciala v Sloveniji. (Vaupotič J. in sod., 2006).

2.9 Vpliv radona na zdravje

Z α -preobrazbo radona nastajajo njegovi kratkoživi produkti (RnDP), in sicer ^{218}Po in ^{214}Po , ki sta sevalca α , ter ^{214}Pb in ^{214}Bi , ki sta sevalca β in γ . Ob svojem nastanku so radonovi kratkoživi produkti pozitivno nabiti ioni, po nevtralizaciji z molekulami zraka pa se pojavljajo bodisi kot molekularne gruče (manjše kot 10 nm) ali pa se vežejo na aerosolne delce (velikosti od 200 nm do 600 nm) (Butterweck G. in sod., 1992). Prve imenujemo nevezani, druge pa vezani RnDP. Med dihanjem zraka, ki vsebuje radon in RnDP, se del RnDP odloži na stene dihalnih poti, kjer sprostito energijo sevanja v tkivo. Največji učinek ima sevanje na stene bronhijev (Wilkening M., 1990). Radon se med dihanjem le kratek čas zadržuje v pljučih in je zato prispevek njegovega sevanja neznamen (le nekaj %) v primerjavi z učinkom, ki ga imajo RnDP, ki se v pljučih zadržijo dlje časa (Vaupotič J., 2008). Skupaj so radon in RnDP drugi najpomembnejši povzročitelj pljučnega raka, takoj za kajenjem cigaret (NRC, 1988).

V svetovnem povprečju prejeme človek od vseh virov naravnega sevanja letno efektivno dozo okrog 2,4 mSv, k čemur prispevajo radon in RnDP okrog 60 %

(UNESCAR, 2000). V Sloveniji je ta delež nižji (slika 4), in sicer 0,88 mSv na leto, oziroma 36,5 % (Koželj in sod., 2006).



Slika 4: Delež obsevanosti prebivalstva v Sloveniji od posameznih vrst virov sevanj (Koželj M. in sod., 2006)

2.10 Geologija in tektonika Slovenije

Slovenija leži na stičišču Alp in Dinaridov, kar vključuje Vzhodne in Južne Alpe, Panonski bazen, Dinaride ter Jadransko – Apulijsko predgorje. Sedanja geološka struktura Slovenije je nastala med terciarno orogenezo. Takrat je Apulijska litosferska plošča trčila z Evrazijsko litosfersko ploščo, pri čemer se je Apulijska litosferska plošča (del Afriške litosferske plošče) narinila na Evrazijsko litosfersko ploščo. Velik del Istre in JZ dela Slovenije pripada Jadransko – Apulijski plošči, ki jo sestavljajo kamnine Jadransko – Dinarske mezozojske karbonatne platforme in fliša, ki je posledica njene degradacije. Za zahodno in jugo-zahodno Slovenijo je značilna slemenitev v smeri severozahod – jugovzhod (Placer L., 2008).

Dinaridi predstavljajo celoten del južne Slovenije in so v geološkem smislu severovzhodni del Apulijske mikroplošče. Sestavljeni so iz karbonatnih kamnin in sedimentov kot posledica razpada Jadransko-Dinarske karbonatne plošče (Placer L., 2008).

Jadransko – Apulijsko predgorje predstavlja relativno trdno jedro Jadranske mikroplošče. Sem spada večji del Istre in jugo-zahodnega dela Slovenije. Vsebuje kamnine Jadransko-Dinarske mezozojske karbonatne platforme in flišnih kamnin ki so nastali iz nje pri degradaciji (Placer L., 2008).

Južne Alpe so paleogeografsko del Dinaridov, do ločitve je prišlo v miocenu. Mezozojske kamnine Slovenskega bazena in zgornje triasne kamnine julijske karbonatne plošče so izpostavljene z njimi (Placer L., 2008).

Vzhodne Alpe so geološko-orografski termin, ki zajemna kompleks predkambrijskih in staropaleozojskih metamorforiziranih kamnin ter permskih in mezozojskih sedimentnih kamnin severno od Periadriatskega preloma (Placer L., 2008).

Panonski bazen je sestavljen iz posameznih depresij. Njihov nastanek in spreminjanje je vezano na obdobje paleogena in neogena. Depresije so zapolnjene s sedimenti

Paratetide, ki so odloženi na pogreznjenih vzhodnih podaljških Vzhodnih Alp, Južnih Alp in Dinaridov (Placer L., 2008).

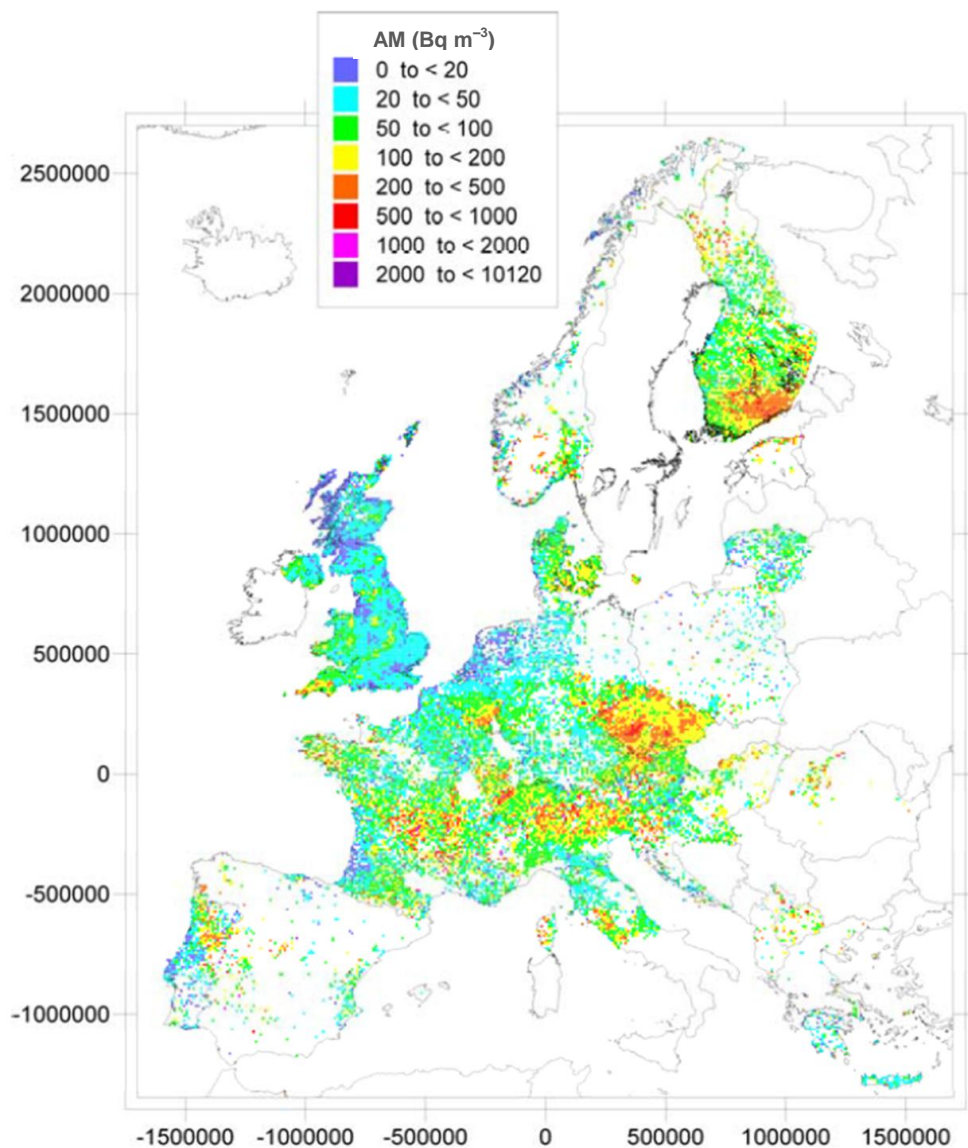
Poleg glavnih geoloških enot, opisanih zgoraj, je potrebno v opis zajeti še rečne in ledeniške sedimente, ki se raztezajo v večjih dolinah. Poleg njih pa imamo v Ljubljanski in Krški kotlini še morske in rečne sedimente (Placer L., 2008).

2.11 Dosedanje raziskave o radonu v Sloveniji

Prve meritve koncentracije radona v Sloveniji je izvedel Institut Jožef Stefan v rudniku urana v Žirovskem vrhu leta 1968 (Vaupotič J., 2003). Leta 1991 so na Institutu Jožef Stefan pričeli izvajati slovenski radonski program. Vključeval je sistematične meritve radona v bivalnem in delovnem okolju, v zunanjem zraku in v zemlji (Vaupotič J., 2003).

V program je bilo najprej zajeto 730 vrtcev in 890 šol ter 1000 naključno izbranih domov. Kasneje se je preiskava selila na druga delovna okolja; tako so izmerili koncentracijo v 26 bolnišnicah, 10 večjih vodnih zajetjih, 5 večjih toplicah, 8 večjih vinskih kletah, več turistično zanimivih jamah, s poudarkom na Postojnski jami (Kobal I. in sod., 1987; Vaupotič J. 2010a), ter okrog sto različnih javnih objektih (Vaupotič, 2003). V zadnji stopnji raziskave pa je bila izmerjena koncentracija na okrog 120 različnih točkah po vsej Sloveniji v talnem zraku (Vaupotič J. in sod., 2006) in na nekaterih istih točkah (skupaj 72) tudi v zunanjem zraku (Vaupotič J. in sod., 2010).

Na osnovi dobljenih rezultatov so izdelali karte radona za vrtce in šole, domove ter za talni in zunanji zrak. Karta radona za domove je vključena v Evropski radonski atlas (slika 5), ki ga "Joint Research Center" pri Evropski komisiji pripravlja zadnjih nekaj let (EC, 2012). V prihodnje bodo v atlas vključeni tudi podatki, ki sem jih obdelal v svojem diplomskem delu.



Slika 5: *Evropski radonski atlas (EC, 2012)*

V legendi na sliki 5 pomeni AM aritmetično srednjo vrednost koncentracije radona v Bq m⁻³, oranžna-rdeča-roza-vijoličasta barva pa povišano koncentracijo radona. Mejna vrednost koncentracije radona v domovih je v večini evropskih držav, vključno s Slovenijo, 400 Bq m⁻³.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Merilna tehnika

V naši raziskavi smo za merjenje koncentracije radona skozi daljše časovno obdobje uporabili detektorje jedrskih sledi Gammadata švedskega proizvajalca Landauer Nordic (slika 6). To je pasivni detektor, saj radon z zrakom vstopa v prostor detektorja z difuzijo. Ohišje detektorja je zasnovano tako, da vanj vstopi samo radon, ne pa tudi njegovi kratkoživi produkti. Zaradi radioaktivne preobrazbe radon tudi v notranjosti detektorja nastajajo kratkoživi produkti. Sam detektor je folija, ki jo α -delci poškodujejo in tako v njej pustijo mikroskopske sledi. Folije so lahko iz polikarbonata (Makrofol, Lexan), celuloznega nitrata (LR 115) ali alil diglikol polikarbonata (CR 39) (Nikolaev V.A. in Ilić R., 1999). Osnova Gammadata detektorja je folija CR 39.

Po kemični in termični obdelavi postanejo sledi v foliji vidne (slika 7) in jih lahko preštajemo. Največji premer sledi znaša 7 μm (Jönsson G., 1995). Včasih so jih prešteli pod navadnim mikroskopom, danes pa se za to uporablja elektronski mikroskop. Gostota sledi je sorazmerna povprečni koncentraciji radona za čas, ko je bil detektor izpostavljen (Nikolaev V.A. in Ilić R., 1999).



Slika 6: Detektorji jedrskih sledi Gammadata proizvajalca Landauer Nordic, ki so bili uporabljeni v raziskavi



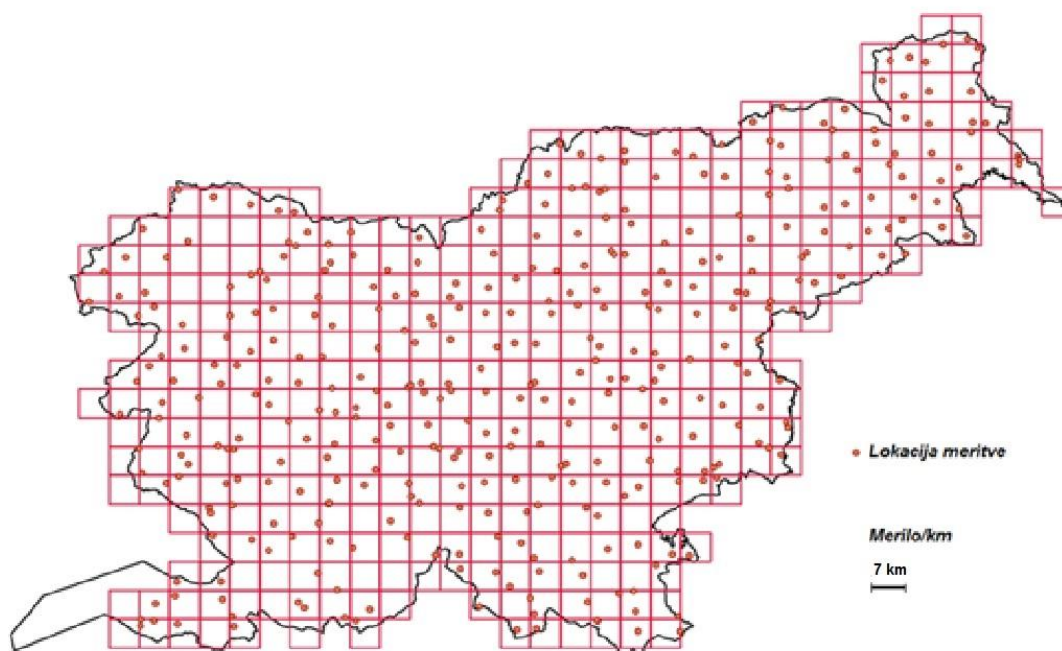
Slika 7: Mikroskopska slika folije v detektorju jedrskih sledi (Jönsson G., 1995)

3.2 Izbira mest meritev in potek raziskave

Eden od ciljev te študije je bil, da zagotovimo kar najbolj enakomerno porazdelitev detektorjev po celotni Sloveniji. V primeru, da izbiramo domove naključno (telefonske ankete, naključni naslovi in podobno), se lahko zgodi, da je zaradi večje koncentracije prebivalstva v urbanih središčih tam tudi več detektorjev, medtem ko nekatera redkeje poseljena območja ostanejo brez detektorjev in tako za ta območja ne pridobimo podatkov.

