

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**PROSTORSKO SPREMINJANJE TALNIH KONCENTRACIJ
RADONA ZNOTRAJ PRAVILNIH MREŽ NA
KARBONATIH IN KLASTIČNIH SEDIMENTIH**

DIPLOMSKO DELO

Nejc LEKOČEVIČ

Mentorica: prof. dr. Janja Vaupotič

Nova Gorica, 2011

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.

Nejc Lekočevič

ZAHVALA

Zahvala za nastanek diplomskega dela gre moji mentorici prof. dr. Janji Vaupotič za izredno voljo pri vodenju projekta. Hvala tudi njenima sodelavkama Asti Gregorič, univ. dipl. inž. geol. in Mateji Smerajec, univ. dipl. inž. kem. inž., hvala dr. Krzysztofu Kozaku, dr. Jadwigi Mazur, mag. Dominiku Grządzielu, Gregorju Plestenjaku, univ. dipl. inž. agr., Andreju Vončini, univ. dipl. inž. agr. in prof. dr. Ivanu Kobalu.

POVZETEK

V diplomskem delu obravnavam koncentracije radona in ogljikovega dioksida v talnem zraku na dveh globinah v vrtinah na treh lokacijah z različnimi litološkimi podlagami (Sedraž, Ponikve in Črnotiče). Meritve sem izvedel na trinajstih točkah v pravilni mreži 20 m × 20 m. Na vsakem mestu sem jih ponovil trikrat. Vzorce sem zajemal in analiziral z opremo Centra za radon na Institutu Jožef Stefan. Iskal sem korelacije med koncentracijami radona med različnimi litološkimi podlagami in različnima globinama ter korelacijo med koncentracijama radona in ogljikovega dioksida in ugotavljal ponovljivost rezultatov. Meritve sem izvajal poleti v obdobju stabilnega vremena po vsaj petih zaporednih dneh brez dežja. Najvišje koncentracije radona sem izmeril v Črnotičah (karbonati – goli kras), sledi Sedraž (klastiti) in najnižje v Ponikvah (karbonati – pokriti kras). Pri nekaterih meritvah sem dobil veliko sipanje rezultatov, posebej v Sedražu, najverjetneje zaradi strukture tal. Dobro korelacijo med koncentracijama ogljikovega dioksida in radona sem opazil v primerih, ko med koncentracijami na različnih točkah ni bilo velikih razlik. Ponovljivost rezultatov je bila zadovoljiva, v Sedražu je bila dobra le na manjši globini. V Ponikvah sem samo v prvi meritvi dobil razumljive rezultate na obeh globinah, v drugi pa mi je meritev delno pokvarila pokošena trava. V Črnotičah sem dobil zelo dobre rezultate, v vročem vremenu višje kot v oblačno-vetrovnem.

Ključne besede: radon, ogljikov dioksid, talni zrak, pravilna mreža, litologija

SUMMARY

My graduation thesis deals with radon and carbon dioxide in soil gas at two depths on three sites with different lithology (Sedraž, Ponikve in Črnotiče). Measurements took place in thirteen points arranged in a regular 20 m × 20 m grid. Gas sampling and analysis were carried out with the equipment of the Radon Center at the Jožef Stefan Institute. At each site, measurements were repeated three times. I was seeking correlations between concentrations of radon on different lithological grounds and at different depths as well as correlations between concentrations of radon and carbon dioxide, and evaluated the reliability and repeatability of results. Measurements were performed during periods of stable weather, after at least five days without rain. The highest concentrations of radon were found in Črnotiče (carbonate rocks – uncovered karst), followed by Sedraž (clastic rocks) and lowest, in Ponikve (carbonate rocks – covered karst). Sometimes, results differed substantially from point to point, especially in Sedraž, presumably due to soil structure. Correlation between concentrations of carbon dioxide and radon was well expressed in cases, where radon concentrations at points in the grid were similar. Repeatability was rarely good: in Sedraž, only at shallow depth. In Ponikve, results of the first measurement were reasonable at both depths, but in second, they were irregular, presumably because of the grass cut the evening before and lying on the ground overnight. In Črnotiče I obtained regular results, higher on a hot day than on a cloudy and windy day.

Key words: radon, carbon dioxide, soil gas, regular grid, lithology

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 Splošno.....	1
1.2 Cilji diplomskega dela.....	2
2 TEORETIČNI DEL	3
2.1 Radioaktivnost.....	3
2.2 Radon in njegove lastnosti.....	4
2.3 Izvor radona.....	6
2.3.1 Radon v naravi.....	6
2.3.2 Radon v bivalnem okolju.....	9
2.3.3 Učinki radona na človeka.....	9
2.3.4 Radon v Sloveniji.....	10
2.4 Geološki podatki.....	11
2.4.1 Lokacija Sedraž.....	11
2.4.2 Lokacija Ponikve.....	12
2.4.3 Lokacija Črnotiče.....	13
3 EKSPERIMENTALNI DEL	14
3.1 Opis lokacij.....	14
3.1.1 Sedraž.....	14
3.1.2 Ponikve.....	14
3.1.3 Črnotiče.....	15
3.2 Metodologija meritev.....	16
3.2.1 Cev za zajemanje vzorcev zraka.....	17
3.2.2 Meritve radona v tleh.....	18
3.2.3 Meritve ogljikovega dioksida v tleh.....	18
3.2.4 Meritve radona v zgradbah.....	18
3.2.5 Meritve ekshalacije radona in prepustnosti tal.....	18
3.3.2 Ogljikov dioksid.....	23
4. REZULTATI IN RAZPRAVA	24
4.1 Koncentracije radona v talnem zraku in v zaprtih prostorih.....	24
4.1.1 Klastiti (lokacija Sedraž).....	24
4.1.2 Karbonati.....	27
4.1.3 Notranji zrak.....	31
4.2. Primerjave rezultatov.....	32
4.2.1 Primerjava koncentracij radona in ogljikovega dioksida na različnih globinah.....	32
4.2.2 Prostorska primerjava koncentracij radona.....	45
5 ZAKLJUČKI	50
6 VIRI	51

SEZNAM PREGLEDNIC

Preglednica 1: Rezultati meritev na lokaciji Sedraž dne 31. 5. 2011.....	24
Preglednica 2: Rezultati meritev na lokaciji Sedraž dne 1. 6. 2011.....	25
Preglednica 3: Rezultati meritev na lokaciji Sedraž dne 11. 7. 2011.....	26
Preglednica 4: Rezultati meritev na lokaciji Ponikve dne 7.7.2011.....	27
Preglednica 5: Rezultati meritev na lokaciji Ponikve dne 8.7.2011.....	28
Preglednica 6: Rezultati meritev na lokaciji Črnotiče dne 3. 6. 2011.....	29
Preglednica 7: Rezultati meritev na lokaciji Črnotiče dne 23. 6. 2011.....	30
Preglednica 8: Aritmetične srednje vrednosti (AM) koncentracij radona (C_{Rn}) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2}) glede na litološko enoto na globinah 50 in 80 cm na lokacijah Sedraž in Ponikve ter na globinah 30 in 50 cm na lokaciji Črnotiče.....	30
Preglednica 9: Koncentracije radona (C_{Rn}) v zraku okoliških stanovanjskih hiš, leto izgradnje hiše ter talna izolacija na lokacijah Sedraž in Ponikve.....	31

SEZNAM SLIK

Slika 1: Uranov, aktinijev in torijev razpadni niz.....	5
Slika 2: Rast radonovih razpadnih produktov iz radona.....	6
Slika 3: Prehajanje radona iz zemlje v zunanji in notranji zrak.	7
Slika 4: Shematski prikaz možnih poti radona po nastanku iz radija.....	8
Slika 5: Litološka karta Slovenije.....	11
Slika 6: Izsek geološke mape merilnega mesta Sedraž in neposredne okolice.....	12
Slika 7: Izsek geološke mape merilnega mesta Ponikve in neposredne okolice.....	13
Slika 8: Izsek geološke mape merilnega mesta Črnotiče in neposredne okolice.....	13
Slika 9: Lokacija Sedraž.....	14
Slika 10: Lokacija Ponikve.....	15
Slika 11: Lokacija Črnotiče.....	15
Slika 12: Mreža meritev s trinajstimi točkami od 0 do 12.....	16
Slika 13: Cev za jemanje vzorcev zraka in kovinska glavica.....	17
Slika 14: Črpanje vzorca talnega zraka.....	17
Slika 15: Shematski prikaz sistema za merjenje ekshalacije radona iz tal.	19
Slika 16: Shematski prikaz sistema za merjenje prepustnosti tal.....	19
Slika 17: Alfa scintilacijski celici volumna 0,31 dm ³	20
Slika 18: Alfa scintilacijski celici volumna 0,70 dm ³	21
Slika 19: Alfa scintilacijski merilnik PRM-145.....	21
Slika 20: Črpalka zraka AlphaPump.....	22
Slika 21: Črpalka zraka Vacutech.....	22
Slika 22: Merilnik Testo 435-2 s sondo in zaščitnim cilindrom.....	23
Slika 23: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Sedraž na klastitih.....	33
Slika 24: Koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Sedraž na klastitih.....	34
Slika 25: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm na lokaciji Sedraž na klastitih.....	36
Slika 26: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 80 cm na lokaciji Sedraž na klastitih.....	37
Slika 27: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih.....	38
Slika 28: Koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih.....	39
Slika 29: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih.....	40
Slika 30: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 80 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih.....	41
Slika 31: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) na globini 30 cm in 50 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih.....	42
Slika 32: Koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 30 cm in 50 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih.....	43
Slika 33: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 30 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih.....	44
Slika 34: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih.....	44
Slika 35: Koncentracije radona (C_{Rn} / Bq m ⁻³) v zraku stanovanjskih hiš na litoloških podlagah klastiti (lokacija Sedraž) in karbonati – pokriti kras (lokacija Ponikve).	45

Slika 36: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m ⁻³) na klastitih na globini 50 cm na lokaciji Sedraž.....	46
Slika 37: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m ⁻³) na klastitih na globini 80 cm na lokaciji Sedraž.....	47
Slika 38: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m ⁻³) na karbonatih – pokriti kras na globini 50 cm na lokaciji Ponikve.....	48
Slika 39: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m ⁻³) na karbonatih – pokriti kras na globini 80 cm na lokaciji Ponikve.....	48
Slika 40: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m ⁻³) na karbonatih – goli kras na globini 30 cm na lokaciji Črnotiče.....	49
Slika 41: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m ⁻³) na karbonatih – goli kras na globini 50 cm na lokaciji Črnotiče.....	49

1 UVOD

1.1 Splošno

Radon (Rn) je radioaktiven žlahtni plin, ki v naravi nastaja v zemeljski skorji v treh razpadnih verigah (Slika 1) z α radioaktivno preobrazbo radija (Ra). V razpadni verigi urana (^{238}U) nastaja radon (^{222}Rn , $t_{1/2} = 3,82$ dni), aktinija (^{235}U) aktinon (^{219}Rn , $t_{1/2} = 3,9$ s) in torija (^{232}Th) toron (^{220}Rn , $t_{1/2} = 55,6$ s) (Nero, 1988). Za razliko od preostalih radionuklidov v razpadnih verigah, ki so kovine, so radonovi izotopi plini, in vsi sledijo α , β ali γ radioaktivni preobrazbi. Največ raziskav je namenjenih ^{222}Rn , ki ima najdaljši razpolovni čas in ga zato najdemo tudi v bivalnem in delovnem okolju. Kar polovico letne doze sevanja dobimo od radona in njegovih razpadnih produktov (RnDP) (UNSCEAR, 2000). Zato ni naključje, da posvečamo meritvam radona v bivalnem in delovnem okolju veliko pozornost, v zadnjem času pa tudi meritvam radona v talnem zraku (tako imenovani radonski potencial ali radonski indeks) od koder vstopa v zgradbe. Ker je ^{222}Rn tudi predmet moje raziskave, se bom v nadaljevanju osredotočil na ta izotop.

Ker nastaja radon v zemeljski skorji, najdemo najvišje koncentracije v talnem zraku, običajno od 100 do 500 Bq m^{-3} (merjeno do globine 1 m). Radon potuje (migrira) v talnem zraku proti površini z difuzijo na krajše razdalje in z advekcijo na daljše. Hitrost migracije znatno pospeši prisotnost nosilnih plinov (N_2 , CO_2 , CH_4) ali termalne vode. Meritve radona in ogljikovega dioksida kot njegovega nosilnega medija kažejo korelacijo koncentracij teh dveh plinov (Fujiyoshi in sod., 2009; Zimmer in Erzinger, 2003). V ozračju se radon hitro razredči in koncentracija v zunanjem zraku redko preseže 50 Bq m^{-3} . Drugače je v zaprtih prostorih, kot so domovi in delovni prostori. Če v zgradbi tla in stene, ki mejijo na podlago - zemljišče, niso dobro izdelane in izolirane, prihaja radon v prostor. V notranjem zraku so koncentracije običajno do nekaj 100 Bq m^{-3} , lahko pa v nekaterih primerih dosežejo tudi do nekaj 1000 Bq m^{-3} .

