

UNIVERZA V NOVI GORICI  
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**PREDNOST KONTINUIRNE MERITVE RADONA PRI  
IZRAČUNU SEVALNE DOZE**

DIPLOMSKO DELO

**Ana Brodar**

Mentorica: prof. dr. Janja Vaupotič

Nova Gorica, 2014



## **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.

Ana Brodar



## **ZAHVALA**

Za nastanek diplomskega dela, od zasnove do končne oblike, se iskreno zahvaljujem svoji mentorici prof. dr. Janji Vaupotič, ki me je s svojimi izkušnjami, znanjem in potrpežljivostjo ves čas usmerjala ter mi pomagala. Zahvala gre tudi prof. dr. Sonji Lojen in dr. Davidu Kocmanu za nasvete in pomoč pri razlagi in izdelavi geološkega dela naloge ter Tadeji Karl, prof. slov., za lektoriranje diplomskega dela.

Iskreno in iz srca, bi se na tem mestu rada zahvalila tudi Emi in Janku za gostoljubnost, možnost izvajanja meritev, pogovore in najboljši jabolčni zavitek.

Za vse spodbude, podporo in finančno pomoč tekom študija, se globoko zahvaljujem svojim staršem, Petru, Ivu in dedku. Posebna zahvala tudi prijateljici Ines in njeni družini, bratu ter Mateju.

Hvala, da ste mi ves čas stali ob strani, me podpirali in verjeli vame.



## POVZETEK

Mnoge države po svetu posvečajo preiskavam radona v domovih veliko pozornost, saj radon in njegovi kratkoživi produkti prispevajo več kot polovico k sevalni dozi, ki jo prejmemo od vseh naravnih virov sevanja ter so drugi najpomembnejši vzrok za nastanek pljučnega raka, takoj za kajenjem. Cilj diplomskega dela je bil ugotoviti in ovrednotiti vplive zunanje temperature in zračnega tlaka ter prezračevalnih navad na koncentracijo radona v dveh dnevni sobah (pritličje in prvo nadstropje) stanovanjske hiše na krasu in oceniti sevalne doze stanovalcev. Osnova so bile kontinuirne urne meritve radona, ki so potekale od januarja 2013 do januarja 2014. Iz enournih koncentracij aktivnosti radona sem izračunala različna povprečja koncentracij (mesečna, četrletna, polletna in letna, in sicer za celoten čas in samo za čas, ko so stanovalci dejansko bili v prostoru) in iz njih izračunala sevalne doze. Od Agencije Republike Slovenije za okolje sem pridobila tudi urne vrednosti temperature in tlaka zunanjega zraka za najbližjo meteorološko postajo Škocjan, ki se nahaja v bližini Parka Škocjanske jame, na jugozahodnem delu Slovenije. Analiza časovne vrste dobljenih podatkov je pokazala, da je bila koncentracija radona v prostorih odvisna od geološke zgradbe območja, na katerem stoji stavba (zaradi kraških tal je bila koncentracija zelo povišana, glede na mejno vrednost za radon v Sloveniji), letnih časov, nadstropja, v katerem je soba ter bivalnih navad stanovalcev (predvsem prezračevanja). Po pričakovanju so bile višje koncentracije pozimi in nižje poleti, ter višje ponoči kot podnevi. V dnevni sobi v pritličju se je koncentracija radona znatno zvišala v času, ko sta bila stanovalca na dopustu in je bila hiša zaprta, prostori pa neprezračeni. V splošnem je bila boljša, in sicer v splošnem negativna, korelacija med koncentracijo radona in zunanjo temperaturo kot zračnim tlakom. Koncentracija radona je bila ves čas poteka meritev občutno višja v dnevni sobi v pritličju (povprečna celoletna koncentracija  $7162 \text{ Bq m}^{-3}$ ) kot v dnevni sobi v prvem nadstropju (povprečna celoletna koncentracija  $1289 \text{ Bq m}^{-3}$ ) in je tako v obeh sobah znatno presežala mejno koncentracijo za radon v domovih, ki je  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ . Kot rezultat visokih koncentracij radona so bile visoke tudi sevalne doze. Tako so bile mesečne vrednosti efektivnih doz v dnevni sobi v pritličju višje od povprečne letne v svetovnem merilu.

**Ključne besede:** bivalno okolje, efektivna doza, geologija, kontinuirna meritve, kras, radon, temperatura zraka, zračni tlak.

## SUMMARY

Due to the fact that radon and its short-lived products contribute more than a half to the effective dose a member of the general public receives from all natural radiation sources, many countries worldwide pay great attention to radon in homes. Radon and its short-lived products are a major cause of lung cancer, second only to cigarette smoking. The aim of my thesis was to evaluate the influence of the atmospheric temperature, pressure and living habits on radon levels in two living rooms (on ground and on the first floor) of a private residential house, situated in a karst area, and to estimate radiation doses of inhabitants. My study was based on a continuous radon monitoring (once an hour), from January 2013 to January 2014, from which different averages of radon activity concentration have been obtained (monthly, quarterly, semi-annual and annual, both for the entire time and only for time spent by residents in the rooms), and used for calculation of the effective doses. Information on hourly values of air temperature and pressure for the nearest meteorological station Škocjan were provided by the Slovenian Environment Agency. The analysis of time-series of all the parameters included have shown a clear dependence of indoor radon concentration on geology of the area (due to karst phenomena radon levels are very high with respect to the national radon limit for indoor air), season, floor of the room and living habits of residents. As expected, radon concentration reached higher values in winter than in summer and higher in night time than in day time. Radon concentration in the living room on the ground floor increased substantially during the summer vacations of inhabitants, when the house was closed and rooms not ventilated. In general, better negative correlation of radon concentration was obtained with atmospheric temperature than with atmospheric pressure. Average radon concentration during the entire period of our monitoring was substantially higher in the living room on the ground floor ( $7162 \text{ Bq m}^{-3}$ ) than on the first floor ( $1289 \text{ Bq m}^{-3}$ ), and in both rooms by far exceeding the national radon limit of  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ . As a result of such high radon levels, monthly effective doses of residents on the ground floor were higher than the average annual effective dose worldwide.

**Key words:** atmospheric pressure, atmospheric temperature, continuous monitoring, effective dose, geology, karst, living environment, radon.



## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Kratka predstavitev problema radona</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Nameni diplomskega dela</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>TEORETIČNE OSNOVE</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Osnove radioaktivnosti</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Definicije doz</b> .....	<b>5</b>
2.2.1	Absorbirana doza, $D$ .....	5
2.2.2	Enakovredna doza, $H$ .....	5
2.2.3	Efektivna doza (sevalna doza), $E_{\text{eff}}$ .....	5
<b>2.3</b>	<b>Radon in njegovi kratkoživi produkti</b> .....	<b>6</b>
2.3.1	Značilnosti in lastnosti radona.....	6
2.3.2	Faktor radioaktivnega ravnotežja.....	8
<b>2.4</b>	<b>Izvor radona in njegovo širjenje</b> .....	<b>8</b>
2.4.1	Izstop radona iz mineralnih zrn ali emanacija.....	9
2.4.2	Transport radona v tleh.....	9
2.4.3	Izhajanje radona ali ekshalacija.....	10
<b>2.5</b>	<b>Učinki radona in njegovih kratkoživih produktov na zdravje ljudi</b> .....	<b>10</b>
2.5.1	Dozimetrija radona in njegovih razpadnih produktov.....	11
2.5.2	Dozni pretvorbni faktor.....	12
2.5.2.1	<i>Epidemiološki pristop</i> .....	12
2.5.2.2	<i>Dozimetrični pristop</i> .....	12
2.5.2.3	<i>Izračun doz</i> .....	13
<b>2.6</b>	<b>Vstop radona iz zemljišča v bivalni prostor</b> .....	<b>13</b>
<b>2.7</b>	<b>Radon v bivalnem okolju</b> .....	<b>14</b>
<b>2.8</b>	<b>Geologija območja, na katerem stoji obravnavana hiša</b> .....	<b>15</b>
2.8.1	Kras.....	16
2.8.2	Geološka zgradba in značilnosti kamnin.....	16
2.8.3	Odvisnost koncentracije radona v bivalnem prostoru od litološke zgradbe zemljišča.....	17
<b>2.9</b>	<b>Dosedanje raziskave radona v Sloveniji</b> .....	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>EKSPERIMENTALNI DEL</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Meritve radona</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Izvedba meritev</b> .....	<b>19</b>
3.2.1	Opis hiše in dveh merilnih mest.....	19
3.2.2	Potek meritev.....	21
3.2.3	Obdelava podatkov.....	21
<b>4</b>	<b>REZULTATI IN RAZPRAVA</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Koncentracije radona</b> .....	<b>22</b>
4.1.1	Izmerjena koncentracija radona.....	22
4.1.1.1	<i>Dnevna soba v pritličju</i> .....	22
4.1.1.2	<i>Dnevna soba v prvem nadstropju</i> .....	23
<b>4.2</b>	<b>Soodvisnost med izmerjeno koncentracijo radona in zunanjo temperaturo ter zunanjim tlakom</b> .....	<b>25</b>
4.2.1	Korelacijski koeficienti.....	25
4.2.1.1	<i>Dnevna soba v pritličju</i> .....	26
4.2.1.2	<i>Dnevna soba v prvem nadstropju</i> .....	30
4.2.1.3	<i>Učinki prezračevalnih navad stanovalcev v juliju</i> .....	31
<b>4.3</b>	<b>Povprečne koncentracije radona</b> .....	<b>33</b>
4.3.1	Celotne povprečne mesečne koncentracije radona.....	34
4.3.2	Povprečne mesečne bivalne koncentracije radona.....	35
4.3.3	Primerjava koncentracij radona med pritličjem in prvim nadstropjem.....	36

4.4 Efektivna doza.....	37
5 ZAKLJUČKI .....	39
6 VIRI .....	41
6.1 Internetni viri .....	46

## SEZNAM PREGLEDNIC

<b>Preglednica 1:</b> Splošne in fizikalne lastnosti radona (Kemija, 2004) .....	6
<b>Preglednica 2:</b> Vrednosti doznega pretvorbena faktorja (DCF) po ICRP (ICRP-65, 1993) in UNSCERAR.....	12
<b>Preglednica 3:</b> Koeficient korelacije ( $r$ ) za korelacije med koncentracijo radona ( $C_{Rn}$ ) v zraku dnevne sobe v pritličju in temperaturo ( $T$ ) ter tlakom ( $P$ ) zunanjega zraka po mesecih .....	26
<b>Preglednica 4:</b> Koeficient korelacije ( $r$ ) za korelacije med koncentracijo radona ( $C_{Rn}$ ) v zraku dnevne sobe v prvem nadstropju in temperaturo ( $T$ ) ter tlakom ( $P$ ) zunanjega zraka po mesecih.....	26
<b>Preglednica 5:</b> Celotne povprečne koncentracije radona ( $C_{Rn}$ ), izračunane iz izmerjenih urnih koncentracij: B – bivalna, M – mesečna, 3-M – trimesečna ali četrtletna, 6-M – šestmesečna ali polletna in L – letna .....	33
<b>Preglednica 6:</b> Koeficient korelacije ( $r$ ) med celotnimi povprečnimi mesečnimi koncentracijami radona v dnevni sobah v pritličju in prvem nadstropju .....	36
<b>Preglednica 7:</b> Efektivne doze ( $E_{eff}$ ) v dnevni sobah v pritličju in prvem nadstropju, izračunane na osnovi različnih celotnih povprečnih koncentracij radona: M=mesečno, 3-M=trimesečno, 6-M=polletno in L=letno .....	37
<b>Preglednica 8:</b> Bivalne mesečne koncentracija radona ( $C_{Rn}$ ) in bivalne mesečne efektivne doze ( $E_{eff}$ ) .....	38
<b>Preglednica 9:</b> Razmerja med povprečno bivalno efektivno dozo in celotno povprečno efektivno dozo.....	38

## SEZNAM SLIK

<b>Slika 1:</b> Razpadni nizi torija, urana in aktinija .....	7
<b>Slika 2:</b> Shematski prikaz možnih poti radona po nastanku iz radija. Več zrn je v stiku, med njimi pa pore, ki so zapolnjene z zrakom ali vodo. Atom radona je označen z modro piko, atom radija pa z zeleno .....	9
<b>Slika 3:</b> Delež obsevanosti prebivalstva v Sloveniji od posameznih vrst virov sevanj .	11
<b>Slika 4:</b> Možne poti vstopa radona v bivalni prostor oziroma hišo.....	14
<b>Slika 5:</b> Prikaz geološke zgradbe in značilnosti kamnin na območju merilnega mesta, ki je označen s črno piko .....	16
<b>Slika 6:</b> Prostorska porazdelitev povprečnih celoletnih koncentracij radona v 400 domovih.....	18
<b>Slika 7:</b> Merilnik Radon Scout .....	19
<b>Slika 8:</b> Izbira merilnega mesta (rdeči krog) glede na povprečno letno koncentracijo radona .....	20
<b>Slika 9:</b> Skica obravnavane hiše ter razporeditev prostorov in nadstropje merjenja....	20
<b>Slika 10:</b> Časovni potek urnih in 24-urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v letu 2013 .....	23
<b>Slika 11:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v letu 2013.....	23
<b>Slika 12:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in temperature zunanjega zraka v letu 2013.....	24
<b>Slika 13:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in zunanjega zračnega tlaka v letu 2013.....	24
<b>Slika 14:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v januarju .....	27
<b>Slika 15:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v januarju.....	27
<b>Slika 16:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v maju.....	28
<b>Slika 17:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v maju.....	28
<b>Slika 18:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v avgustu .....	29
<b>Slika 19:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v avgustu.....	29
<b>Slika 20:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v novembru.....	30
<b>Slika 21:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v novembru.....	30
<b>Slika 22:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in temperature zunanjega zraka v novembru.....	31
<b>Slika 23:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in zunanjega zračnega tlaka v oktobru .....	31
<b>Slika 24:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v juliju.....	32
<b>Slika 25:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in temperature zunanjega zraka v juliju .....	32
<b>Slika 26:</b> Stolpčni prikaz celotnih mesečnih povprečnih koncentracij radona v dnevni sobi v pritličju .....	34

<b>Slika 27:</b> Stolpčni prikaz celotnih mesečnih povprečnih koncentracij radona v dnevni sobi v prvem nadstropju.....	34
<b>Slika 28:</b> Stolpčni prikaz celotnih mesečnih bivalnih koncentracij radona v dnevni sobi v pritličju.....	35
<b>Slika 29:</b> Stolpčni prikaz celotnih mesečnih bivalnih koncentracij radona v dnevni sobi v prvem nadstropju .....	35
<b>Slika 30:</b> Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in dnevni sobi v prvem nadstropju v letu 2013 .....	36

## SEZNAM OKRAJŠAV

RnDP = radonovi razpadni produkti  
 $DCF_D$  = dozimetrični dozni pretvorbeni faktor  
 $DCF_E$  = epidemiološki dozni pretvorbeni faktor  
 $F$  = faktor radioaktivnega ravnotežja  
 $E_{\text{eff}}$  = efektivna doza

# 1 UVOD

## 1.1 Kratka predstavitev problema radona

Radioaktivni žlahtni plin radon je brez barve, vonja in okusa. Nastaja v zemeljski skorji z  $\alpha$ -radioaktivno preobrazbo radija v naravnih radioaktivnih nizih, in sicer (Nero Jr. A. V., 1988) izotop  $^{222}\text{Rn}$  (imenovan tudi radon) iz  $^{226}\text{Ra}$  v nizu  $^{238}\text{U}$ , izotop  $^{220}\text{Rn}$  (imenovan tudi toron) iz  $^{224}\text{Ra}$  v nizu  $^{232}\text{Th}$  in izotop  $^{219}\text{Rn}$  (imenovan tudi aktinon) iz  $^{223}\text{Ra}$  v nizu  $^{235}\text{U}$ . Med njimi ima radon najdaljšo razpolovno dobo (3,82 dni) in so, razen v redkih primerih, tudi njegove koncentracije v okolju najvišje. Zato ta izotop obravnavam tudi v svojem diplomskem delu in ga navajam bodisi kot  $^{222}\text{Rn}$  ali radon.

Z  $\alpha$ -preobrazbo  $^{222}\text{Rn}$  nastanejo radioaktivni kratkoživi produkti (RnDP):  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ . Ti so na začetku pozitivno nabiti ioni, ki pa se kmalu nevtralizirajo pri rekombinaciji z molekulami zraka, tvorijo molekularne skupke in se vežejo na aerosolne delce. Pri dihanju se delež delcev posede na stene dihalnih poti. Ta delež je močno odvisen od njihove velikosti. Na mestih, kjer se zadržujejo atomi RnDP, se energija, ki se sprošča pri njihovih radioaktivnih preobrazbah  $\alpha$ ,  $\beta$  in  $\gamma$ , absorbira v tkivu, ga poškoduje in s tem poveča tveganje za nastanek pljučnega raka (Bell F. G., 2007). V svetovnem povprečju prispevata radon in toron ter njuni kratkoživi produkti več kot polovico k sevalni dozi, ki jo prejmemo od vseh naravnih virov sevanja (UNSCEAR, 2000), kar pomeni, da so za kajenjem drugi najpomembnejši vzrok za nastanek pljučnega raka (Darby S. in sod., 2005).

Po drugi strani pa je radon zaradi svojih fizikalno-kemijskih lastnosti koristno orodje v nekaterih znanstvenih disciplinah. Tako ga uporabljamo kot enega od znanilcev potresov (Gregorič A., in sod. 2012), kot indikator tektonskih prelomov (Hočevar M., 2005), kot sledilo v gibanju zračnih gmot nad kopnim in nad oceani (Nero Jr. A. V., 1988) ter kot pokazatelja uranove rude (Nero Jr. A. V., 1988).

Najbolj pogosto je glavni izvor radona v zraku bivalnih prostorov zemljišče, na katerem stoji stavba (Nero Jr. A. V., 1988). Ker je uran v večji ali manjši koncentraciji razširjen povsod po zemeljski skorji, velja to tudi za radon. Poleg vsebnosti urana (in s tem radija) v zemljišču, je zelo pomembna tudi velikost zrn minerala ter porazdelitev radija v zrnih, saj je od tega prvenstveno odvisno koliko atomov radona, ki nastajajo v zrnu, uspe uiti v prostor med zrn in tako dobi možnost nadaljnega širjenja v okolju (Leban M., 2013). Na krajše razdalje potuje radon z difuzijo, na daljše in na površino pa zaradi svoje radioaktivne preobrazbe pride samo z advekcijo in konvekcijo, najbolj pogosto raztopljen v vodi ali v nosilnih plinih ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ). Na njegovo potovanje vplivajo geofizikalni in hidrogeološki dejavniki. Olajšujejo mu ga podzemni rovi in razpoke (kot je to na kraškem svetu) in tektonski prelomi (zaradi lažjega prehoda skozi zdolbljene kamnine). Njegova koncentracija v plinu v zemlji, je v območju od  $10^3$  do  $10^6$   $\text{Bq m}^{-3}$ , pri prehodu v ozračje pa se zaradi razredčenja hitro zniža in je od nekaj  $\text{Bq m}^{-3}$  do nekaj  $10$   $\text{Bq m}^{-3}$ . Če so zidovi in talne plošče, ki so v stiku z zemljiščem dovolj učinkovita ovira za prehod plina iz zemljišča v zgradbo, koncentracija radona v notranjem zraku ne presega  $10^2$   $\text{Bq m}^{-3}$ . Že nekaj razpok ali slabih stikov pa je dovolj, da lahko preseže tudi  $10^3$   $\text{Bq m}^{-3}$ .

Prve sistematične meritve radona so izvajali v rudnikih urana, kjer so rudarji delali v zraku z visokimi koncentracijami radona. Kmalu pa so odkrili visoke koncentracije tudi v

nekaterih zgradbah. In sledile so preiskave radona po domovih in na delovnih mestih. Danes ima velika večina razvitih držav vsaj grobo oceno izpostavljenosti svojih prebivalcev radonu.

Tudi v Sloveniji so prve meritve radona izvedli leta 1969 v rudniku urana v Žirovskem vrhu (Gregorič A., 2008). Nato so se preusmerili v kraške jame (Kobal I. in sod., 1987; Vaupotič J., 2010a), premogovnike (Kobal I. in sod., 1990) in toplice (Vaupotič J., 2003). V okviru slovenskega radonskega programa so v letih od 1990 do 1994 izmerili koncentracijo radona v 1000 naključno izbranih domovih (Humar M. in sod., 1992), v 730 vrtcih (Vaupotič J. in sod., 2012) in 890 šolah (Vaupotič J. in sod., 2012). Večino povišanih vrednosti so odkrili na kraških tleh. Sledile so dodatne preiskave v zgradbah s povišanimi koncentracijami radona (Vaupotič J. in sod., 2013) in v številnih javnih zgradbah in ustanovah, kot so bolnišnice, vodna zajetja in nekateri upravni uradi (Vaupotič J., 2003). V zadnji raziskavi, ki je potekala od 2011 do 2013, so koncentracije radona izmerili še v 400 domovih (Vaupotič J. in sod., 2013). Namen vseh teh preiskav ni bilo samo ugotavljanje stanja, ampak tudi njegovo saniranje. Tako so doslej v več kot 50 zgradbah uspešno znižali koncentracije radona izpod zelene meje.