Da bi možnost izpada nekaterih območij iz raziskave zmanjšali na najmanjšo možno mero, smo izbiro domov pričeli v obratni smeri. Slovenijo smo razdelili na pravilno mrežo kvadratov izmere 7 km × 7 km. V njej je zajeta celotna površina Slovenije, število kvadratov pa je 400 (slika 8).

V naslednjem koraku je bilo potrebno izbrati gospodinjstva, ki bi sodelovala v raziskavi. Naslove okrog 200 gospodinjstev, ki so bila pripravljena sodelovati, smo pridobili s pomočjo sodelavcev, prijateljev in sorodnikov. Naslove preostalih gospodinjstev pa smo pridobili s telefoniranjem na naključne naslove v nekem kvadratu. Pri tem so odpadla gospodinjstva, ki živijo v večnadstropnih stanovanjskih blokih, saj je raziskava temeljila na merjenju koncentracije radona v bivalnih prostorih v pritličju oziroma prostorih čim bližje tlom. Zaradi neposeljenosti so nekateri kvadrati kljub temu ostali brez enega samega detektorja. Ti kvadrati so predvsem na območju Julijskih Alp, Snežnika, Kočevja in Pohorja.



Slika 8: Mesta meritev

Meritve radona v notranjem zraku so potekale v dveh ločenih obdobjih, in sicer v hladnem obdobju november 2011 – april 2012 in v toplim obdobju maj 2012 – oktober 2012. Tako smo pridobili dva niza podatkov, ki nam omogočata primerjavo koncentracij med tema dvema obdobjema. Ker so gospodinjstva izpolnila tudi vprašalnik, so na voljo tudi podatki o bivanjskih navadah, letu izgradnje in drugih lastnostih domovanja, ki

lahko vplivajo na koncentracijo radona. Vse te podatke je bilo potrebno urediti, poleg tega tudi uvrstiti vsako lokacijo v ustrezno litološko enoto.

3.3 Določanje litologije zemljišča

Za opredelitev litologije zemljišča, na katerem stoji hiša, vključena v raziskavo, smo uporabili isto klasifikacijo, kot so jo uporabili pri raziskavi naravne radioaktivnosti tal v Sloveniji (Kovács T. in sod. 2013).

Glede na Osnovno geološko karto Slovenije (1:100 000) (Geološki zavod Slovenije) smo področje Slovenije razdelili v sedem litoloških razredov ali enot, in sicer:

A – rečni in ledeniški nanosi: večinoma nesprijeti klastični sedimenti različnih frakcij, od drobnozrnatega melja in gline, do peskov in prodov; nastali so v kvartarju, najdemo pa jih ob rekah in v gorskih dolinah.

B – klastične sedimentne kamnine (sprijete), ki jih delimo na:

B1, 2 – drobnozrnate in debelozrnate klastične kamnine različnih starosti

B3 – fliš sestavlja več vrst sedimentnih kamnin, ki se razikujejo po zrnavosti. Nastal je pri sedimentaciji podvodnih plazov oziroma turbiditnih tokov v morskem okolju; zanj je značilna postopna zrnavost, kar pomeni, da so v spodnjem delu debelozrnate kamnine, proti vrhu pa vse bolj drobnozrnate. Večja območja fliša v Sloveniji so v Slovenski Istri, Brkinih, Vipavski dolini in Goriških Brdih.

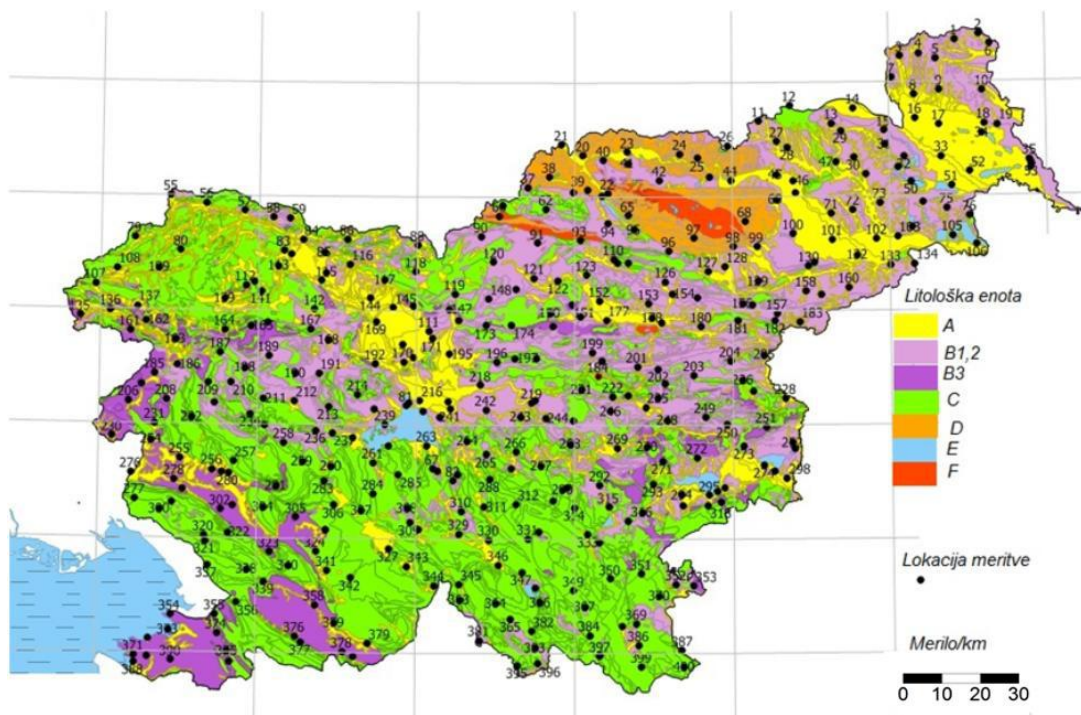
C – karbonatne kamnine zajemajo apnenice in dolomite; so najbolj pogoste kamnine v Sloveniji, saj tvorijo več kot dve tretjini slovenskega površja; iz njih so zgrajene Julijske in Savinjske Alpe, večji del Karavank, Kras ter obsežna območja Notranjske in Dolenjske

D – metamorfne kamnine: v Sloveniji zajemajo manjše predele in jih najdemo na Pohorju ter na Koroškem, v pasu severno od Drave

E – morski in jezerski sedimenti: sedimenti, s katerimi so zapolnjene večje kotline, kot sta Ljubljanska in Krška kotlina. Posamezna področja teh sedimentov so v vzhodni Sloveniji na območju Panonske nižine.

F – magmatske kamnine: največje območje magmatskih kamnin v Sloveniji je na Pohorju, najdemo pa jih še v Karavankah ter na posameznih manjših območjih.

Pri določanju litoloških enot sem uporabil program Manifold, ki je eden izmed programov, ki delujejo na osnovi geografskega informacijskega sistema (GIS) . Pri tem sem na georeferenciran sloj litoloških enot dodal sloj z našimi merilnimi točkami, ki sem jim koordinate določil glede na poštni naslov in sicer tako, da sem na spletnem portalu Geopedia (www.geopedia.si) poiskal naslov hiše, v kateri je potekala meritev in izpisal koordinate. Na združenih mapah smo nato odčitali, na kateri litološki enoti leži merilna točka (slika 9).



Slika 9: Litološke enote in mesta meritev

S slike 9 je razvidno, da leži največ hiš, ki so bile vključene v raziskavo, na karbonatnih (C) tleh (35 %). To je skladno z geološko podlago saj pokrivajo karbonati (kras) največji del površja v Sloveniji (Ogorelc B., 2001). Zaradi neposeljenosti so nekatera območja Julijskih Alp, Dolenjske in Notranjske ostala brez meritev. Na teh območjih prav tako prevladuje karbonatna podlaga, zaradi česar je delež meritev na karbonatni podlagi vseeno manjši, kot je njen delež v celotni površini Slovenije. Glede na število meritev karbonatom sledijo drobnozrnate (26,5 %) in debelozrnate klastične kamnine (B1, B2) ter rečni in ledeniški nanosi (A) s 26,5 % in 24 % deležem vseh meritev. Najmanj meritev je bilo opravljenih v domovih, ki stojijo na metamorfnih kamninah (4 %) ter na morskih in jezerskih sedimentih (1,6 %). Na magmatskih kamninah je bila opravljena ena sama meritev.

3.4 Obdelava rezultatov

Iz laboratorija podjetja Landauer Nordic smo prejeli rezultate meritev v obliki datotek Microsoft Office Excel. Ker sta bili izvedeni dve meritvi v različnih časovnih obdobjih, smo dobili rezultate ločeno. V prvi datoteki so bili rezultati merjenja iz obdobja november 2011 – april 2012, v drugi pa za obdobje maj 2012 – oktober 2012.

Če pri neki točki ni bilo rezultata, to pomeni, da nam s tega domovanja niso vrnilo detektorja. Nekatera gospodinjstva so vrnila samo en detektor, bodisi prvega ali drugega, nekatera pa nobenega. Da bi zagotovili vračilo kar največ detektorjev, smo gospodinjstva na vračilo opozorili z dopisom, ki smo mu priložili ovojnico z znamko za vračilo detektorja. Za obdobje november 2011 – april 2012 smo od 385 poslanih detektorjev dobili vrnjenih 362 (94 %) v drugem obdobju pa 322 (84 %).

Gospodinjstva so skupaj z detektorjem za merjenje radona v topli polovici leta (maj 2012 – oktober 2012) prejela tudi vprašalnik o podatkih o zgradbi s prošnjo, da ga pazljivo izpolnijo in vrnejo skupaj z detektorjem. Nekateri vrnjeni vprašalniki so bili pomanjkljivo izpolnjeni (manjkajoči odgovori) ali pa napačno izpolnjeni (obkroženih več odgovorov). Da bi zagotovil čim večjo podatkovno bazo, sem si pomanjkljive podatke pridobil s telefonskim pogovorom. Kljub temu mi ni uspelo zagotoviti vseh podatkov, saj so bila nekatera gospodinjstva nedosegljiva na telefonske klice.

Podatke sem združili v enotno bazo v programu Microsoft Excel. V nadaljnji obdelavi smo upoštevali samo tiste točke, pri katerih smo imeli rezultate obeh meritev. Teh je bilo 316. Pri statistični obdelavi koncentracij glede na odgovor v vprašalniku je število upoštevanih domov različno pri vsaki kategoriji posebej, saj sem upošteval samo tiste domove, pri katerih sem imel na voljo rezultate obeh obdobj meritev in odgovor v vprašalniku.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

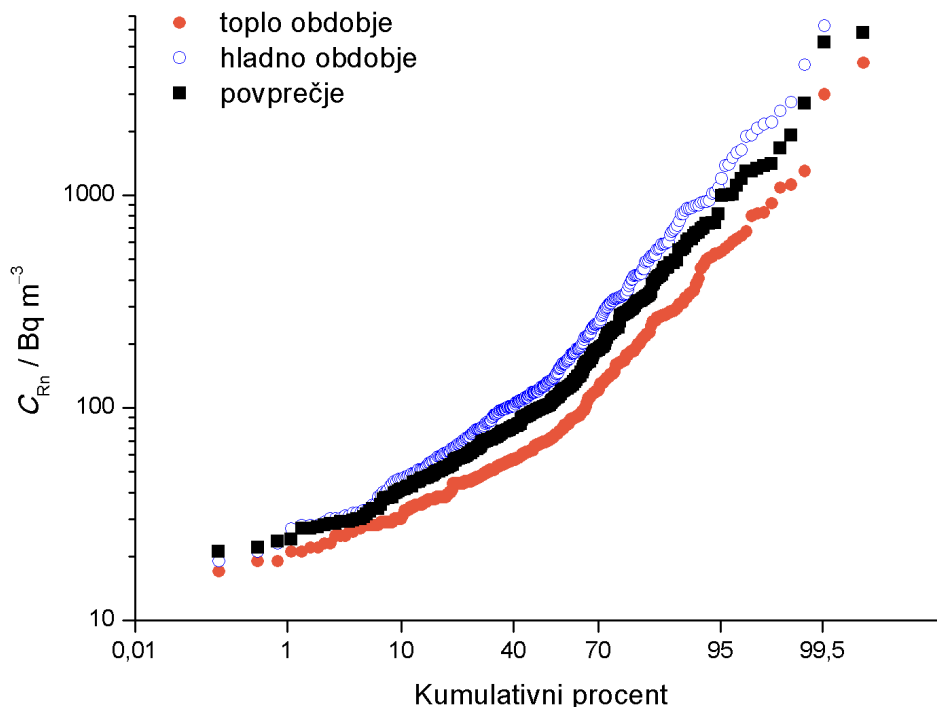
4.1 Povprečne koncentracije radona v vseh domovih

4.1.1 Logaritemsko-normalna porazdelitev

V nadaljevanju predstavljam rezultate merjenja koncentracije radona na 316 točkah po Sloveniji z detektorji jedrskih sledi. Na teh točkah je bila koncentracija radona v hiši izmerjena v obeh obdobjih. V nadaljevanju uporabljam za obdobje november 2011 – april 2012 naziv 'hladno obdobje', za obdobje maj 2012 – oktober 2012 pa 'toplo obdobje'.