Meritve radonskega potenciala so zelo zahtevne in kompleksne ter jih je na ravni države v zadovoljivem obsegu do sedaj opravila le peščica držav. Med njimi izstopata Švedska (EC, 2005) in Nemčija (Kemski in sod., 2001), ki sta kategorizirali zemljišča tako, da glede na potencial radona v tleh zahtevata različne preventivne gradbene ukrepe za radonsko varne hiše. Problem izvajanja meritev je velika razlika v rezultatih tudi na razdaljah le nekaj metrov. Zaenkrat niso poenoteni niti kriteriji vzorčenja, kot so globina, trajanje in čas izvajanja meritev, izbira aparatur in tehnik. Na končne rezultate vpliva tudi mnogo naravnih dejavnikov, kot so lokalna mikroklima in anomalije v geološki podlagi. Zato nas je še pred samimi meritvami za izvedbo tega diplomskega dela skrbela ponovljivost rezultatov in posledično težave pri interpretaciji. Preden bomo v Sloveniji začeli z množičnimi meritvami radonskega potenciala, je potrebno kriterije poenotiti, in upam, da bo vsaj korak v to smer naredilo moje diplomsko delo.

Med države, ki so opravile sistematične meritve radona v najbolj gosti mreži na državnem nivoju sodi tudi Češka (Neznal in sod., 2004). V Sloveniji so meritve radonskega potenciala opravili na približno 140 merskih točkah po vsej državi, kar pa daje zaenkrat le orientacijsko sliko (Vaupotič in sod., 2008). Raziskave radona pri nas so bile dolga leta usmerjene predvsem v preiskovanje delovnih in bivalnih prostorov, šele v zadnjem času pa je v ospredju radonski potencial.

Z zdravstvenega vidika je najbolj pomemben radon v zaprtih prostorih. Tu se lahko zaradi omejenega prezračevanja kopiči in doseže visoke koncentracije. Raziskave kažejo, da radon in njegovi razpadni produkti v zaprtih stanovanjskih prostorih prispevajo k povečanemu tveganju raka na pljučih (Jacobi, 1996). Zato poskušamo v bivalnih in delovnih prostorih

zagotoviti čim nižje koncentracije radona, večina razvitih držav pa ima zakonsko določene mejne koncentracije. V Sloveniji je zgornja dopustna meja za koncentracijo radona v letnem povprečju za domove 400 Bq m^{-3} in za delovne prostore 1000 Bq m^{-3} (Ur. l. RS, št. 49/2004).

Načeloma bi izmerjene koncentracije radona v zemlji lahko uporabili za napovedovanje tistih v zaprtih prostorih, a raziskave kažejo, da so vzorčne zveze med njimi mnogokrat šibke. Ob močno povečanih koncentracijah v zemlji se povečajo tudi tiste v zaprtih prostorih in obratno, a faktor povečanja (ali upadanja) je v zemlji precej večji (Albering in sod., 1996; Varley in Flowers, 1998; Kemski in sod., 1996). Poleg geofizikalnih, geokemijskih in vremenskih dejavnikov pri tem ne smemo zanemariti tipa stavbe in kakovosti gradbene izvedbe.

1.2 Cilji diplomskega dela

V svojem diplomskem delu sem se osredotočil na raziskavo radona v talnem zraku. V ta namen sem izvajal meritve radona na trinajstih točkah v pravilni mreži na dveh globinah na dveh različnih litoloških podlagah (karbonati in klastični sedimenti). Dodaten parameter, ki sem ga meril, je ogljikov dioksid, nosilni plin za radon. Na obeh litoloških podlagah sem dodatno izmeril koncentracije radona še v nekaj hišah v neposredni bližini naših mrež.

Ker so meritve radona v talnem zraku zelo kompleksne in zahtevne, so načini in kriteriji vzorčenja ter optimizacija merilnih tehnik še vedno v fazi raziskovanja in preizkušanja. Upam, da bodo rezultati in dognanja mojega diplomskega dela vsaj korak v smeri boljšega poznavanja in razumevanja meritev radona v talnem zraku v Sloveniji.

Konkretnije, po analizi rezultatov vseh meritev sem skušal odgovoriti na naslednja vprašanja:

- v kolikšni meri vpliva globina vrtine na koncentracijo radona in kakšne so razlike med koncentracijami radona med dvema različnima globinama
- kakšna je ponovljivost rezultatov meritev pri podobnih meteoroloških razmerah
- kakšna je korelacija med koncentracijo radona in ogljikovega dioksida
- kakšne so prostorske variacije radona znotraj izbranih mrež
- kolikšne so razlike v koncentracijah radona med dvema različnima litološkima podlagama v talnem zraku kot tudi v nekaj izbranih okoliških zgradbah
- kolikšno bi bilo najnižje število meritev za zadovoljivo natančno podajanje koncentracije radona na posamezni merski točki
- ali hiter pregled radona v zraku manjšega števila hiš s podobnimi karakteristikami kaže razliko med litološkima podlagama

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Radioaktivnost

Radioaktivnost je spontan pojav, v katerem se nestabilno atomsko jedro preobrazi v stabilnejšega, in obenem seva višek energije v obliki delcev ali elektromagnetnega valovanja. Število atomov N radioaktivnega jedra se zaradi te preobrazbe s časom manjša. Hitrost preobrazbe matematično zapišemo z enačbo:

$$A = -dN/dt = \lambda N \quad (1)$$

v kateri je λ konstanta hitrosti preobrazbe in ima enoto s^{-1} . Hitrost preobrazbe imenujemo tudi aktivnost A , ki ima enoto 1 Bq, kar ustreza eni preobrazbi v eni sekundi.

Če diferencialno enačbo 1 integriramo, dobimo:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda \cdot t} \quad (2)$$

N je število radioaktivnih jeder, ki je po preteku časa t ostalo od prvotnega števila jeder N_0 .

Podobno kot za število jeder v enačbi 2, velja glede na enačbo 1 tudi za aktivnost:

$$A = A_0 \times e^{-\lambda \cdot t} \quad (3)$$

A_0 je aktivnost v času $t = 0$ in A aktivnost v času $t = t$.

Iz zgornje enačbe lahko izpeljemo zvezo za razpolovni čas, to je čas, v katerem je padla aktivnost z vrednosti $A = A_0$ na vrednost $A = A_0/2$:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad (4)$$

Poznamo tri glavne vrste radioaktivnih preobrazb: alfa (α), beta (β) in gama (γ).

Pri preobrazbi α se nestabilno jedro preobrazi v stabilnejšega in pri tem sprosti delec α , ki je helijevo jedro. Tako ima novonastalo jedro 2 protona in 2 nevtrona manj od prvotnega jedra, torej masno število manjše za 4.

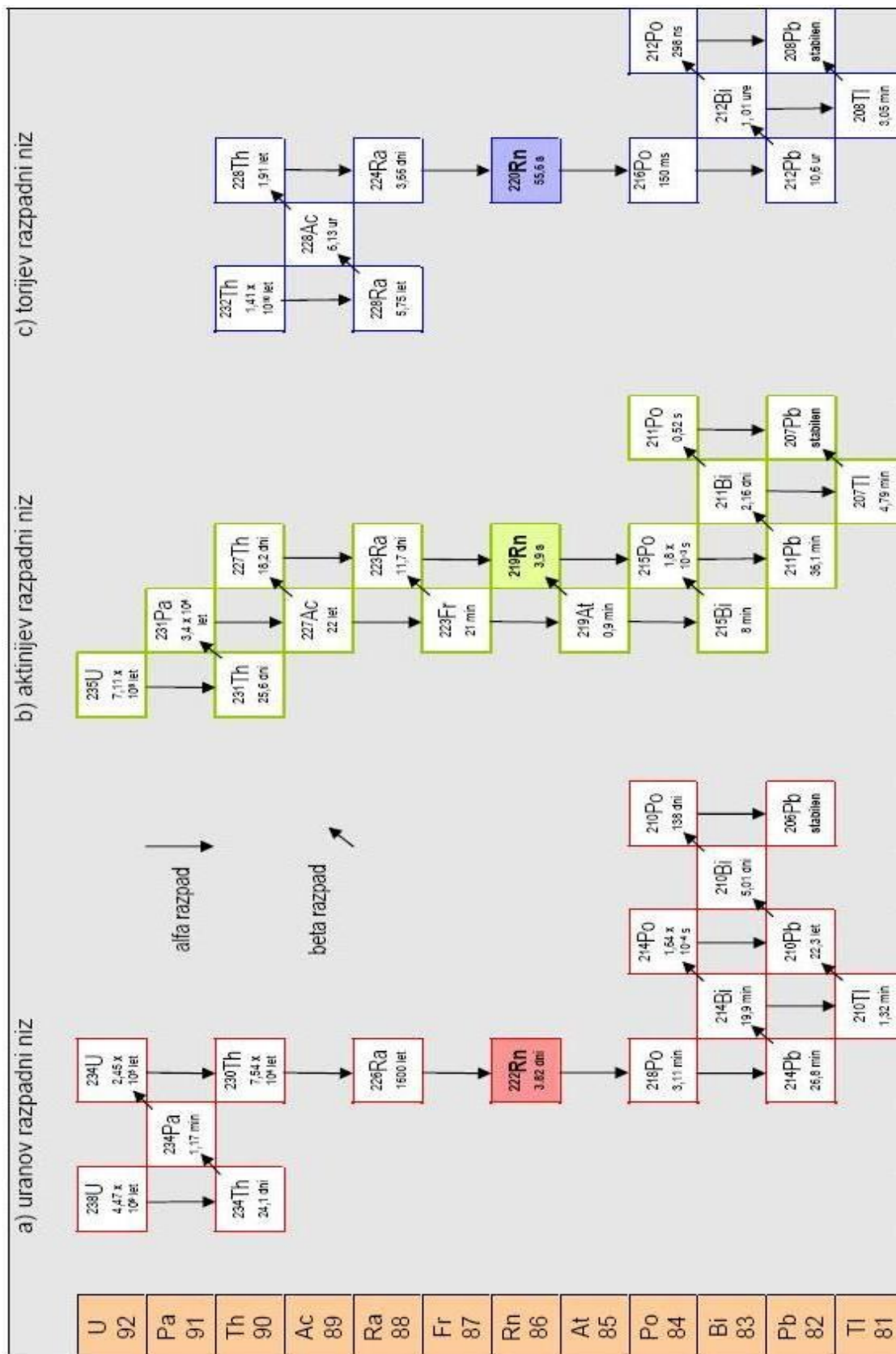
Poznamo dve vrsti preobrazbe β . Pri preobrazbi β^- se v nestabilnem jedru 1 nevtron spremeni v proton, delec β^- (elektron z nabojem 1) in antinevtrino. Tako ima novonastalo jedro vrstno število za 1 višje od prvotnega in nespremenjeno masno število. Pri preobrazbi β^+ se v nestabilnem jedru 1 proton spremeni v nevtron, delec β^+ (elektron z nabojem +1) in nevtrino. Tako ima novonastalo jedro vrstno število za 1 manjše in nespremenjeno masno število.

Jedra, ki nastajajo pri preobrazbah α in β , so pogosto energijsko vzbujena; v osnovno stanje preidejo s sevanjem γ , ki je elektromagnetno valovanje kratkih valovnih dolžin. Zato se pri preobrazbah γ ne spremeni niti vrstno niti masno število jedra.

2.2 Radon in njegove lastnosti

Radon je radioaktiven žlahtni plin. Vrelišče ima pri temperaturi 211,35 K, tališče pa pri 202,15 K. Pri sobni temperaturi 293,15 K in normalnem zračnem tlaku 101,3 kPa je brezbarven, brez vonja, okusa in ima gostoto 9,73 g/cm³.

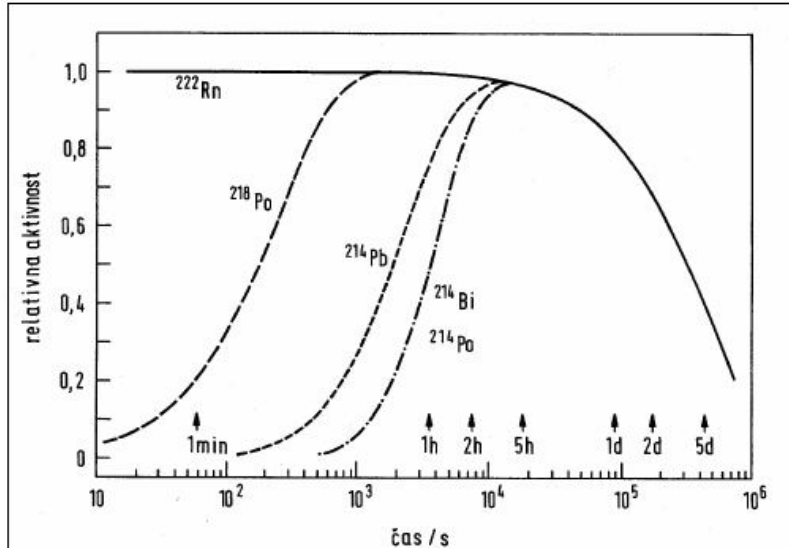
Trije najpomembnejši radonovi izotopi v naravi so radon (²²²Rn), aktinon (²¹⁹Rn) in toron (²²⁰Rn). Nastopajo vsak v svoji razpadni verigi – radon v uranovi (²³⁸U), aktinij v aktinijevi (²³⁵U) in toron v torijevi (²³²Th) (Vaupotič in Kobal, 1997) (Slika 1). V svojem diplomskem delu obravnavam izotop radon ²²²Rn.