Za svoje diplomsko delo sem izbrala hišo na kraških tleh, v kateri so v okviru zadnje raziskave (Vaupotič J. in sod., 2013; Leban M., 2013) našli visoko koncentracijo radona. V svoji raziskavi sem želela ugotoviti, zakaj tako visoka vrednost, kako se spreminja s časom in kolikšno sevalno dozo prejmejo njeni stanovalci.



## 1.2 Nameni diplomskega dela

Namen mojega diplomskega dela je bil, da ovrednotim rezultate kontinuirnih enoletnih meritev koncentracije radona v dveh prostorih izbrane stanovanjske hiše na Krasu s povečano koncentracijo radona. Podrobno sem raziskala ter opredelila odvisnost koncentracije radona od zunanje temperature in tlaka ter ene izmed bivalnih navad, prezračevanja prostorov. Iz kontinuirnih meritev sem izračunala različna povprečja koncentracije radona ter jih uporabila kot vhodne podatke pri izračunu sevalnih (efektivnih) doz. Ugotovila sem, kolikšne so razlike v sevalni dozi, če pri izračunu uporabim različne koncentracije: od letnih povprečij, ki so najmanj natančna, do urnih vrednosti, ki so predstavljene kot najbolj natančne. Statistično sem ovrednotila izbrane mesečne koncentracije radona, ki presegajo zakonsko določeno mejno vrednost za radon,  $400 \text{ Bq m}^{-3}$  (ULRS, 2004) in so zaradi vpliva na zdravje tamkajšnjih stanovalcev še posebej pomembne. Končni cilj je bil, da določim glavne dejavnike, ki vplivajo na povišane koncentracije radona v zraku bivalnih prostorov izbrane hiše. Hišo na Krasu sem izbrala na osnovi najnovejše raziskave, ki jo je izvedel Institut "Jožef Stefan" v 400 domovih v Sloveniji in je imela eno od najvišjih koncentracij radona.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

### 2.1 Osnove radioaktivnosti

Radioaktivna preobrazba je spontan proces, pri katerem nestabilno jedro atoma sprosti presežek svoje energije v obliki sevanja delcev ali fotonov. Od preobrazb navajam tu samo tri najbolj pogoste, katerim so podvržena tudi jedra radona in jedra njegovih kratkoživih produktov, to so:

- preobrazba  $\alpha$  s sevanjem delcev  $\alpha$  (ki so helijeva jedra),
- preobrazba  $\beta$  s sevanjem delcev  $\beta^-$  (ki so elektroni  $e^-$ ) ali delcev  $\beta^+$  (ki so elektroni  $e^+$ ),
- preobrazba  $\gamma$  s sevanjem fotonov  $\gamma$  (ki so elektromagnetno valovanje).

Ker so jedra, ki nastanejo pri preobrazbah  $\alpha$  in  $\beta$ , pogosto vzbujena, sevajo fotone  $\gamma$  in s tem prehajajo v manj vzbujeno ali stabilno stanje (Vaupotič J. in Kopal I., 2012). Pri prehodu v stabilno stanje jedra, se lahko sproščajo tudi drugi težki delci, nevtroni in protoni.

Število jeder radioaktivnega elementa se s časom zaradi radioaktivne preobrazbe manjša. Hitrost radioaktivne preobrazbe imenujemo aktivnost ( $A$ ), ki jo matematično zapišemo z enačbo:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (1)$$

Z rešitvijo diferencialne enačbe

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (2)$$

in integracijo od časa  $t = 0$ , ko je  $N = N_0$ , do časa  $t = t$ , ko je  $N = N$ ,

dobimo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Če obe strani enačbe 3 pomnožimo z  $\lambda$  dobimo (glede na enačbo 1):

$$A = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Enota aktivnosti je 1 razpad na sekundo in jo imenujemo 1 bequerel z oznako 1 Bq.

$A_0$  je aktivnost vira ob času  $t = 0$ ,  $A$  pa aktivnost po preteku časa  $t$ .

Za posamezno jedro ne moremo napovedati, kdaj bo razpadlo, ker so radioaktivne preobrazbe naključni dogodki. Podamo pa lahko razpolovni čas  $t_{1/2}$  (enačba 5), to je čas, v katerem se aktivnost vzorca (število atomov) zmanjša na polovico.

$$t_{1/2} = \ln 2/\lambda \quad (5)$$

## 2.2 Definicije doz

### 2.2.1 Absorbirana doza, $D$

Absorbirana doza ( $D$ ) je definirana kot energija  $dE$ , ki se absorbira v snovi mase  $dm$  :

$$D = dE / dm . \quad (6)$$

Kot enoto za  $D$  uporabljamo 1 Gy (gray), pri čemer je  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$  (Vaupotič J. in Kobal I., 2012).

Doza  $D$  nam pove množino absorbirane energije, ne upošteva pa različnih učinkov, ki jih imajo različna sevanja na snov. Za to uporabljamo enakovredno dozo.

### 2.2.2 Enakovredna doza, $H$

Enakovredna doza  $H$  za tkivo T je definirana kot zmnožek  $w_R$  – sevalnega utežnega faktorja za sevanje R in povprečne absorbirane doze  $D_{T,R}$ , ki jo je prejelo tkivo T. Vrednosti  $H$  za različna tkiva lahko enostavno seštejemo, saj pri tej dozi upoštevamo biološko učinkovitost sevanja. Sevalni utežni faktor  $w_R$  je za sevanje  $\beta$  in  $\gamma$  1, medtem ko za sevanje  $\alpha$  uporabimo 20. Enota enakovredne doze je 1 Sv (sievert). Tako pri sevanju  $\beta$  in  $\gamma$  1 Gy pomeni 1 Sv ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ), pri sevanju  $\alpha$  pa 1 Gy absorbirane doze pomeni 20 Sv enakovredne doze.

$$H_T = \sum w_R D_{T,R} \quad (7)$$

Ker so različna tkiva različno občutljiva na sevanje, moramo uporabiti vpeljano sevalno oziroma efektivno dozo (Vaupotič J. in Kobal I., 2012).

### 2.2.3 Efektivna doza (sevalna doza), $E_{\text{eff}}$

Efektivna ali sevalna doza  $E_{\text{eff}}$  je vsota doz  $H_T$ , pomnoženih z utežnim faktorjem za določeno tkivo  $w_T$ :

$$E_{\text{eff}} = \sum w_T H = \sum w_T \sum w_R D_{T,R} \quad (8)$$

Utežni faktor za tkivo  $w_T$  meri relativni prispevek tkiva T k celotnemu učinku na telo, ki ga povzroči enakomerno obsevanje celotnega telesa. Enota, ki jo uporabljamo za efektivno dozo je 1 Sv. Pri dihanju radona in RnDP so najbolj izpostavljena pljuča, v katerih se RnDP posedajo. Zato pri izračunu efektivne doze upoštevamo le utežni faktor za pljuča, ki je 0,12 (UNSCEAR, 2000).

## 2.3 Radon in njegovi kratkoživi produkti

### 2.3.1 Značilnosti in lastnosti radona

Radon je radioaktivni žlahtni plin, brez barve, vonja in okusa (preglednica 1) (Kemija, 2004). Nastaja z  $\alpha$ -preobrazbo radija. V treh naravnih radioaktivnih nizih nastajajo trije njegovi izotopi, in sicer (slika 1) (Vaupotič J., 1995):

- $^{222}\text{Rn}$  (imenovan tudi radon), ki nastaja iz  $^{226}\text{Ra}$  v uranovem nizu ( $^{238}\text{U}$ ),
- $^{220}\text{Rn}$  (imenovan tudi toron), ki nastaja iz  $^{224}\text{Ra}$  v torijevem nizu ( $^{232}\text{Th}$ ),
- $^{219}\text{Rn}$  (imenovan tudi aktinon), ki nastaja iz  $^{223}\text{Ra}$  v aktinijevem nizu ( $^{235}\text{U}$ ).

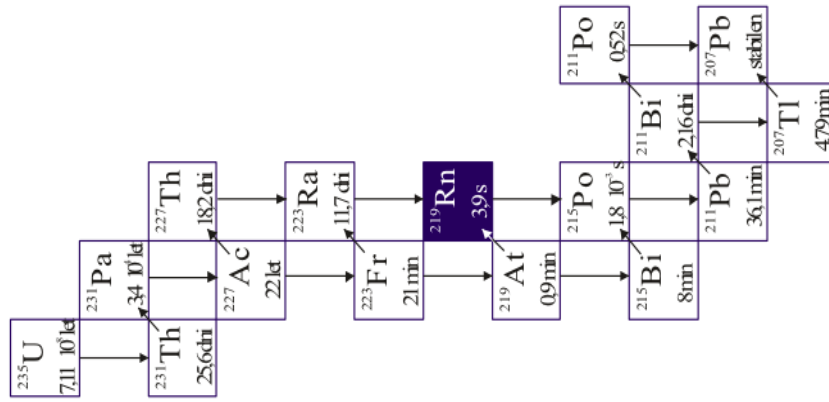
**Preglednica 1: Splošne in fizikalne lastnosti radona (Kemija, 2004)**

splošne lastnosti		fizikalne lastnosti	
simbol	Rn	agregatno stanje	plin
vrstno število	86	tališče	-71 °C (202 K)
relativna atomska masa	(222) g mol <sup>-1</sup>	vrelišče	-61,7 °C (211,3 K)

Najdaljši razpolovni čas 3,82 dni ima  $^{222}\text{Rn}$ , zato je koncentracija tega izotopa v okolju običajno znatno višja od koncentracije  $^{220}\text{Rn}$ , medtem ko je koncentracija  $^{219}\text{Rn}$  zanemarljivo nizka (Nero Jr., A. V., 1988). Zaradi relativno visokega razpolovnega časa radona ( $^{222}\text{Rn}$ ), lahko velik del tega plina, ki nastane v zemeljski skorji, doseže atmosfero. Največji delež v okolju prispeva  $^{222}\text{Rn}$ , zato ga, če ni drugače poudarjeno, enostavno imenujemo kar radon.

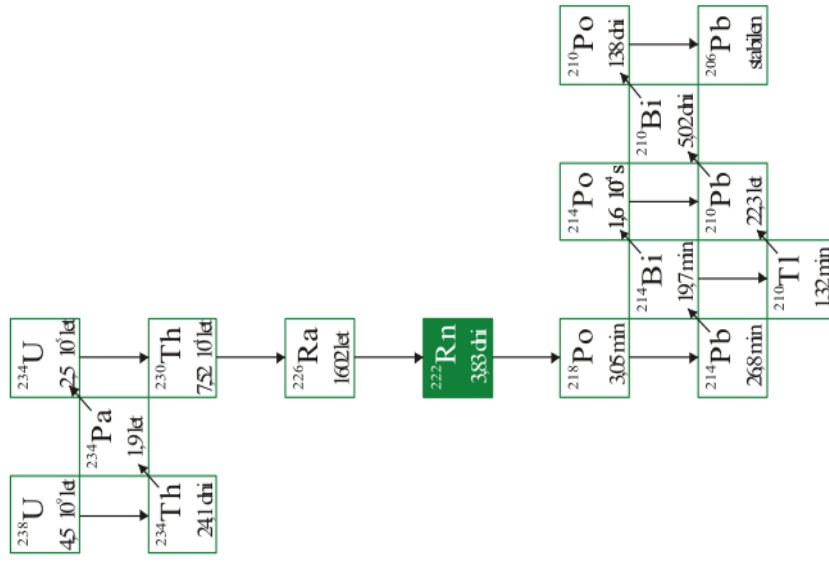
Rezultat  $\alpha$ -preobrazbe radona so RnDP:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ . Ti so ob nastanku pozitivno nabiti kovinski ioni, ki se rekombinirajo in nevtralizirajo ter v zraku tvorijo gruče velikosti do 10 nm. Sčasoma se absorbirajo na aerosolne delce, velikosti med 200 nm in 600 nm. Te imenujemo vezani RnDP (Butterweck G. in sod., 2001).

c) AKTINIJEV



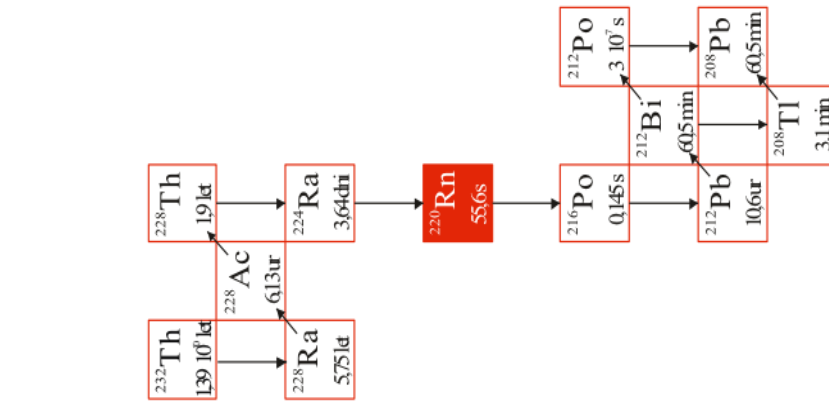
β, γ razpad

b) URANOV



α razpad

a) TORIJEV



LEGENDA:

U	92	Pa	91	Th	90	Ac	89	Ra	88	Fr	87	Rn	86	At	85	Po	84	Bi	83	Pb	82	Tl	81
---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Slika 1: Razpadni nizi torija, urana in aktinija (povzeto po Valkovič V., 2000)

### 2.3.2 Faktor radioaktivnega ravnotežja

V povsem mirnem zraku, bi po približno treh urah lahko prišlo do sekularnega radioaktivnega ravnotežja med radonom in njegovimi kratkoživimi produkti. Takrat bi bila aktivnost vsakega produkta enaka aktivnosti radona (Vaupotič J. in Kobal I., 2012). Zaradi mešanja in gibanja zraka ter usedanja aerosolov pa se praktično nikoli ne vzpostavi radioaktivno ravnotežje (Makofske W. J in Edelstein M. R., 1988; Vaupotič J. in Kobal I., 2012). Stopnjo ravnotežja izražamo s tako imenovanim ravnotežnim faktorjem  $F$ , ki je podan z izrazom:

$$F = C_{\text{RnDP}} / C_{\text{Rn}}, \quad (9)$$

v katerem je  $C_{\text{Rn}}$  koncentracija aktivnosti radona,  $C_{\text{RnDP}}$  pa enakovredna ravnotežna koncentracija aktivnosti RnDP, podana preko koncentracij  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  (prispevek  $^{214}\text{Po}$  je vključen pri  $^{214}\text{Bi}$ ) z izrazom:

$$C_{\text{RnDP}} = 0,1065 C_{^{218}\text{Po}} + 0,515 C_{^{214}\text{Pb}} + 0,379 C_{^{214}\text{Bi}} . \quad (10)$$

V različnih okoljih so tudi vrednosti  $F$  različne, saj so odvisne od mikroklimatskih in vremenskih razmer. Meritve v različnih državah so pokazale, da je v zunanjem zraku njegova vrednost med 0,50 in 0,70 (oziroma od 50 do 70 %) (UNSCEAR, 2000), v zraku bivalnega okolja pa med 0,40 in 0,50 (oziroma od 40 do 50 %) (Vaupotič J. in Kobal I., 2006). Mednarodne organizacije, ki uravnavajo področje varstva pred sevanji (UNSCEAR, 2000; ICRP-65, 1993), priporočajo, da v dozimetriji radona, takrat ko nimamo izmerjene vrednosti  $F$ , upoštevamo  $F = 0,40$ .

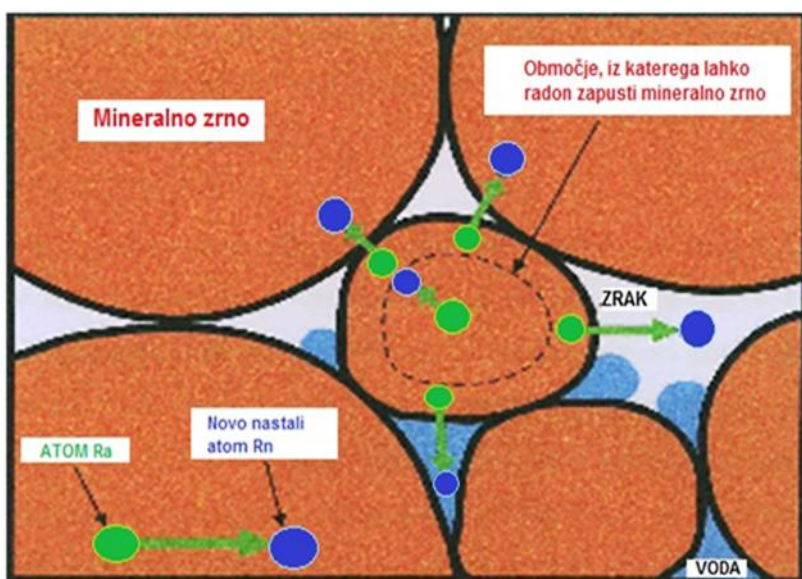
Ker so meritve radona bolj enostavne kot meritve RnDP, so podatkovne baze o koncentracijah radona obsežnejše od koncentracij produktov. Če koncentracije radona uporabimo za izračun doz, jih pretvorimo v koncentracije RnDP z uporabo enačbe 9 preko produkta  $C_{\text{RnDP}} = C_{\text{Rn}} \times F$  in pri tem vzamemo priporočeno vrednost  $F$ .

### 2.4 Izvor radona in njegovo širjenje

Ker je uran (in s tem radij) zelo razširjen element, čeprav na splošno v nizkih koncentracijah, se tudi radon pojavlja v kamninah in zemlji, v termalnih in mineralnih vodah, v podtalnici, v oceanih in morjih, v naravnem plinu (UNESCAR, 2000). Svetovno povprečje vsebnosti urana v kamninah je  $37 \text{ Bq kg}^{-1}$ , v prsti pa  $25,9 \text{ Bq kg}^{-1}$  (NCRP, 1984). Povišane vsebnosti urana najdemo v kisljih magmatskih kamninah (graniti in pegmatiti), metamorfni kamninah granitne sestave (skrilavci), piroklastičnih kamninah (karbonati), sedimentnih kamninah (organogeni glinavci, rečni peščenjaki, fosforiti) ter v drugih sedimentih, ki vsebujejo fosfate. Visoko vsebnost urana imajo tudi nekateri boksiti in premogi (Gundersen C. S. in sod., 1991). Kopiči se tudi na površini glinenih delcev, ki vsebujejo kovinske okside, še posebej v prisotnosti železovih oksidov, kalcijevega karbonata in organskih snovi (Gundersen C. S. in sod., 1991).

### 2.4.1 Izstop radona iz mineralnih zrn ali emanacija

Atom radona dobi pri nastanku z  $\alpha$ -preobrazbo 86 keV kinetične energije, ki ga v zrnju kamnine odrine v nasprotno smer od gibanja delca  $\alpha$ . V večini mineralov je ta energija dovolj, da prepotuje v mineralu od 20 do 70 nm, v vodi 100 nm in v zraku 63  $\mu\text{m}$  (Hassan N. M. in sod., 2009). Po nastanku atom radona lahko (slika 2): (i) z difuzijo potuje na drugo mesto v istem zrnju, (ii) uide iz zrna in se ujame v drugem zrnju, (iii) obstane v prostoru med zrnji (v pori) ali (iv) uide iz zrna, prepotuje prostor med zrnji in se ujame v drugem zrnju. Tako manjšemu deležu radonovih atomov uspe, da zapustijo mineralno zrno in se ujamejo v prostor med zrnji, v katerem je bodisi plin ali voda ali kakšna druga tekočina. Ta delež imenujemo delež izstopa radona ali emanacijski koeficient.



**Slika 2:** Shematski prikaz možnih poti radona po nastanku iz radija. Več zrn je v stiku, med njimi pa pore, ki so zapolnjene z zrakom ali vodo. Atom radona je označen z modro piko, atom radija pa z zeleno (povzeto po Hočevar M., 2005)

Emanacijski koeficient je za kamnine in tla med 0,05 in 0,70 (Schumann R. R. in Gundersen L. C. S., 1996). Če je v porah kamnine tekočina (voda), je emanacijski koeficient višji, ker tekočina zaustavi atom radona in mu prepreči, da bi se ujel v drugem zrnju (Hassan N. M. in sod., 2009). Na emanacijski koeficient vplivajo porazdelitev radija v zrnju: če so atomi radija bližje površini, ima več nastalih atomov radona možnost, da uidejo v prostor med zrnji. Prav tako je emanacijski koeficient višji v manjših zrnjih, v katerih ima radon krajšo pot do izstopa iz zrna.