Negotovost meritev z detektorji jedrskih sledi je bila v hladnem obdobju merjenja od 11 do 43 % in v toplen obdobju merjenja od 12 do 29 % s povprečno vrednostjo obeh obdobj 15 %.

Koncentracije radona je na sliki 10 prikazana kot logaritemsko normalna porazdelitev. Premica v tej porazdelitvi bi pomenila, da imamo enoten vir radona, odstopanje od premice pa nasprotno pomeni, da je več različnih virov (Gregorič A., 2008). Edini vir radona je sicer radij v zemlji, a prehod radona od izvora v domove je, kot sem pojasnil v teoretičnih osnovah, podvržen mnogim vplivom in bi zato na sliki 10 težko pričakovali premico.



Slika 10: Logaritemsko normalna porazdelitev povprečnih koncentracij radona v 316 domovih

Koncentracije radona so bile v hladnem obdobju v območju od 19 do 8616 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 340 ± 735 Bq m⁻³, v toplem obdobju pa v območju od 17 do 4196 Bq m⁻³, z aritmetično srednjo vrednostjo 158 ± 331 Bq m⁻³. Aritmetična srednja vrednost za celotno obdobje (povprečje obeh meritev) je 249 ± 524 Bq m⁻³. Geometrična srednja vrednosti hladnega obdobja merjenja znaša 158 \times \div 3,0 Bq m⁻³, toplega obdobja merjenja 86 \times \div 2,6 Bq m⁻³, za celotno obdobje merjenja pa znaša geometrična srednja vrednost 125 \times \div 3,0 Bq m⁻³.

Iz rezultatov je razvidno, da je koncentracija radona v zimskem času v domovih okoli 2 x višja kot v poletnem času. Povprečna koncentracija v nekem domu je bila najvišja pozimi, in sicer v povprečju dvakrat višja kot poleti. Razlogi za to so v bivalnih navadah in vremenu. Ko je hladno, bistveno manj pogosto prezračujemo kot v toplem obdobju, in s tem omogočamo kopičenje radona v prostorih. Prav tako s klimatskimi napravami poleti povečujemo prezračevanje in s tem nižamo koncentracijo radona v bivalnem okolju.

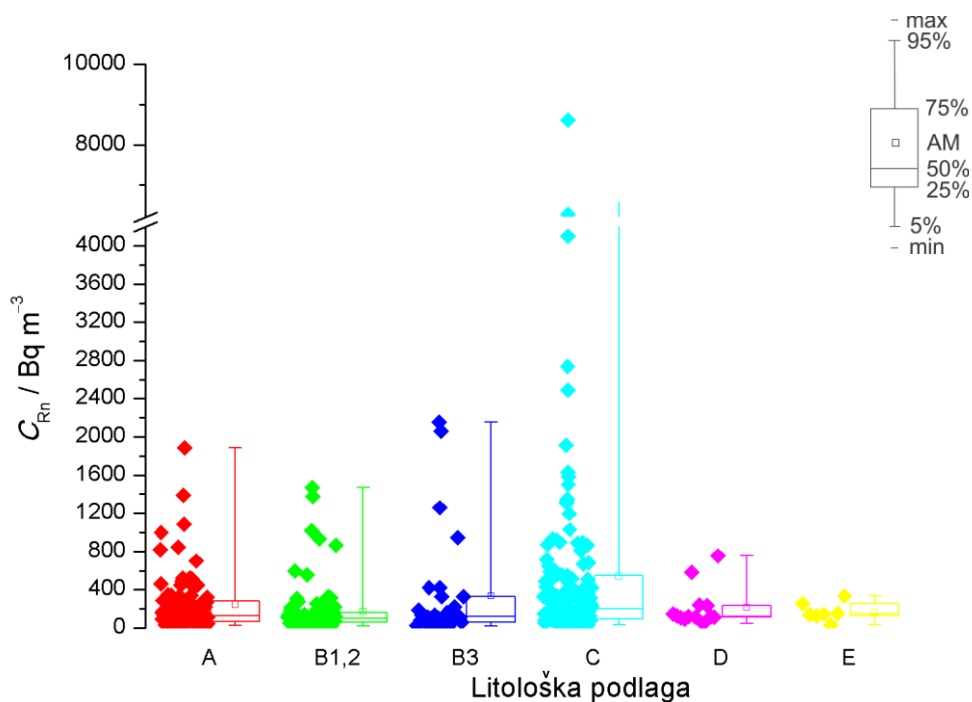
V 160 domovih (50 %) je bila povprečna letna koncentracija radona manj kot 100 Bq m⁻³. Koncentracija, višja od 400 Bq m⁻³, je bila v 46 domovih (14 %), višja od 1000 Bq m⁻³ pa v 15 domovih (4,7 %).

4.1.2 Koncentracije radona glede na litološko podlago

Na sliki 11 in v preglednici 1 so podani rezultati koncentracije radona v domovih glede na litologijo zemljišča pod zgradbo. V preglednici so predstavljene statistične vrednosti za posamezne litološke enote, pri čemer so imena litoloških enot v prvi vrstici enaka kot na sliki 11.

Preglednica 1: Statistični parametri povprečnih celoletnih koncentracij radona v 316 domovih glede na litološko podlago. Imena litoloških enot v prvi vrstici so enaka kot v poglavju 3.3. V drugi vrstici je število meritev (točk) na neki litološki enoti (N). V tretji vrstici je aritmetična srednja vrednost (AM), v četrti aritmetični standardni odklon (ASD), v peti geometrična srednja vrednost (GM), v šesti geometrični standardni odklon (GSD) in v zadnji mediana (MEDIAN)

	A	B1, 2	B3	C	D	E
N	77	82	28	111	12	5
AM	173	133	211	404	156	87
ASD	223	172	334	805	154	64
GM	111	88	109	184	116	68
GSD	2,4	2,3	2,9	3,2	2,0	2,2
MEDIAN	94	75	94	171	101	92



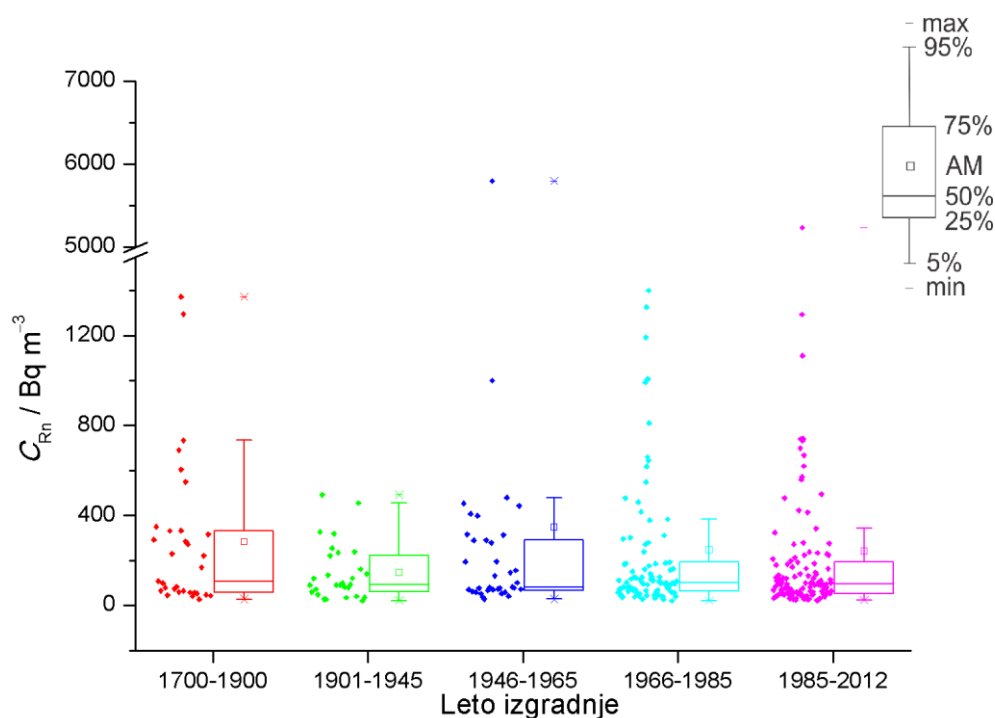
A: rečni in ledeniški nanosi, B1, 2: drobnozrnate in debelozrnate klastične kamnine, B3: fliš, C: karbonatne kamnine, D: metamorfne kamnine, E: morski in jezerski sedimenti

Slika 11: Povprečne celoletne koncentracije radona v 316 domovih glede na litološko podlago pod zgradbo

Povprečna celoletna koncentracija radona v domovih na karbonatih je bila 404 Bq m^{-3} , kar presega našo mejno vrednost za radon 400 Bq m^{-3} (ULRS, 2004). Na flišu je bila letna povprečna koncentracija približno za faktor 2 nižja. Ti rezultati se ujemajo z dosedanjimi meritvami radona v hišah (Lekočević N., 2011) ter v vrtih in šolah (Popit A. in Vaupotič J., 2002). Čeprav je poroznost karbonatov nizka, pa je propustnost vseeno visoka zaradi razpok in podzemnih rogov in jam, ki radonu olajšajo pot proti površju (Gregorič A., 2008). To je tudi razlog za največji standardni odklon 805 Bq m^{-3} . Povprečne letne koncentracije radona na litoloških enotah A, B1, 2, B3 in D so od 133 do 211 Bq m^{-3} (preglednica 1). Čeprav je večina posameznih koncentracij na teh litoloških podlagah nizka, je bilo nekaj tudi višjih vrednosti, ki jih lahko pojasnimo z značilnostjo zemljišča. To so razpoke in prelomi, ki omogočajo lažji prehod radona. Najnižje letne povprečne koncentracije radona (87 Bq m^{-3}) so bile v domovih, ki stojijo na morskih in jezerskih sedimentih (E). To si lahko pojasnimo z nizko prepustnostjo teh kamnin.

4.1.3 Koncentracije radona glede na starost zgradbe

Ker se kakovost gradnje izboljšuje, sem pričakoval, da bodo koncentracije radona v novejših domovih nižje kot v starejših. V novejših domovih bi zaradi boljše gradnje morale biti manj razpok in špranj, še posebej v glavni plošči in v zidovih v stiku z zemljiščem. To bi morale zmanjšati glavni vir radona, ki je zemljišče pod zgradbo.



Slika 12: Povprečne letne koncentracije radona v 311 domovih glede na leto izgradnje

Slika 12 prikazuje koncentracije radona v domovih v odvisnosti od obdobja izgradnja hiše. Prvo obdobje obsega najstarejše domove pa vse do leta 1900. V drugem obdobju sledijo domovi, ki so bili zgrajeni med letoma 1900 in 1945. Čas po 2. svetovni vojni do 1985 sem razdelil na tri dvajsetletna obdobja, zadnje obdobje je nekoliko daljše.

Preglednica 2: Statistični parametri povprečnih letnih koncentracij radona v 311 domovih glede na obdobje izgradnje. V prvi vrstici so obdobja izgradnje. V drugi vrstici je število meritev (točk) v nekem časovnem obdobju (N). V tretji vrstici je aritmetična srednja vrednost (AM), v četrti aritmetični standardni odklon (ASD), v peti geometrična srednja vrednost (GM), v šesti geometrični standardni odklon (GSD) in v zadnji mediana (MEDIAN)

	1700–1900	1901–1945	1946–1965	1966–1985	1986–2012
N	32	29	36	94	120
AM	284	146	349	247	242
ASD	339	125	954	388	548
GM	158	104	143	130	116
GSD	3,0	2,4	2,9	2,8	2,8
MEDIAN	140	94	92	103	96

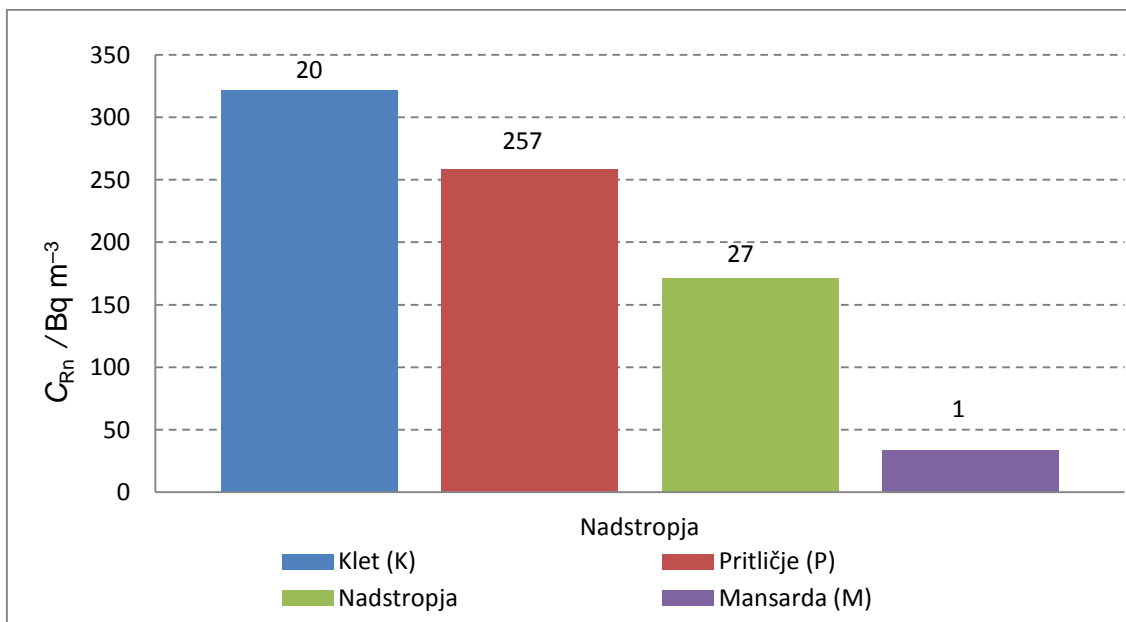
Skupno število domov s poznano starostjo je bilo 311. Za ostale domove prebivalci v vprašalniku niso navedli leta izgradnje in tudi niso bili dosegljivi na telefonske klice.