Slika 1: Uranov, aktinijev in torijev razpadni niz. (Zupancič, 2007; cit. po Vaupotič, 1995)

Po α -preobrazbi radona nastanejo štiri kratkoživi razpadni produkti (slika 1): ^{218}Po (preobrazba α , $t_{1/2} = 3,11$ min), ^{214}Pb (preobrazbi β in γ , $t_{1/2} = 26,8$ min), ^{214}Bi (preobrazbi β in

γ , $t_{1/2} = 19,9$ min) in ^{214}Po (preobrazba α , $t_{1/2} = 164$ μs). V mirnem zraku se po približno treh urah lahko vzpostavi radioaktivno ravnotežje med radonom in njegovimi kratkoživimi razpadnimi produkti, kar pomeni, da je po tem času aktivnost vsakega produkta enaka aktivnosti radona (Slika 2).



Slika 2: Rast radonovih razpadnih produktov iz radona (Vaupotič, 2002).

Kot radioaktiven žlahtni plin ima radon svojstvene lastnosti, zaradi katerih je pogosto študiran element. Razlog za večino raziskav radona so njegovi zdravju škodljivi učinki. Po drugi strani pa ga v nekaterih znanstvenih disciplinah uporabljajo kot koristno raziskovalno orodje. Zaradi radioaktivnosti je spodnja meja zaznavnosti pri meritvah nizka. Ker je žlahten, kemijsko ne reagira z medijem, skozi katerega prehaja. Kot plin je mobilen in potuje na daljše razdalje tako v zemeljski skorji kot v vodi in v atmosferi. Seveda določa dolžino njegove poti njegova radioaktivnost, zaradi katere se število njegovih atomov s časom manjša. Našteto mu omogoča zelo raznoliko uporabo v znanosti – kot sledilo pri študiju tokov zračnih mas in morske vode, pri iskanju izvirov sladke vode na morskem dnu, kot znanilec potresov in vulkanskih izbruhov, kot indikator prisotnosti določenih mineralov, kot pokazatelj prepustnosti geološke podlage.

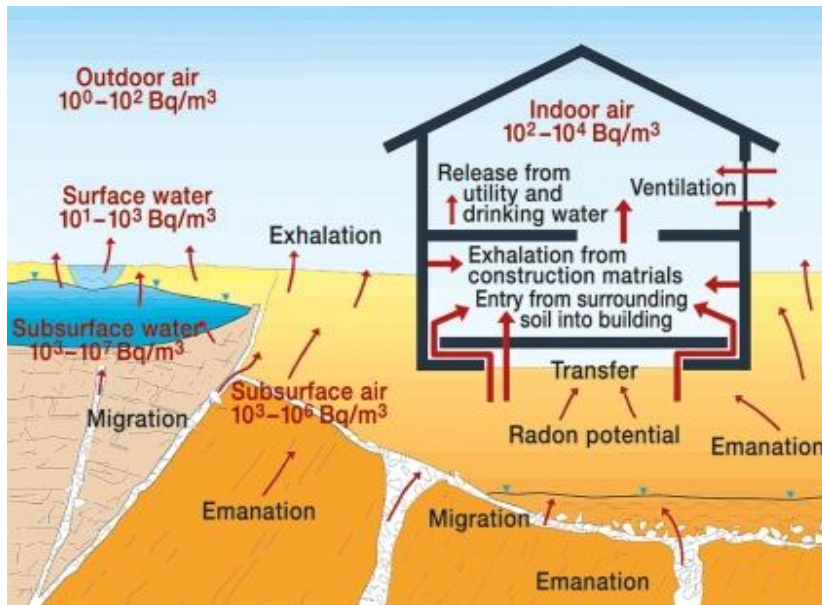
2.3 Izvor radona

2.3.1 Radon v naravi

Tla so dinamičen sistem, sestavljen iz trdih delcev (mineralni delci, organska snov), talne raztopine (voda z raztopljenimi snovmi) in talnih plinov. Mineralni delci in organska snov nista odvisna od trenutnih spreminjajočih se razmer, ampak sta posledica geološke evolucije in se spreminjata v daljših časovnih obdobjih – od nekaj desetletij do tisočletij (Stritar, 1991). Na drugi strani pa se delež vlage in zraka v tleh lahko ves čas spreminja glede na meteorološke in mikroklimatske pogoje. Med trdnimi talnimi delci se v splošnem nahajajo pore različnih velikosti in oblik. V njih se lahko zadržuje ali voda ali plini ali oboje.

Koncentracija radona v zunanjem zraku in bivalnih prostorih je posledica številnih dejavnikov v tleh (Slika 3). Sem spadajo vsebnost in koncentracija urana ter radija (Sroor in sod., 2001;

Baykara in sod., 2005), vlažnost (Bossew, 2003), poroznost tal (Jönsson et al., 1999) in prepustnost za pline. Ker nastaja radon v razpadni verigi urana, je njegova prisotnost pogojena z prisotnostjo radija in posledično urana. Uran je prisoten v praktično vseh kamninah, večinoma v koncentracijah od 12 do 36 Bq kg⁻¹, lahko pa tudi precej višjih, vse do 1200 Bq kg⁻¹. Podobno velja za radij (²²⁶Ra), katerega koncentracija je v zemlji v povprečju od 20 do 50 Bq kg⁻¹ (UNSCEAR, 1993).

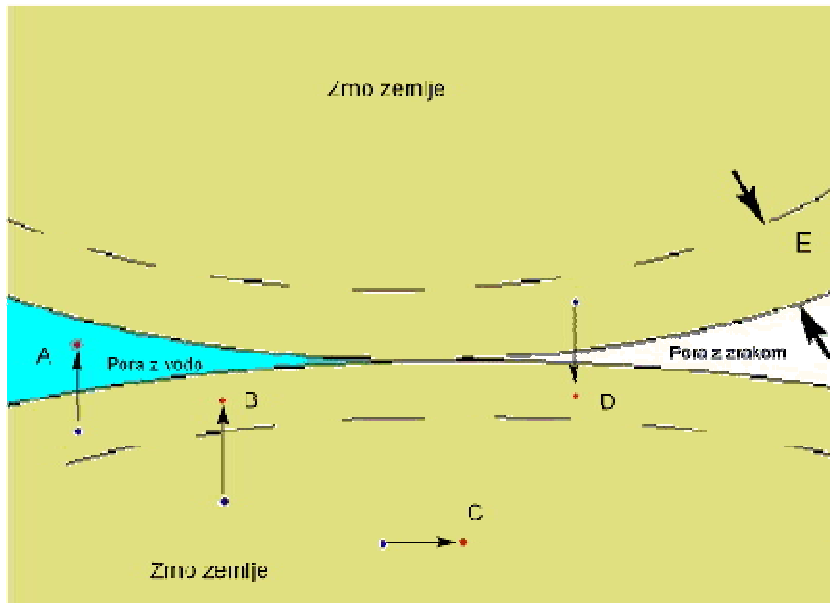


Slika 3: Prehajanje radona iz zemlje v zunanji in notranji zrak (Schmid in sod., 2010).

2.3.1.1 Emanacija radona

Če se atom ²²⁶Ra nahaja dovolj blizu površine zrnca kamnine, ima pri radioaktivnem razpadu njegov razpadni produkt ²²²Rn dovolj veliko odzivno energijo, da se sprostí (emanira) iz zrna v prostor med delci. S pomočjo te energije, v kolikor se nahaja dovolj blizu površja zrna, zapusti zrno in preide v pore kamnin, bodisi napolnjene z vodo ali z zrakom (Slika 4; A). V kolikor je ta pora premajhna in v njej radon ne porabi vse gibalne energije, lahko ta preide v sosednje zrno (Slika 4; D). Črtkasta črta na robu zrn (Slika 4; E) predstavlja mejo, znotraj katere lahko še novonastali radon z odzivno energijo doseže poro.

Nekateri atomi radona nastanejo predaleč od površine zrna in zato pore nikoli ne dosežejo (Slika 4; C). Izjemoma lahko radon, ki sicer ne zapusti zrna, pride dovolj blizu površine (Slika 4; B) in sčasoma lahko preide v poro s pomočjo difuzije (gradient koncentracije). Pojav, pri katerem radon preide v pore, imenujemo emanacija, količino radona, ki preide v pore pa imenujemo emanacijski koeficient (Nazarroff in sod., 1988). Emanacija radona je odvisna od vsebnosti urana-radija v kamnini, vrste kamnine in velikosti por, njene vlažnosti in temperature.



Slika 4: Shematski prikaz možnih poti radona po nastanku iz radija. Dve zrni zemlje sta v stiku, med njima so pore, bodisi napolnjene z zrakom, bodisi z vodo. Atom radija je označen z modro piko, atom radona pa z rdečo (Zupančič, 2007; cit. po Nazaroff in sod., 1988).

Velikost mineralnih delcev določa fizikalno-kemijske in biološke lastnosti tal. Vpliva na zračnost in prepustnost tal ter sposobnost zadrževanja vode. Prepustnost je sposobnost poroznega materiala, da prepušča tekočino in pline, kadar obstaja gradient tlaka. Po drugi strani je poroznost tal lastnost, ki nam pove kakšen je v tleh skupni volumen por glede na celoten volumen tal. Poroznost je odvisna od številčnosti, velikosti in oblike por ter od vlažnosti tal. Tla z manjšimi porami lahko zadržujejo večje količine kapilarne vode (se nahaja v mikrorazpokah) in higroskopske vode (tanka plast na posameznih zrnih zemlje) kot tista z večjimi, katera zadržujejo večjo količino prosto vezane vode (Suhadolc in sod., 2005).

Na posameznih zrnih zemlje tanko plast molekul vode tvorita tako kapilarna kot higroskopska voda in to povečuje emanacijo radona (vlažnost do okoli 15 – 20 %, pri višji se emanacija zmanjša) (Schumann in sod., 1992). Plast vode absorbira del odzivne energije atoma radona, ki to zrno zapušča, in zaradi zmanjšane energije ni več sposoben prodreti v sosednje zrno, zato obstane v pori. Ta tanka plast vode ne zmanjšuje bistveno pretoka zraka v tleh, saj predstavlja le tanek sloj na površini zrn, medtem ko pore v tleh ostajajo nezapolnjene (Nazaroff in sod., 1988).

2.3.1.2 Migracija radona

Radon je kemijsko inerten in kemijsko ne reagira z medijem, skozi katerega prehaja kar mu omogoča dobro mobilnost. V tleh se radon giba na dva načina, z difuzijo in s advekcijo. Z difuzijo se radonovi atomi gibljejo po načelu gradienta koncentracije – od mesta z višjo koncentracijo proti mestu z nižjo. S advekcijo pa potuje pod vplivom gradienta tlaka – od mesta z višjim tlakom k mestu z nižjim. V manj prepustnih tleh je transport radona pogostejši s difuzijo, v bolj prepustnih pa s advekcijo (Nero, 1988). Pri manj prepustnih tleh je pomemben kratek razpolovni čas radona. Transport skozi tla na daljše razdalje pride v poštev torej le s advekcijo in poteka predvsem s pomočjo nosilnih plinov, kot so CO₂, CH₄ ali N₂. Migracija je odvisna od geoloških, geofizikalnih in hidrometeoroloških parametrov (Etiope in Martinelli, 2002; Vaupotič in sod., 2007).

2.3.1.3 Ekshalacija radona

Pojav izhajanja radona na površje se imenuje ekshalacija. Neposredno je odvisna od emanacije radona, poroznosti in hidrometeoroloških dejavnikov. Če je poroznost velika, je potrebna večja množina vode, da se vse pore zapolnijo, in večja množina vode pomeni tudi večjo emanacijo radona iz zrn. A po drugi strani napolnjenost por z vodo pomeni počasnejše prehajanje radona iz tal proti površju. Difuzijski koeficient radona v vodi je $1,97 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ in ob razpolovnem času 3,82 dneva lahko v z vodo nasičenih tleh z difuzijo prepotuje le nekaj centimetrov, medtem ko v suhih tleh (difuzijski koeficient radona v zraku $2,10 \times 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) lahko več metrov (Stranden in sod., 1984; Schumann in sod., 1992). Količina padavin določa predvsem vlago v tleh blizu površja, tudi tu je emanacija najvišja pri vlažnosti okoli 15 – 20 %. Če vlažnost naraste, je debelina vodnega sloja okoli zrn večja in večji delež radona lahko ostane v vodi v porah in transport proti površju se zmanjša (Singh in Virk, 1996; Fujiyoshi in sod., 2006). Spremembe v zračnem tlaku so pomembne, če vemo, da je pomemben vir transporta radona advekcija po principu gradienta zračnega tlaka. Ker je v plasteh tik pod površino tal navadno največja količina biomase (korenine, itd.), je to območje najbolj prezračeno in posledično količina radona nižja.