### 2.4.2 Transport radona v tleh

Radonovi atomi v prostoru med zrnji imajo možnost, da dalje potujejo po prostoru. Njegovo potovanje z difuzijo je zelo počasno. Ker je podvržen  $\alpha$ -preobrazbi in se število njegovih atomov s časom manjša, na tak način ne prispe daleč. Zato lahko daljše razdalje prepotuje le s konvekcijo ali advekcijo v raztopini v nosilnih tekočinah (voda, nafta) in plinih ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ) (Etiope G. in Marinelli G., 2002). Konvekcijo povzroča prostorski gradient temperature, advekcijo pa prostorski gradient tlaka. Odločilno vlogo pri tem ima prepustnost medija – kamnine, ki je odvisna od (i) vsebnosti vode, (ii) deleža in usmerjenosti por, (iii) oblike in velikosti zrn in por ter (iv) napetosti v kamnini. Prepustnost kamnin je večja pri večjih kamninah, pri katerih so

pore večje in med seboj povezane, z velikimi vmesnimi prostori, ki so napolnjeni z vodo ali plinom – zrakom. Če so na tektonskem prelomu zrna kamnine stisnjena, je prehod nosilnega plina (in s tem radona) otežen in nasprotno, na prelomih z zrahljanimi zrnji je prehod olajšan. Prehod je olajšan tudi na kraškem svetu, kjer lahko radon (kljub zmanjšanju koncentracije zaradi  $\alpha$ -preobrazbe) z nosilnim plinom po podzemnih rovih in razpokah prepotuje daljše razdalje. Tako je transport radona odvisen od geofizikalnih, hidroloških in meteoroloških dejavnikov.

#### 2.4.3 Izhajanje radona ali ekshalacija

Izhajanje radona s površine trdne snovi ali tekočine v ozračje imenujemo ekshalacija in jo podajamo bodisi v  $\text{Bq m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ali  $\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (Hassan N. M. in sod., 2009). Na ekshalacijo radona s površine kamnine ali zemljišča vplivajo številni dejavniki, kot so: vsebnost vode, poroznost, velikost delcev ter razlika temperature in tlaka v trdni snovi ali vodi in v zraku. Tako je ekshalacija radona odvisna od geofizikalnih, hidroloških in meteoroloških dejavnikov.

Z naraščanjem zračnega tlaka se izhajanje plina iz tal zmanjša, s padanjem tlaka pa poveča. To velja tudi za ekshalacijo radona. Če piha veter čez neravno oviro oziroma neravno površino, lokalno znižanje zračni tlaka za oviro in na tem mestu pospešuje ekshalacijo radona (Schumann R. R. in sod., 1992).

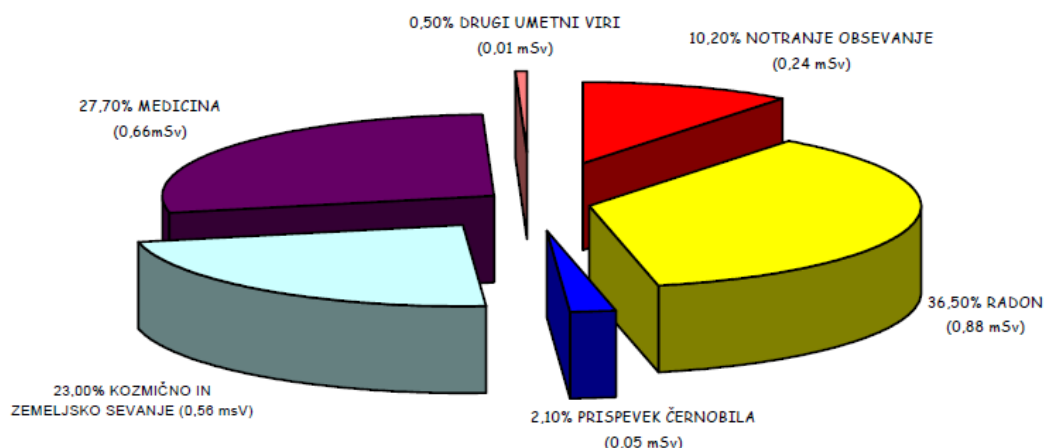
Zaradi sončnega sevanja prihaja do spreminjanja temperature tal in zraka. Ko sonce zaide, se tla ohladijo in prav tako tudi sloj zraka pri tleh. Ozračje se umirja, zmanjša se mešanje zraka in s tem razredčevanje radona, kar omogoča kopičenje radona pri tleh. Ozračje je najbolj stabilno zjutraj in takrat je tudi koncentracija radona pri tleh najvišja. To pa se ne pojavi že, če piha veter samo s hitrostjo  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  (Sesana L. in sod., 2003). Z višanjem temperature in mešanjem zraka se dopoldne koncentracija radona zniža in običajno doseže najnižjo vrednost zgodaj popoldne.

### 2.5 Učinki radona in njegovih kratkoživih produktov na zdravje ljudi

Zaradi sorazmerno dolge razpolovne dobe, se v pljučih preobrazi le manjše število radonovih jeder. Vdihnemo in izdihnemo ga skupaj z zrakom in je kot tak zanemarljivo škodljiv. Zato je prispevek radona k celotni dozi zelo majhen (okrog 5 %). Drugače pa je z njegovi kratkoživimi produkti, ki jih vdihamo skupaj z aerosolnimi delci, ki se lahko deloma usedejo na stene naših dihalnih poti (Vaupotič J., 2012). Pri njihovih radioaktivnih preobrazbah se sprošča energija, ki se absorbira v tkivu pljuč in s tem poškoduje pljučne celice ter poveča možnost nastanka pljučnega raka. Največji učinek ima sevanje na stene bronhijev (Wilkening M., 1990). Najbolj nevarna sta  $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$ , ki pri preobrazbah sproščata  $\alpha$ -energijo 6,00 MeV oziroma 7,69 MeV (Nero, 1988; Kranrod C. in sod., 2009; ICRP-65, 1993). Njun učinek je največji, ko sta v nevezani obliki (Hofmann W., 1994).

Od vseh virov naravnega sevanja prejme človek v svetovnem povprečju letno efektivno dozo okrog 2,4 mSv in k temu prispevajo radon in RnDP okrog 60 % (UNESCAR, 2000). V Sloveniji je ta delež nižji, in sicer 0,88 mSv, oziroma 36,5 % (slika 3) (Koželj M. in sod., 2006). Radon in njegovi kratkoživi produkti so drugi najpomembnejši povzročitelji pljučnega raka, takoj za kajenjem cigaret (Darby S. in sod., 2005).





**Slika 3:** Delež obsevanosti prebivalstva v Sloveniji od posameznih vrst virov sevanj (Koželj M. in sod., 2006)

### 2.5.1 Dozimetrija radona in njegovih razpadnih produktov

Pri izpostavitvi radonu in RnDP ne moremo izmeriti doze, ki jo prejme pljučno tkivo in ostali deli telesa. Prav tako ne moremo izmeriti aktivnosti, ki jo z dihanjem zraka z določeno koncentracijo radona in RnDP vnesemo v telo. Z uporabo matematičnih modelov, ki slonijo na poznavanju fizikalnih (pretok zraka, depozicija aerosolov, radioaktivna preobrazba) in fizioloških (obnova celic, fagocitiranje) procesov v pljučih, pa lahko dozo izračunamo. Za izračun doz potrebujemo dozne pretvorbene faktorje (*DCF*), ki nam vdihano aktivnost ali vdihano energijo alfa pretvorijo v dozo. Vdihano aktivnost podajamo kot produkt, enakovreden ravnotežni koncentraciji RnDP ( $C_{RnDP}$ ) in času dihanja oziroma izpostavljenosti, torej v enotah  $Bq\ m^{-3}\ h$ . Dozni pretvorbni faktor (*DCF*) nam pove kakšno dozo (v nSv) dobimo na enoto izpostavljenosti ( $Bq\ m^{-3}\ h$ ), tako da zanj uporabljamo enoto  $nSv\ (Bq\ m^{-3}\ h)^{-1}$  (Smrkolj P., 2010).

V anglosaški literaturi se še vedno uporablja za  $C_{RnDP}$  stara zgodovinska enota 1 WL (working level), ki ustreza koncentraciji potencialne  $\alpha$ -energije  $1,28 \times 10^8\ MeV\ m^{-3}$ . Izpostavljenost se izraža kot WLM (working-level-month), ki jo dosežemo če 1 (delovni) mesec (170 ur) dihamo zrak s koncentracijo RnDP 1 WL. Tako se *DCF* izraža v enotah  $mSv\ WLM^{-1}$ . Podajamo pa ga lahko tudi v  $mSv\ (mJ\ m^{-3}\ h)^{-1}$  (Smrkolj P., 2010).

## 2.5.2 Dozni pretvorbeni faktor

Dozne pretvorbene faktorje dobimo po eni strani iz izsledkov epidemioloških raziskav, lahko pa jih tudi izračunamo z uporabo dozimetričnih modelov. Prve označujemo z  $DCF_E$ , druge pa z  $DCF_D$ .

### 2.5.2.1 Epidemiološki pristop

Ta pristop temelji na raziskavah radona in njegovih RnDP v rudnikih uranove, kositrne in železove rude. Raziskovali so vpliv izpostavljenosti radonu pri njegovih različnih koncentracijah v zraku na več kot 68000 rudarjih (od nekaj WLM pa do več kot 1000 WLM) (Stather J. W., 2004). Prav tako so opravili ogromno raziskav tudi na ljudeh, ki so preživeli bombni napad na Hirošimo na Japonskem ter na živalih v ZDA in v Franciji (Stather J. W., 2004). Izsledke so morali ekstrapolirati na nižje koncentracije, da so lahko ovrednotili izpostavljenost radonu in RnDP v bivalnem okolju.

Mednarodna komisija za zaščito pred sevanji (ICRP – International Commission on Radiological Protection) na osnovi rezultatov vseh do sedaj opravljenih epidemioloških raziskav priporoča vrednost  $DCF_E$  za izračun doz, in sicer  $5 \text{ mSv WLM}^{-1}$  za delovno okolje ter  $4 \text{ mSv WLM}^{-1}$  za bivalno okolje (ICRP-65, 1993).

**Preglednica 2:** Vrednosti doznega pretvorbenega faktorja ( $DCF$ ) po ICRP (ICRP-65, 1993) in UNSCEAR (UNSCEAR, 2000)

	ICRP		UNSCEAR	
	RnDP		Rn	RnDP
	dom	delovni prostor	dom in delovni prostor	dom in delovni prostor
<b>enota <math>DCF</math></b>				
$\text{mSv WLM}^{-1}$	<b>4</b>	<b>5</b>		
$\text{nSv (Bq m}^{-3} \text{ h)}^{-1}$			<b>0,17</b>	<b>9</b>
$\text{mSv (mJ m}^{-3} \text{ h)}^{-1}$	<b>1,1</b>	<b>1,4</b>		

V primeru, ko imamo na razpolago koncentracijo radona in ne koncentracije RnDP, je priporočljivo po ICRP-65 publikaciji (1993) uporabiti vrednost 0,40 za ravnotežni faktor  $F$ . To pomeni, da pomnožimo koncentracijo radona s to vrednostjo  $F$  in dobimo  $C_{\text{RnDP}}$ , potreben za izračun doze.

Poleg ICRP tudi druge organizacije izdajajo priporočila za dozne pretvorbene faktorje  $DCF_E$ , kot na primer: NAS (National Academy of Sciences), NRC (Nuclear Regulatory Commission), IAEA (International Atomic Energy Agency), WHO (World Health Organization), ILO (International Labour Organization), UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Po teh priporočilih tako države sprejemajo svoje vrednosti.

### 2.5.2.2 Dozimetrični pristop

Pristop sta razvila Brichall in James (1994) in pri tem uporabila novi model pljuč iz publikacije ICRP-66 (1994). Ta model obravnava pljuča kot sistem cevi, skozi katere se pretaka zrak skupaj z aerosoli. V odvisnosti od koncentracije aerosolov in velikostne porazdelitve delcev ter hitrosti dihanja, imamo na voljo nekaj matematičnih modelov, s katerimi lahko izračunamo posedanje RnDP v različnih vejah pljuč. V odvisnosti od velikostne razporeditve delcev, na katere so vezani RnDP, lahko izračunamo dozne

pretvorbene faktorje za vsakega od atomov RnDP. Pri tem moramo upoštevati difuzijo radionuklidov v tkivu, fagocitiranje ter doseg delcev  $\alpha$  v tkivu in njihovo energijo. Dokazano je, da k doznemu pretvorbenemu faktorju največ prispevajo nevezani atomi RnDP, med katerimi velja empirična zveza (Brichall A. in James A. C., 2003).

### 2.5.2.3 Izračun doz

Osnovna enačba za izračun efektivne doze ( $E_{\text{eff}}$ ) je: (Nero Jr. A. V., 1988; Vaupotič J. in sod., 2007):

$$E_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{RnDP}}}{3700} \times \frac{t}{170} \times DCF \quad (11)$$

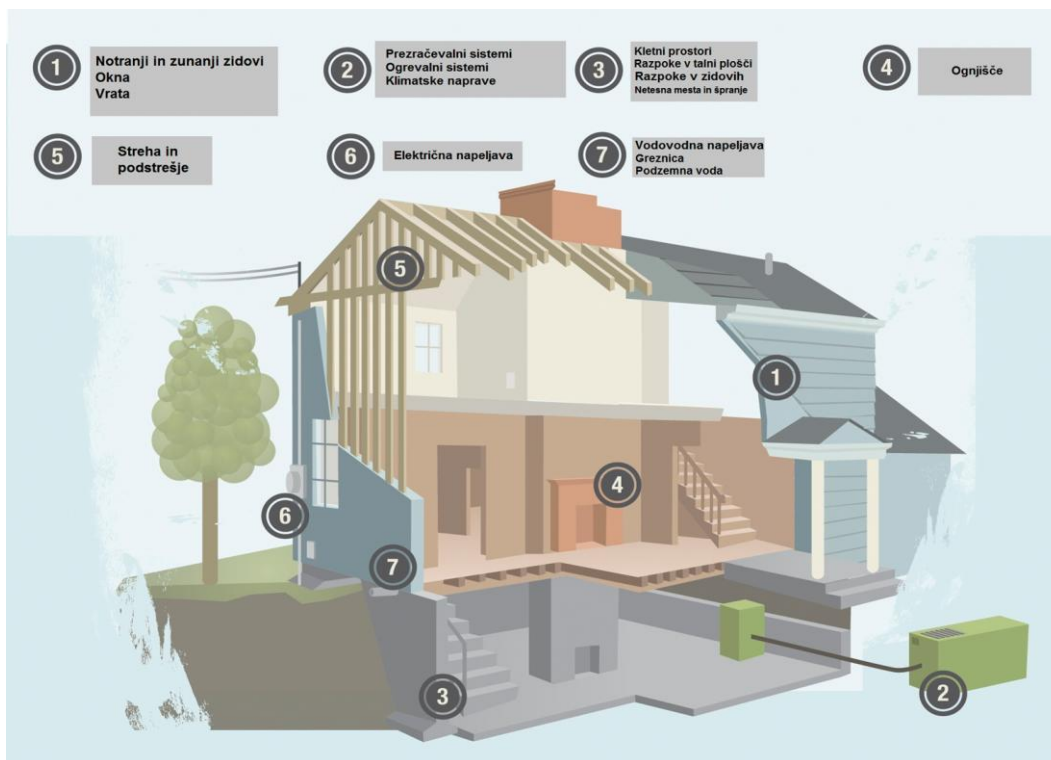
$C_{\text{RnDP}}$  delimo s 3700, da pretvorimo koncentracijo RnDP iz  $\text{Bq m}^{-3}$  v WL, in  $t$  (v h), ki je čas dihanja zraka s to koncentracijo, delimo s 170, da dobimo izpostavljenost v WLM (in ne v  $\text{Bq m}^{-3} \text{ h}$ ) in uporabimo  $DCF = 4 \text{ mSv WLM}^{-1}$ .

Kot bo razvidno iz opisa meritev, sem v svojem diplomskem delu merila koncentracijo radona, in ne koncentracije produktov. Zato sem pri izračunu doz v zgornji enačbi  $C_{\text{RnDP}}$  zamenjala z  $C_{\text{Rn}} \times F$ . Idealno bi sicer bilo izmeriti  $C_{\text{Rn}}$  v vsakem volumnu vdihanega zraka, izračunati  $E_{\text{eff}}$  za vsak vdih in potem sešteti tako dobljene delne vrednosti  $E_{\text{eff}}$ , da bi dobili celotno  $E_{\text{eff}}$  za neko obdobje. To je nerealno. V mojem primeru je bila pogostost meritve radona enkrat na uro, tako da dobim povprečno vrednost  $C_{\text{Rn}}$  v 1 h, kar je lahko tudi najkrajši čas v zgornji enačbi. Iz svojih podatkov sem tako lahko računala različna povprečja  $C_{\text{Rn}}$ , kot na primer: samo ponoči ali čez dan, za en teden ali en mesec itd. Na podlagi tega sem ugotavljala, kako se doze spreminjajo s časom (urami dneva, dnevi v tednu ali letnimi časi) in kako so odvisne od prezračevalnih navad stanovalcev ter zunanje temperature in zračnega tlaka.

## 2.6 Vstop radona iz zemljišča v bivalni prostor

Kadar postavimo hišo neposredno v zemljišče ali na zemljišče, je za bivalne prostore največji potencialni izvor radona zemljišče (slika 4). Med ploščo in zemljiščem pod njo, se ustvari podtlak zaradi razlike temperatur v zgradbi in v zemljišču. Ta povzroči vlek zraka iz zemljišča v notranjost zgradbe (Nazaroff W. W. in sod., 1988). Ker je koncentracija radona v plinu v zemljišču od nekaj  $10^3 \text{ Bq m}^{-3}$  do nekaj  $10^6 \text{ Bq m}^{-3}$ , je dovolj že majhna špranja ali odprtina v tleh (zaradi odtokov) ali slabo tesnjen stik med osnovno betonsko ploščo in zidovi, ki so v stiku z zemljiščem, da vstop z radonom bogatega zraka iz zemljišča, poviša koncentracijo v zraku v prostoru preko zaželeno ravni.

Na vstop radona v zgradbo vpliva tudi veter. Na privetni strani zgradbe se ustvari nadtlak, ki stisne zunanji zrak v tla in mu s tem zmanjša vstop v kletni prostor stavbe. Podtlak na zavetrni strani pa povzroča izhajanje zraka iz hiše in s tem pospešuje njegovo zamenjavo z zrakom iz tal. Z ogrevanjem stavbe postaja zrak v prostorih toplejši in s tem redkejši od talnega zraka, kar pospešuje vstop zraka iz zemljišča v kletne prostore. Zaradi dežja je zemljišče ob stavbi bolj mokro, in zato manj propustno, kot zemljišče pod stavbo. Zaradi oviranega izhajanja radona iz zemljišča ob stavbi se poveča izhajanje iz zemljišča v stavbo in s tem poveča koncentracija radona v kletnih prostorih (Nazaroff W. W. in sod., 1988). Podoben učinek bi opazili, če bi bilo zemljišče ob stavbi poplavljen ali pokrito s snegom.



**Slika 4:** Možne poti vstopa radona v bivalni prostor oziroma hišo (povzeto po internetnem viru)

## 2.7 Radon v bivalnem okolju

Iz vsega zgoraj povedanega lahko povzamemo, da je koncentracija radona v zraku bivalnih prostorov odvisna od geološke sestave tal (vsebnosti urana v kamninah in zemljini), geološke strukture tal (prepustnosti in poroznosti tal), potresne aktivnosti, bližine tektonskih prelomov ter od hidroloških in meteoroloških parametrov (temperature zemlje in zraka, vlage, zračnega tlaka in padavin) (UNSCEAR, 2000; Vaupotič J., 1995). Če je v zemljini visoka koncentracija radija, lahko pričakujemo tudi visoke koncentracije radona (Thomas J. in sod., 1992).

Raziskave v Sloveniji so pokazale (Popit A. in Vaupotič J., 2002), da so najvišje koncentracije (nad  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ ) v zraku bivalnih prostorov v zgradbah, ki stojijo na kraških tleh. Na ledeniških sedimentih, laporju in različnih klastičnih sedimentnih kamninah, kot so breča, skrilavec, peščenjak, konglomerat in glinavec, so bile vrednosti med  $600$  in  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ . Vrednosti med  $400$  in  $600 \text{ Bq m}^{-3}$  pa so bile na kremenovem peščenjaku, flišu in glinavcu.