Največji delež (38,5 %) predstavljajo domovi, zgrajeni po letu 1985. V obdobju je bilo zgrajenih 94 domov (30,2 %). Na obdobja 1700 – 1900, 1901 – 1945, 1946 – 1965 odpadejo deleži: 10,3 %, 9,3 % oziroma 11,6 %. Proti tem pričakovanjem je bila najnižja povprečna celoletna koncentracija radona (146 Bq m^{-3}) v domovih iz obdobja 1901 – 1945 in najvišja (349 Bq m^{-3}) v domovih iz obdobja 1946 – 1965. Prav tako je bila tudi najvišja izmerjena koncentracija radona (5798 Bq m^{-3}) v nekem domu iz tega obdobja. Povprečna koncentracija radona v novejših domovih, zgrajenih po letu 1966 in tudi po letu 1986, je nižja kot v domovih, zgrajenih v obdobju po drugi svetovni vojni. Kljub novejši gradnji je povprečna koncentracija radona v najnovejših domovih primerljiva z domovi, zgrajenimi pred letom 1900. Prav tako najdemo v vseh obdobjih, z izjemo obdobja 1901 – 1945, domove, v katerih povprečna letna koncentracija radona presega 1000 Bq m^{-3} . Da ni visokih koncentracij radona v domovih, zgrajenih v obdobju 1900 – 1945, je morda naključje, saj v to obdobje spada le 29 domov.

Iz teh rezultatov lahko sklepamo, da starost zgradbe ni ključnega pomena za koncentracijo radona v bivalnem okolju. Le-ta je ne glede na starost lahko visoka ali nizka.

4.1.4 Koncentracija radona glede na nadstropje merjenja

Namen raziskave je bil, da se opravijo meritve le v pritličjih, vendar so nekateri stanovalci detektorje postavili tudi v kleti ali pa druga višja nadstropja. V vprašalniku smo pod točko 'nadstropje' navedli: klet, pritličje, mansarda ter prvo, drugo, tretje in višje nadstropje. Zaradi boljše preglednosti sem vse rezultate po različnih nadstropjih (nadstropje 1, nadstropje 2...) združil pod eno rubriko nadstropja. Število nad stolpcem predstavlja število meritev v danem nadstropju.



Slika 13: Povprečna letna koncentracija radona v 305 domovih glede na nadstropje merjenja

Najvišje povprečne celoletne koncentracije radona so bile v kletnih prostorih (slika 12) in sicer 322 Bq m^{-3} . Do podobnih ugotovitev so prišli tudi v drugih državah (Zhu H.C. in sod., 1998; Gallelli G. in sod., 1998; Popović D. in Todorović D., 2006). Povprečna izmerjena koncentracija v pritličju je bila za 24,4 % nižja od povprečne koncentracije izmerjene v kletih, kar je zelo podobno kot v Srbiji (Popović D. in Todorović D., 2006), kjer so ugotovili, da je padec koncentracije radona z višino okrog 20 % na nadstropje.

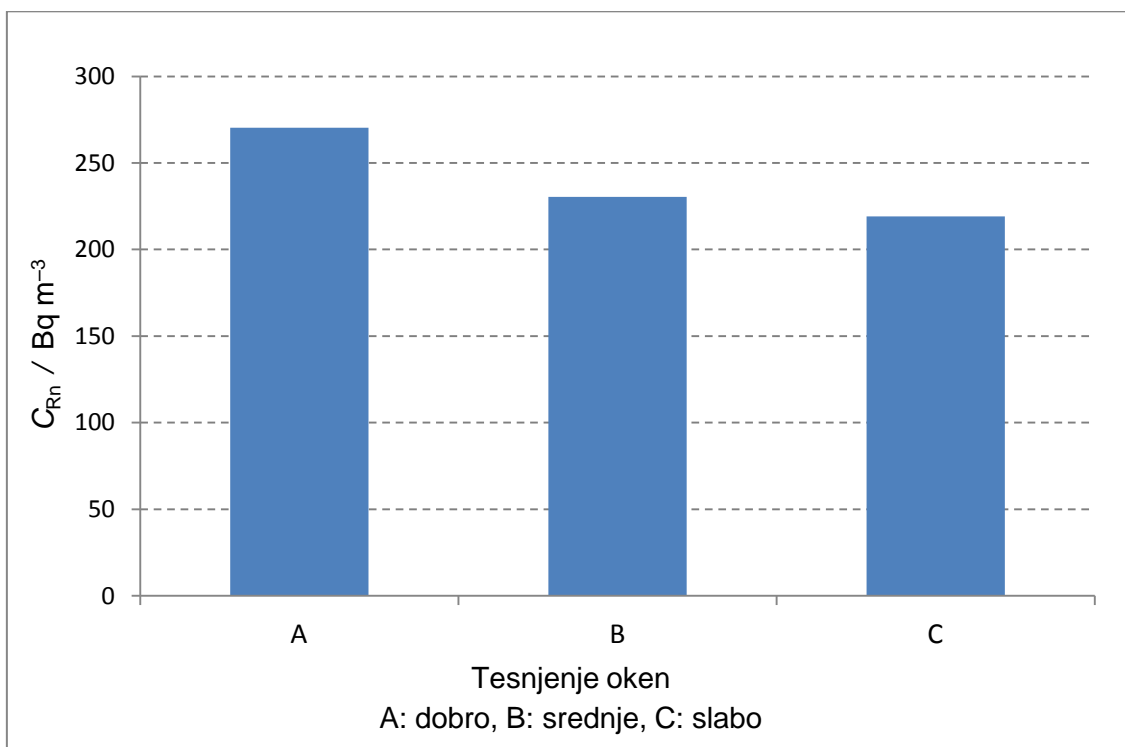
V našem primeru je zveza med koncentracijo radona in višino nadstropja linearna, in sicer:

$$y = -95,2x + 434 \quad (9)$$

s korelacijskim koeficientom 0,97. Padanje koncentracije z nadstropji kaže na to, da je glavni vir radona zemljišče pod zgradbo in ne gradbeni materiali.

4.1.5 Koncentracija radona glede na tesnjenje oken

V vprašalniku smo tudi ponudili izbiro med tremi možnostmi tesnjenja oken, in sicer: dobro, srednje ali slabo tesnjenje. Žal je vprašanje samo kvalitativno in zato so bili tudi odgovori zelo subjektivni. Na vprašanje je odgovorilo 313 gospodinjstev. Kot »dobro« je tesnjenje svojih oken ocenilo 158 gospodinjstev (50,5 %), »srednje dobro« 128 (40,9 %), »slabo« pa 27 (8,6 %) (slika 13). Kljub subjektivni oceni gospodinjstev sem želel preveriti korelacijo med koncentracijo radona in tesnjenjem oken.

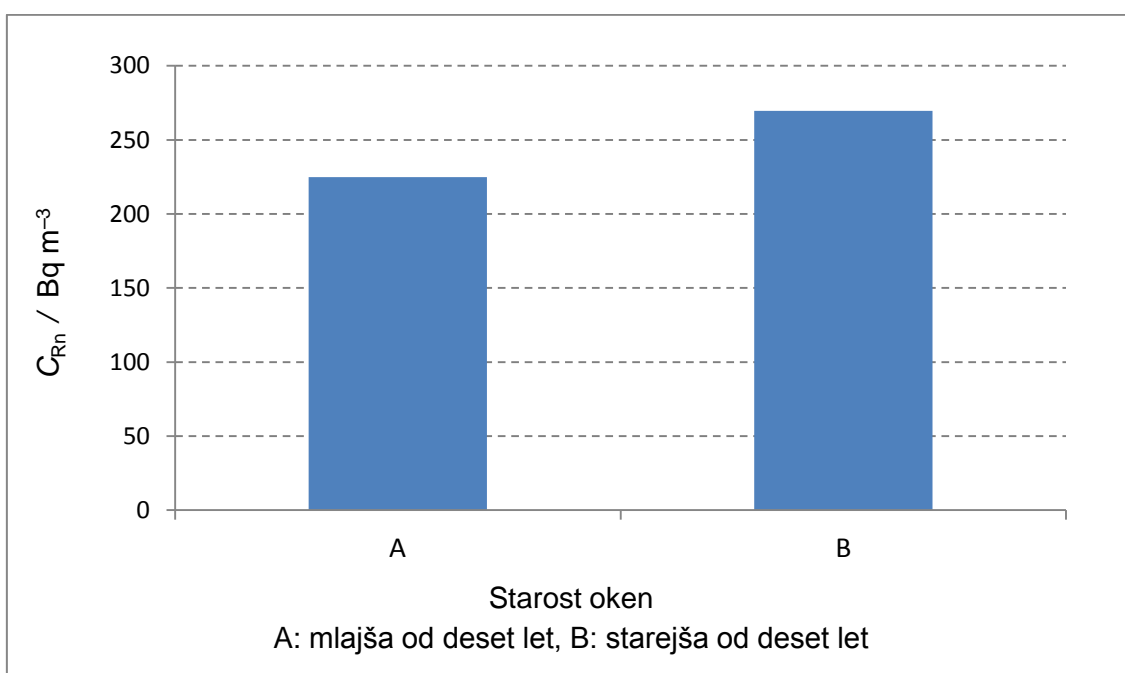


Slika 14: Povprečna letna koncentracija radona v 313 domovih glede na tesnjenje oken

Po pričakovanju je bila najvišja povprečna celoletna koncentracija radona v domovih, kjer naj bi bilo tesnjenje oken dobro, in sicer 270 Bq m^{-3} . V domovih, kjer so tesnjenje oken ocenili kot srednje, je bila povprečna koncentracija za 17,4 % nižja (231 Bq m^{-3}). Najnižja koncentracija je bila izmerjena v domovih z slabim tesnjenjem oken, 219 Bq m^{-3} . Povprečna celoletna koncentracija radona pada od najvišje, pri domovih z dobrim tesnjenjem oken, do najnižje, pri domovih z slabim tesnjenjem oken, s korelacijskim koeficientom 0,90. Slabo tesnjenje oken tako vpliva na koncentracijo radona v bivalnem okolju, saj predstavlja vir dotoka zunanega zraka, ki se meša z notranjim, in znižuje koncentracijo radona v prostoru. Ta ima občutno nižjo koncentracijo radona kot talni zrak izpod domovanja, ki je glavni vzrok za povišane koncentracije radona v prostorih.

4.1.6 Koncentracija radona glede na starost oken

Pričakovali bi, da bo koncentracija radona v domovih z novejšimi okni višja. Novejša okna bolje tesnijo od starejših, kar pomeni manjšo izmenjavo notranjega zraka z zunanjim zrakom (prezračevanje). Posledica boljšega tesnjenja in s tem manjšega prezračevanja je kopičenje z radonom bogatega zraka v domovih.