2.3.2 Radon v bivalnem okolju

Koncentracije radona v bivalnih prostorih so odvisne od naravnih dejavnikov in tistih, ki so povezane s človekovim delovanjem. Med naravne spadajo tip kamnine in njena prepustnost ter kemična sestava z vsebnostjo urana (in radija), na mestu kjer stavba stoji (Popit in Vaupotič, 2002). V Sloveniji so to najpomembnejši faktorji (Vaupotič in sod., 1994). Na koncentracije vplivajo še vremenski pogoji na območju – padavine, vetrovnost, zračni tlak, temperatura, itd. Med tiste, ki jih povezujemo s človekom, spadajo predvsem način in kakovost gradnje ter njegove bivalne navade. Koncentracijo radona višajo gradbeni materiali s povišano vsebnostjo urana in radija, gradnja stavb na neprimerni podlagi (elektrofiltrski pepel in žindra, rudniška jalovina), voda v gospodinjstvu, iz katere se radon sprošča v zrak, radon v zemeljskem plinu, ki se pri gorenju sprošča v zrak, neprezračenost prostorov, itd (Vaupotič, 2003). V stavbah je načeloma temperatura višja kot v neposredni bližini in zato je toplejši zrak tudi redkejši. To v stavbah povzroči podtlak in ustvari gradient za transport okoliškega in talnega zraka (v katerem je radon) v stavbo.

Radon preide v zrak bivalnih prostorov v največji meri iz tal, na katerih stoji stavba. Ostali viri radona, kot so zunanji zrak, gradbeni material, gorenje zemeljskega plina in raba vode, so manj pomembni oziroma skoraj zanemarljivi. Zato je pomemben način gradnje, še posebej kakovost temeljev in tistih sten, ki so v stiku s tlemi. Ob večji koncentraciji urana v tleh je potrebna večja pozornost radonsko varni gradnji. Zato naj bi bile koncentracije radona in prepustnost prsti (Wiegand, 2001; Neznal in Šmarda, 1996) upoštevane pri načrtovanju in izgradnji bivalnih stavb. V Nemčiji je predlagana lestvica ogroženosti zaradi radonskega potenciala: nizka ($<10 \text{ kBq m}^{-3}$), srednja ($10\text{--}100 \text{ kBq m}^{-3}$), povišana ($100\text{--}500 \text{ kBq m}^{-3}$) in visoka ogroženost ($>500 \text{ kBq m}^{-3}$) (Kemski in sod., 2001). Podobna je lestvica na Švedskem: nizka ($<10 \text{ kBq m}^{-3}$), normalna ($10\text{--}50 \text{ kBq m}^{-3}$) in visoka ogroženost ($>50 \text{ kBq m}^{-3}$) (EC, 2005). V Sloveniji takšne klasifikacije še ni (Vaupotič in sod., 2010a).

2.3.3 Učinki radona na človeka

Radon letno predstavlja v Sloveniji 36,5 % celotnega sevanja okolja, tako naravnega kot antropogenega izvora. Od skupno povprečne letne efektivne doze 2,4 mSv radon s svojimi

razpadnimi produkti prispeva 0,88 mSv. Preostali pomembnejši viri so kozmično in zemeljsko sevanje, medicina, notranje obsevanje in Černobil (Koželj in sod., 2006).

Radon vedno spremljajo njegovi kratkoživi razpadni produkti (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi in ^{214}Po), ki nastajajo z radioaktivnimi preobrazbami in se pojavljajo v zraku kot nanoaerosoli. V svetovnem merilu predstavljajo skupaj z radonom v povprečju več kot polovico celotne efektivne doze v na prebivalca (UNSCEAR, 2000) in so pomemben povzročitelj pljučnega raka, takoj za kajenjem cigaret (Darby in sod., 2005).

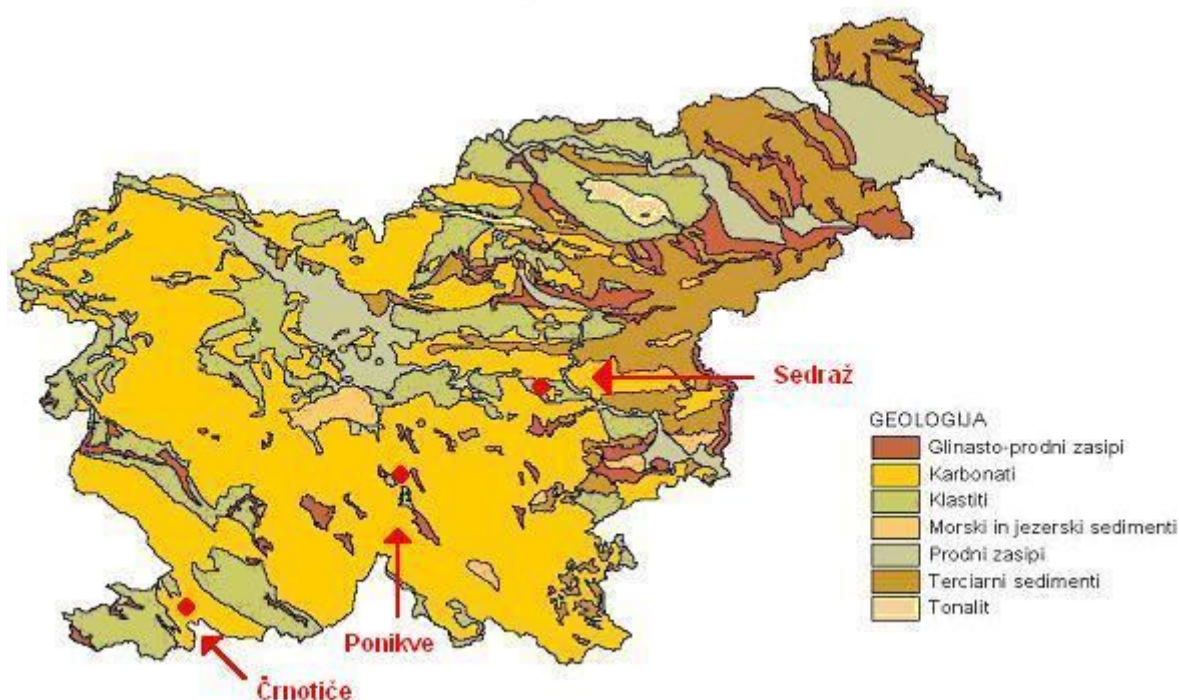
Sevanje povzroča fizikalne, kemične in biološke učinke. Radon vstopi v človeško telo predvsem z dihanjem. Sam po sebi človeku ni škodljiv, škodljivi so njegovi kratkoživi razpadni produkti, ki se filtrirajo v pljučih. Nalagajo se v pljučnem tkivu, kjer se ob njihovih radioaktivnih preobrazbah sprosti velika množina energije (predvsem ob preobrazbah ^{218}Po in ^{214}Po , ki sta sevalca alfa). Poškodbe tkiva lahko dolgoročno povečajo možnost nastanka pljučnega raka.

2.3.4 Radon v Sloveniji

V Sloveniji so bile meritve radona izvedene na nacionalnem nivoju v zunanjem zraku (60 merilnih mest), talnem zraku (140 merilnih mest), v domovih (1000 naključno izbranih) ter na delovnih mestih (v 730 vrtcih, 890 šolah, 25 bolnišnicah, glavnih 10 vodovodnih podjetjih, 10 večjih vinskih kletih) (Vaupotič, 2003).

Izmerjena povprečna letna koncentracija radona v zunanjem zraku je $14,9 \text{ Bq m}^{-3}$ (Vaupotič in sod., 2010b), povprečna letna koncentracija v domovih pa 54 Bq m^{-3} (Križman in sod., 1996).

Povprečna srednja vrednost koncentracije radona v talnem zraku na globini 80 cm celotne Slovenije je $45,1 \text{ kBq m}^{-3}$, izmerjena je bila v času stabilnega in suhega vremena v poletnih mesecih. Glede na glavne litološke enote (Slika 5) so bile povprečne koncentracije naslednje: glinasto prodni zasipi $68,2 \text{ kBq m}^{-3}$, karbonati $50,4 \text{ kBq m}^{-3}$, prodni zasipi $38,1 \text{ kBq m}^{-3}$, klastiti $26,4 \text{ kBq m}^{-3}$, morski in jezerski sedimenti $20,3 \text{ kBq m}^{-3}$ in terciarni sedimenti $19,6 \text{ kBq m}^{-3}$ (Vaupotič in sod., 2007).



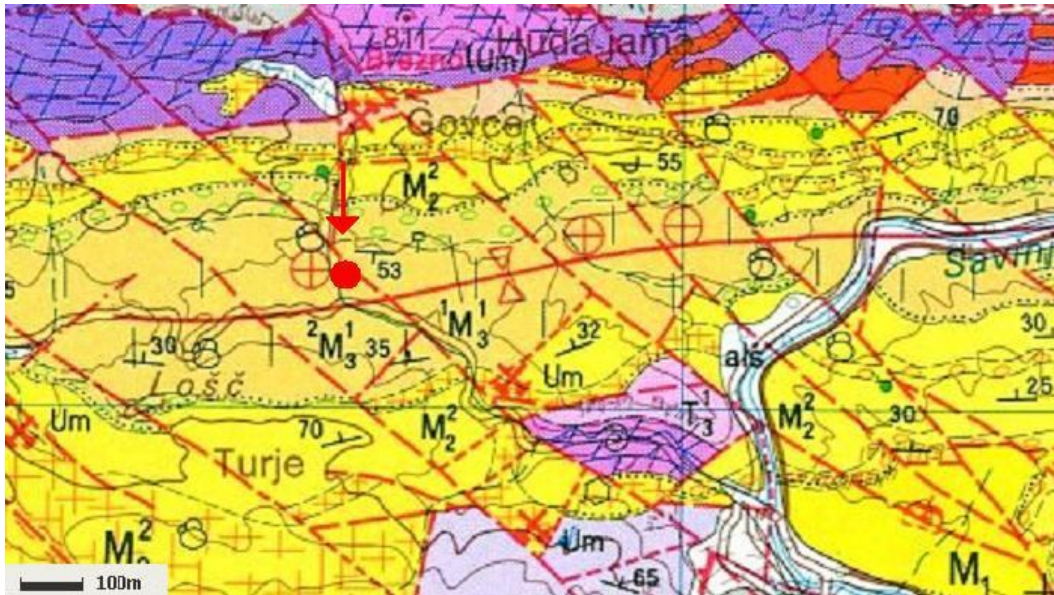
Slika 5: Litološka karta Slovenije (Geološki zavod Slovenije).

V okviru svojega diplomskega dela sem meritve opravil na klastitih (lokacija Sedraž) in na karbonatih (lokaciji Ponikve in Črnotiče), ki so označene na slikah od 6 do 8, v nadaljevanju pa podajam njihov podroben geološki opis.

2.4 Geološki podatki

2.4.1 Lokacija Sedraž

Prvo lokacijo, na kateri smo izvajali meritve, glede na geološko podlago uvrščamo med klastite, ki so se odlagali na območju Posavskih gub. Na tem območju so razvite miocenske plasti sarmatijske stopnje (M_3). (Slika 6).



Slika 6: Izsek geološke mape merilnega mesta Sedraž in neposredne okolice. Rdeča točka predstavlja natančno lokacijo meritve (Buser, 1979).

Na neposrednem območju našega merjenja se sarmatijske plasti pričenjajo s horizontom apnenčevega peščenjaka (${}^1M_3^1$), ki je podoben tortonijskemu, le da vsebuje manj prodnikov kislkih kamenin. V bazi teh plasti najdemo pravi bazalni konglomerat. Apnenčev peščenjak sestavlja pretežno drobni litotamniji in drugih grebenskih organizmov. Nad peščenjakom leži rjav meljast pretežno kremenov pesek (${}^2M_3^1$), ki se menjava s plastmi lističastega glinenega laporja (Buser, 1979). Na tej lokaciji so nad to matično kamnino razvita evtrična rjava tla na deluviju (Geodetski inštitut Slovenije, a).

2.4.2 Lokacija Ponikve

Druga merilna lokacija, ki se nahaja pri Ponikvah, je locirana na karbonatnih kamninah jurske starosti in sicer na zgornje liasnih in doggerskih skladih ($J_{1,2}$) (Slika 7). so razviti skoraj na vsem ozemlju kot skladovit temno siv do črn gost apnenec, ki se ponekad menjava s plastmi temno sivega gostega in oolitnega apnenca (Buser, 1974). Plasti jurske starosti so na vzhodni in zahodni strani ločene od plasti triasne in kredne starosti s prelomnima conama, ki potekata v dinarski smeri (SZ-JV). Debelina zgornjeliasnih in doggerskih skladov je 250 do 850 metrov (Buser, 1974). Na tej lokaciji so nad matično kamnino razvita rjava pokarbonatna tla na apnencu (Geodetski inštitut Slovenije, b).



Slika 7: Izsek geološke mape merilnega mesta Ponikve in neposredne okolice. Rdeča točka predstavlja natančno lokacijo meritve (Buser, 1974).

2.4.3 Lokacija Črnotiče

Tretja lokacija se prav tako nahaja na karbonatnih kamninah v okolici Črnotič v jugozahodnem delu Slovenije. Na tem območju je razvit alveolinsko-numulitni apnenec zgornje paleocenske in eocenske starosti (Slika 8) (Pleničar in sod., 1973). Na tem območju je talni sloj, z izjemo v vrtačah, zelo tanek, razvit v obliki rendzinastih tal (Geodetski inštitut Slovenije, c).