Izmenjava zunanjega zraka z zrakom v zgradbi poteka skozi različna mesta, kot so: odprta vrata in okna, zračniki, dimniki ter mehanično prezračevanje (UNSCEAR, 2000). Radon lahko v zgradbo prehaja tudi skozi različna netesna mesta v zgradbi (slabo tesnjenih oken, odprtine okoli odtokov, pip ali sifonov), skozi luknje in votline znotraj zidov ali skozi reže in odprtine v dvignjenih nadstropjih (Vaupotič J. in Kobal I., 2012).

Med glavne izvore radona v bivalnem okolju prištevamo zemljišče pod stavbo, lahko pa tudi gradbeni material, vodo in naravni plin ter kakovost gradnje. Kadar imajo gradbeni materiali visoko vsebnost radija, lahko predstavljajo pomembni vir radona v bivalnem okolju. Tak primer je opeka iz elektrofiltrskega pepela z vsebnostjo radija od  $180 \text{ Bq}$

$\text{kg}^{-1}$  do  $1100 \text{ Bq kg}^{-1}$  (EC, 2005). Prispevek od uporabe vode in naravnega plina h koncentraciji radona v notranjem zraku je običajno zanemarljiv (Vaupotič J., 1995).

V okviru nacionalnih programov so mnoge države izvedle ali pa še izvajajo obširne ter sistematične meritve koncentracij radona v bivalnih prostorih in na delovnih mestih. Na splošno velja, da so koncentracije v bivalnih prostorih bistveno višje (od 2 do 10 krat višje) kot v zunanjem zraku. Svetovna povprečna letna koncentracija radona v notranjem zraku je  $40 \text{ Bq m}^{-3}$  (UNSCEAR, 2000).

V zraku bivalnega okolja se koncentracija radona spreminja dnevno in z letnimi časi. V splošnem so koncentracije radona najvišje proti jutru in najnižje popoldne ter najvišje pozimi in najnižje poleti (Denman A. R., Groves-Kirkby N. P., 2007; Vaupotič J. in Kobal I., 2006). V našem podnebjju sta koncentraciji radona jeseni in spomladi podobni. Največje razlike (tudi do 50 %) so med zimo (ko so najvišje) in poletjem (Vaupotič J. in Kobal I., 2006). Pomembno vlogo pri tem imajo temperaturna razlika med zemljiščem pod stavbo in v stavbi, zračni tlak (predvsem njegov časovni gradient) ter jakost in smer vetra (Miles J. C., 2001). S svojimi bivalnimi navadami, ki se razlikujejo z letnimi časi, prav tako pomembno vplivamo na koncentracijo radona v bivalnem prostoru. Tu je najpomembnejše gretje (ki se glede na podnebje razlikuje od pokrajine do pokrajine) ter način in pogostost prezračevanja (odpiranje oken in vrat, prezračevalni jaški, ventilatorji, klimatske naprave).

## **2.8 Geologija območja, na katerem stoji obravnavana hiša**

Na koncentracijo radona vplivajo geološki, pedološki in klimatski dejavniki. Skozi daljše časovno obdobje ostajata geologija in pedologija bolj ali manj konstantni, medtem ko se klimatski dejavniki spreminjajo dnevno in sezonsko. Da sem lahko ovrednotila rezultate meritev, sem morali dobro poznati lokalno geologijo in klimo.

V jugozahodnem delu Slovenije se nahaja Košanska dolina s površino približno  $30 \text{ km}^2$ , ki na zahodu sega do Zgornje Pivke ter na severu do doline Reke. Obravnavano območje se na severu razprostira do Vremščice (1027 m) proti Osojnici (820 m) in je večinoma nenaseljeno. Površje ima kraške reliefne značilnosti, najbolj izstopajoče so vrtače, ograjene s suhimi zidovi. Površinskih tekočih voda v tem delu Košanske doline ne najdemo. Obravnavana kraška vas leži na skrajnem severnem robu Košanske doline na najvišjem predelu celotne doline. Južni del doline ima zaradi prekritosti kamnin s flišnimi sedimenti manj izražene kraške značilnosti kot severni del (Dolgan M., 2006).

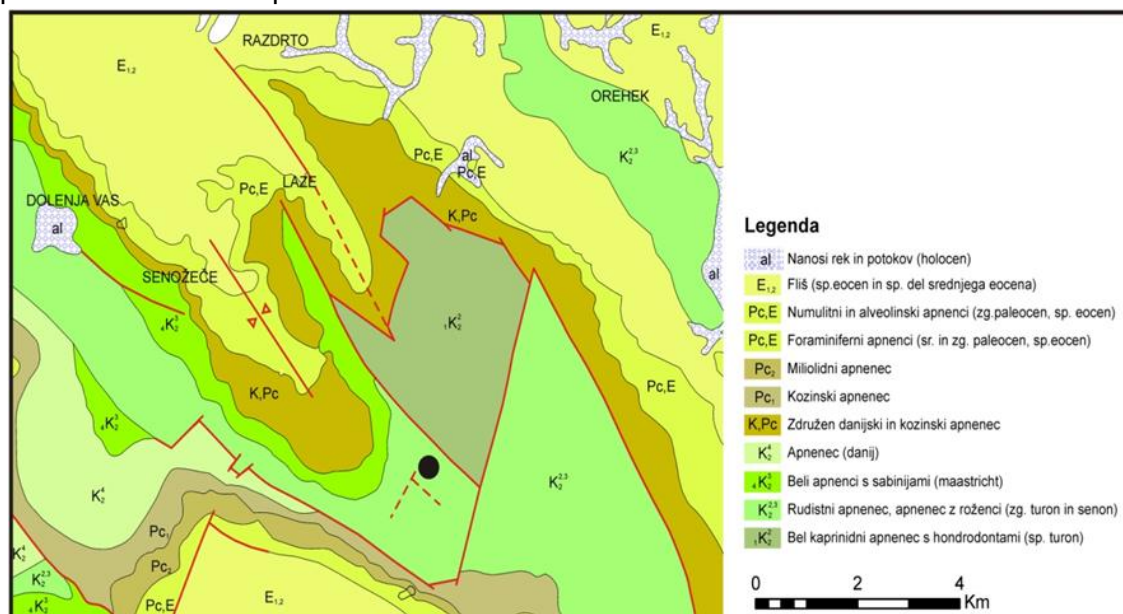
Severni del Košanske doline je precej zakrasel, medtem ko je južni del bolj flišni. Pokrajina Vremščica predstavlja nekakšno reliefno pregrado, ki deloma omili učinke sredozemskih zračnih gmot na poti proti notranjosti in ima tako pravzaprav številne lastnosti sredozemskega sveta (Perko D. in Orožen Adamič M., 1998).

### 2.8.1. Kras

Kras je posebna oblika dela zemeljske skorje, površja in podzemlja. Razvije se na trdnih, vendar zelo razpokanih karbonatnih kamninah, katere sestavljajo pretežno apnenci in dolomiti. Ob stiku z vodo se začno karbonatne kamnine raztapljati, tako voda ne odteka le na površju, ampak tudi prenika v podzemlje. Z raztapljanjem kamnin prihaja do širjenja razpok in podzemnih rogov, to pa privede do nastanka kraških jam in brezen. Apnenci in dolomiti, ki jih najdemo večinoma na Krasu, so nastali iz krednih in terciarnih karbonatnih usedlin plitvih toplih obkontinentalnih morij. Najstarejše kamnine, apnenci in dolomiti iz zgornje krede, pa so zastopane južno od Divaškega preloma – na severozahodnem delu Krasa (Obu K., 2010).

### 2.8.2 Geološka zgradba in značilnosti kamnin

Na severnem območju Košanske doline, kjer sem izvedla meritve koncentracije radona, lahko zasledimo narinjene paleocenske in zgornjekredne apnence (Slika 5). V podlagi krovnih flišnih plasti eocene starosti pa so ti apnenci razgaljeni med Narinom in obravnavano kraško vasjo. Na površju okrog Kala najdemo najstarejše kamnine, imenovane zgornjekredni rudistni apnenci oziroma apnenci z roženci, natančneje iz obdobja zgornjega turona in senona. V bližini merilnega mesta, ki je označeno s črno piko, se nahaja prikriti prelom (rdečkaste črte), ki je bil ugotovljen, vendar prelomnici po površini ni mogoče povsem slediti. Območje spada med zelo zakrasela območja, kar pomeni, da je to območje za emanacijo, migracijo in ekshalacijo radona zelo ugodno, prav tako tudi zaradi preloma.



**Slika 5:** Prikaz geološke zgradbe in značilnosti kamnin na območju merilnega mesta, ki je označen s črno piko (Osnovna Geološka karta Slovenije, list Postojna)

V pretežnem delu ozemlja so prisotne prepustne zakrasele kamnine, v katerih so padavine in kraška podzemna voda oblikovale značilne kraške pojave tako na površju kot tudi v podzemlju. V zgornjekrednem apnencu je razvidno škrapljasto površje s številnimi vrtačami (Pleničar M., 1999; Trajkov S., 2013). Severno od Neverk najdemo zakrasele, skladnate, zelo razpokane in prelomljene apnence. Na tem delu Košanske doline prevladuje tudi kraško brezvodno površje z vrtačami in jamami ter drugimi

korozijskimi oblikami, hitro vertikalno prenikanje padavin po razpokah in prelomih do globoke podtalnice. Razvita je podzemeljska vodna mreža. Narivni pokrov sestavljajo zgornjekredni apnenci in inverzni paleocenski apnenci, medtem ko je veliko rudistnih apnencev v krovlini. Karbonatne kamnine so razpokane in prelomljene, razpoke pa so prečne in vzdolžne ter se na gosto prepredajo. Večji vzdolžni prelom se nahaja v predelu Ravenskega hriba ter med Kalom in Neverkami. Prečni prelomi pa so ugotovljeni pri Stari Sušici in Mali Pristavi na podlagi morfoloških znakov, ki nepravilno potekajo med numulitnimi apnenci in flišem. Ker so ravninski predeli slabo razgaljeni, je ugotovljenih posamičnih prelomov zelo malo, dejansko pa naj bi jih bilo mnogo več. Košanska dolina leži ob pomembnem neotektonskem prelomu, ob katerem lahko najdemo še vrsto spremljajočih prelomov, ki se lahko cepijo ter spajajo ali pa potekajo vzporedno z njim, kot nakazujejo strukturnice (Habič P., 1984). V severnem, reliefno višjem in nenaseljenem delu Košanske doline, je več kraških jam in brezen. To območje ostane zaradi tega suho tudi po obilnem dežju. Zelo verjetno je, da zaradi značilne reliefne oblikovanosti severnega območja Košanske doline, obstaja podzemna povezava med breznom Stanovica in Gabranca. Stanovica bi naj bila brezno, na višji nadmorski višini, saj iz njega nikoli ne priteče voda, kar si je mogoče razlagati tako, da voda po obilnih padavinah podzemno odteka k nižje ležečemu breznu Gabranca (Trajkov S., 2013).

### 2.8.3 Odvisnost koncentracije radona v bivalnem prostoru od litološke zgradbe zemljišča

Povezava med koncentracijo radona v talnem zraku in koncentracijo radona v bivalnih prostorih obstaja, čeprav na emanacijo, migracijo in ekshalacijo radona vplivajo številni dejavniki (Vaupotič J. in sod., 2012). Pričakujemo lahko, da bo koncentracija radona v bivalnem okolju višja v stavbah, ki stojijo na zemljišču z visoko koncentracijo radona v talnem zraku. Radonski potencial podajamo s koncentracijo radona v talnem zraku in s propustnostjo zemljišča. Pri novogradnjah in sanacijah že obstoječih stavb, pa je le tega koristno upoštevati. V Nemčiji so predlagali razrede ogroženosti zaradi radona, glede na koncentracijo radona v talnem zraku (Kemski J. in sod., 2001), in sicer:

- nizka ogroženost pri  $<10 \text{ kBq m}^{-3}$ ,
- srednja ogroženost pri  $10\text{--}100 \text{ kBq m}^{-3}$ ,
- povišana ogroženost pri  $100\text{--}500 \text{ kBq m}^{-3}$  ter
- visoka ogroženost pri  $>500 \text{ kBq m}^{-3}$ .

S pomočjo te lestvice so izdelali zemljevid radonskega potenciala za Nemčijo, s katerim so prikazali grobo oceno ogroženosti tal (Menzler S. in sod., 2006). Za zanesljivo oceno pa je seveda potrebna meritev na izbranem zemljišču.

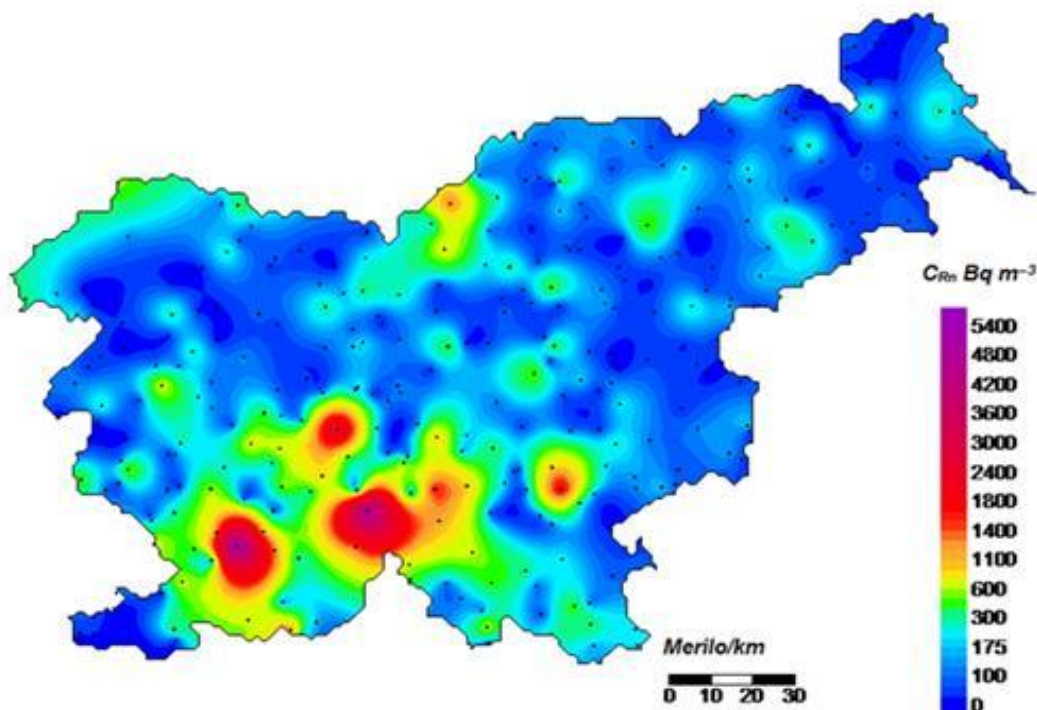
Na osnovi nemške kategorizacije zemljišč so naredili zelo grobo oceno tudi za Slovenijo, ki temelji le na 72 merilnih točkah, in dobili: 8 merilnih točk (11 %) na zemljiščih z nizko ogroženostjo, nadaljnjih 48 merilnih točk (67 %) na zemljiščih s srednjo ogroženostjo ter 16 merilnih točk (22 %) na zemljiščih s povišano ogroženostjo. Zemljišč z visoko ogroženostjo v svoji študiji niso našli (Vaupotič J. in sod., 2007).



## 2.9 Dosedanje raziskave radona v Sloveniji

Leta 1990 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 zemljini (Vaupotič J., 2003). V obdobju med leti 1990 in 1994, so v raziskave najprej zajeli 730 vrtcev in 890 šol, nato še 1000 naključno izbranih domov. Z raziskavo so hoteli prikazati problem radona in spremenljivost njegove koncentracije v Sloveniji. Kasneje so izmerili koncentracijo radona še v drugih delovnih okoljih, in sicer v bolnišnicah, vodnih zajetjih, toplicah, vinskih kletih ter turistično zanimivih jamah, s poudarkom na Postojnski jami (Vaupotič J., 2010), ter različnih javnih zgradbah (Vaupotič J., 2003). Na 120 različnih točkah po celotni Sloveniji, so v zadnji stopnji raziskave, izmerili koncentracijo radona v talnem zraku (Vaupotič J. in sod., 2006) in na nekaterih istih točkah tudi v zunanjem zraku (Vaupotič J. in sod., 2010). Na osnovi dobljenih rezultatov so izdelali zemljevide radona v zraku šol, vrtcev in domov ter v talnem in zunanjem zraku. V Evropski radonski atlas, ki ga zadnjih nekaj let pripravlja Joint Research Center pri Evropski komisiji (EC, 2012), so vključili podatke za domove. Da bi izboljšali podatke za Slovenijo, so v letih od 2011 do 2013 izmerili koncentracijo radona še v 400 domovih (Vaupotič J. in sod., 2013). V 50 domovih je koncentracija radona presegla  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ . V večini evropskih držav (WHO, 2009) in prav tako tudi v Sloveniji (ULRS, 2004), je mejna vrednost za koncentracijo radona v domovih  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Za svoje diplomsko delo sem izbrala eno od hiš, kjer so v raziskavi radona v 400 domovih izmerili povprečno koncentracijo radona višjo od  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$  (Vaupotič J. in sod., 2013; Leban M., 2013).



**Slika 6:** Prostorska porazdelitev povprečnih celoletnih koncentracij radona v 400 domovih (povzeto po Leban M., 2013)



### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1 Meritve radona

Meritve koncentracije radona sem izvajala z merilniki Radon Scout (Sarad, Nemčija) (slika 7). Zrak vstopa z difuzijo skozi odprtine na sprednji plošči, gre skozi filter in dalje v celico s polprevodniškim detektorjem. Zaradi napetost 50 V med detektorjem in ohišjem, se pozitivni ioni  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  in  $^{214}\text{Po}$ , ki nastajajo v celici kot rezultat  $\alpha$ -preobrazbe  $^{222}\text{Rn}$ , deponirajo na detektorju. Zaradi počasnega procesa difuzije je koncentracija torona v celici in s tem tudi njegovih produktov zanemarljiva. Kot rezultat  $\alpha$ -spektrometrije nam merilnik poda koncentracijo aktivnosti radona. Frekvenco meritve lahko poljubno nastavimo. Merilno območje za radon je od  $50 \text{ Bq m}^{-3}$  do  $1 \text{ MBq m}^{-3}$  (Sarad, 2003). Merilnik beleži tudi temperaturo in relativno vlažnost zraka. Izmerjene podatke prikaže na koncu vsake meritve na zaslonu in jih shrani v svoj pomnilnik.