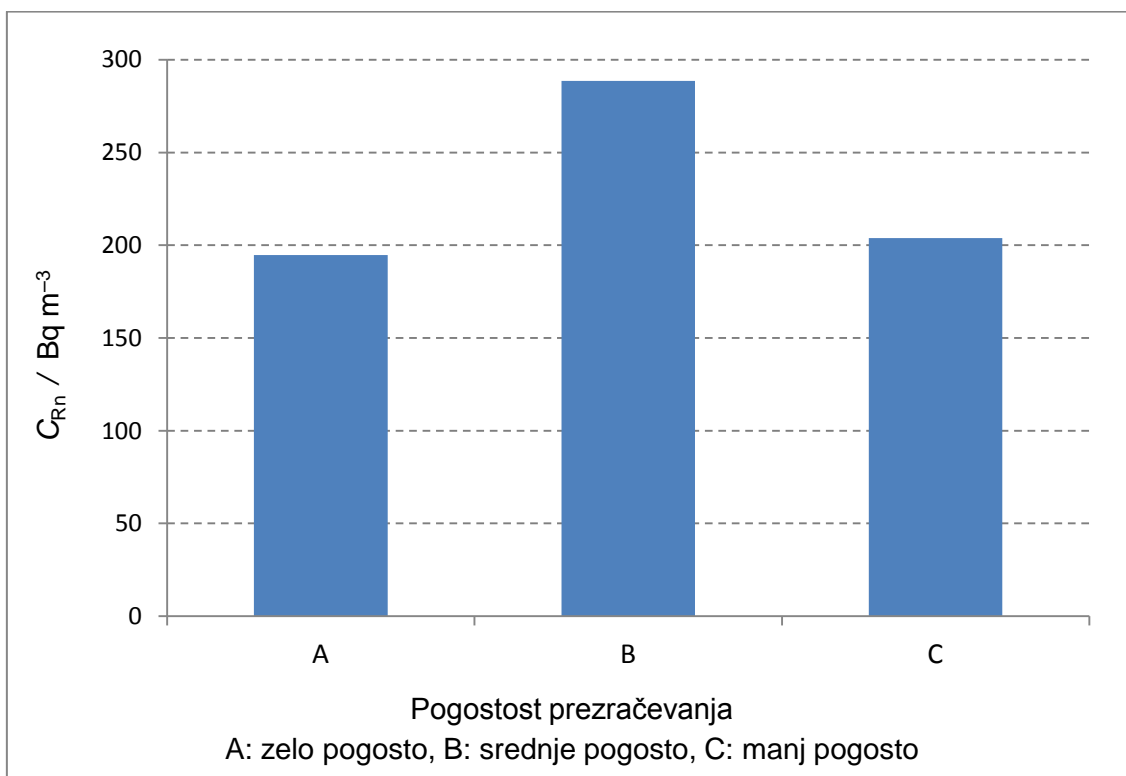
Slika 15: Povprečna letna koncentracija radona v 313 domovih glede na starost oken

Povprečna celoletna koncentracija radona v domovih, kjer so okna starejša od deset let znaša 270 Bq m^{-3} in je za 20 % višja kot v domovih, kjer so okna mlajša od desetih let. Delež domov, v katerih so okna, novejša od deset let, je 44,4 %, okna, starejša od desetih let, pa ima 45,6 % domov (slika 14).

Manjšo koncentracijo radona v domovih z novejšimi okni lahko pojasnimo z vplivom številnih drugih dejavnikov, kot so na primer drugačne bivalne navade, vrsta zemljišča, uporaba hidro in termo izolacije osnovne plošče itd.

4.1.7 Koncentracija radona glede na pogostost prezračevanja

V vprašalniku so lahko stanovalci opredelili pogostost prezračevanja s tremi stopnjami: zelo pogosto, srednje pogosto in pa manj pogosto. Tudi to vprašanje je bilo kvalitativno in zato odgovori subjektivni. Dobili smo naslednje število odgovorov: »srednje pogosto« 181 (58 %), »zelo pogosto« 108 (34,6 %) in »manj pogosto« 23 (7,4 %).

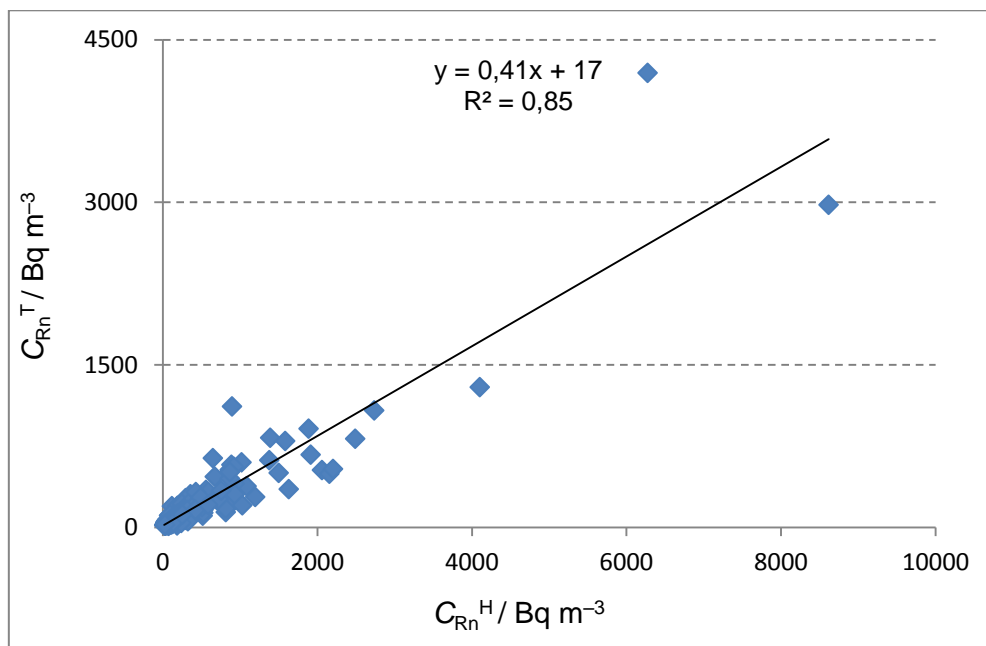


Slika 16: Povprečna letna koncentracija radona v 312 domovih glede na pogostost prezračevanja

Najvišjo povprečno celoletno koncentracijo ($289\ Bq\ m^{-3}$) so imeli domovi s srednje pogostim prezračevanjem (slika 15). V domovih, kjer prezračujejo bodisi bolj ali manj pogosto, je bila povprečna celoletna koncentracija radona za približno 50% nižja. Iz dobljenih rezultatov ni mogoče sklepati, kako pogostost prezračevanja vpliva na koncentracijo radona v bivalnem okolju. Očitno je bilo vprašanje preveč splošno in odgovori ne kažejo dejanskega stanja. Prezračevanje poteka tudi pri zaprtih oknih in vratih, pomembno vlogo pri tem pa imajo lastnosti stavbe (tesnjenje oken in vrat, morebitne razpoke v stenah, propustnost sten itd.) (Nazarof W.W. in sod., 1988).

4.1.8 Primerjava koncentracij radona med hladnim in toplim obdobjem merjenja

Pri primerjavi koncentracij radona med hladnim in toplim obdobjem merjenja sem upošteval samo lokacije, na katerih imamo rezultate tako iz hladnega kot tudi iz toplega obdobja merjenja. Temu pogoju je zadostilo 316 lokacij.



Slika 17: Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplim obdobju (C_{Rn}^T)

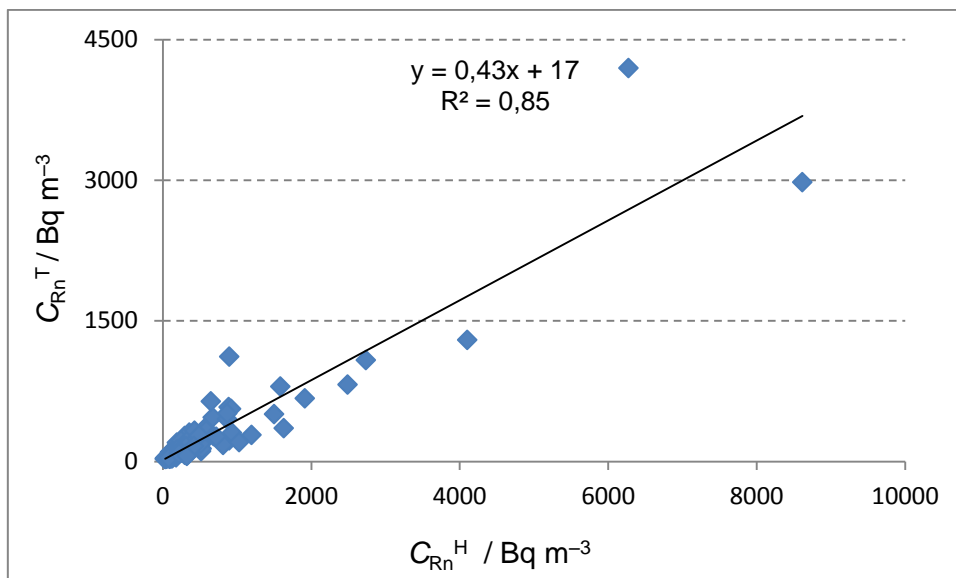
Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem in toplim obdobju je linearna (slika 16) in jo opisuje sledeča enačba:

$$C_{Rn}^T = 0,41 C_{Rn}^H + 17, \quad (10)$$

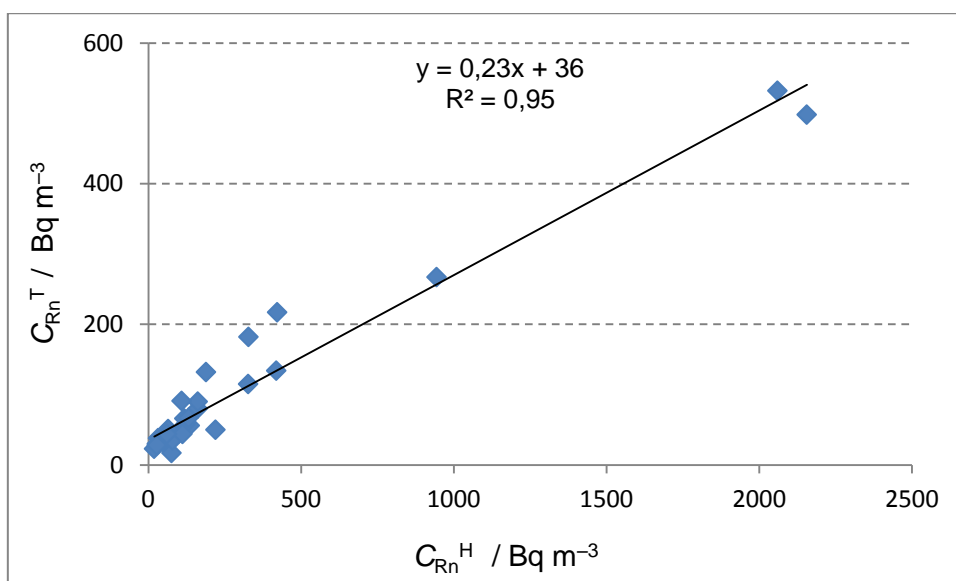
pri čemer je C_{Rn}^T koncentracija radona v toplim obdobju, C_{Rn}^H pa koncentracija radona v hladnem obdobju. Korelacijski koeficient je 0,85. Koncentracije v hladnem obdobju so višje kot v toplim obdobju, zato je smerni koeficient premice manjši od 1. Višje koncentracije v zimskem oziroma hladnem obdobju leta se ujemajo s prejšnjimi raziskavami radona v Sloveniji (Gregorič A., 2008) kot tudi v tujini (Miles J.C., 2001; Denman A.R. in sod., 2008). Povprečna koncentracija radona v hladnem obdobju merjenja znaša 340 Bq m^{-3} , v toplim obdobju pa 158 Bq m^{-3} in je za faktor 2,14 nižja. Vzroki za višje koncentracije v hladnem obdobju leta so v bivalnih navadah in meteoroloških dejavnikih (Miles J.C., 2001).

4.1.9 Primerjava koncentracij radona med hladnim in toplim obdobjem merjenja v domovih na flišni ali karbonatni podlagi

Primerjavo med tema litološkima enotama sem izbral zaradi fizikalnih lastnosti kamnin, ki bistveno vplivajo na migracijo radona. Pri karbonatih je ta zaradi razpok in prelomov visoka, kar je vzrok za visoke koncentracije radona v talnem zraku in posledično tudi v domovih. Na drugi strani ima fliš zaradi plasti drobnozrnatih sedimentnih kamnin, zelo nizko prepustnost, kar preprečuje prehajanje radona proti površju. To se odraža tudi v korelaciji med koncentracijo v hladnem in toplim obdobju. Za karbonatno podlago jo predstavljam na sliki 17, za flišno pa na sliki 18.



Slika 18: Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplim obdobju (C_{Rn}^T) pri 111 domovih, ki stojijo na karbonatni podlagi



Slika 19: Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplim obdobju (C_{Rn}^T) pri 28 domovih, ki stojijo na flišni podlagi

Korelacija med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplim obdobju (C_{Rn}^T) pri domovih, ki stojijo na karbonatni podlagi, ki jo opisuje enačba:

$$\dots\dots C_{Rn}^T = 0,43 C_{Rn}^H + 17 \quad (11)$$

je zelo visoka, s korelacijskim koeficientom 0,85.

Korelacijo med povprečno celoletno koncentracijo radona v hladnem (C_{Rn}^H) in toplim obdobju (C_{Rn}^T) pri domovih, ki stojijo na flišni podlagi opisuje enačba:

$$\dots\dots C_{Rn}^T = 0,23 C_{Rn}^H + 36 \quad (12)$$

Tu je korelacijski koeficient še nekoliko višji, in sicer 0,95.

Koncentracije radona so v domovih na karbonatni podlagi visoke tudi v toplen obdobju, pri katerem je smerni koeficient premice, ki opisuje to korelacijo, 0,43 (enačba 11). Koncentracije radona v domovih, ki stojijo na flišu, pa so v toplen obdobju nižje kot v hladnem obdobju, kar potrjuje tudi smerni koeficient 0,23 (enačba 12), ki je tako za več kot dvakrat manjši kot pri karbonatni podlagi. Na podlagi tega lahko sklepamo, da nizke zimske temperature na flišu znatno pripomorejo h konvekcijskemu transportu radona proti površju. Pri konvekcijskem transportu je glavni dejavnik temperaturna razlika. Ta je pozimi večja kot poleti, kar pomeni da je večji tudi konvekcijski transport radona. Kraške lastnosti karbonatov, kot so razpoke in prelomi znatno olajšajo prehod radona proti površju. Sprememba v konvekcijskem toku ima tako manjši vpliv na koncentracijo radona v domovih, ki stojijo na karbonatni podlagi kot pa na tistih, ki stojijo na flišni podlagi.

Prelomi na karbonatni podlagi so najverjetneje tudi glavni vzrok za večja odstopanja od korelacijske premice pri visokih vrednostih koncentracije radona. V teh primerih transport radona ob prelomih predstavlja specifične razmere in s tem povezano odstopanje od pričakovane korelacije med hladnim in toplim obdobjem leta.