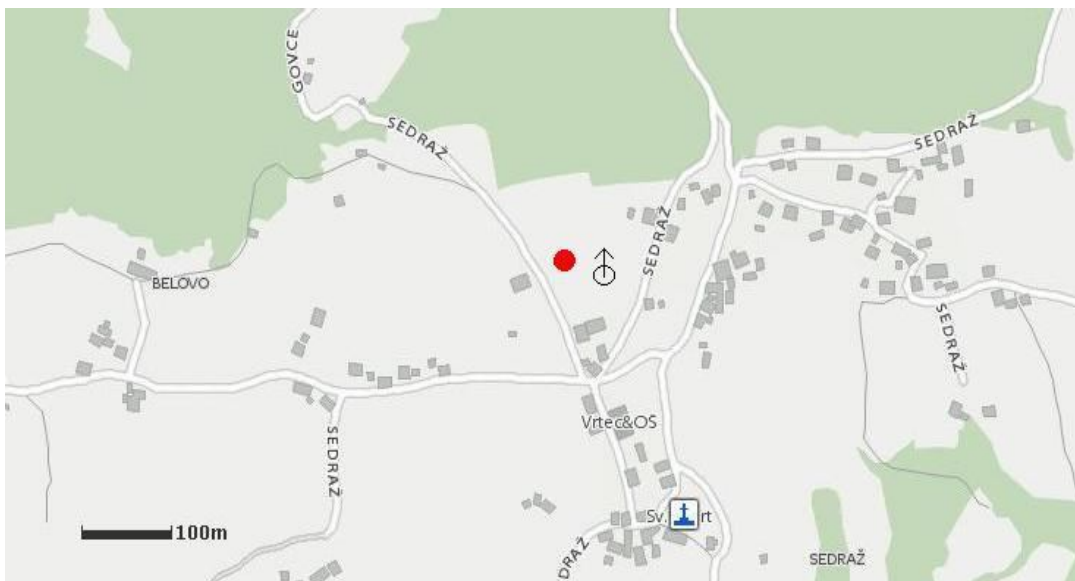
Slika 8: Izsek geološke mape merilnega mesta Črnotiče in neposredne okolice. Rdeča točka predstavlja natančno lokacijo meritve (Pleničar in sod., 1973).

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Opis lokacij

3.1.1 Sedraž

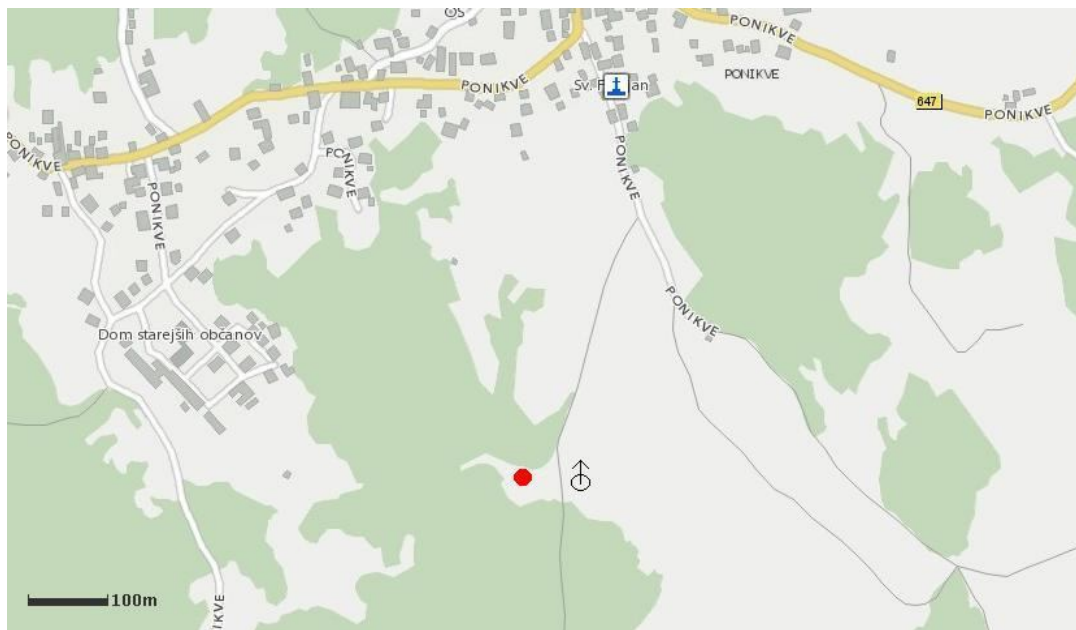
Lokacije meritve leži v kraju Sedraž v občini Laško (Slika 9). Ima zmerno kontinentalno podnebje s povprečno letno temperaturo 8 do 10 °C in letno višino padavin 1300 do 1400 mm (ARSO, 2006). Natančna lokacija je 46°8'47" severne zemljepisne širine in 15°10'24" vzhodne zemljepisne dolžine (iTouchMaps.com).



Slika 9: Lokacija Sedraž. Rdeča pika predstavlja natančno lokacijo meritve in smer puščice predstavlja orientacijo mreže meritev (glej Slika 12).

3.1.2 Ponikve

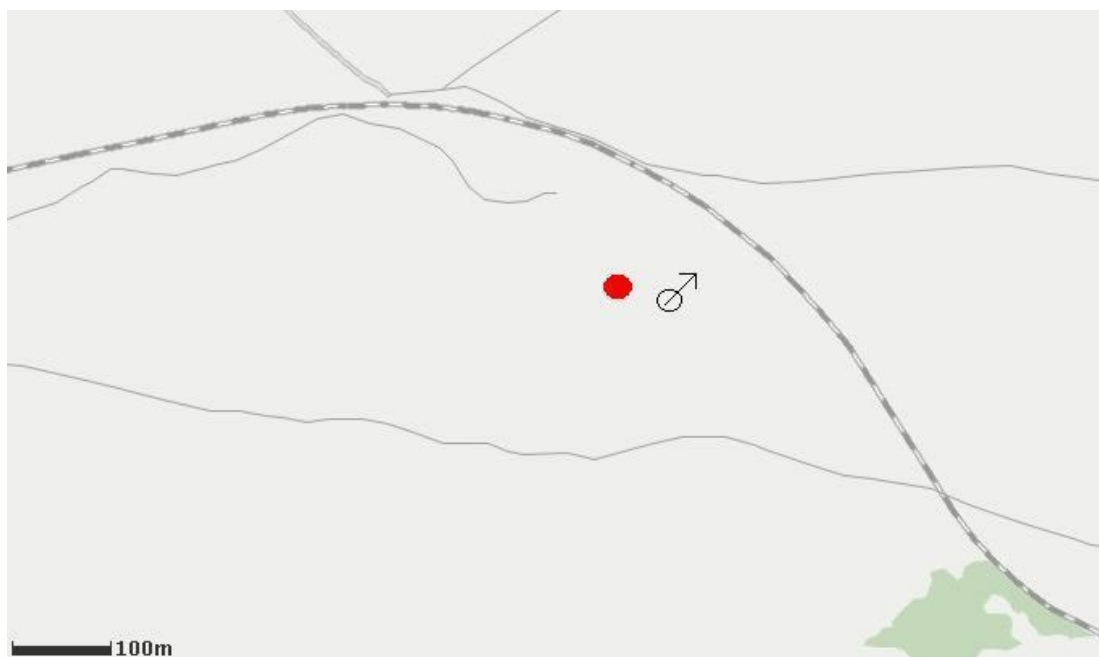
Lokacije meritve leži v kraju Ponikve v občini Dobropolje (Slika 10). Ima zmerno kontinentalno podnebje s povprečno letno temperaturo 8 do 10 °C in letno višino padavin 1400 do 1500 mm (ARSO, 2006). Natančna lokacija je 45°51'23" severne zemljepisne širine in 14°39'13" vzhodne zemljepisne dolžine (iTouchMaps.com).



Slika 10: Lokacija Ponikve. Rdeča pika predstavlja natančno lokacijo meritve in smer puščice predstavlja orientacijo mreže meritev (glej Slika 12).

3.1.3 Črnotiče

Lokacije meritve leži manj kot 2 kilometra zračne linije v smeri jug-vzhod-vzhod od kraja Črnotiče v Mestni občini Koper (Slika 11). Ima zmerno kontinentalno podnebje s povprečno letno temperaturo 10 do 12 °C in letno višino padavin 1400 do 1500 mm (ARSO, 2006). Natančna lokacija je 45°32'55" severne zemljepisne širine in 13°55'12" vzhodne zemljepisne dolžine (iTouchMaps.com).

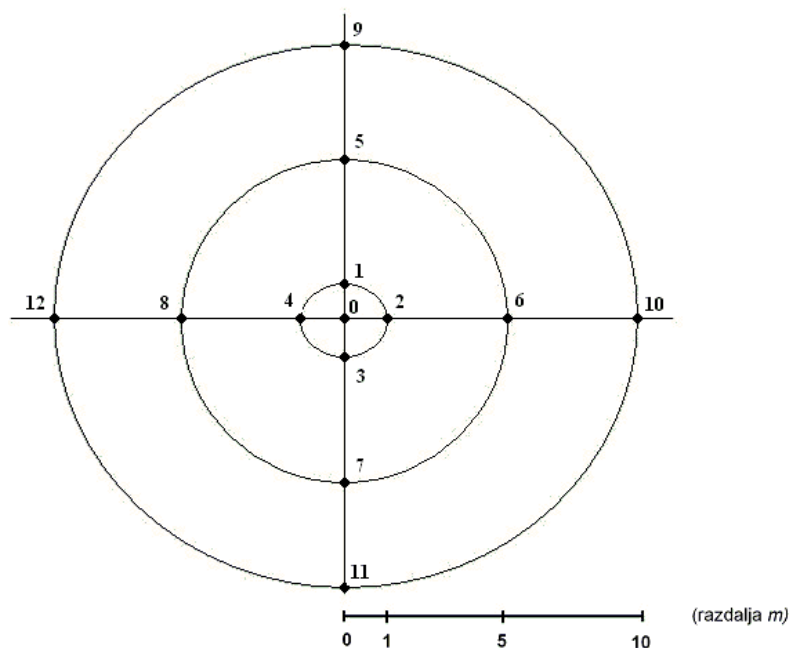


Slika 11: Lokacija Črnotiče. Rdeča pika predstavlja natančno lokacijo meritve in smer puščice predstavlja orientacijo mreže meritev (glej Slika 12).

3.2 Metodologija meritev

Na dveh različno prepustnih litoloških podlagah (klastiti in karbonati) sem na treh lokacijah (ena na klastitih in dve na karbonatih - na golem in pokritem krasu) meril radon znotraj pravilne mreže izmer 20 m × 20 m. Na vsakem merilnem mestu sem izbral sredinsko točko in nato po štiri točke v razdalji 1 m, 5 m in 10 m od nje, skupaj torej 13 točk v vsaki mreži (Slika 12). Na golem krasu sem zaradi pomanjkanja zemljine meritve izvajal v vrtači. Ta je bila velikosti približno 12 m × 15 m, zato sem zaradi manjšega prostora namesto na 13 točkah meril le na 9 (točke 0 do 8, Slika 12). Pri golem krasu je površje v veliki večini kamnito, za razliko od pokritega krasa, katerega površje v veliki večini pokriva zemlja ali preperelina (Gams, 1962). Meritve sem na vseh točkah opravil na globinah 50 cm in 80 cm oziroma na globinah 30 cm in 50 cm (na golem krasu), ker podlaga ni dopuščala jemanja vzorcev iz večjih globin (prisotnost kamnov).

Poleg koncentracije radona sem izmeril v talnem zraku tudi koncentracijo CO₂. Meritve sem izvedel v obdobju stabilnega in suhega vremena.



Slika 12: Mreža meritev s trinajstimi točkami od 0 do 12. Začetna je središčna točka ali točka 0, sledijo točke na oddaljenosti 1 m (1, 2, 3, 4), 5 m (5, 6, 7, 8) in 10 m (9, 10, 11, 12) od središča z začetkom na dvanajsti uri v smeri urinega kazalca.

Dodatno sem na obeh geoloških podlagah izbral nekaj bližnjih stanovanjskih zgradb približno podobne starosti in kakovosti gradnje, v katerih sem v zraku izmeril trenutne koncentracije radona z alfa scintilacijsko tehniko. Prostor je moral biti čim manj prezračen in v najnižjem delu stavbe, najraje v kletnih prostorih.

Rezultate sem statistično obdelal. Iskal sem korelacijo med radonom in CO₂, korelacijo med koncentracijami merjenih parametrov na dveh različnih globinah, korelacijo med koncentracijo radona v talnem zraku in v okoliških zgradbah ter opravil primerjavo med koncentracijami na obeh podlagah.

3.2.1 Cev za zajemanje vzorcev zraka

Odvzem vzorcev zraka za meritve radona sem opravljal tako, da sem na zahtevano globino zabil votlo kovinsko cev dolžine 105 cm, zunanega premera 12 mm in notranjega premera 10 mm. Na spodnjo odprtino cevi sem nataknil kovinsko koničasto glavico, da bi pri zabijanju v zemljo imela čim manjši upor in da zemlja ne bi zamašila cevi (Slika 13). Ko je bila cev na željeni globini, sem najprej s tenko železno žico skozi cev potisnil glavico še dodatne 2 do 3 cm globlje v zemljo, nato pa cev izvlekel za 1 do 2 cm, da bi talnemu zraku pri črpanju omogočili prosto pot v cev. Nato sem s prenosno črpalko AlphaPump (Slika 20) črpal vzorec talnega zraka v scintilacijsko celico 1,5 min s pretokom zraka $1 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ (Slika 14). Postopek sem na vsaki točki ponovil dvakrat, in sicer najprej na globini 50 cm in nato na globini 80 cm (oziroma 30 cm in 50 cm na golem krasu). Na lokaciji Sedraž sem meritve ponovil trikrat, na lokacijah Ponikve in Črnotiče pa po dvakrat.