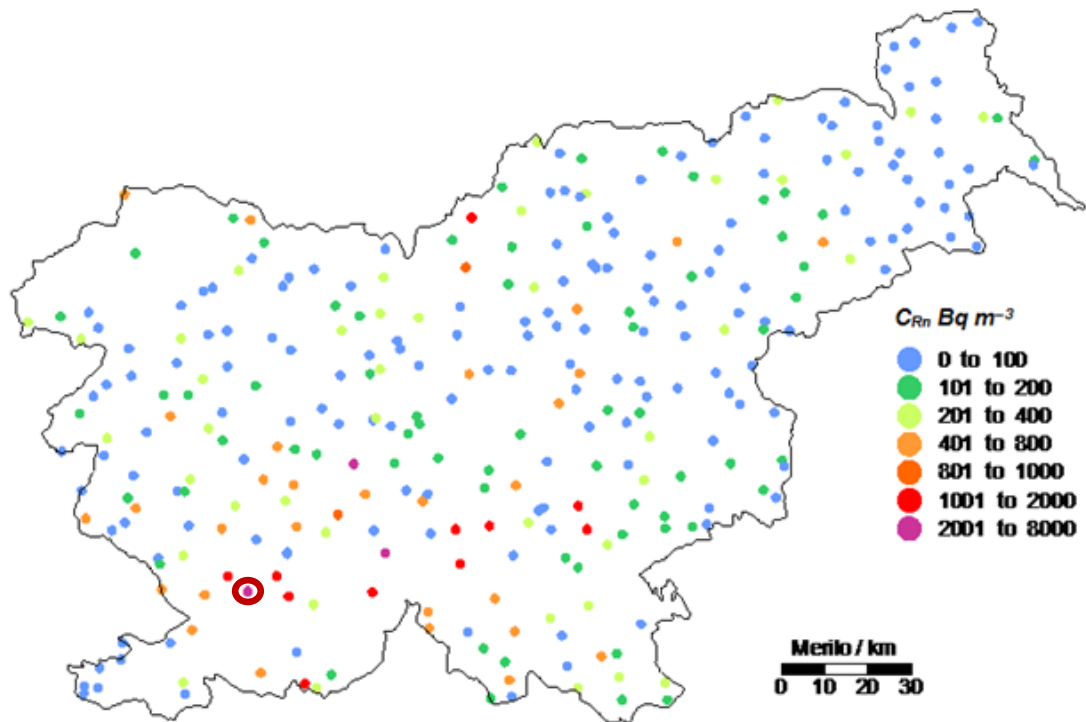


*Slika 7: Merilnik Radon Scout*

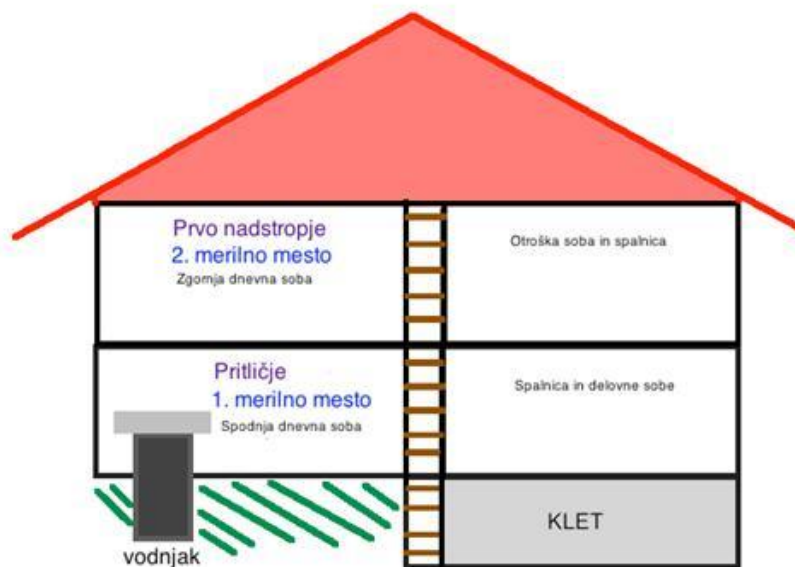
#### 3.2 Izvedba meritev

##### 3.2.1 Opis hiše in dveh merilnih mest

Stanovanjsko hišo smo izbrali na osnovi visoke koncentracije radona (slika 8) v raziskavi 400 domov (Leban M., 2013). Hiša je bila izgrajena okrog leta 1957 in obnovljena po letu 2000 (slika 9). V hiši živi upokojen zakonski par, ki ga ob koncih tedna obiščeta otroka s svojimi vnuki. Vhod v hišo je z zahodne strani, pred katerim je vrt z nasadom različnih okrasnih in sadnih dreves. Na severozahodnem delu hiše je vodnjak, iz katerega so v preteklosti črpali pitno vodo. Prvo merilno mesto je bilo v nepodkleteni dnevni sobi na severozahodnem delu hiše. Drugo pa v dnevni sobi v prvem nadstropju, prav tako na severozahodnem delu hiše. Merilni mesti smo izbrali glede na nadstropje merjenja in uporabe obeh dnevnih sob, saj se ena od teh skoraj nikoli ni uporabljala. Zakonca večino dneva preživita v spodnji dnevni sobi v pritličju. Zgornje dnevne sobe skoraj ne uporabljata in sta v času naše meritve le redko vstopala vanjo. Pritličje jugozahodnega in jugovzhodnega dela je podkleteno in nad njim je spalnica zakoncev, otroške sobe in delovni prostori.



**Slika 8:** Izbira merilnega mesta (rdeči krog) glede na povprečno letno koncentracijo radona (povzeto po Leban M., 2013)



**Slika 9:** Skica obravnavane hiše ter razporeditev prostorov in nadstropje merjenja

### 3.2.2 Potek meritev

Meritve radona v izbrani hiši so potekale eno leto, in sicer od 9. januarja 2013 do 1. januarja 2014. Frekvenco na merilniku sem nastavila enkrat na uro. Po določenem času (krajšem od 28 dni), sem podatke prenašala na prenosni računalnik in jih uporabila za nadaljnjo obdelavo. Tako sem pridobila dolge časovne vrste koncentracije radona ter temperature in relativne vlažnosti zraka v obeh dnevni sobah. Vrste nam kažejo spremembe po dnevih, mesecih in letnih časih. Podatke o zunanjem tlaku in zunanji temperaturi na najbližji meteorološki postaji Škocjan, sem si priskrbel od Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). Relativno vlažnost zraka v diplomskem delu nisem obravnavala.

### 3.2.3 Obdelava podatkov

Podatke sem prenesla iz merilnikov na prenosni računalnik in jih shranila v programu MS Excel. Vsak mesec, po preteku 28 dni, sem nove podatke dodajala v skupni dokument, kjer sem jih nato statistično obdelovala. Program MS Excel sem uporabila tudi za izračune različnih povprečij koncentracije radona in za izračune učinkovitih (sevalnih) doz. Prav tako sem v programu MS Excel vse podatke grafično obdelala in izračunala korelacijske koeficiente. Slike in grafe sem nato še dodatno obdelala v programu MS Publisher.

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

V tem poglavju najprej podajam koncentracije radona, izmerjene s kontinuirnima merilnikoma v zraku obeh dnevni sob, v pritličju in prvem nadstropju, skupaj s temperaturo in tlakom zunanjega zraka, za celotno obdobje meritve. Temu sledi izbor mesečnih povprečnih koncentracij radona v odvisnosti od zunanje temperature in tlaka. Nato podajam povprečno mesečno, trimesečno, polletno in letno koncentracijo radona ter bivalno (realno) koncentracijo radona samo za čas, ki bi ga stanovalca dnevno preživela v dnevni sobi v pritličju ali v dnevni sobi v nadstropju. V zadnjem delu podajam efektivno (sevalno) dozo, ki bi jo stanovalca prejela v dnevni sobi v pritličju ali prvem nadstropju. Poleg ovrednotenja vpliva zunanje temperature in tlaka na koncentracijo radona, sem v nalogi želela preveriti, koliko se med seboj razlikujejo efektivne doze izračunane na osnovi različnih koncentracij radona, ki izhajajo iz iste podatkovne baze.

### 4.1 Koncentracije radona

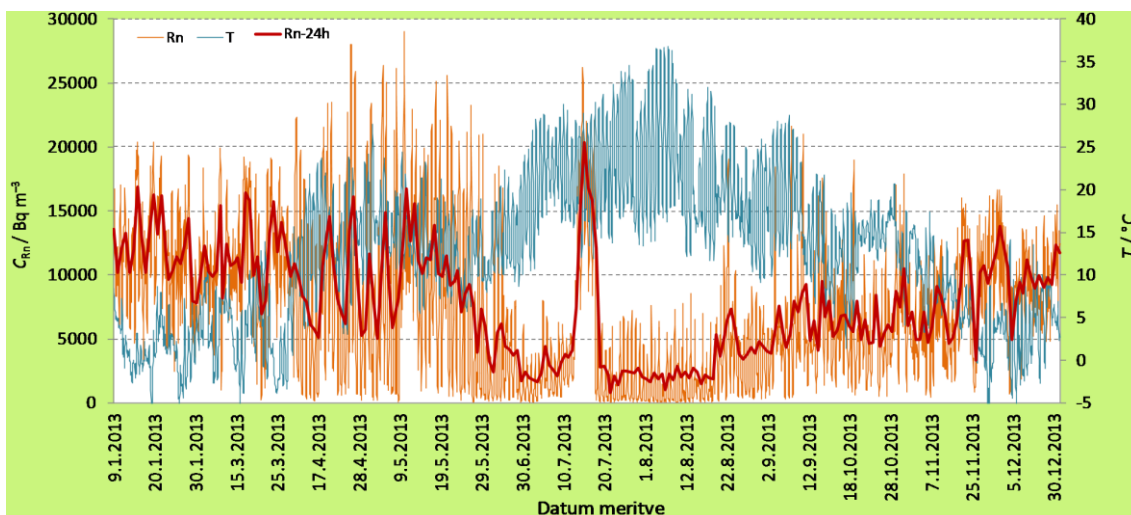
Iz kontinuirnih meritev sem dobila koncentracije radona enkrat na uro. V nadaljevanju prikazujem časovne vrste koncentracij radona in temperature ter zračnega tlaka. Razpravljam tudi o soodvisnosti med izmerjenimi količinami.

#### 4.1.1 Izmerjena koncentracija radona

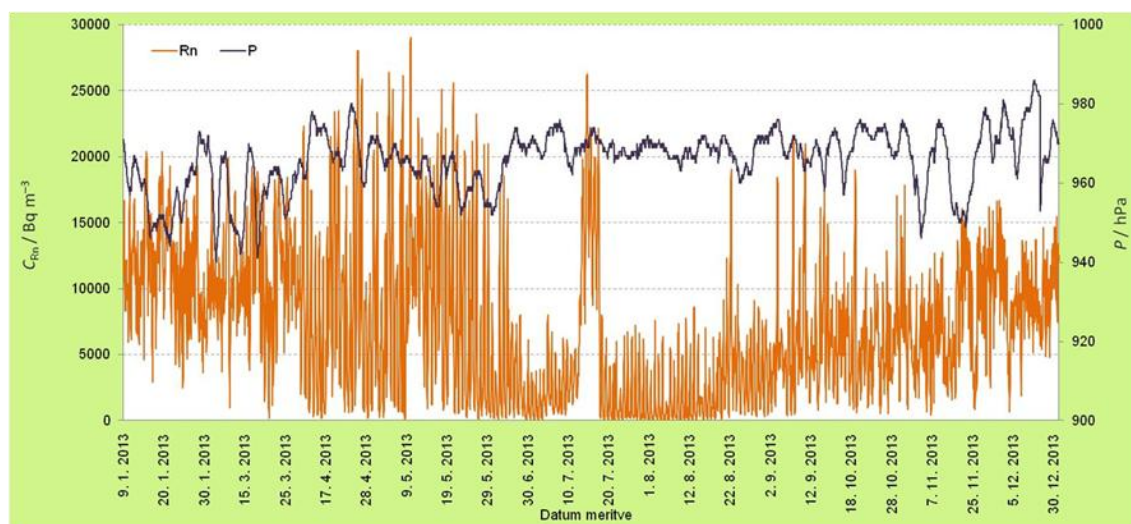
##### 4.1.1.1 Dnevna soba v pritličju

Časovni potek urnih in 24-urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zraka zunaj, je prikazan na sliki 10. Povprečna letna koncentracija radona je bila  $7162 \text{ Bq m}^{-3}$ , najvišja urna koncentracija pa je bila izmerjena v začetku maja, in sicer  $29040 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Vidimo, da je prišlo do kopičenja radona v dnevni sobi v pritličju takrat, ko ni bilo pretoka zraka oziroma prezračevanja (slika 10). V sredini julija so bili stanovalci na dopustu in tako je lepo razvidno, kako naj bi prezračevanje prostora ne glede na zunanjo temperaturo vplivalo na koncentracijo radona. Vidimo lahko, da je prišlo do povišanja koncentracije radona, ko se prostori niso prezračevali. V jesenskem času opazimo postopno zniževanje temperature ter postopno zviševanje koncentracije radona. Ko je prišlo do stabilnosti atmosfere, brez večjih temperaturnih nihanj, lahko na sliki 10 opazimo tudi povišanje koncentracije radona. V pomladanskem času so bile koncentracije radona v zgodnjih jutranjih urah višje kot pozimi, proti večeru pa so se izrazito znižale. Ta trend je najbolj opazen takrat, ko sta dnevni minimum in maksimum zunanje temperature v območju od  $10$  do  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pri več ali manj stalni temperaturi v prostoru, prihaja ponoči do vdiranja talnega, z radonom bogatega zraka v prostor. Rezultat tega je izrazit porast koncentracije ponoči, ki mu sledi izrazito znižanje koncentracije podnevi. Predvidevam, da se to nenavadno prezračevanje dnevne sobe pojavlja zaradi dotoka zraka iz razpoke, rova ali skrite podzemne jame.



**Slika 10:** Časovni potek urnih in 24-urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanega zraka v letu 2013

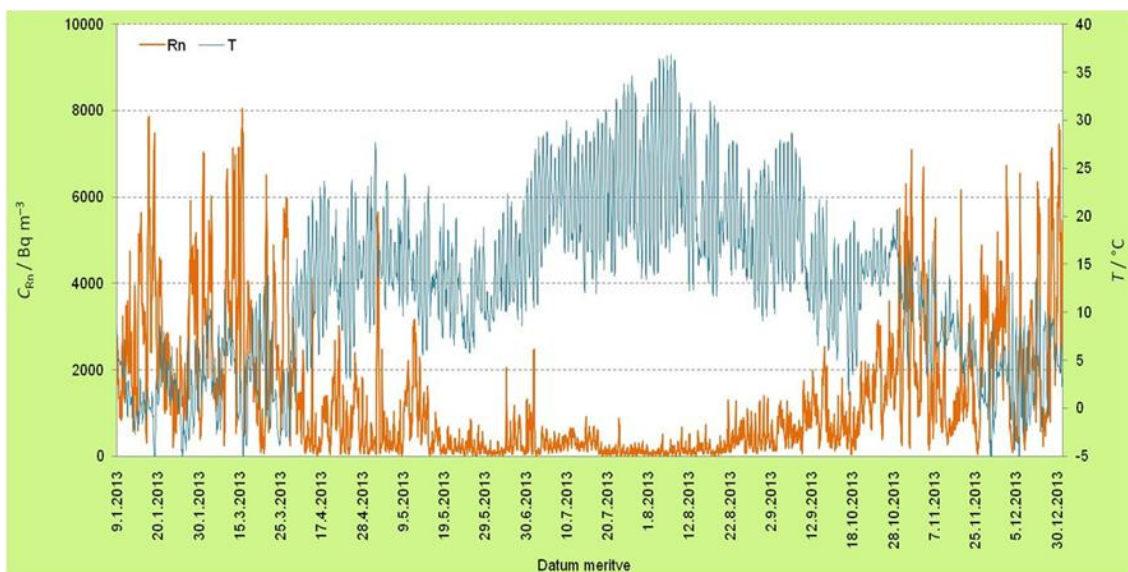


**Slika 11:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanega zračnega tlaka v letu 2013

Kot vidimo na sliki 11, se je zračni tlak zunaj spreminjal v razponu od 941 hPa do 986 hPa. V začetku februarja se je naglo znižal in pri tem je ostala koncentracija radona znižana. Ko se je spet zvišal, pa se je zvišala tudi koncentracija radona. Naglo povišanje tlaka se je pojavilo po obdobju z nizkim tlakom in takrat so tudi povišane koncentracije radona.

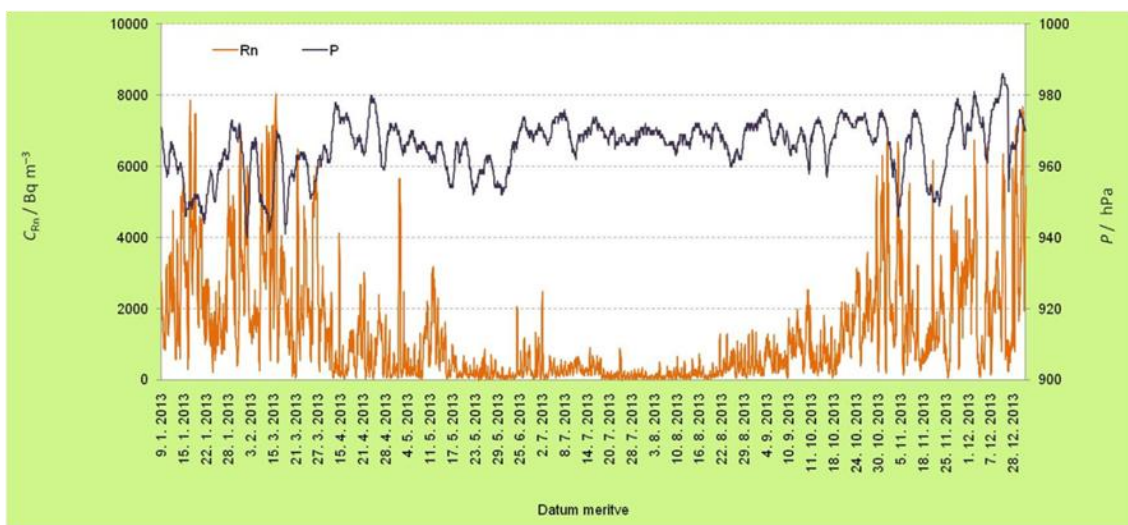
#### 4.1.1.2 Dnevna soba v prvem nadstropju

Na sliki 12 vidimo, kako je raven koncentracije radona odvisna od nadstropja, v katerem je soba. V prvem nadstropju je bila povprečna letna koncentracija radona manjša ( $1289 \text{ Bq m}^{-3}$ ) kot v pritličju ( $7162 \text{ Bq m}^{-3}$ ), sam vzorec časovnega poteka pa je bil v obeh primerih podoben. Vidimo tudi, da med odsotnostjo stanovalcev v juliju ni prišlo do bistvenega povišanja koncentracije. V začetku pomladi se je koncentracija radona začela zmanjševati, a se je ponovno dvignila konec aprila, podobno kot tudi v dnevni sobi v pritličju. Tako kot v pritličju, tudi tu vidimo dnevna periodična nihanja.



**Slika 12:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in temperature zunanjega zraka v letu 2013

Na sliki 13 je časovni potek koncentracije radona in zunanjega tlaka, soodvisnost je podobna kot v dnevni sobi v pritličju.



**Slika 13:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in zunanjega zračnega tlaka v letu 2013

## 4.2 Soodvisnost med izmerjeno koncentracijo radona in zunanjo temperaturo ter zunanjim tlakom

V raziskavi sem želela ovrednotiti odvisnost koncentracije radona od temperature in tlaka zunanjega zraka. Najprej predstavim korelacijske koeficiente za korelacije med koncentracijo radona ter temperaturo in tlakom zunanjega zraka. Nato pa za izbrane mesece, kot predstavnike zimskega, spomladanskega, poletnega in jesenskega časa pokažem časovne poteke vseh treh obravnavanih količin. Za poletje sem izbrala julij, da bi ugotovila vpliv odsotnosti stanovalcev. V nadaljevanju sledi opis grafov ter izračun korelacijskih koeficientov.

### 4.2.1 Korelacijski koeficienti

Na preglednici 3 so prikazani korelacijski koeficienti za korelacije med koncentracijo radona ( $C_{Rn}$ ) v dnevni sobi v pritličju ter temperaturo ( $T$ ) in tlakom ( $P$ ) zunanjega zraka. Glede na število meritev, ki je različno (nekaj krajših obdobj meritev nam manjka) za vsak mesec čez vse leto, so prikazane izračunane korelacije za izbrana parametra. Vidimo, da je bila korelacija med  $C_{Rn}$  in  $T$  negativna, razen januarja in februarja. Visoko negativno korelacijo ( $r = -0,56$ ) med  $C_{Rn}$  in  $T$  sem dobila novembra, najslabšo negativno ( $r = -0,13$ ) pa julija. Med  $C_{Rn}$  in  $P$  sem dobila enako število pozitivnih in negativnih korelacij. Pri negativnih je bila najboljša v mesecu oktobru ( $r = -0,47$ ) in najslabša avgusta ( $r = -0,02$ ). Pri pozitivnih pa je bila najboljša julija ( $r = 0,25$ ) in najslabša marca ter novembra ( $r = 0,03$ ).

Na preglednici 4 so prikazani korelacijski koeficienti za korelacije med koncentracijo radona ( $C_{Rn}$ ) v dnevni sobi v prvem nadstropju ter temperaturo ( $T$ ) in tlakom ( $P$ ) zunanjega zraka. Glede na nadstropje merjenja sem praviloma izvedla enako število meritev. Med  $C_{Rn}$  in  $T$  je bilo 7 negativnih in 5 pozitivnih korelacij, medtem ko je bilo za korelacijo med  $C_{Rn}$  in  $P$  število negativnih in pozitivnih enako. Pri negativnih korelacijah med  $C_{Rn}$  in  $T$  je bila najboljša avgusta ( $r = -0,30$ ) in najslabša novembra ( $r = -0,07$ ). Med pozitivnimi korelacijami med  $C_{Rn}$  in  $T$  je bila sicer najboljša februarja ( $r = 0,41$ ), a ker je bilo število meritev samo 122, sem kot mesec za nadaljnjo obravnavo izbrala oktober z malo slabšo korelacijo ( $r = 0,33$ ), a s številom meritev 488. Najslabša pozitivna korelacija je bila maja ( $r = 0,16$ ). Med negativnimi korelacijami med  $C_{Rn}$  in  $P$  je bila najslabša januarja ( $r = -0,05$ ) in najboljša februarja ( $r = -0,63$ ), a ker je bilo število ponovno le 122, sem kot mesec za nadaljnjo obravnavo izbrala september z malo slabšo negativno korelacijo ( $r = -0,52$ ), a s številom meritev 371. Med pozitivnimi korelacijami je bila najslabša novembra ( $r = 0,05$ ) in najboljša junija ( $r = 0,34$ ).