4.2 Povprečne koncentracije radona v domovih s preseženimi mejnimi vrednostmi

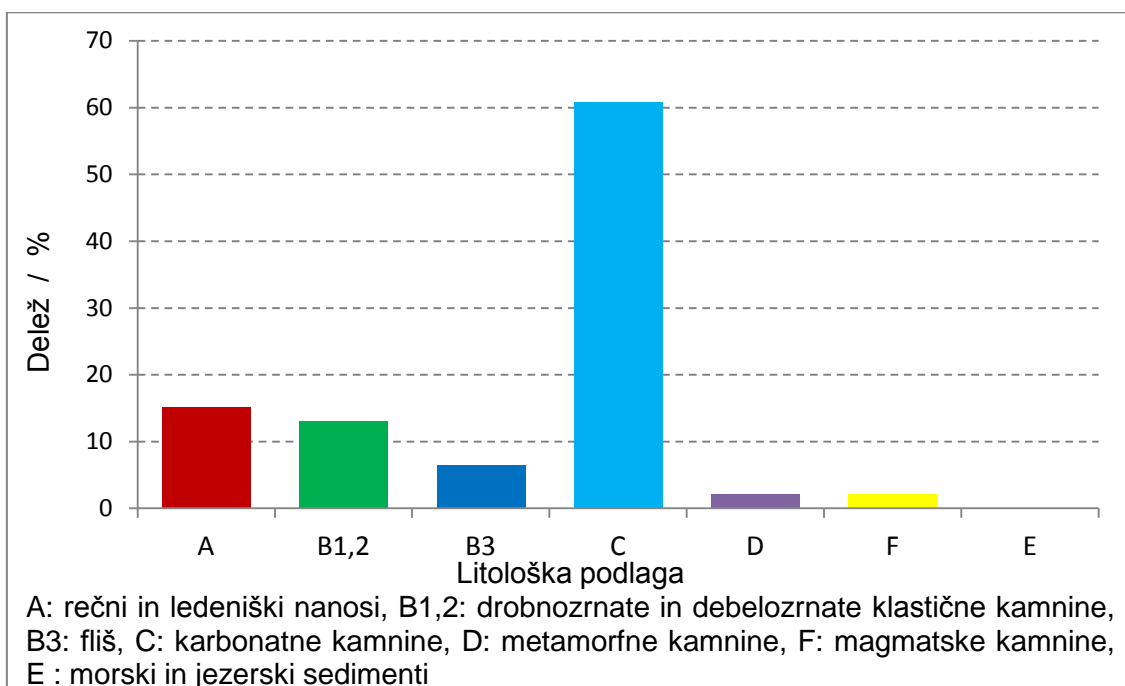
V tem poglavju obravnavam samo povprečne celoletne koncentracije, ki so v naši raziskavi presegle zakonsko predpisano zgornjo mejo 400 Bq m^{-3} . Takšnih primerov je bilo 46 ali 14 %. To je veliko več kot v raziskavi radona v 1000 domovih po Sloveniji v letu 1994, kjer je bilo takšnih koncentracij okrog 1 % (Humar M. in sod., 1992). Vendar pa je potrebno poudariti, da je bil izbor merilnih mest v tej študiji drugačen, zato rezultate težko primerjamo. Takrat so bili v raziskavo poleg individualnih hiš vključeni tudi stanovanjski bloki in so zato meritve potekale v različnih nadstropjih, za razliko od naših, ko smo meritve v glavnem opravili v pritličjih individualnih hiš.

Delež domov, v katerih koncentracije radona presegajo 400 Bq m^{-3} , je v sosednji Avstriji 4 %, v Italiji 0,9 % in na Hrvaškem 1,8 % (EU, 2005). Vsaka država je izbrala svoj lastni način izbire merilnih mest, zato so tudi v tem primeru rezultati težko primerljivi.

Neenotnost načina izvedbe meritev je bil tudi glavni problem na katerega je naletel "Joint Research Center" (JRC) pri Evropski komisiji pri pripravi Evropskega radonskega atlasa. Da bi bili rezultati primerljivi med posameznimi državami, so se odločili, da v atlas vključijo izključno celoletne povprečne koncentracije radona v pritličjih domov (EC, 2012). V JRC so izdelali enoten koordinatni sistem za celotno Evropo in v njem določili velikost in meje posameznega kvadrata, v katerega je bilo potrebno umestiti koncentracije radona, izmerjene v tem kvadratu, in izračunati njihovo povprečno vrednost. Tako je JRC vsem državam udeleženkam posredoval kratek računalniški program in navodila za pravilen izračun povprečnih vrednosti ter vnos v podatkovno bazo. Ker Evropski radonski atlas temelji na enotni metodologiji, so rezultati med državami prvič zares primerljivi (EC, 2012).

4.2.1 Koncentracije, višje od 400 Bq m^{-3} , glede na litološko podlago

Največji delež povprečnih celoletnih koncentracij radona, ki presegajo 400 Bq m^{-3} , je bil v domovih na karbonatni podlagi (C), in sicer kar 61 % (slika 19). Sicer je bil delež meritev na karbonatni podlagi 35 %, kar pomeni, da je njihov delež med visokimi koncentracijami skoraj za faktor 2 večji. To dokazuje, da igrajo kraški pojavi (podzemni rovi, jame, razpoke in podobno) pomembno vlogo pri prehodu radona skozi zemljišče in končno v zgradbo.

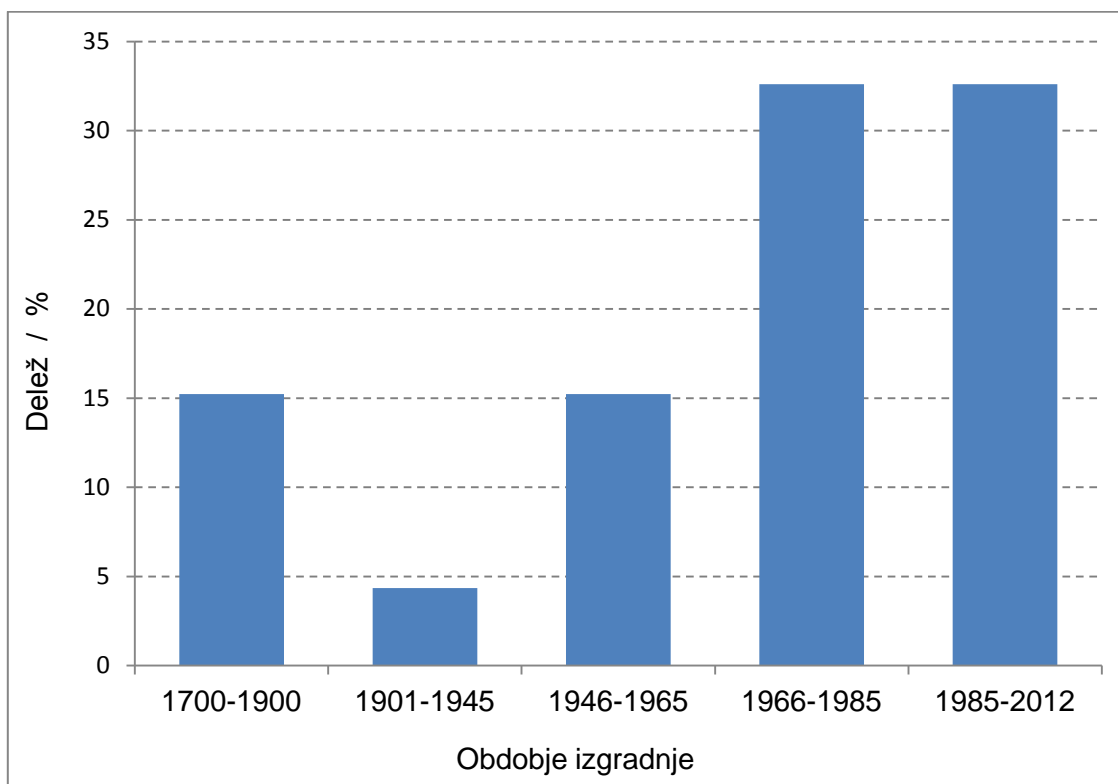


Slika 20: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m^{-3} , glede na litološko podlago

Z visokim deležem meritev na karbonatih lahko pojasnimo visoko povprečno koncentracijo v celotni raziskavi (poglavje 4.1.1), kot tudi visok delež povprečnih celoletnih koncentracij, ki presegajo 400 Bq m^{-3} . Prav tako je bilo pet najvišjih povprečnih celoletnih koncentracij v domovih na karbonatni podlagi. Domov s koncentracijo višjo od 400 Bq m^{-3} , je na rečnih in ledeniških nanosih (A) 15 %, na drobnozrnatih in debelozrnatih klastičnih kamninah (B1,2) pa 13 %. To se sklada z njunima deležema v celotnem številu meritev. Delež flišnih kamnin (B3) je 6 % in prav tako ne odstopa od deleža meritev v celotni raziskavi. Na metamornih (D) in magmatskih (F) podlagah sta bila le po en dom s povprečno celoletno koncentracijo, višjo od 400 Bq m^{-3} . Meritev v domovih na metamornih kamninah je bilo le 12, zato nam ena vrednost nad 400 Bq m^{-3} ne ponuja trdnih informacij. Zaradi ene same meritve ne moremo in ne smemo delati zaključkov. Izmed petih meritev v domovih na morskimi in jezerskih sedimentih (E) nobena povprečna celoletna koncentracija ni preseгла 400 Bq m^{-3} .

4.2.2 Koncentracije, višje od 400 Bq m^{-3} glede na starost zgradbe

Največji delež domov, v katerih celoletna povprečna koncentracija presega 400 Bq m^{-3} , je bilo zgrajenih v obdobjih 1966 – 1985 in 1985 – 2012 (slika 20). To je v sorazmerju z njunim deležem v celotnem vzorcu domov, ki so sodelovali v raziskavi (4.1.3). Skupaj je bil delež teh dveh obdobji v celotnem vzorcu 70,7 %, glede na domove, v katerih celoletna povprečna koncentracija presega 400 Bq m^{-3} , pa je njun delež 65,2 %. Ostala obdobja so zastopana sorazmerno z njihovim deležem v celotnem vzorcu.



Slika 21: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m^{-3} , glede na obdobje izgradnje

Ker se kakovost gradnje z leti izboljšuje, bi pričakovali, da bo koncentracija radona v novejših domovih nižja kot v starejših. V tej raziskavi najdemo najvišje koncentracije radona tudi v domovih, ki so bili zgrajeni leta 2000 in 2010. To kaže na to, da se morda ljudje premalo zavedajo nevarnosti visokih koncentracij radona. Je pa tudi res, da v skrbi za boljšo toplotno zaščito vedno bolj skrbimo za tesnjenje oken in vrat in s tem zmanjšujemo naravno prezračevanje. Ta kompromis je velik izziv pred načrtovalci novih zgradb.

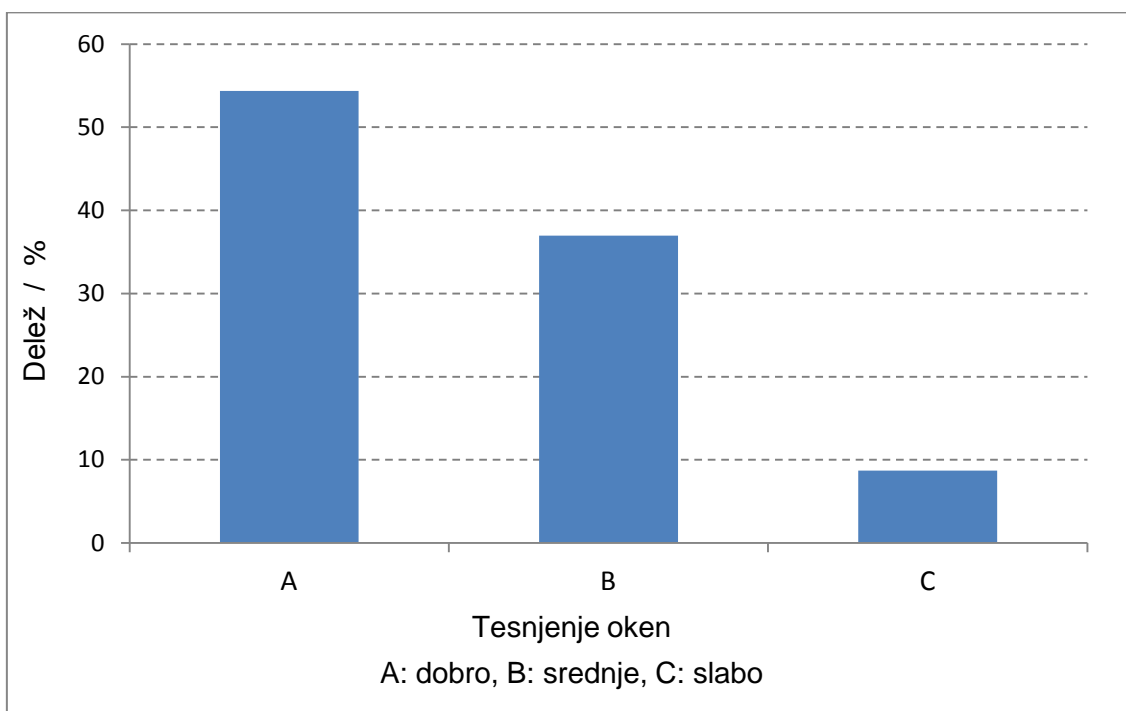
4.2.3 Koncentracije, višje od 400 Bq m^{-3} , glede na nadstropje merjenja

Deleži koncentracij, višjih od 400 Bq m^{-3} , glede na nadstropja ne kažejo realnega rezultata, saj so gospodinjstva prejela navodila, v katerih jim je bilo naročeno, naj

detektor postavijo v pritličju. Zaradi tega je bila velika večina koncentracij višjih od 400 Bq m⁻³ izmerjenih v pritličju, saj so gospodinjstva večinoma upoštevala navodila.