Slika 13: Cev za jemanje vzorcev zraka in kovinska glavica.



Slika 14: Črpanje vzorca talnega zraka v scintilacijsko celico in preko merilnika CO_2 s pomočjo črpalke AlphaPump.

3.2.2 Meritve radona v tleh

Po vsaj treh urah po odvzetju vzorca, ko se je vzpostavilo radioaktivno ravnotežje med radonom in njegovimi razpadnimi produkti, sem aktivnost radona v scintilacijskih celicah izmeril na prenosnem alfa scintilacijskem merilniku PRM-145 (Ames, Ljubljana) v impulzih na minuto (imp min^{-1}) ter izračunal koncentracijo aktivnosti (Bq m^{-3}).

3.2.3 Meritve ogljikovega dioksida v tleh

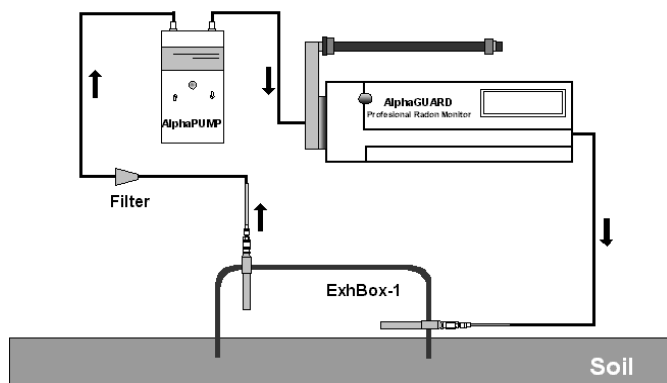
Koncentracijo CO_2 sem meril z merilnikom Testo 435-2 (Testo, ZDA) (Slika 22). Merilna sonda je bila v času črpanja talnega zraka v kovinski posodi valjaste oblike, ta pa je bila povezana z alfa scintilacijsko celico (Slika 14). Meritev je potekala v času črpanja talnega zraka (1,5 min) in nato še približno 5 minut po prenehanju črpanja ob nepredušno zaprti kovinski posodi. Rezultate meritev CO_2 sem preko namenskega programa *Confort Software Basic X35* (Testo, ZDA) prenesel na računalnik. Na merilnem mestu Črnotiče sem uporabil merilnik Li-840 (Licor, ZDA), ki ima podoben princip delovanja, a večje merilno območje.

3.2.4 Meritve radona v zgradbah

Na vseh litoloških podlagah, kjer sem opravljaj meritev, sem vzel tudi vzorce zraka v bivalnih stavbah v bližini. To sem opravljaj s 30-sekundnim ročnim črpanjem zraka v alfa scintilacijsko celico. Po vsaj treh urah, ko se je vzpostavilo ravnotežje med radonom in njegovimi razpadnimi produkti, sem vsebnost radona v scintilacijskih celicah izmeril na prenosnem alfa scintilacijskem merilniku PRM-145 (Slika 19).

3.2.5 Meritve ekshalacije radona in prepustnosti tal

Na nekaterih lokacijah sem meril tudi hitrost ekshalacije radona in prepustnost tal. Sistem za merjenje ekshalacije je bil sestavljen iz treh enot (Slika 15) – iz lovilnega lonca (exhalation box), ki sem ga položil na tla in se je v njem nabiral radon, ki je izhajal iz tal. Črpalka je zagotavljala pretok zraka iz lovilnega lonca v merilnik alphaguard (Genitron, Nemčija) in nazaj v lonec. Meritev je morala potekati vsaj 90 minut. Podatke sem prenesel na računalnik in izračunal hitrost izhajanja radona iz naklona krivulje (koncentracije radona v odvisnosti od časa).

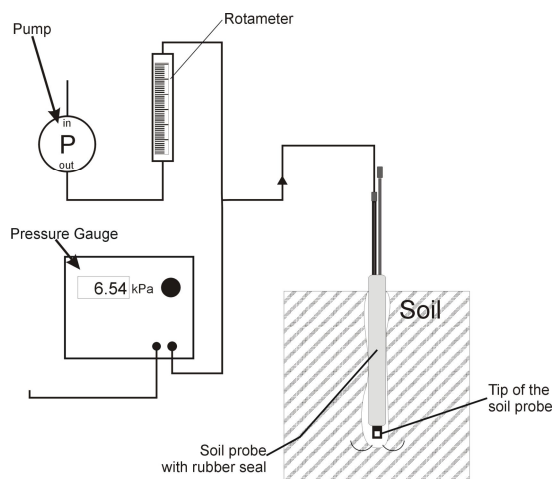


Slika 15: Shematski prikaz sistema za merjenje ekshalacije radona iz tal (Žunić in sod., 2006).

Pri merjenju prepustnosti tal sem v zabil v zemljo sondo na določeno globino in s črpalko črpal zrak preko merilnika tlaka (pressure gauge VDTP-105; območje 0 - 10 kPa) in merilnika pretoka zraka (rotameter; območje 0 – 1,0 dm³ min⁻¹) (Slika 16). Meril sem razliko tlaka in pretok zraka ter izračunal prepustnost z uporabo modificirane enačbe za Fickov zakon (Žunić in sod., 2006).

$$k = \mu \frac{1}{W} \frac{Q}{dP} \quad (6)$$

V enačbi predstavlja k prepustnost tal, μ dinamično viskoznost, W konstanto sonde (dobljeno z umeritvijo), Q pretok zraka in dP razliko tlaka.



Slika 16: Shematski prikaz sistema za merjenje prepustnosti tal (Žunić in sod., 2006).

3.3.1 Radon

Za meritve radona smo uporabili alfa (α) scintilacijsko tehniko, katere sestavni deli so alfa scintilacijske celice, alfa scintilacijski merilnik in črpalke za odvzem vzorcev in čiščenje celice.

3.3.1.1 Alfa scintilacijske celice

Alfa scintilacijske celice uporabljajo za merjenje radona od leta 1956. Metoda je zasnovana na merjenju celokupne aktivnosti alfa ^{222}Rn in njegovih kratkoživih razpadnih produktov ^{218}Po in ^{214}Po . Celice so iz različnih materialov, različnih oblik in velikosti, in imajo notranje stene, razen dna, ki je prozoren in služi za optični stik s fotopomnoževalko, prevlečene s scintilatorjem, to je cinkovim sulfidom, aktiviranim s srebrom - ZnS(Ag) . Ko delec α , ki nastane pri transformaciji radona ali katerega od njegovih razpadnih produktov, zadene cinkov sulfid, pride do sevanja svetlobe z valovno dolžino okrog 600 nm. Po treh urah po zajetju vzorca, ko se vzpostavi radioaktivno ravnotežje radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov, celico z vzorcem postavimo na scintilacijski števec. Tu fotopomnoževalka svetlobne signale pretvori v električne, jih ojača in prešteje. Ta metoda je aktivna in nam pove kakšna je trenutne koncentracije radona v zraku (Vaupotič in Kopal, 1997).

Pri delu sem za meritve radona v talnem zraku uporabil scintilacijske celice volumna $0,31 \text{ dm}^3$ (Quindos-Ponceta in sod., 2003), ki so prikazane na sliki 17, in scintilacijske celice volumna $0,70 \text{ dm}^3$ (Vaupotič in sod., 1992), ki so prikazane na sliki 18. Za meritve radona v hišah sem uporabil slednje.

Manjše celice (Slika 17) so izdelane iz pleksi stekla, na vrhu imajo dva kovinska zamaška, ki služita za odvzem vzorcev zraka in čiščenje celic. V notranjosti celic je plastična folija na katero je nanesen scintilator ZnS(Ag) .



Slika 17: Alfa scintilacijski celici volumna $0,31 \text{ dm}^3$.

Večje scintilacijske celice (Slika 18) so iz pločevine, dno je iz pleksi stekla. Tenka plast scintilatorja ZnS(Ag) je nanešena na notranje stene celice. Odprtini na vrhu predstavljata dve cevki, ena sega skoraj do dna celice, medtem ko druga le par centimetrov v celico. Cevki sta zaprti s kovinskima zamaškoma. Zaradi takšne zasnove je celico s preprihovanjem lažje očistiti.



Slika 18: Alfa scintilacijski celici volumna $0,70 \text{ dm}^3$.

3.3.1.2 Alfa scintilacijski merilnik PRM-145

Merilnik PRM-145 (Ames, Ljubljana) je sestavljen iz dveh delov, zloženih v prenosnem kovčku (Slika 19). Prvi del (cilindrične oblike) je fotopomnoževalka s pokrovom, pod katerega postavimo alfa scintilacijsko celico. Drugi del vsebuje mikrokontroler, akumulator, napajalnik in selektor impulzov. Na njem je tipkovnica, kontrolna lučka za pokrov fotopomnoževalke, stikala za vklop in dvovrstični alfanumerični prikazovalnik s tekočimi kristali. Ima merilni obseg do največ 5000 impulzov na sekundo (imp s^{-1}) oziroma od 0,0 do 99.999,0 Bq m^{-3} (Ames, 2000).



Slika 19: Alfa scintilacijski merilnik PRM-145.

Pri merjenju vzorcev postavimo scintilacijsko celico na fotopomnoževalko. Slednja mora biti v stiku z dnom celice. Počakamo nekaj sekund, da se vzpostavi konstantno napajanje fotopomnoževalke; če bi z meritvijo začeli takoj, bi nam merilnik v prvi minuti preštel nekaj sto impulzov preveč. Preden celico napolnimo z vzorcem, je potrebo izmeriti njeno ozadje, katerega odštejemo od meritve vzorca pri končnem izračunu.

Enačba za izračun koncentracije radona je naslednja:

$$C_{Rn} = \frac{\frac{n_s}{t_s} - \frac{n_b}{t_b}}{60 \times b \times e^{-\frac{\ln 2 \times \Delta t}{t_{1/2}}}} \quad (9)$$

C_{Rn} je koncentracija radona (Bq m^{-3}), n_s in n_b sta število impulzov (imp) vzorca (sample) in ozadja (background), t_s in t_b sta časa merjenja vzorca in ozadja (oba v minutah). Konstanta b je izkoristek alfa scintilacijske celice ($\text{s}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$), ki ga izračunamo pri kalibraciji, Δt je čas od odvzema do štetja vzorca minus 3 ure (čas, ki je potreben, da se vzpostavi radioaktivno ravnotežje med ^{222}Rn , ^{218}Po in ^{214}Po), $t_{1/2}$ je razpolovni čas radona (3,82 dni).

3.3.1.3 Črpalka AlphaPump

Črpalka (Slika 20) deluje po principu kroženja zraka. Ima tri nastavitve pretoka zraka – $1 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$, $0,5 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ in $0,3 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$. Mi smo jo uporabljali za črpanje vzorca zraka iz zemlje z maksimalnim pretokom $1 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$.



Slika 20: Črpalka zraka AlphaPump.

3.3.1.4 Črpalka Vacutech

Črpalka zraka Vacutech (Slika 21) deluje po principu kroženja zraka, uporabljali smo jo za čiščenje alfa scintilacijskih celic. Ta črpalka sicer nima nastavitve pretoka zraka, a je večji kot pri črpalci AlphaPump.



Slika 21: Črpalka zraka Vacutech.

Po uporabi scintilacijskih celic za meritve radona v stanovanjih ali radona v talnem zraku te očistimo. Za čiščenje (izpihovanje vzorcev) celic z zunanjim zrakom na terenu uporabljamo črpalko Vacutech. V laboratoriju pa celice očistimo z dušikom (N_2), ki ima zelo nizko vsebnost radona.

3.3.2 Ogljikov dioksid

Instrument Testo 435-2

Merilnik Testo 435-2 (Testo, ZDA) povežemo s tipalom IAQ (Slika 22), ki deluje na principu toplotne kapacitete plinov. Poleg CO_2 meri tudi relativno vlažnost zraka, temperaturo zraka in zračni tlak. Frekvenco prikaza izmerjenih vrednosti poljubno nastavimo. Merilnik je prenosen in ga napajajo baterije. Ima delovno temperaturo med -20 in $+50$ °C. Sonda meri temperature med -40 in $+150$ °C, koncentracije CO_2 med 0 in 10000 ppm in zračni tlak med 0 in 2000 hPa. Za prenos podatkov iz merilnika na osebni računalnik in njihov ogled je potrebna namestitev priloženega namenskega programa *Comfort Software Basic X35* (Testo, ZDA).

Merilnik sem uporabil za meritve koncentracijo CO_2 v zemlji. Čeprav je zgornja meja detekcije CO_2 10000 ppm, sem opazil, da instrument lahko izmeri tudi koncentracije nad to mejo, a le v primeru, če CO_2 narašča zelo počasi (v mojem primeru največ 14372 ppm). Če pa narašča zelo hitro in preide zgornjo mejo detekcije, potem rezultat ni zabeležen ne na zaslonu, ne v spominu inštrumenta.



Slika 22: Merilnik Testo 435-2 s sondo in zaščitnim cilindrom.