**Preglednica 3:** Koeficient korelacije ( $r$ ) za korelacije med koncentracijo radona ( $C_{Rn}$ ) v zraku dnevne sobe v pritličju in temperaturo ( $T$ ) ter tlakom ( $P$ ) zunanjega zraka po mesecih

dnevna soba v pritličju			
mesec	število meritev $N$	koeficient korelacije $r$ med $C_{Rn}$ in $T$	koeficient korelacije $r$ med $C_{Rn}$ in $P$
januar	557	0,03	-0,27
februar	122	0,13	0,15
marec	405	-0,35	0,03
april	501	-0,49	-0,13
maj	732	-0,42	0,08
junij	220	-0,53	-0,06
julij	711	-0,13	0,25
avgust	737	-0,51	-0,02
september	371	-0,40	-0,23
oktober	488	-0,41	-0,47
november	560	-0,56	0,03
december	392	-0,20	0,09

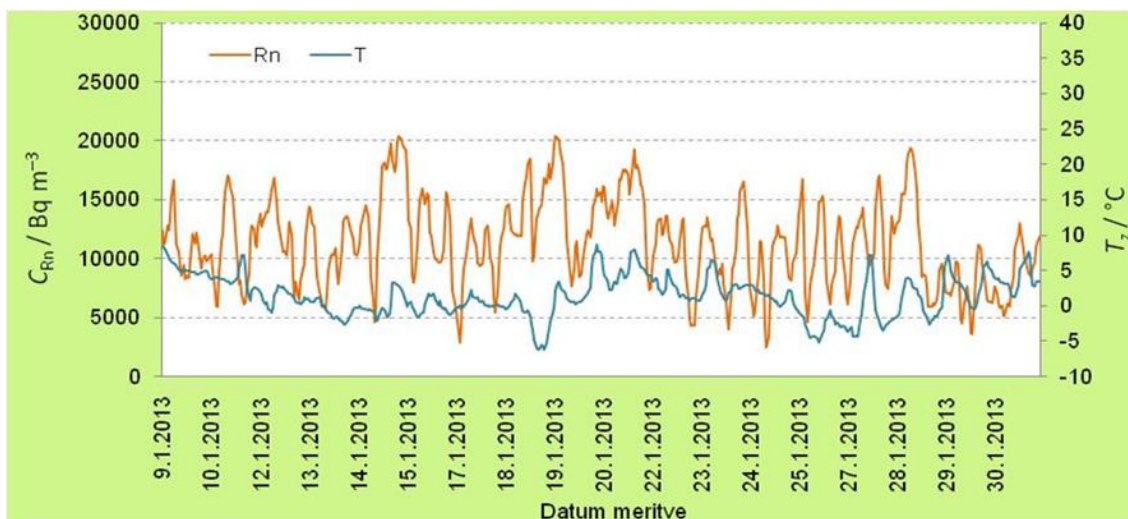
**Preglednica 4:** Koeficient korelacije ( $r$ ) za korelacije med koncentracijo radona ( $C_{Rn}$ ) v zraku dnevne sobe v prvem nadstropju in temperaturo ( $T$ ) ter tlakom ( $P$ ) zunanjega zraka po mesecih

dnevna soba v prvem nadstropju			
mesec	število meritev $N$	koeficient korelacije $r$ med $C_{Rn}$ in $T$	koeficient korelacije $r$ med $C_{Rn}$ in $P$
januar	557	-0,09	-0,05
februar	122	0,41	-0,63
marec	405	-0,18	-0,14
april	501	-0,15	-0,35
maj	732	0,16	0,26
junij	220	<0,01	0,34
julij	711	-0,12	0,13
avgust	737	-0,30	-0,19
september	371	-0,18	-0,52
oktober	488	0,33	0,21
november	560	-0,07	0,05
december	392	0,18	0,09

#### 4.2.1.1 Dnevna soba v pritličju

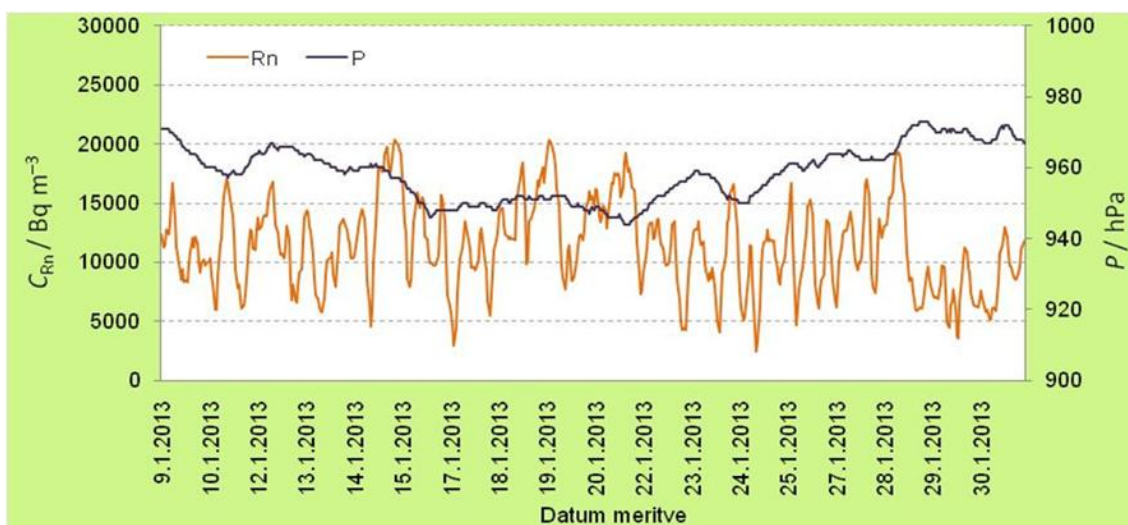
Na sliki 14 vidimo časovne spremembe urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v januarju, ki sem ga izbrala kot predstavnika zimskega letnega časa. Opazimo lahko, da se koncentracija radona spreminja v isti smeri kot temperatura. To nam pove tudi šibka pozitivna korelacija med koncentracijo radona ter temperaturo ( $r = 0,03$ ).





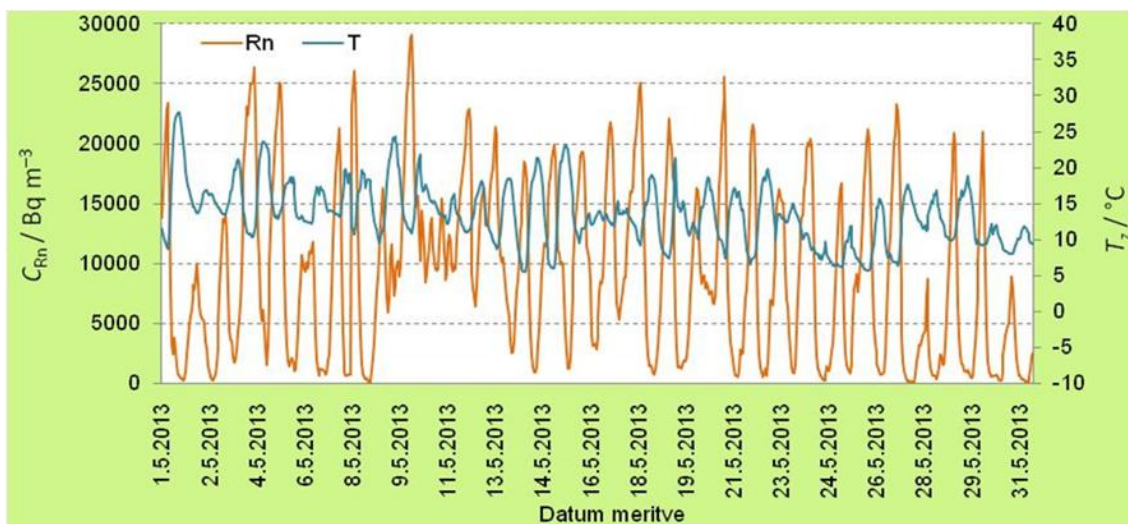
**Slika 14:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v januarju

Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v januarju je prikazan na sliki 15. V začetku meseca se je koncentracija radona spreminjala v isti smeri kot zunanji tlak. Proti koncu meseca pa opazimo, da koncentracija radona pade, ko vrednost zunanjega tlaka naraste in obratno. To nam pove tudi izračunana višja negativna korelacija ( $r = -0,27$ ) med koncentracijo radona in zunanjim tlakom.



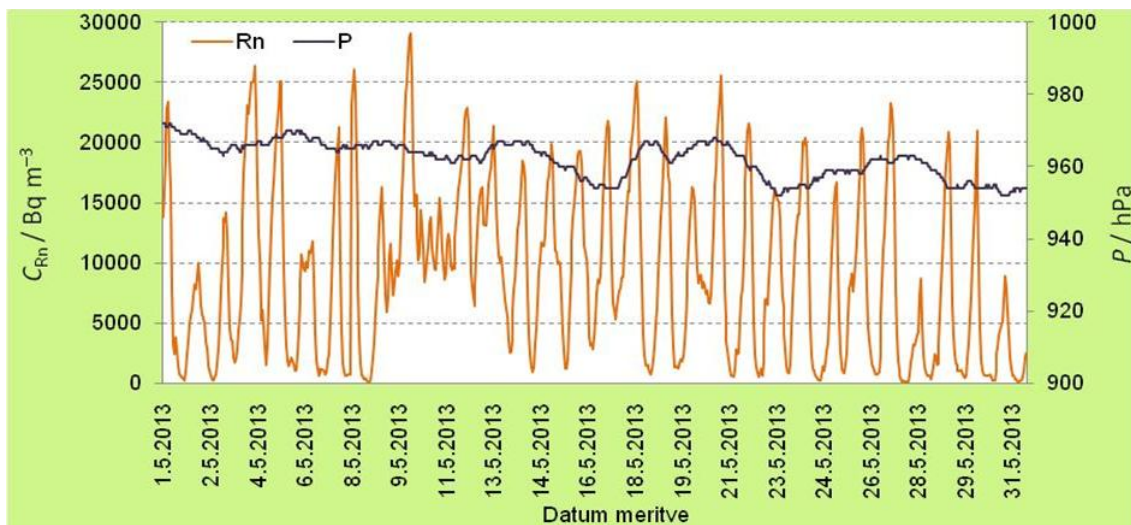
**Slika 15:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v januarju

Za predstavnika spomladanskega letnega časa sem izbrala maj. Kot kaže slika 16, se je v tem času temperatura zunanjega zraka postopno višala. Opazimo tudi velike temperaturne razlike med dopoldanskim in popoldanskim časom. Pri višji temperaturi je bila koncentracija radona nižja in obratno, kar nam pove tudi dobra negativna korelacija. Med 9. in 13. majem je temperatura padala. Vidimo običajno dnevno - nočno nihanje.



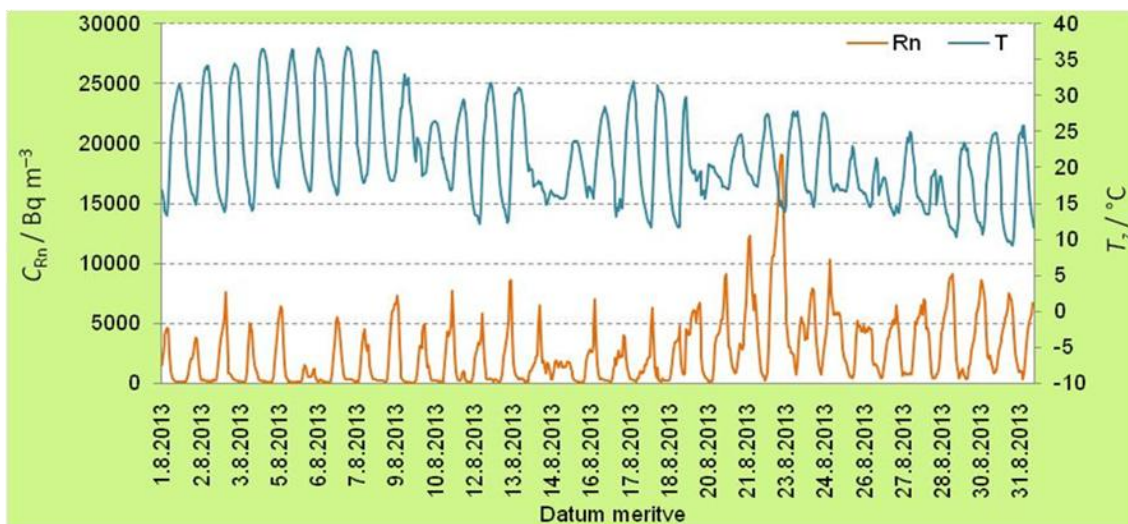
**Slika 16:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v maju

Na sliki 17 vidimo časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjskega zračnega tlaka v maju. Vidi se, da se koncentracija radona spreminja glede na spreminjanje tlaka. To pomeni, da se koncentracija radona zviša, kadar se zviša tlak in obratno, koncentracija radona se zniža, kadar se zniža zunanji tlak.

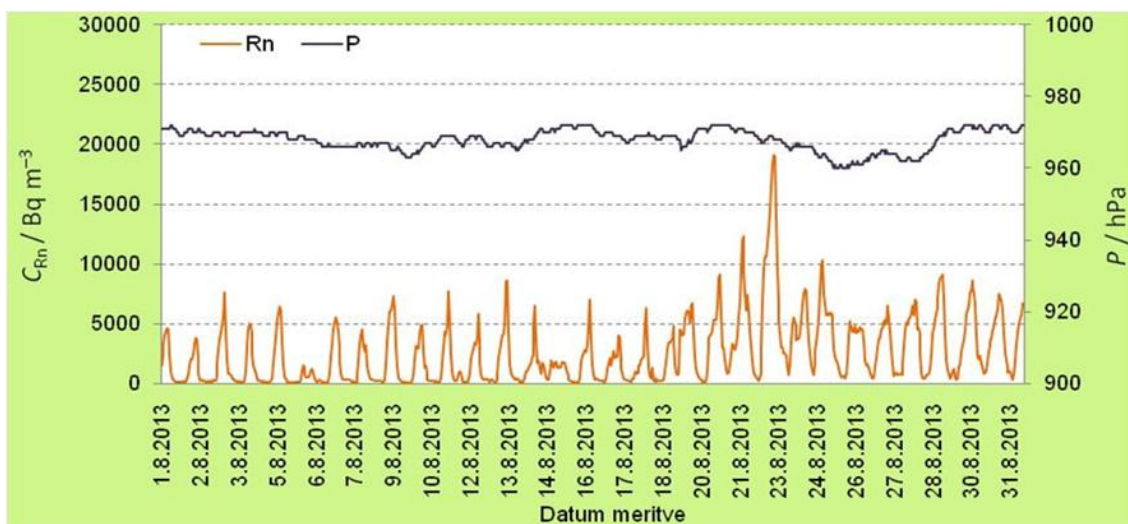


**Slika 17:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjskega zračnega tlaka v maju

Za predstavnika poletnega letnega časa sem izbrala avgust. Na sliki 18 vidimo, da se je koncentracija radona zvišala, kadar se je zunanja temperatura znižala in obratno. Poleti je izmenjava zunanjskega zraka z notranjim večja, zaradi tega pride tudi do nižjih izmerjenih koncentracij radona. Proti koncu meseca se je koncentracija radona zaznavno zvišala. Na sliki 19 ne vidimo nobene povezave med zunanjim tlakom in koncentracijo radona, kar potrjuje tudi nizek korelacijski koeficient ( $r = -0,02$ , tabela 3).



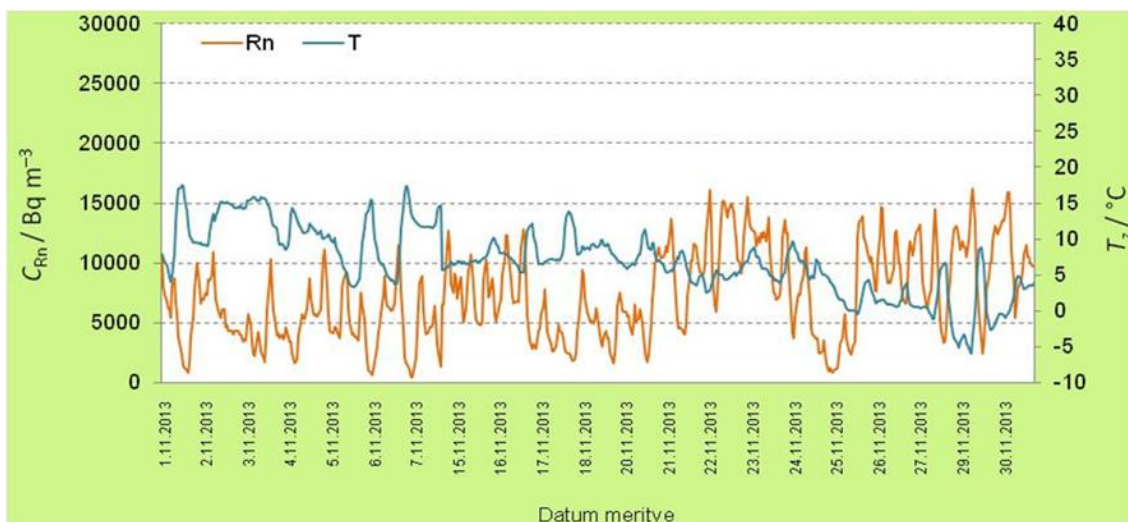
**Slika 18:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v avgustu



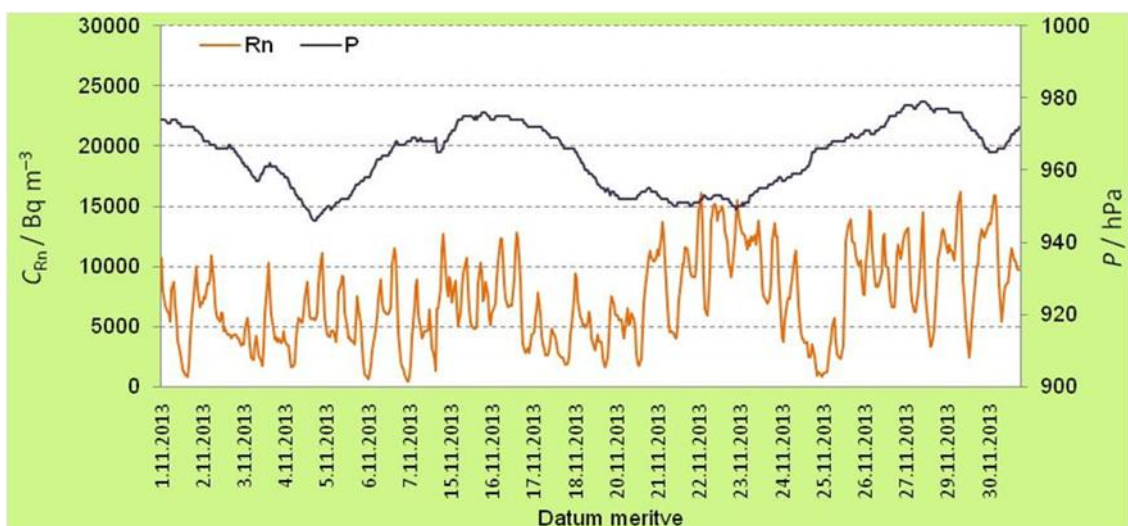
**Slika 19:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v avgustu

Za predstavnika jesenskega letnega čas sem izbrala november. Na sliki 20 lahko vidimo, kako sta se spreminjala urna koncentracija radona v dnevni sobi v pritličju in temperatura zunanjega zraka v novembru. Za ta mesec sem izračunala najvišjo negativno korelacijo, kar pomeni, da se je koncentracija radona spreminjala obratno s temperaturo. Ko se je temperatura znižala je koncentracija radona naraščala in obratno. Spremembe koncentracije radona in zunanjega tlaka pa vidimo na sliki 21. Najslabša pozitivna korelacija nam pove, da se je koncentracija radona povišala, kadar se je tlak povišal in obratno.





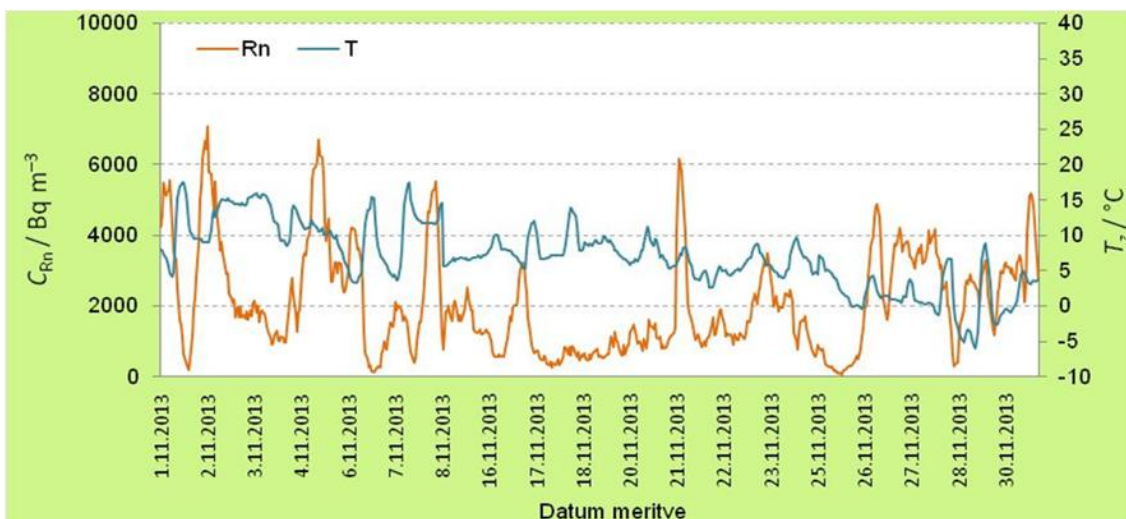
**Slika 20:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanjega zraka v novembru



**Slika 21:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in zunanjega zračnega tlaka v novembru

#### 4.2.1.2 Dnevna soba v prvem nadstropju

Za predstavbo, kako se spreminja korelacija glede na nadstropje, sem si za dnevno sobo v prvem nadstropju izbrala dva meseca, ki sta imela najbolj različni korelaciji med koncentracijo radona v zraku v sobi ter temperaturo oziroma tlakom zunanjega zraka. Tako na sliki 22 predstavljam časovni potek urnih koncentracij radona in zunanje temperature v novembru in na sliki 23 časovni potek urnih koncentracij radona in zunanjega zračnega tlaka v oktobru.