4.2.4 Koncentracije, višje od 400 Bq m⁻³, glede na tesnjenje oken

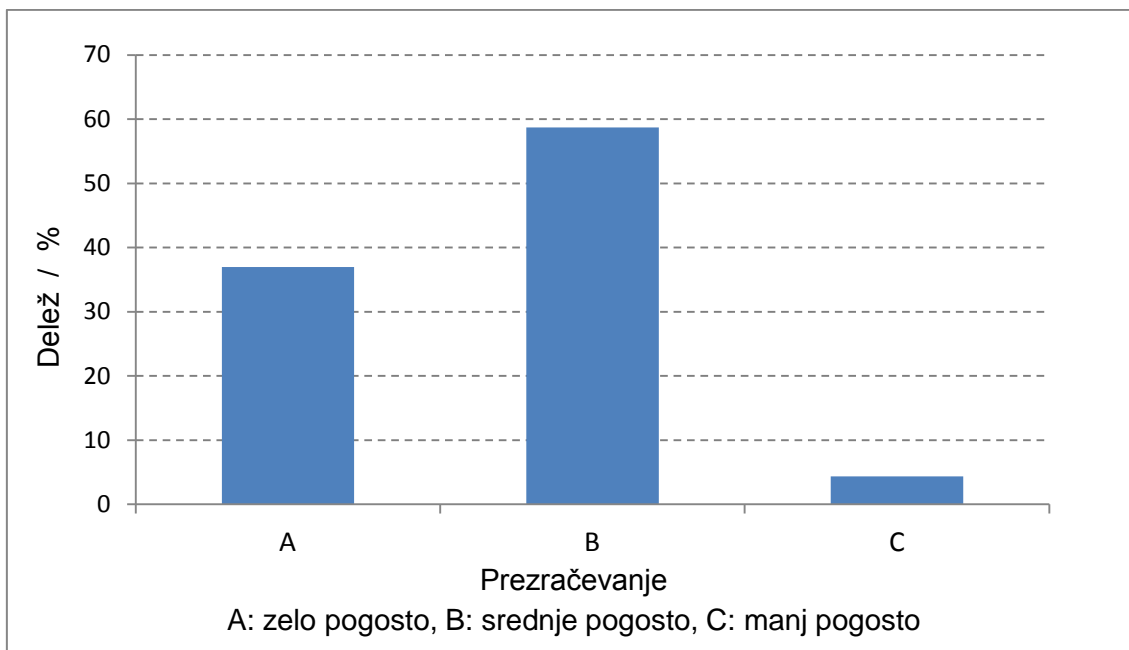
Največji delež domov, kjer so bile izmerjene povprečne celoletne koncentracije višje od 400 Bq m⁻³ ima po opisu prebivalcev okna, ki tesnijo dobro. V celotnem vzorcu je bilo takih domov 50,5 %, med presežnimi mejnimi koncentracijami pa 54,4 %, kar ne predstavlja bistvenega povečanja. Prav tako sta deleža primerljiva v ostalih dveh razredih (srednje, slabo) tesnjenja in ne kažeta bistvenega odstopanja od celotnega vzorca (slika 21). Poleg tega najdemo najvišje koncentracije v vseh treh kategorijah, na podlagi česar lahko sklepamo, da je bilo vprašanje preveč opisno in ne odraža dejanskega stanja.



Slika 22: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m⁻³, glede na tesnjenje oken

4.2.5 Koncentracije, višje od 400 Bq m⁻³, glede na prezračevalne navade

Na vprašanje, kako pogosto prezračujejo, je večina (58 %) gospodinjstev odgovorila, da to počnejo srednje pogosto. Povsem enak je delež (58 %) domov s povprečno celoletno koncentracijo radona, višjo od 400 Bq m⁻³ (slika 22). Tako bi lahko sklepali, da prezračevanje ne vpliva na koncentracijo radona v domovih. Tega pa ne moremo sprejeti, saj je fizikalno nelogično in je tudi v nasprotju z rezultati mnogih raziskav (Šeliga Š., 2000; Chao Y.H.C. in sod., 1997; Cavallo A. in sod., 1996).



Slika 23: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m^{-3} , glede na pogostost prezračevanja

Te raziskave so potrdile vpliv prezračevanja na koncentracijo radona v bivalnem okolju. Prezračevanje prinaša zunanji zrak, ki ima običajno nižjo koncentracijo radona v notranjost stavb, kar pripomore k znižanju koncentracije radona v bivalnem okolju. Očitno je bilo vprašanje preveč splošno in odgovori ne kažejo dejanskega stanja, enako kot pri celotnem vzorcu (poglavje 4.1.7).

4.2.5 Koncentracije radona, višje od 400 Bq m^{-3} , glede na starost oken

Delež domov, v katerih je bila celoletna povprečna koncentracija radona višja od 400 Bq m^{-3} je 44,4 % (slika 23), kar je enako deležu, kot so ga imeli ti domovi v celotnem vzorcu domov v raziskavi. Pričakovali bi, da bodo novejša okna bolj tesnila in s tem povečala kopičenje z radonom bogatega zraka v notranjosti domov. Kljub temu se tako pri povprečni koncentraciji radona v celotnem vzorcu (poglavje 4.1.6) kot tudi pri koncentracijah, ki presegajo 400 Bq m^{-3} , to ni potrdilo. To lahko pojasnimo z vplivom številnih drugih dejavnikov (predvsem z litološko podlago in kakovostjo gradnje) na koncentracijo radona v notranjem zraku. Njihov vpliv očitno prevladuje nad starostjo oken.

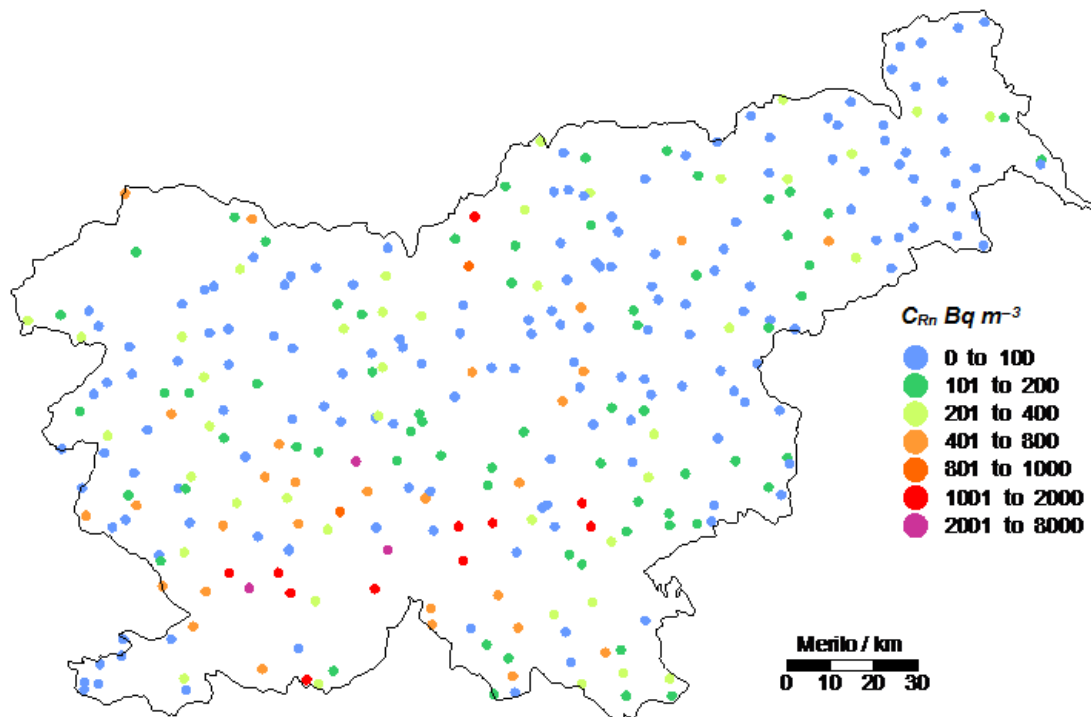


Slika 24: Delež povprečnih celoletnih koncentracij radona v 46 domovih, višjih od 400 Bq m^{-3} , glede na starost oken

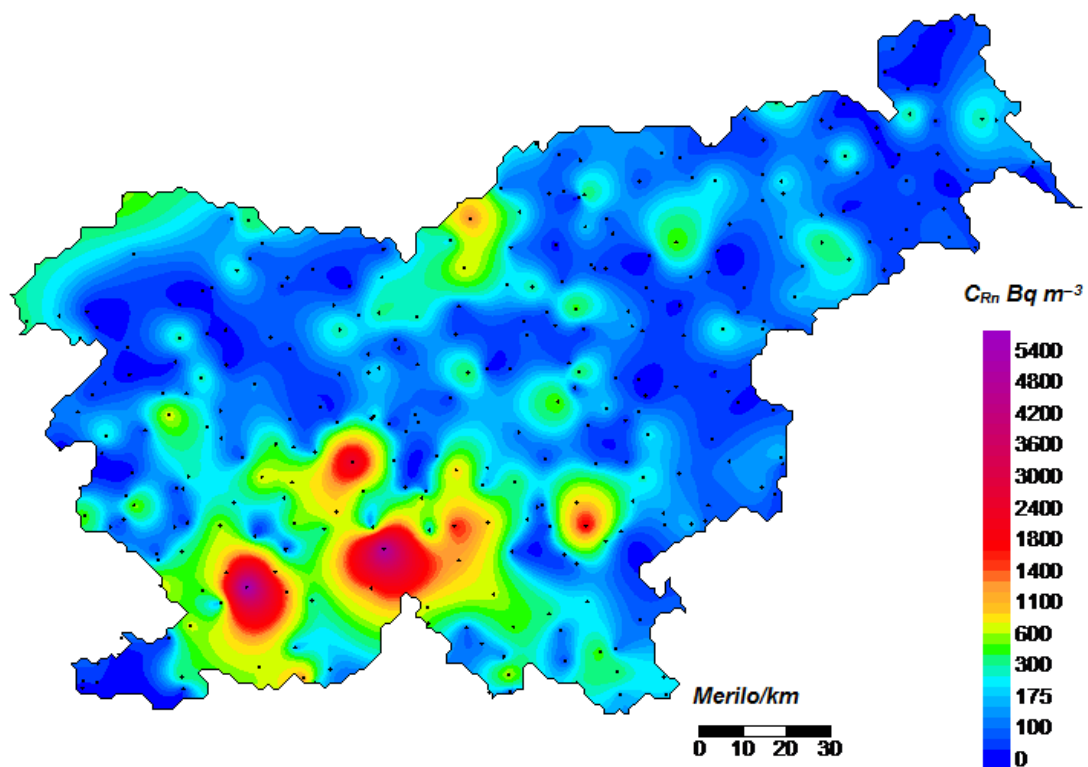
4.3 Prostorska porazdelitev radona

Prostorsko porazdelitev koncentracij radona sem med točkami z izmerjeno koncentracijo radona interpoliral z uporabo programa Surfer podjetja Golden Software. Program omogoča uporabo in obdelavo georeferenciranih prostorskih podatkov. V programu sem narisal prostorsko porazdelitev koncentracij radona. Za nazornejšo predstavo sem pripravil dva zemljevida prostorske porazdelitve: na prvem (slika 24) so prikazane lokacije meritev in koncentracija radona (z različnimi barvami za različna območja koncentracije radona), na drugem (slika 25) pa so lokacije meritev označene s točkami, z uporabo Kriginga v programu Surfer pa sem podatke interpoliral na celotno območje Slovenije.

Območja z najvišjo celoletno povprečno koncentracijo radona v domovih so v južni polovici Slovenije in se ujemajo s karbonatno litološko podlago. V poglavju 4.2.1 smo videli, da je večina koncentracij radona, višjih od 400 Bq m^{-3} , prav na tej litološki podlagi. Poleg tega so tukaj tudi najvišje izmerjene vrednosti izmed vseh koncentracij. Visoke koncentracije se ne pojavljajo v Alpskem in predalpskem svetu, kjer prav tako veliko domov stoji na karbonatni podlagi. Domnevam, da je to posledica prsti, ki predstavlja oviro pri prehajanju radona iz tal in je v Alpskem svetu debelejša kot na Krasu. Drugje po Sloveniji so koncentracije dokaj enakomerno razporejene, s posameznimi manjšimi otoki povišanih vrednosti. Ena izmed takih lokacij je na območju Krškega. Tvorita ga dve lokaciji z izrazito povišano celoletno povprečno koncentracijo radona. Drugo, manjše območje povišanih koncentracij, je na širšem območju Solčave, tvorita pa ga dve lokaciji s povišano koncentracijo radona. Ker gre le za dve lokaciji, kjer je zaradi različnih vzrokov prišlo do povišane koncentracije, ne moremo delati trdnih zaključkov.