4. REZULTATI IN RAZPRAVA

Ker sta bili v moji diplomski dveh različnih litoloških podlagi (klastiti in karbonati) osnovni kriterij za študij radona v talnem zraku na dveh globinah znotraj pravilnih mrež, tudi rezultate podajam glede na litološko zgradbo tal in jih primerjam med seboj. Na klastitih sem meritve opravil na eni lokaciji (Sedraž), na karbonatih pa na dveh (Ponikve – pokriti kras, Črnotiče – goli kras). Prvi del poglavja vsebuje preglednice rezultatov vseh meritev na vseh lokacijah, drugi del pa grafično ponazoritev rezultatov, in sicer porazdelitve po globinah ter prostorske porazdelitve.

4.1 Koncentracije radona v talnem zraku in v zaprtih prostorih

V preglednicah 1 do 7 podajam rezultate merjenih parametrov v talnem zraku. V prvem stolpcu preglednic je zaporedje merilnih točk, razporejenih v pravilni mreži (glej Sliko 12). V drugem stolpcu so koncentracije radona na globini 50 cm (C_{Rn-50}), v tretjem pa na globini 80 cm (C_{Rn-80}), v Bq m⁻³. V četrtem stolpcu sledijo koncentracije ogljikovega dioksida na globini 50 cm (C_{CO2-50}) in v petem na globini 80 cm (C_{CO2-80}), podane kot ppm. V šestem stolpcu je hitrost ekshalacije radona (E_{Rn}) v mBq m⁻² s⁻¹ in v sedmem stolpcu prepustnost tal na globini 80 cm ($Pr-80$) v 10⁻¹³ m². V zadnjih dveh vrsticah so aritmetične srednje vrednosti (AM) in standardni odkloni (ASD) za koncentracije radona in koncentracije ogljikovega dioksida.

4.1.1 Klastiti (lokacija Sedraž)

V Preglednici 1 podajam rezultate prvih meritev, ki sem jih opravil na lokaciji Sedraž 31. 5. 2011.

Preglednica 1: Rezultati meritev na lokaciji Sedraž dne 31. 5. 2011.

Točka	C_{Rn-50} Bq m ⁻³	C_{Rn-80} Bq m ⁻³	C_{CO2-50} ppm	C_{CO2-80} ppm	E_{Rn} mBq m ⁻² s ⁻¹	$Pr-80$ 10 ⁻¹³ m ²
S-0	39900 ± 400	<20 *	11980	440	34 ± 7	<0,17
S-1	29600 ± 350	31 ± 15 *		222		4,92
S-2	35 ± 30 *	46 ± 33 *	360	300		1,34
S-3	560 ± 90	27 ± 25 *		291		<0,17
S-4	63500 ± 1270	15 ± 25 *		240		3,05
S-5	48300 ± 450	15100 ± 250		270	25 ± 8	<0,17
S-6	49900 ± 1000	136700 ± 1970		788		19,70
S-7	41400 ± 1000	63 ± 80 *		747		2,04
S-8	45700 ± 800	<20 *		241		<0,17
S-9	25500 ± 700	92 ± 47 *	243	223		<0,17
S-10	220 ± 80 *	173 ± 66 *	255	266		<0,17
S-11	3300 ± 200	337 ± 100 *	234	223		<0,17
S-12	10600 ± 470	22100 ± 540		6550	17 ± 7	<0,17
AM	27578	13440	2614	831		
ASD	22384	37700	5236	1729		

Opombe: *slab vlek črpalke

Koncentracije radona so bile na globini 50 cm v območju od 35 do 63500 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 27578 ± 22384 Bq m⁻³, na globini 80 cm pa v območju od 15 do 136700 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 13440 ± 37700 Bq m⁻³. Z izjemo točk S-2, S-3 ter S-10 in S-11, kjer so koncentracije radona prenizke, so preostale koncentracije na globini 50 cm v območju pričakovanih vrednosti. Na globini 80 cm bi pričakovali višje koncentracije radona kot na globini 50 cm, a smo jih izmerili le na točkah S-6 in S-12, kar kaže na slabo prepustnost zemljine. Ta povzroči nižji pretok zraka skozi črpalko in tako manjši volumen prečrpanega talnega zraka preko scintilacijske celice. Ker se je plin dušik v scintilacijski celici le delno zamenjal s talnim zrakom, so koncentracije radona nižje. Kot kažejo rezultati, je bil volumen prečrpanega talnega zraka iz globine 80 cm izjemno nizek, saj so koncentracije radona le rahlo nad ozadjem. Zemljina je bila na globini 50 cm suha in primerna za meritve, na globini 80 cm pa je bila vlažnost previsoka in zato koncentracije radona prenizke, kar potrjujejo tudi rezultati prepustnosti, ki je na večini točk zelo nizka (<0,17×10⁻¹³ m²). Povprečna koncentracija radona, izmerjena na klastitih v globini 80 cm, je v Sloveniji 26400 Bq m⁻³ (Vaupotič in sod., 2007). Koncentracije ogljikovega dioksida sem zaradi težav z merilnikom meril na globini 50 cm le na petih točkah. Koncentracije so bile v razponu od 234 do 11980 ppm z aritmetično srednjo vrednostjo 2614 ± 5236 ppm. Na globini 80 cm so bile koncentracije v območju od 222 do 6550 z aritmetično srednjo vrednostjo 831 ± 1729 ppm. Na obeh globinah so koncentracije CO₂ večinoma podobne, v območju od 222 do 788 ppm, izjemi sta le dve višji vrednosti (6550 in 11980 ppm). Podobno kot koncentracije radona, so tudi koncentracije CO₂ prenizke, saj je bil volumen prečrpanega talnega zraka premajhen in se v merilni posodi ni povsem izmenjal z zunanjim zrakom.

Korelacij med koncentracijami radona na različnih globinah ter med koncentracijama radona in ogljikovega dioksida nisem iskal. Glede na rezultate, je edina smiselna primerjava koncentracij radona na točkah S-6 in S-12, kjer je v prvem primeru na globini 80 cm koncentracija višja za faktor 2,7, na točki S-12 pa za faktor 2,1 kot na globini 50 cm.

V Preglednici 2 so rezultati druge meritve na lokaciji Sedraž, ki sem jo opravil 1. 6. 2011.

Preglednica 2: Rezultati meritev na lokaciji Sedraž dne 1. 6. 2011.

Točka	C _{Rn-50} Bq m ⁻³	C _{Rn-80} Bq m ⁻³	C _{CO2-50} ppm	C _{CO2-80} ppm	E _{Rn} mBq m ⁻² s ⁻¹	Pr-80 10 ⁻¹³ m ²
S-0	13200 ± 1580	27500 ± 2200	300	>10000	7 ± 4	<0,17
S-1	28000 ± 720	<20 *	>10000	1040		<0,17
S-2	20000 ± 480	49000 ± 980	>10000	>10000		<0,17
S-3	9900 ± 450	<20 *	>10000	2180		<0,17
S-4	21500 ± 610	28 ± 15 *	>10000	1450		<0,17
S-5	13100 ± 410	1620 ± 150	>10000	880		<0,17
S-6	36900 ± 820	9345 ± 490	>10000	3790		<0,17
S-7	14600 ± 560	<20 *	>10000	1530		<0,17
S-8	340 ± 340 *	360 ± 254 *	13400	274		<0,17
S-9	48000 ± 1050	32 ± 20 *	>10000	1900		<0,17
S-10	32000 ± 640	17 ± 17 *	>10000	1440		<0,17
S-11	16300 ± 610	10 ± 11 *	>10000	2730		<0,17
S-12	5200 ± 140	37200 ± 370	14400	>10000		<0,17
AM	19938	9637		3632		
ASD	13371	16916		3732		

Opombe: *slab vlek črpalke

Koncentracije radona na globini 50 cm so v območju od 340 do 48600 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 19938 ± 13371 Bq m⁻³. Na točki S-8 je tudi v tem primeru najbolj verjeten vzrok za nizko koncentracijo slabša prepustnost zemljine in z njo povezane težave pri

črpanju zraka. Na preostalih točkah so koncentracije radona bolj enakomerno porazdeljene kot pri prvi meritvi, enajst vrednosti od trinajstih je v območju od 9900 do 48000 Bq m⁻³, le dve sta nižji (341 in 5242 Bq m⁻³). Koncentracije radona na globini 80 cm so v območju od 10 do 49000 Bq m⁻³ in imajo aritmetično srednjo vrednost 9637 ± 16916 Bq m⁻³. Podobno kot pri prvi meritvi, je tudi tokrat koncentracija radona le trikrat (točke S-0, S-2 in S-12) v območju pričakovanih vrednosti, ostali rezultati so prenizki. Koncentracije CO₂ so na globini 50 cm z izjemo točke S-0 presegle 10000 ppm in žal na večini točk pravih vrednosti instrument ni pokazal. Zgornja meja detekcije instrumenta je 10000 ppm, pri čemer lahko pri počasnem naraščanju koncentracije izmeri tudi vrednosti do okrog 15000 ppm, če je naraščanje prehitro pa instrument zablokira. Za globino 50 cm nisem izračunal aritmetične srednje vrednosti in standardnega odklona, pri globini 80 cm pa je aritmetična srednja vrednost verjetno višja, saj sem pri računanju upošteval zgornjo mejo 10000 ppm, čeprav so bile prave vrednosti višje. Na globini 80 cm so bile koncentracije CO₂ na treh točkah (S-0, S-2 in S-12) višje od 10000 ppm, na preostalih točkah pa v območju od 274 do 3790 ppm.

Iskanje korelacije med koncentracijama radona in ogljikovega dioksida tudi v tem primeru ni smiselno. Kljub temu pa je predvsem na globini 80 cm razvidno, da višje koncentracije radona sledijo višjim koncentracijam ogljikovega dioksida. Na globini 50 cm tega trenda ni opaziti, predvsem zaradi nepoznavanja pravih koncentracij ogljikovega dioksida. Samo na točkah S-0, S-2 in S-12 so koncentracije radona na globini 80 cm višje kot na globini 50 cm, in sicer na točki S-0 za faktor 2,1, na točki S-2 za faktor 2,4 in na točki S-12 za faktor 7,1, pri čemer gre pri slednji verjetno za prenizko izmerjeno koncentracijo na globini 50 cm.

Tretjo meritev sem na lokaciji Sedraž opravil 11. 7. 2011, rezultate podajam v preglednici 3.

Preglednica 3: Rezultati meritev na lokaciji Sedraž dne 11. 7. 2011.

Točka	C _{Rn} -50 Bq m ⁻³	C _{Rn} -80 Bq m ⁻³	C _{CO2} -50 ppm	C _{CO2} -80 ppm	E _{Rn} mBq m ⁻² s ⁻¹	Pr-80 10 ⁻¹³ m ²
S-0	<20 *	26000 ± 600	328	13500		
S-1	<20 *	<20 *	1340	980		
S-2	<20 *	<20 *	680	>10000		
S-3	40800 ± 890	64400 ± 1150	>10000	>10000		
S-4	16800 ± 500	24500 ± 560	4260	12946		
S-5	30400 ± 860	95000 ± 1800	7350	12983		
S-6	47600 ± 990	88500 ± 1600	9270	13167	/	/
S-7	<20 *	27500 ± 770	1240	13500		
S-8	50000 ± 850	<20 *	4560	1060		
S-9	<20 *	17 ± 25 *	850	690		
S-10	5900 ± 160	<20 *	4950	890		
S-11	26700 ± 340	<20 *	12700	1500		
S-12	<20 *	<20 *	890	650		
AM	16794	25080	4494	7067		
ASD	19829	35221	4159	5992		

Opombe: *slab vlek črpalke

Aritmetična srednja vrednost koncentracije radona je na globini 50 cm 16784 ± 19842 Bq m⁻³. Na šestih točkah so koncentracije radona v območju pričakovanih vrednosti (od 16000 do je 50000 Bq m⁻³), na točki S-10 je nekoliko nižja, 5900 Bq m⁻³, na preostalih šestih točkah pa so zelo nizke (<20 Bq m⁻³). Podobno je na globini 80 cm (aritmetična srednja vrednost 25080 ± 35221 Bq m⁻³), kjer so koncentracije na šestih točkah pričakovano visoke (od 24500 do 95000 Bq m⁻³), pri preostalih sedmih pa na meji detekcije. Minimalne koncentracije kažejo, da je bil pretok talnega zraka iz zemljine v scintilacijsko celico zelo

majhen, oziroma ga sploh ni bilo, zato koncentracije radona ni bilo moč pravilno izmeriti. Pri odvzemu vzorcev sem po zvoku črpalke zaznal, da je pretok zraka nizek ali ga sploh ni, žal pa pretoka zraka nisem meril. Zaradi premajhnega volumna vzorca so praviloma tudi koncentracije CO₂ na istih točkah nizke. Aritmetična srednja vrednost koncentracije CO₂ na globini 50 cm je 4494 ± 4159 ppm, na globini 80 cm pa 7067 ± 5992.

Na točkah od S-3 do S-6 sem na obeh globinah izmeril pričakovano visoke vrednosti radona in dobil na globini 80 cm za faktor 1,6, 1,5, 3,1 in 1,9 višje vrednosti kot na globini 50 cm. Podobno so bile tudi koncentracije CO₂ na globini 80 cm višje, in sicer na točkah S-4, S-5 in S-6, za faktor 3,0, 1,8 in 1,4.

4.1.2 Karbonati

4.1.2.1 Pokriti kras (lokacija Ponikve)

V Preglednici 4 predstavljam rezultate prve meritve na lokaciji Ponikve na karbonatih.