**Slika 22:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in temperature zunanega zraka v novembru

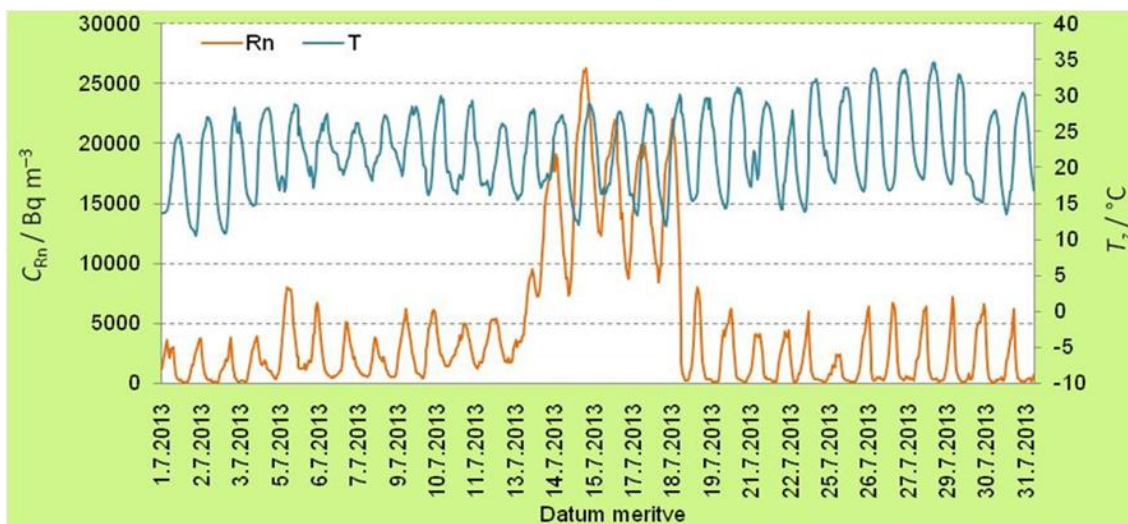


**Slika 23:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in zunanega zračnega tlaka v oktobru

Za november pri  $r = -0,07$  (preglednica 4) težko govorimo o kakršnikoli korelaciji med  $C_{Rn}$  in  $T$ . Oktobra je bila korelacija med  $C_{Rn}$  in  $P$  slabo pozitivna z  $r = 0,21$  (preglednica 4) pri številu meritev 488, kar pomeni, da sta se koncentracija radona in zračni tlak spreminjala skupaj. Opazimo lahko, da pride do spremembe oziroma znižanja tlaka v prvi polovici meseca.

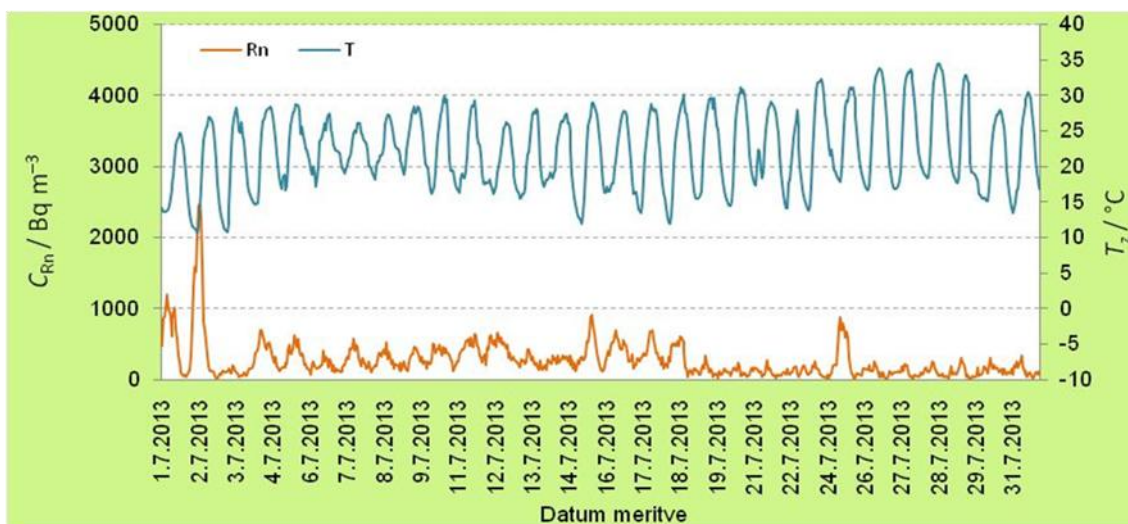
#### 4.2.1.3 Učinki prezračevalnih navad stanovalcev v juliju

Na sliki 24 vidimo izrazito zvišanje koncentracije radona v mesecu juliju, ko so bili stanovalci na dopustu. V tem času je bila hiša zaprta, prezračevanje prostorov je bilo zmanjšano in radon se je v prostorih nemoteno kopičil. Da je pa nekaj prezračevanja le bilo, pričajo dnevno-nočna nihanja koncentracije. Do tako visoke koncentracije radona v času odsotnosti stanovalcev je najverjetneje prišlo zato, ker je stavba in s tem bivalni prostor povezan z manjšo razpoko ali jamo, kar je na Krasu pogost pojav (Velišček T., 2009).



**Slika 24:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in temperature zunanega zraka v juliju

V dnevni sobi v prvem nadstropju se je koncentracija radona zaradi odsotnosti stanovalcev le rahlo povišala, tudi tukaj pa so opazna dnevno-nočna nihanja (slika 25).



**Slika 25:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v prvem nadstropju in temperature zunanega zraka v juliju

### 4.3 Povprečne koncentracije radona

Iz urnih koncentracij radona, ki sem jih dobila s kontinuirnimi merilniki, sem izračunala mesečna (M), trimesečna ali četrletna (3-M), 6 mesečna ali polletna (6-M) in letna (L) povprečja, ki sem jih uporabila kot osnovo za izračun efektivnih doz. Zaradi enostavnosti bom v razpravi pridevnik 'povprečni' izpuščala in jih bom imenovala: mesečna koncentracija, trimesečna koncentracija, polletna koncentracija in letna koncentracija radona. Ta povprečja so zbrana v preglednici 5. Kot vidimo, je bila povprečna letna koncentracija v dnevni sobi v pritličju  $7162 \pm 457 \text{ Bq m}^{-3}$ , v dnevni sobi v prvem nadstropju pa  $1289 \pm 213 \text{ Bq m}^{-3}$ . Obe povprečji sta občutno višji od mejne vrednosti za radon v naši državi, ki je  $400 \text{ Bq m}^{-3}$  (ULRS, 2004).

Te povprečne koncentracije so za dozimetrijo fiktivne, saj nas pri izračunu doze zanima le koncentracija v času, ko se oseba dejansko zadržuje ali biva v prostoru in je izpostavljena radonu. Ob poznavanju bivalnih navad stanovalcev sem iz izmerjenih urnih koncentracij izračunala tudi mesečna, trimesečna, polletna in letna povprečja samo za čase, ko so se stanovalci zadrževali v dnevni sobah v pritličju ali v prvem nadstropju. Ta povprečja imenujem 'bivalna' povprečja (B), da jih razlikujem od tistih preko celotnega časa, ki jih imenujem 'celotna' povprečja.

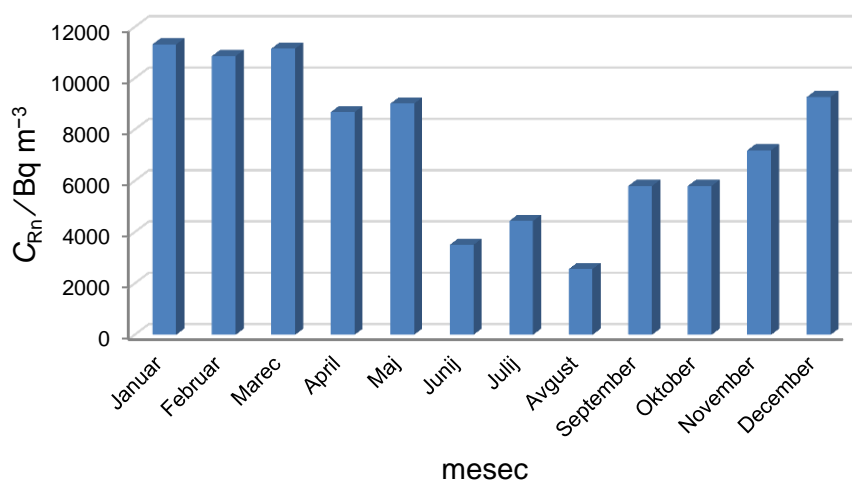
**Preglednica 5:** Celotne povprečne koncentracije radona ( $C_{Rn}$ ), izračunane iz izmerjenih urnih koncentracij: B – bivalna, M – mesečna, 3-M – trimesečna ali četrletna, 6-M – šestmesečna ali polletna in L – letna.

mesec	dnevna soba pritličje					dnevna soba prvo nadstropje				
	$C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$					$C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$				
	B	M	3-M	6-M	L	B	M	3-M	6-M	L
januar	12243	11326	11211	9393	7162	2708	2671	2758	1537	1289
februar	11961	10870				2453	2468			
marec	10503	11161				2728	2963			
april	5828	8686	8026	5436	7162	863	879	645	1096	1289
maj	5702	9014				595	587			
junij	1811	3509				303	298			
julij	4318	4439	3959	5436	7162	276	268	368	1096	1289
avgust	1740	2565				248	246			
september	4357	5806				810	801			
oktober	5203	5806	7300	5436	7162	1459	1417	2015	1096	1289
november	7256	7195				1967	2081			
december	9376	9273				2619	2673			

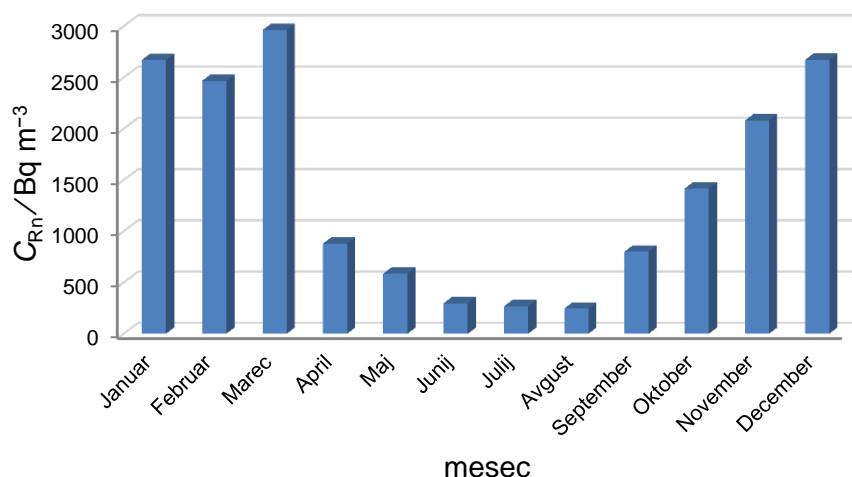


### 4.3.1 Celotne povprečne mesečne koncentracije radona

S slike 26 je razvidno, da je bila najnižja celotna mesečna koncentracija radona  $2565 \text{ Bq m}^{-3}$  v avgustu in najvišja  $11326 \text{ Bq m}^{-3}$  v januarju. Vidimo, da koncentracija radona v mesecu februarju pade in nato spet naraste v mesecu marcu. V spomladanskem času, v mesecu aprilu, je koncentracija radona nižja kot v mesecu maju, kar bi spet lahko povezovali s praznim prostorom, morda majhno kraško jamo, rovom ali prelomom pod zgradbo. Julija se je koncentracija ponovno povišala v primerjavi z junijem, ker je bilo manj prezračevanja v času odsotnosti stanovalcev. Jeseni je začela koncentracija naraščati. Mesec september je na Krasu dokaj toplel, s skoraj poletnimi temperaturami, zato je koncentracija še vedno nižja kot v pomladanskih mesecih, podobno je bilo tudi oktobra.



**Slika 26:** Stolpčni prikaz celotnih mesečnih povprečnih koncentracij radona v dnevni sobi v pritličju



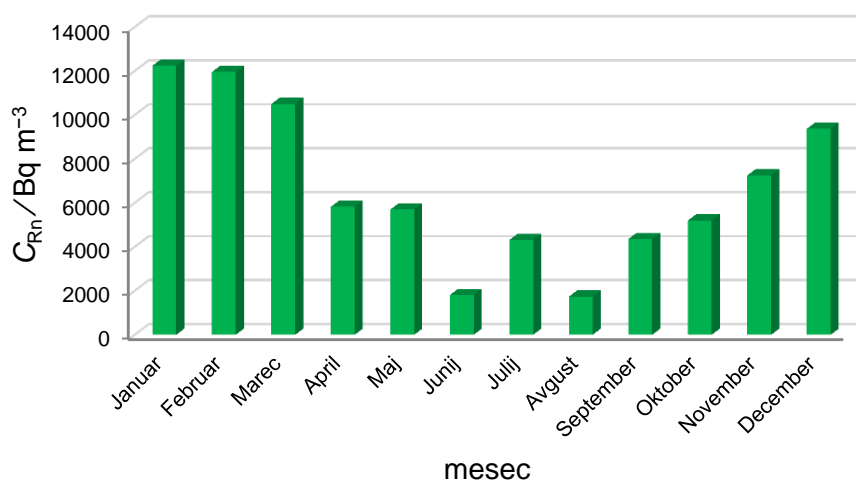
**Slika 27:** Stolpčni prikaz celotnih mesečnih povprečnih koncentracij radona v dnevni sobi v prvem nadstropju



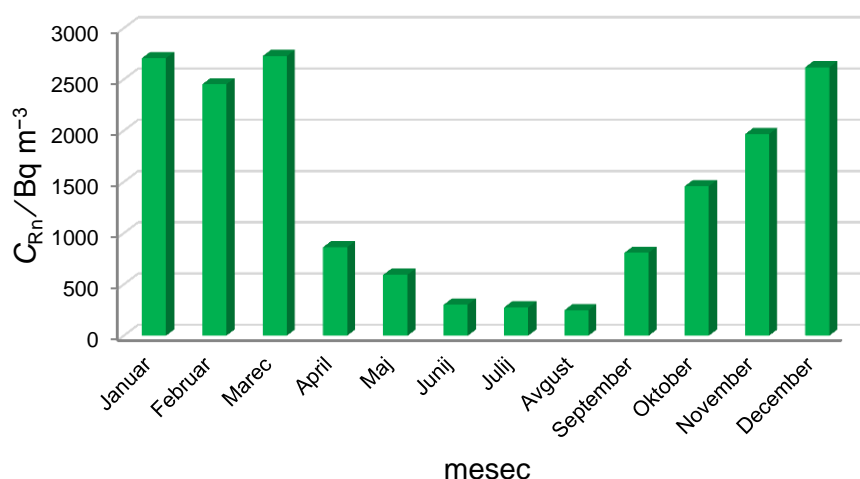
Na sliki 27 vidimo, da je vzorec naraščanja in padanja celotne povprečne koncentracije radona v prvem nadstropju podoben kot v pritličju, z najnižjimi vrednostmi poleti in najvišjimi pozimi, z izjemo v juliju, ko sta bila stanovalca nekaj dni odsotna.

#### 4.3.2 Povprečne mesečne bivalne koncentracije radona

Mesečne bivalne koncentracije radona sem iz izmerjenih urnih koncentracij izračunala ob predpostavki, da bi se stanovalci zadrževali v dnevni sobi od 7. do 22 ure. To v približku velja za dnevno sobo v pritličju, nikakor pa ne tudi za dnevno sobo v prvem nadstropju, ki jo uporabljajo le redko. Mesečne bivalne koncentracije radona so prikazane na slikah 28 in 29. V dnevni sobi v pritličju so nekoliko višje od celodnevni, medtem ko so v prvem nadstropju znatno nižje od njih.



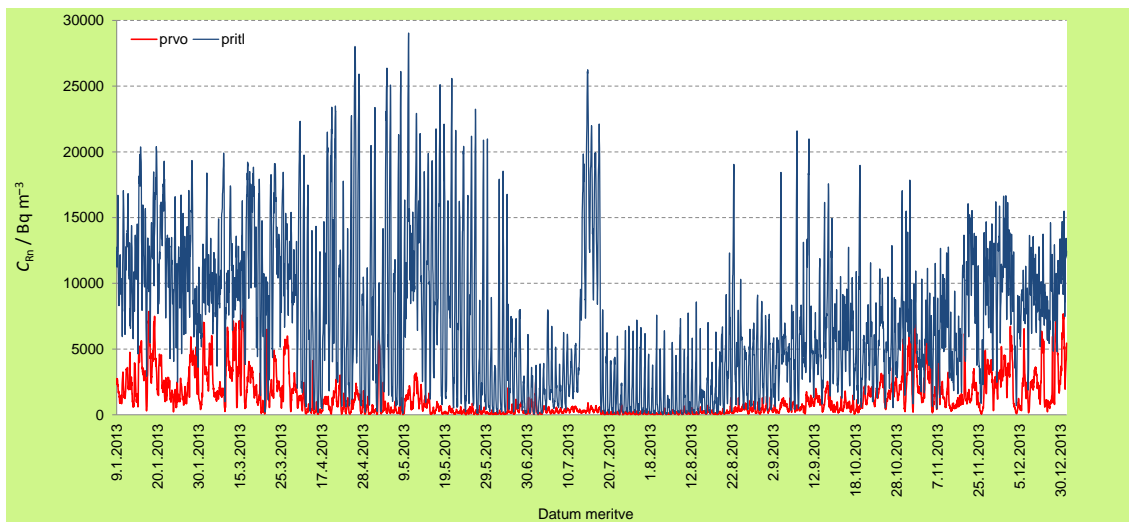
**Slika 28:** Stolpčni prikaz celotnih mesečnih bivalnih koncentracij radona v dnevni sobi v pritličju



**Slika 29:** Stolpčni prikaz celotnih mesečnih bivalnih koncentracij radona v dnevni sobi v prvem nadstropju

### 4.3.3 Primerjava koncentracij radona med pritličjem in prvim nadstropjem

Na sliki 30 je prikazana primerjava poteka urnih koncentracij radona v pritličju in v prvem nadstropju. Vidimo, da so koncentracije radona v prvem nadstropju znatno nižje kot v pritličju, tudi dnevna nihanja so v prvem nadstropju manjša kot v pritličju. V prvem nadstropju ne opazimo porasta koncentracije v času odsotnosti stanovalcev v juliju. Koncentracija radona je v poletnih mesecih v prvem nadstropju dokaj konstanta.



**Slika 30:** Časovni potek urnih koncentracij radona v zraku v dnevni sobi v pritličju in dnevni sobi v prvem nadstropju v letu 2013

Iz preglednice 6 je razvidno, da je bila korelacija med koncentracijama radona v obeh sobah pozitivna, z izjemo februarja, ko pa zaradi nizkega korelacijskega koeficienta o korelaciji ne moremo niti govoriti. Tudi sicer, so bili korelacijski koeficienti nizki: samo junija je presegel 0,50, vse ostale mesece pa je bil pod 0,40.