Slika 25: Mesta meritev v domovih in velikostni razred povprečne celoletne koncentracije v njih



Slika 26: Prostorska porazdelitev povprečnih celoletnih koncentracij radona v domovih

5 ZAKLJUČKI

V svoji diplomski nalogi sem ovrednotil koncentracije radona v zraku 400 domov po vsej Sloveniji, ki jih je Center za radon v Odseku za znanosti o okolju na Institutu "Jožef Stefan" izmeril z detektorji jedrskih sledi v obdobjih od novembra 2011 do aprila 2012 (hladno obdobje) in od maja do oktobra 2012 (toplo obdobje). Pri tem sem upošteval litologijo zemljišča ter značilnosti domov in bivalne navade, kakor so jih navedli stanovalci v našem vprašalniku. Analiza je pokazala naslednje zaključke:

Koncentracije radona so bile v hladnem obdobju v območju od 19 do 8616 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 340 ± 735 Bq m⁻³ in geometrično srednjo vrednostjo 158 $\frac{\times}{\div}$ 3,0 Bq m⁻³. V toplen obdobju pa so bile koncentracije radona v območju od 17 do 4196 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 158 ± 331 Bq m⁻³ in geometrično srednjo vrednostjo 86 $\frac{\times}{\div}$ 2,6 Bq m⁻³. Aritmetična srednja vrednost obeh obdobj je bila 249 ± 524 Bq m⁻³, geometrična srednja vrednost pa 125 $\frac{\times}{\div}$ 3,0 Bq m⁻³. Porazdelitev koncentracije radona je logaritemsko normalna.

Porazdelitev geometričnih srednjih vrednosti koncentracij (v Bq m⁻³) glede na litologijo zemljišča je bila naslednja: 111 na rečnih in ledeniških nanosih, 88 na drobnozrnatih in debelozrnatih klastičnih kamninah, 109 na flišu, 185 na karbonatnih kamninah, 116 na metamorfni kamninah in 68 na morskih in jezerskih sedimentih. Razlog za najvišje koncentracije na karbonatni podlagi so kraški pojavi (podzemne razpoke, rovi, jame), ki omogočajo lažji prehod radona skozi kamnine in tako tudi proti površju, kjer vstopa v zgradbe.

Čeprav so gospodinjstva dobila navodila, da detektorje izpostavijo izključno v pritličjih, so jih 20 izpostavili v kletih, 27 v nadstropjih in enega v mansardi. Koncentracija radona je bila najvišja v kletih in je linearno padala proti višjim nadstropjem. Tako je bila povprečna koncentracija 325 Bq m⁻³ v kleti, 260 Bq m⁻³ v pritličju in 170 Bq m⁻³ v prvem nadstropju. To kaže na to, da je bil glavni vir radona zemljišče pod zgradbo in ne morda gradbeni materiali.

Koncentracija radona v novejših domovih (zgrajenih po letu 1966) je nižja kot v domovih, zgrajenih v obdobju po drugi svetovni vojni. Kljub novejši gradnji je povprečna koncentracija radona v najnovejših domovih primerljiva z domovi, zgrajenimi pred letom 1900. Prav tako najdemo v vseh obdobjih (z izjemo obdobja od 1901 do 1945) domove s povprečno letno koncentracijo radona nad 1000 Bq m⁻³. Sklepamo lahko, da starost zgradbe ni ključnega pomena za koncentracijo radona v bivalnem okolju. Le-ta je ne glede na starost lahko visoka ali nizka.

Analiza ni pokazala pričakovane odvisnosti koncentracije od prezračevanja, saj so bile vrednosti v zelo pogosto in manj pogosto prezračevanih prostorih podobne (190 Bq m⁻³ oziroma 210 Bq m⁻³), pa nižje od vrednosti v srednje pogosto prezračevanih (280 Bq m⁻³). Predvidevam, da so razlog za ta neuspešen dokaz preveč splošni odgovori, ki jih je ponujal vprašalnik in so si jih gospodinjstva različno razlagala. To vprašanje bi bilo potrebno zastaviti bolj natančno in ponuditi odgovore z opredeljenim časom prezračevanja dnevno.

Z boljšim tesnjenjem oken zmanjšujemo naravno prezračevanje in s tem omogočamo radonu, da se kopiči v zaprtem prostoru. Povprečna koncentracija radona je bila pri dobrem tesnjenju 270 Bq m⁻³, pri srednje dobrem 230 Bq m⁻³ in pri slabem 220

Bq m⁻³. Smer zniževanja koncentracije je sicer pravilna, a so razlike blizu eksperimentalnim napakam.

Največ domov, v katerih je povprečna koncentracija presegala slovensko mejno vrednost 400 Bq m⁻³, je bilo na karbonatih (61 %), manj na rečnih in ledeniških nanosih (15 %) in drobnozrnatih in debelozrnatih klastičnih kamninah (13 %), na ostalih litoloških enotah pa le po nekaj %.

Na zemljevidu prostorske porazdelitve radona v domovih vidimo, da se najvišje koncentracije pojavljajo v južni polovici Slovenije (torej na karbonatni podlagi), z nekaj manjšimi otoki (na primer na območju Krškega in na širšem območju Solčave). To bi nam moralo biti v opomin, da na teh območjih poskrbimo, da osnovno ploščo in zidove, ki so v stiku z zemljiščem, primerno izoliramo in tako preprečimo vstop radona v zgradbo.

Končna ocena vseh dejavnikov je pokazala, da imajo največji vpliv na koncentracijo radona v domovih litološka podlaga, letni čas, nadstropje in tesnjenje oken.

Podatki o povprečnih letnih koncentracijah radona, ki smo jih v pritličjih domov izmerili v okviru te raziskave, bodo izboljšali sliko Slovenije v Evropskem radonskem atlasu.

6 VIRI

Butterweck G., Porstendörfer J., Reineking A., Kesten J. 1992. Unattached fraction and the aerosol size distribution of the radon progeny in a natural cave and mine atmosphere. *Radiation Protection Dosimetry* 45:165–170

Cavallo A., Gadsby K., Reddy T.A. 1996. Comparison of natural and forced ventilation for radon mitigation in houses. *Environment International* 22: 1073-1078

Chao Y.H.C., Tung C.W.T., Burnett J. 1997. Influence of Ventilation on Indoor Radon Level. *Building and Environment* 32: 527-534

Cosma C., Cucuș-Dinu A., Begy R., Sainz C. 2013. Soil and building material as main sources of indoor radon in Băița-Ștei radon prone area (Romania). *Journal of Environmental Radioactivity* 116: 174–179

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

Denman A.R., Crockett R.G.M., Groves-Kirkby C.J., Phillips P.S., Gillmore G.K., Woolridge A.C. 2007. The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon – A case study in Northamptonshire, UK. *Environment International* 33: 34–44

Denman A. R., Groves-Kirkby, C. J., Phillips, P. S., Woolridge, A. C., Crockett, R. G. M. 2008. Seasonal correction factors in radon exposure assessment: are they help or hindrance? V: *12th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA 12), Buenos Aires, Argentina, 19–24 October 2008*

Etiopie G.; Martinelli, G. 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 129: 185–20

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

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

EC (European Commission). 2005. An overview of radon survey in Europe. Luxembourg, Office for Official Publication of the European Communities

Gruber V., Tollefsen T., De Cort M. On the way to a European Atlas of Natural Radiation. 2012. European Commission
http://rri.vein.hu/conferences/terrestrial/2012/docs/online_anyagok/w_1_1_Gruber_Atlas_for%20pdf.pdf (pregledano 8. novembra 2013)

Font L., Baixeras C. 2003. The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors. *The Science of the Total Environment* 307: 55–69

- Gallelli G., Panatto D., Lai P., Orlando P., Risso D. 1998. Relevance of main factors affecting radon concentration in multi-storey buildings in Liguria (Northern Italy). *Journal of Environmental Radioactivity* 39: 117–128
- Gregorič A. 2008. Indoor, outdoor and soil-gas radon levels in Slovenia. Seminar. Ljubljana, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana, xx str.
- Gregorič A., Zmazek B., Džeroski, S., Torkar D., Vaupotič J., 2012. Radon as an earthquake precursor – methods for detecting anomalies. In: D'Amico S. (Ed.). *Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning*, InTech, Open Access Publisher
- Groves-Kirkby C.J., Denman A.R., Phillips P.S. 2008. Lorenz Curve and Gini coefficient: novel tools for analysing seasonal variation of environmental radon gas. *Journal of Environmental Management* 90: 2480–2487
- Hassan N.M., Hosoda M., Ishikawa T., Sorimachi A., Sahoo S.K., Tokonami S., Fukushi M. 2009. Radon migration process and its influence factors; review. *Japanese Journal of Health Physics* 44: 218–231
- Hočevar M. 2005. Porazdelitev radona v tleh na labotskem prelomu pri Homcu. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, 65 str.
- 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
- Jönsson G. 1995. Radon gas-where from and what to do? *Radiation Measurements* 25: 537–546
- Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M. 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *The Science of the Total Environment* 272: 217–230
- 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
- Kobal I., Smodiš B., Burger J., Škofljanec M. 1987. Atmospheric ^{222}Rn in tourist caves of Slovenia, Yugoslavia. *Health Physics* 52: 473–479
- Kobal I., Vaupotič J., Udovč H., Burger J., Stropnik B. Radon concentrations in the air of Slovene (Yugoslavia) underground mines. *Environment International* 16: 171–173
- Kovács T., Szeiler G., Fábiáni F., Kardos R., Gregorič A., Vaupotič J. 2013. Systematic survey of natural radioactivity of soil in Slovenia. *Journal of Environmental Radioactivity* 122: 70–78
- 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
- Križman M., Ilić R., Škvarč J., Jeran Z. 1996. A survey of indoor radon concentrations in dwellings in Slovenia. V: *Proceedings of Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries in Central Europe*. Glavič-Cindro D. (ur.). Ljubljana, Jožef Stefan Institute: 66–70

Lekočević N. 2011. Prostorsko spreminjanje talnih koncentracij radona znotraj pravilnih mrež na karbonatnih in klastičnih sedimentih. Diplomsko delo. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju, 55 str.

Martinelli G. 1998. Gas geochemistry and ^{222}Rn migration processes. *Radiation Protection Dosimetry* 78: 77–82

Miles J.C., 2001. Temporal variation of radon levels in houses and implications for radon measurement strategies. *Radiation Protection Dosimetry* 94: 369–375

Nazaroff W.W. 1992. Radon transport from soil to air. *Reviews of Geophysics* 30: 137–160

Nazaroff W.W., Moed B.A., Sextro R.G. 1988. Soil as a source of indoor radon: generation, migration and entry. V: Radon and its Decay Products in Indoor Air. Nazaroff W.W., Nero Jr, A.V. (ur.). John Wiley and Sons, New York, str. 57–112

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

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

Nikolaev V.A., Ilić R. 1999. Etched track radiometers in radon measurements: a review. *Radiation Measurements* 30: 1–13

NRC (National Research Council). Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. 1988. Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters. BEIR IV, Washington, D.C. National Academy Press

NRC (National Research Council). Panel on Dosimetric Assumptions Affecting the Application of Radon Risk Estimates. 1991. Comparative Dosimetry of Radon in Mines and Homes. Washington, D.C. National Academy Press

NRC (National Research Council). Committee on Health Risks of Exposure to Radon 1999. Health Effects of Exposure to Radon. BEIR VI, Washington, D.C. National Academy Press

Ogorolec, B. 2001. Karbonatne kamnine: njihov nastanek in razširjenost v Sloveniji. *Proteus* 64–1

Placer L. 2008. Osnove tektonske razčlenitve Slovenije. *Geologija* 51: 205–217

Popit A., Vaupotič J. 2002. Vpliv geološke podlage na povišanje koncentracije radona v slovenskih šolah in vrtcih. *Geologija* 45: 499–504

Popović D., Todorović D. 2006. Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia. *Physics, Chemistry and Technology* 4: 11–20

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

- Schumann R.R., Gundersen C.S. 1996. Geologic and climatic controls of radon emanation coefficient. 1996. *Environment International* 22: 439–446
- Šeliga Š. 2008. Stopnja radioaktivnega ravnotežja med radonom in njegovimi kratkoživimi razpadnimi produkti. Diplomsko delo. Nova Gorica, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju, 58 str.
- Tanner A.B. 1978. Radon Migration in the Ground: A Supplementary Review. U.S. Geological Survey Open-File Report 78-1050. str 4.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 2000. Report to the General Assembly, with scientific annexes. 2000. Vol. 1
- ULRS (Uradni list Republike Slovenije). 2004. Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih. Uradni list RS (Ur. l. RS, št. 49/2004)
- Vaupotič J. 2003. Indoor radon in Slovenia. *Nuclear Technology & Radiation Protection* 18: 36–43
- Vaupotič J. 2008. Comparison of various methods of estimating radon dose at underground workplaces in wineries. *Radiation and Environment Biophysics* 47: 527–534
- Vaupotič J. 2010a. Radon levels in Karst caves in Slovenia. *Acta Carsologica* 39: 503–512
- Vaupotič J. 2010b. Slovenian approach in managing exposure to radon at workplaces. *Nukleonika* 55: 565–571
- 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
- Vaupotič J., Kobal I., Križman M. 2010. Background outdoor radon levels in Slovenia. *Nukleonika* 55: 579–582
- Vaupotič J., Žvab Rožič P., Barišič D. 2012. Environmental aspect of radon potencial in terra rossa and eutric cambisol in Slovenia. *Environmental Earth Science* 66: 223–229
- Wilkening M. 1990. Studies in Environmental Science 40. Radon in the Environment. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands
- Zhu H.C., Charlet J.M., Tondeur F. 1998. Geological controls to the indoor radon distribution in southern Belgium. *The Science of the Total Environment* 220: 195–214