**Preglednica 6:** Koeficient korelacije ( $r$ ) med celotnimi povprečnimi mesečnimi koncentracijama radona v dnevni sobi v pritličju in prvem nadstropju

mesec	dnevna soba v pritličju in prvem nadstropju	
	število meritev N	koeficient korelacije $r$ med dnevno sobo v pritličju in dnevno sobo v prvem nadstropju
januar	557	0,31
februar	122	-0,06
marec	405	0,10
april	501	0,34
maj	732	0,15
junij	220	0,53
julij	711	0,26
avgust	737	0,27
september	371	0,23
oktober	488	0,21
november	560	0,25
december	392	0,36

#### 4.4 Efektivna doza

Na osnovi različnih celotnih povprečij koncentracij radona sem po enačbi (11) izračunala mesečne, trimesečne, polletne in letne efektivne doze, ki bi jih prejel stanovalec, če bi se ves čas zadrževal v dnevni sobi v pritličju ali dnevni sobi v prvem nadstropju. Svetovno povprečje letne efektivne doze samo od radona in RnDP je 1,15 mSv (UNSCEAR, 2000), medtem ko je slovensko povprečje letne doze 0,88 mSv (Koželj M. in sod., 2006). Iz preglednice 7 je razvidno, da so izračunane letne efektivne doze višje od svetovnega in slovenskega povprečja, kar sem glede na visoke koncentracije radona tudi pričakovala.

**Preglednica 7:** Efektivne doze ( $E_{eff}$ ) v dnevni sobi v pritličju in prvem nadstropju, izračunane na osnovi različnih celotnih povprečnih koncentracij radona: M=mesečno, 3-M=trimesečno, 6-M=polletno in L=letno

mesec	pritličje				prvo nadstropje			
	$E_{eff} / \text{mSv}$				$E_{eff} / \text{mSv}$			
	M	3-M	6-M	L	M	3-M	6-M	L
januar	18,3	55,0	92,1	127,7	4,3	13,5	15,1	23,0
februar	16,4				3,7			
marec	18,6				5,0			
april	11,5	32,2	43,6	127,7	1,2	2,6	8,8	23,0
maj	12,3				0,8			
junij	4,6				0,4			
julij	6,1	15,8	43,6	127,7	0,4	1,5	8,8	23,0
avgust	3,5				0,3			
september	7,7				1,1			
oktober	9,7	35,8	43,6	127,7	2,4	9,9	8,8	23,0
november	11,6				3,4			
december	15,5				4,5			
	$E_{eff} / \text{mSv a}^{-1}$				$E_{eff} / \text{mSv a}^{-1}$			
letna	135,8	138,8	135,7	127,7	27,5	27,5	23,9	23,0

Izračun efektivne doze na osnovi bivalne koncentracije radona je najboljši približek dejansko prejeti dozi in zato tudi najbolj pravilen (preglednica 8). Efektivna doza, ki bi jo stanovalec prejel v prvem nadstropju ( $26,8 \text{ mSv a}^{-1}$ ), je za faktor 4,4 nižja od tiste, ki bi jo prejel v pritličju ( $119,8 \text{ mSv a}^{-1}$ ), kjer je bila koncentracija radona znatno višja.

Vendar pa se najbolj pravilen izračun efektivne doze ne razlikuje znatno od tistih izračunov, ki sem jih dobila na osnovi celotne povprečne mesečne, trimesečne, polletne in letne koncentracije radona. V preglednici 9 podajam razmerja med povprečno letno bivalno in povprečno letno celotno efektivno dozo na osnovi različnih celotnih povprečij koncentracije radona: mesečnih, trimesečnih, polletnih in letnih. Vidimo, da so razlike majhne. V dnevni sobi v pritličju so doze na osnovi celotnih povprečnih koncentracij nekoliko nižje od povprečne bivalne doze, razmerje je v območju od 0,86 do 0,94. V dnevni sobi v nadstropju je to razmerje v območju od 0,97 do 1,17.

**Preglednica 8:** Bivalne mesečne koncentracija radona ( $C_{Rn}$ ) in bivalne mesečne efektivne doze ( $E_{eff}$ )

mesec	dnevna soba pritličje		dnevna soba prvo nadstropje	
	bivalna $C_{Rn}$ Bq m <sup>-3</sup>	bivalna $E_{eff}$ mSv mo <sup>-1</sup>	bivalna $C_{Rn}$ Bq m <sup>-3</sup>	bivalna $E_{eff}$ mSv mo <sup>-1</sup>
januar	12243	19,8	2708	4,4
februar	11687	18,1	2453	3,7
marec	10503	17,5	2728	4,6
april	5838	7,7	863	1,1
maj	5702	7,8	595	0,8
junij	1811	2,4	303	0,4
julij	1691	2,3	276	0,4
avgust	1740	2,4	248	0,3
september	4357	5,8	810	1,1
oktober	5203	8,7	1459	2,4
november	7256	11,7	1967	3,2
december	9376	15,7	2619	4,4
		<b>119,8 mSv a<sup>-1</sup></b>		<b>26,8 mSv a<sup>-1</sup></b>

**Preglednica 9:** Razmerja med povprečno bivalno efektivno dozo in celotno povprečno efektivno dozo

koncentracija radona	dnevna soba pritličje	dnevna soba prvo nadstropje
	razmerje med povprečno letno bivalno in povprečno letno celotno dozo	razmerje med povprečno letno bivalno in povprečno letno celotno dozo
mesečna	0,88	0,97
trimesečna	0,86	0,97
polletna	0,88	1,12
letna	0,94	1,17

Ker se efektivne doze bistveno ne razlikujejo, če pri izračunu vzamemo celotna povprečja ali bivalna povprečja koncentracije radona, to pomeni, da nam tudi detektorji jedrskih sledi, ki merijo le povprečne celotne mesečne (četrtletne, polletne ali letne) koncentracije, dovolj dobro pokažejo dejansko izpostavljenost radonu. Efektivne doze lahko zato dovolj zanesljivo ocenimo na osnovi meritev povprečnih koncentracij radona in kontinuirnih meritev ne potrebujemo.

Po drugi strani pa nam meritve povprečnih koncentracij radona ne dajejo informacij o dnevnem spreminjanju koncentracije radona, kot so jutranja povišanja ali znižanja po prezračevanju. Za tovrstne raziskave so nujne kontinuirne meritve, ki beležijo koncentracijo radona vsaj nekajkrat na dan, najbolje enkrat na uro. Poleg tega lahko samo s kontinuirnimi meritvami študiramo vpliv vremenskih dejavnikov (temperature, tlaka) na koncentracijo radona in na njene časovne spremembe.

Seveda pa so koncentracije radona in ocenjene sevalne doze v stanovanjski hiši občutno previsoke, zato bi bilo nujno izvesti sanacijo zgradbe, da bi koncentracijo radona znižali na zadovoljivo nizko raven.

## 5 ZAKLJUČKI

V svojem diplomskem delu sem izvedla enoletne kontinuirne meritve koncentracije aktivnosti radona v dnevni sobi in v prtem nadstropju hiše na Krasu s povišano ravno radona in ocenila sevalne doze stanovalcev.

Iz analize rezultatov lahko podam naslednje zaključke:

Povprečna mesečna koncentracija radona v obeh sobah je vse leto presegala mejno vrednost  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ . Po pričakovanju so bile višje vrednosti pozimi in nižje poleti, ter višje ponoči in nižje podnevi.

V dnevni sobi v pritličju se je koncentracija radona znatno zvišala v času, ko sta bila stanovalca na dopustu in je bila hiša zaprta, prostori pa neprezračeni. Ker se to ni zgodilo tudi v dnevni sobi prtem nadstropju, lahko zaključim, da je morda pod zgradbo kraška razpoka ali jama, iz katere z radonom bogat zrak vstopa v zgradbo.

Razlike med sobama so se pokazale tudi v korelaciji med koncentracijo radona in zunanjo temperaturo zraka. Proti pričakovanju ni bila vedno negativna, ampak je bila tudi pozitivna, in sicer januarja in februarja v pritličju ter februarja, maja, oktobra in decembra v prtem nadstropju. Korelacijski koeficienti so bili sorazmerno nizki: višji od 0,50 so bili v pritličju le trije (junij, avgust, november), v prtem nadstropju pa nobeden.

Korelacija med koncentracijo radona in zračnim tlakom je bila po pričakovanju v glavnem negativna (če ne upoštevamo tistih s korelacijskimi koeficienti, manjšimi od 0,10). V pritličju je bila pozitivna februarja in julija, v prtem nadstropju pa maja, junija in julija ter oktobra.

Pozitivnih korelacij med koncentracijo radona in zunanjo temperaturo ter zračnim tlakom nismo uspeli pojasniti.

Iz urnih koncentracij radona sem izračunala različna povprečja koncentracije, in sicer mesečna, četrletna, polletna in letna. Če sem računala povprečja preko celotnega časa, sem jih imenovala celotna povprečja, za razliko od tistih, ki sem jih računala samo preko časa, ko sta se stanovalca dejansko zadrževala v prostoru, ki sem jih imenovala bivalna povprečja.

Primerjava celotnih mesečnih povprečnih koncentracij radona v pritličju in v prtem nadstropju je pokazala pozitivno korelacijo, a z nizkimi korelacijskimi koeficienti, kar spet kaže na to, da so razmere v sobah različne.

Kot rezultat visokih koncentracij radona so bile visoke tudi sevalne doze: mesečne vrednosti efektivnih doz v dnevni sobi v pritličju so bile višje od povprečne letne v svetovnem merilu (1,15 mSv).

Sevalne doze se bistveno ne razlikujejo, če pri izračunu vzamemo celotna povprečja ali bivalna povprečja. To pomeni, da nam tudi detektorji jedrskih sledi, ki merijo le povprečne mesečne (četrletne ali letne) koncentracije dovolj dobro pokažejo dejansko izpostavljenost radonu.

Prednost kontinuiranih meritev je bila, da sem lahko zasledovala dnevna nihanja koncentracije radona in ovrednotila vpliv temperature, zračnega tlaka in prezračevanja na koncentracijo radona. S temi izsledki si tako lahko pomagamo v prostorih s povišano koncentracijo radona, saj jo s primernim prezračevanjem v primernih časih lahko znatno znižamo.

Izvajanje preiskav v dveh sobah istočasno, je pokazalo, da rezultatov, dobljenih v eni sobi, nikakor ne smemo posploševati na druge prostore v isti zgradbi, saj se razmere od prostora do prostora lahko zelo razlikujejo. Zato za oceno sevalnih doz stanovalcev ni dovolj izmerjena koncentracija radona samo v enem prostoru, ampak potrebujemo podatke za vse prostore, v katerih stanovalci živijo (delajo, se zadržujejo).

## 6 VIRI

ARSO (Agencija republike Slovenije za okolje), Prikaz letnih vrednosti temperatur in tlaka na merilnem mestu Škocjan (Obdobje med 1. Januarjem 2013 in 1. Januarjem 2014), spletna stran (2013)

Bell F.G. 2007. Basic environmental and engineering geology. Cattiness, *Whittles Publishing Limited*; Str. 342

Birchall A., Puncher M., James A. C., Marsh J. W., Jarvis N. S., Peace M. S. 2003. Internal dosimetry made simple. IMBA. *Radiation Protection Dosimetry* 105: 421–425

Butterweck G., Vezzù G., Schuler C, Müller R., Marsh J. W., Thrift S., Birchall A. 2001. In vivo measurement of unattached radon progeny deposited in the human respiratory tract. *Radiation Protection Dosimetry* 94: 247–50

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., Groves-Kirkby N. P., Groves-Kirkby C. J. 2007. Health implication of radon distribution in living rooms and bedrooms in U. K. dwellings - A case study in Northamptonshire. *Environmental International* 33: 999–1011

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

Dolgan, M. 2006. Dolnja Košana in okolica. Celje, Celjska Mohorjeva družba

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

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

Gregorič A. 2008. Indoor, outdoor and soil-gas radon levels in Slovenia. Seminar. Ljubljana, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana

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

Gundersen L.C.S., Schumann R.R., Otton J.K., Dubiel R.F., Owen D.E., Dickinson K.A., Peake R.T. and Wirth S.J. 1991. Preliminary radon potential map of the United

States. *Radon Reduction Technology* (EPA/600/9-91/037B), *Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC*: 9.13–9.32

Habič, P., Gospodarič, R., Kogovšek, J. 1984. Kraške in hidrogeološke značilnosti Košanske doline ter njen prispevek k onesnaženosti Notranjske Reke. Seja razreda za naravoslovne vede, SAZU, Ljubljana

Hassan, N. M., Hosoda, M., Ishikawa, T., Sorimachi, A., Sahoo, S. K., Tokonami, S. and 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. Str. 65

Hofmann W. 1994. Lung Cancer Risk at Low Doses: What Can Cellular Radiobiology tell us. *Radiation Protection Dosimetry* 56: 99–103

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

ICRP-65 (International Commission on Radiological Protection). Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP-65. *Publication Pergamon Press; Oxford*: 1–45

ICRP-66 (International Commission on Radiological Protection). 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP-66. *Publication Pergamon Press; Oxford*: 1–413

Kemija. Zbirka: Tematski leksikon. 2004. 3. Izdaja. Tržič, Učila. International: str. 442

Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manshego M. 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *The science of the Total Environment* 272: 217–230

Keskikuru T., Kokotti H., Lammi S. 2000. Variation of radon entry rate into two detached houses. *Atmospheric Environment* 34: 4819–4828

Kobal I., Smodiš B., Burger J., Škofljanec M. 1987. Atmospheric 222Rn in tourist caves of Slovenia, Yugoslavia. *Health Physics* 52: 473–479

Kobal I., Vaupotič J., Mitić D., Kristan J., Ančič M., Jerančič S., Škofljanec M. 1990. Natural Radioactivity of Fresh Waters in Slovenia, Yugoslavia. *Environmental International* 16: 141–154

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

Leban M. 2012. Vpliv okolja in bivalnih navad na raven radona v domovih. Diplomsko delo. Nova Gorica. Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju

Makofske W. J., Edelstein M. R. 1988. Radon and the Environment. New Jersey. *Noyes publication*; str. 471



- Menzler S., Schaffrath-Rosario A., Wichman H. E., Kreienbrock L. 2006. Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in Deutschland durch Radon in Wohnungen. *Ecomed-Verlag, Landsberg*
- 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., 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
- Nazaroff W. W. 1992. Radon Transport From Soil to Air. *Reviews of Geophysics* 30: 137–160
- 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
- Obu K. 2010. Spreminjanje koncentracije radona v turistični kraški jami v odvisnosti od zunanje temperature in tlaka. Diplomsko delo. Nova Gorica. Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju
- Otton J. K., Gundersen L. C. S., Schumann R. R. 1993. The geology of radon. US Department of the Interior. US Geological Survey
- Perko D., Orožen Adamič M. 1998. Slovenija: Pokrajine in ljudje, Mladinska knjiga, Ljubljana
- Pleničar M., Jurkovšek B. 1999. Rudisti iz cenomanijskih bioherm Hrušice in Nanosa. Katedra za geologija in paleontologijo Univerze v Ljubljani, Geološki zavod Slovenije. *Geologija* 42: 69–116
- Popit A., Vaupotič J. 2002. Vpliv geološke podlage na povišanje koncentracije radona v slovenskih šolah in vrtcih. *Geologija* 45: 499–504
- Sahota S. H., Randhawa K. S., Singh Manmohan, Singh Kulwalt. 2005. Temperature variation of indoor and outdoor radon progeny. *Atmospheric Environment* 39: 2991–2994
- Sarad. 2003. User manual Radon Scout, Sarad GmbH. Dresden, Sarad; str. 8
- Schumann R. R., Owen D. E., Asher-Bolinder S. 1992. Effects of weather and soil characteristics on temporal variations in soil-gas radon concentrations. V: Geologic Controls of Radon. Gates A.E., Gundersen L.C.S. (ur.). *Geological Society of America, Inc. Special paper* 271: 65–72
- Schumann R. R., Gundersen C. S. 1996. Geologic and climatic controls of radon emanation coefficient. *Environment International* 22: 439–446

- Sesana L., Caprioli E., Marcazzan G. M. 2003. Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity* 65: 147–160
- Smrkolj P. 2010. Vloga faktorja ravnotežja in deleža nevezanih radonovih razpadnih produktov pri izračunu efektivne doze. Diplomsko delo. Nova Gorica. Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju
- Stather J. W. 2004. Dosimetric and epidemiological approaches to assessing radon doses—can the differences be reconciled? *Radiation Protection Dosimetry* 4: 487–492
- Stranden E., Kolstad A. K., Lind B. 1984. The influence of moisture and temperature on radon exhalation. *Radiation Protection Dosimetry* 7: 55–58
- Stritar A. 1991. Pedologija (kompandij). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. Agronomski oddelek. str. 126
- Suhadolc M., Ruprecht J., Zupan M. 2005. Priročnik za vaje iz pedologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. Oddelek za agronomijo. Center za pedologijo in varstvo okolja
- Stritar A., Dimic V., Istenič R. 1997. Radioaktivni odpadki — Z znanjem proti strahu. Ljubljana. Agencija za radioaktivne odpadke; str. 89
- Thomas J., Moučka L. 1992. Identification and localisation of radon sources in houses with extreme high radon concentrations. *Radiation Protection Dosimetry* 45: 515–517
- Trajkov S. 2013. Pokrajinske značilnosti vodnih virov in oskrba na območju Košanske doline. Diplomsko delo. Koper, Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije Koper, str. 15–20
- 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)
- Valkovič V. 2000. Radioactivity in the environment. Amsterdam. Elsevier; str. 681
- Vaupotič J. 1995. Koncentracije radona in njegovih razpadnih produktov v bivalnem okolju ter modelni izračuni doz : doktorska disertacija. *Ljubljana*, str. 123, graf. prikazi in tabele
- Vaupotič J., Andjelov M., Kobal I. 2002. Relationship between radon concentrations in indoor air and in soil gas. *Environmental Geology* 42: 583–587
- Vaupotič J. 2003. Indoor radon in Slovenia. *Nuclear Tehnology and Radiation Protection* 18: 36–43
- Vaupotič J., Kobal I. 2006. Radon survey and exposure assessment in hospitals. *Radiation Protection Dosimetry* 121: 158–167

Vaupotič J., Žvab P., Gregorič A., Dujmovič P., Kocman D., Kobal I., Kozak K., Mazur J., Kochowska E. in Haber R. 2007. Radonski potencial v tleh na območjih s povišanimi koncentracijami radona v zaprtih prostorih, Delovno poročilo, IJS-DP-9694, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana.

Vaupotič J. 2010. Radon levels in Karst caves in Slovenia, Radon v slovenskih kraških jamah. *Acta Carsologica* 39: 503–512

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

Vaupotič J., Bezek M., Kavasi N., Ishikawa T. 2012. Radon and thoron doses in kindergartens and elementary schools. *Radiation Protection Dosimetry* 152: 247–252

Vaupotič J., Kobal I. 2012. Radioaktivnost in zaščita pred sevanji. Šolsko leto 2012/2013. Literatura predavanj, Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju, študijski program: okolje I. stopnje (uni.)

Vaupotič J., Streil T., Tokonami S., Žunić Z. S. 2013. Diurnal variations of radon and thoron activity concentrations and effective doses in dwellings in Niška Banja, Serbia. *Radiation Protection Dosimetry* 145: 1–8

Velišček T. 2009. Alfa scintilacijske celice za merjenje radona v zraku: Njihova kalibracija, preizkus tesnosti in uporaba v vinskih kletih. Nova Gorica. Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju

WHO (World Health Organization). 2009. Handbook on Indoor Radon. *A Public Health Perspective*

Wilkening M. H., DE Watkins D. E. 1976. Air exchange and <sup>222</sup>Rn concentrations in the Carlsbad Caverns. *Health Physics* 31: 139–145

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

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

Zupančič M. 2007. Vpliv geoloških in klimatskih dejavnikov na koncentracijo radona v zraku. Diplomsko delo. Nova Gorica. Univerza v Novi Gorici, Fakulteta za znanosti o okolju

## 6.1 Internetni viri

[http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploads/GGO/Postojna/05\\_POSTOJNA\\_2011-2020.pdf](http://www.mko.gov.si/fileadmin/mko.gov.si/pageuploads/GGO/Postojna/05_POSTOJNA_2011-2020.pdf) (april 2014)

<http://www.geo-zs.si/podrocje.aspx?id=0> (Osnovne geološke karte, list Postojna, (februar 2014)

<http://www.katasterjam.si/> (december 2013)

ARSO Meteorološka postaja Škocjan (Celoletni podatki za temperaturo in tlak) (2013-2014)

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet/#webmet==8Sdwx2bhR2cv0WZ0V2bvEGcw9ydlJWblR3LwVnaz9SYtVmYh9icIFGbt9SaulGdugXbsx3cs9mdl5WahxXYyNGapZXZ8tHZv1WYp5mOnMHbvZXZuWYnwCchJXYtVGdlJnOn0UQQdSf;>

<http://web.jrc.ec.europa.eu/radpar/> (maj 2014)

[http://radoneurope.org/wpcontent/uploads/2013/09/Calpena\\_EARSTworkshop2013.pdf](http://radoneurope.org/wpcontent/uploads/2013/09/Calpena_EARSTworkshop2013.pdf) (EC, latest strategy, junij 2014)

EPA slide show. 2006. Doug Kladder. Radon information center.  
<http://www.radon.com/index.html> (16 April 2014)