Preglednica 4: Rezultati meritev na lokaciji Ponikve dne 7. 7. 2011.

Točka	C _{Rn-50} Bq m ⁻³	C _{Rn-80} Bq m ⁻³	C _{CO2-50} ppm	C _{CO2-80} ppm	E _{Rn} mBq m ⁻² s ⁻¹	Pr-80 10 ⁻¹³ m ²
P-0	9100 ± 440	5300 ± 270	7000	5490	3 ± 1	/
P-1	3000 ± 200	11000 ± 500	4100	800		
P-2	11100 ± 500	19700 ± 600	3440	6600		
P-3	27300 ± 730	1700 ± 200 *	6870	1000		
P-4	7900 ± 340	17800 ± 500	5250	6900		
P-5	6200 ± 400	14700 ± 710	3640	4200		
P-6	6800 ± 370	22800 ± 800	3930	3500		
P-7	8500 ± 470	9100 ± 440	2860	690		
P-8	4900 ± 270	2100 ± 180	2400	1140		
P-9	5900 ± 400	13700 ± 580	4530	3900		
P-10	6700 ± 170	18000 ± 270	2530	5380		
P-11	5900 ± 160	<20 * ^D	3660	250		
P-12	4100 ± 130 ^D	<20 * ^D	2000	500		
AM	8261	10457	4016	3102		
ASD	6108	8012	1572	2471		

Opombe: *slab vlek črpalke, ^Dvzorec odvzeli naslednji dan – 8. 7. 2011

Aritmetična srednja vrednost koncentracij radona na globini 50 cm je 8261 ± 6108 Bq m⁻³, na globini 80 cm pa 10457 ± 8012 Bq m⁻³. Meritve sem ta dan moral predčasno prekiniti, ker je lastnik travnika (na katerem sem izvajal meritve) pričel s košnjo. Zadnje tri meritve sem tako izmeril naslednji dan. Dobil sem dokaj enakomerno visoke koncentracije in le dve nizki vrednosti, ki pa sta bili izmerjeni naslednji dan, ko so bili pogoji povsem drugačni, kot je razvidno v preglednici 5. Hitrost ekshalacije radona je zelo nizka. Aritmetična srednja vrednost koncentracije CO₂ na globini 50 cm je 4016 ± 1572 ppm, na globini 80 cm pa 3102 ± 2471 ppm. Na globini 50 cm so dokaj enakomerno visoki rezultati (od 2000 do 7000 ppm), na 80 cm pa nekoliko nižji, z najvišjo koncentracijo 6900 ppm in štirimi rezultati pod 1000 ppm.

Na točkah P-1, P-2, P-4 do P-7 ter P-9 in P-10 so koncentracije radona na globini 80 cm višje kot na globini 50 cm, in sicer za faktor od 1,1 do 3,7. Podoben trend sem pri ogljikovem dioksidu zasledil na točkah P-2, P-4, P-5 in P-10.

V Preglednici 5 so rezultati druge meritve na lokaciji Ponikve na karbonatih.

Preglednica 5: Rezultati meritev na lokaciji Ponikve dne 8. 7. 2011.

Točka	C_{Rn-50} Bq m ⁻³	C_{Rn-80} Bq m ⁻³	C_{CO_2-50} ppm	C_{CO_2-80} ppm	E_{Rn} mBq m ⁻² s ⁻¹	$Pr-80$ 10 ⁻¹³ m ²
P-0	15600 ± 570	<20 *	7100	970	5 ± 3	/
P-1	7400 ± 300	<20 *	4380	660		
P-2	<20 *	28 ± 45 *	440	330		
P-3	7200 ± 380	<20 **	4900	730		
P-4	<20 *	<20 *	480	380		
P-5	10200 ± 500 ***	9300 ± 570 ***	5540	4440		
P-6	4500 ± 300 ***	15700 ± 670 ***	3160	6000		
P-7	5300 ± 370	<20 *	2900	830		
P-8	3900 ± 240	900 ± 120	2920	660		
P-9	5300 ± 370	67 ± 43	3200			
P-10	3400 ± 130	<20				
P-11	5900 ± 160	8900 ± 200 *				
P-12	900 ± 60	<20 *				
AM	5357	2695	3502	1667		
ASD	4279	5153	2088	2062		

Opombe: *slab vlek črpalke; **celica se je v laboratoriju odprla pred štetjem vzorca; ***velika gostota kamnov ob cevi

Aritmetična srednja vrednost koncentracij radona na globini 50 cm je 5357 ± 4279 Bq m⁻³, na globini 80 cm pa 2695 ± 5163 Bq m⁻³. Ta dan me je na merilnem mestu pričakala sveže pokošena trava, ki je vplivala na rezultate merjenja. Na globini 50 cm so koncentracije radona v večini primerov nižje kot dan pred tem, ko je bila na travniku še nepokošena trava, z nekaj izjemami (točke P-0, P-1, in P-5), kjer so višje, na točki P-11 pa sta oba dneva enaki. Na globini 80 cm so koncentracije skoraj povsod na spodnji meji detekcije, izjema sta dve točki, kjer je bila merilna cev v zemlji med večjimi kamni, kar omogoča večjo prepustnost zemlje in boljše prehajanje radona. Takšen primer je točka P-11 s koncentracijo 8900 Bq m⁻³, kjer sem zaradi slabega vleka črpalke in zato nižjega volumna prečrpanega zraka skozi scintilacijsko celico, pričakoval minimalno vrednost. Hitrost ekshalacije radona je zelo nizka. Aritmetična srednja vrednost koncentracije CO₂ na globini 50 cm je 3502 ± 2088 ppm, na globini 80 cm pa 1667 ± 2062 .

4.1.2.2 Goli kras (lokacija Črnotiče)

V Preglednici 6 so zbrani rezultati prve meritve na lokaciji Črnotiče na karbonatih.

Preglednica 6: Rezultati meritev na lokaciji Črnotiče dne 3. 6. 2011.

Točka	C_{Rn-30} Bq m ⁻³	C_{Rn-50} Bq m ⁻³	C_{CO_2-30} ppm	C_{CO_2-50} ppm	E_{Rn} mBq m ⁻² s ⁻¹	$Pr-80$ 10 ⁻¹³ m ²
Č-0	13400 ± 450	38300 ± 740	9850	11800	13 +/- 5	30,2
Č-1	14800 ± 560	21700 ± 740	11500	12270		25,3
Č-2	34000 ± 980	44400 ± 950	12000	12600		19,0
Č-3	34800 ± 1100	63700 ± 1200	12700	12400		19,7
Č-4	10200 ± 380	19600 ± 530	12200	12700		29,3
Č-5	17800 ± 600	55200 ± 1030	10300	11500		15,1
Č-6	164000 ± 1700	244000 ± 2300	15220	15400		20,9
Č-7	5900 ± 360	7000 ± 300	9200	10360		14,9
Č-8	1450 ± 140	5300 ± 340	6630	8400		121,0 *
AM	32827	55433	11067	11937		
ASD	50683	73492	2437	1889		

Opombe: *merjenje prepustnosti na globini 50 cm

Zaradi plitke zemljine sem na tej lokaciji izvedel meritve na globinah 30 in 50 cm, namesto na standardnih 50 in 80 cm. Na golem krasu je zaradi prisotnosti velikega števila kamnov in skal dovolj zemlje za izvedbo meritev le v vrtačah. Ker na izbrani lokaciji nobena vrtača ni bila dovolj velika, da bi izvedel meritve v predvideni mreži, sem moral zunanje štiri točke (Č-9 do Č-12) izpustiti. Aritmetična srednja vrednost koncentracije radona je 32827 ± 50683 Bq m⁻³ na globini 30 cm in 55433 ± 73492 Bq m⁻³ na globini 50 cm. Na tej lokaciji so koncentracije radona v talnem zraku višje kot na prejšnjih dveh, čeprav sem meritve opravil na nižji globini. Z izjemo točke Č-6, kjer sta bili koncentraciji radona izjemno visoki, 164000 Bq m⁻³ na globini 30 cm in 244000 Bq m⁻³ na 50 cm, so vrednosti na preostalih točkah dokaj enakomerne. Aritmetična srednja vrednost koncentracije CO₂ je 11067 ± 2437 ppm na globini 30 cm in 11937 ± 1889 ppm na globini 50 cm, kar so prav tako višje vrednosti kot na prvih dveh lokacijah. Prepustnost zemlje je vsaj za velikostni razred višja kot na klastitih, kar smo pričakovali. Nismo pa pričakovali nižje ekshalacije, vendar bi bila nadaljnja razlaga vzroka na osnovi samo enega rezultata zgolj ugibanje.

Na vseh merilnih točkah so koncentracije radona na globini 50 cm višje kot na globini 30 cm, v povprečju za faktor 1,7. Tudi koncentracije CO₂ so na globini 50 cm višje kot na 30 cm, v povprečju za faktor 1,1. Pri teh meritvah sem uporabil merilnik (Li-840), ki meri koncentracije CO₂ tudi nad 10000 ppm (Licor, ZDA).

V Preglednici 7 so rezultati druge meritve na lokaciji Črnotiče na karbonatih.

Preglednica 7: Rezultati meritev na lokaciji Črnotiče dne 23. 6. 2011.

Točka	C_{Rn-30} Bq m ⁻³	C_{Rn-50} Bq m ⁻³	C_{CO_2-30} ppm	C_{CO_2-50} ppm	E_{Rn} mBq m ⁻² s ⁻¹	$Pr-80$ 10 ⁻¹³ m ²
Č-0	190000 ± 2000	206000 ± 1650				
Č-1	152000 ± 1800	166500 ± 1750				
Č-2	207000 ± 2000	235000 ± 2200				
Č-3	70300 ± 1000 *	205500 ± 1700				
Č-4	112000 ± 1200	283500 ± 2500	/	/	/	/
Č-5	155000 ± 1800	233000 ± 2550				
Č-6	275000 ± 2650	256000 ± 2350				
Č-7	108000 ± 1250	107500 ± 1300				
Č-8	87500 ± 1450	117000 ± 2000 **				
AM	150767	201089				
ASD	65034	60227				

Opombe: *slab vlek črpalke; **cev po vzorčenju težko izvlekli zaradi zbite zemlje

Aritmetična srednja vrednost koncentracije radona na globini 30 cm je 150767 ± 65034 Bq m⁻³, na globini 50 cm pa 201089 ± 60227 Bq m⁻³, kar so znatno višje vrednosti v primerjavi s prvo meritvijo na tej lokaciji (Preglednica 6). Koncentracije CO₂ nisem meril, ker ta dan žal nisem imel na voljo merilnika, ki bi meril koncentracije nad 10000 ppm.

Z izjemo točke Č-6, so koncentracije radona na globini 50 cm višje kot na globini 30 cm, v povprečju za faktor 1,3.

V preglednici 8 so zbrane aritmetične srednje vrednosti koncentracij radona in ogljikovega dioksida na vseh treh lokacijah.

Preglednica 8: Aritmetične srednje vrednosti (AM) koncentracij radona (C_{Rn}) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2}) glede na litološko enoto na globinah 50 in 80 cm na lokacijah Sedraž in Ponikve ter na globinah 30 in 50 cm na lokaciji Črnotiče.

Litološka enota Lokacija	Datum 2011	AM C_{Rn-50} Bq m ⁻³	AM C_{Rn-80} Bq m ⁻³	AM C_{CO_2-50} ppm	AM C_{CO_2-80} ppm
klastiti Sedraž	31. 5.	27578	13440	2614	831
	1. 6.	19938	9637		3632
	11. 7.	16794	25080	4494	7067
karbonati pokriti kras Ponikve	7. 7.	8261	10457	4016	3102
	8. 7.	5357	2695	3502	1667
karbonati goli kras Črnotiče	3. 6.	32827	55433	11067	11937
	23. 6.	150767	201089		

Kot vidimo v preglednici 8, se koncentracije radona znatno razlikujejo, tako glede ponovljivosti na isti litologiji, kot tudi med različnima litologijama. Glavni vzrok za slabo ujemanje rezultatov na isti litologiji je v samem odvzemu vzorca talnega zraka. Njegov volumen je bil zaradi slabe prepustnosti zemljine velikokrat premajhen in v scintilacijski celici ni v celoti izmenjal dušika, zato sem dobil prenizke rezultate, mnogokrat na spodnji meji

detekcije. Glede na meritve radona v talnem zraku, ki so jih opravili po Sloveniji v letih 2006 in 2007 (Vaupotič in sod., 2007), bi pričakoval na karbonatih višje koncentracije radona kot na klastitih, kar sem v primeru lokacije Črnotiče res dobil, ne pa tudi v Ponikvah, kjer dokaj nizke koncentracije radona dne 7. 7. na večini točk težko razložim. Dne 8. 7., ko so bile še nižje, pa sem imel zaradi pokošene trave povsem drugačne razmere. Pričakoval bi tudi, da so globlje v zemlji koncentracije radona višje, kot navaja literatura (Neznal in Neznal, 2005), vendar sem nekajkrat zasledil tudi obratni potek, kar razlagam z večjo vlažnostjo zemljine na globini 80 cm kot na globini 50 cm, večja vlaga pa je povzročila težave pri odvzemu vzorcev in prenizke rezultate.

4.1.3 Notranji zrak

Na lokacijah Sedraž in Ponikve sem odvil vzorce notranjega zraka v osmih kletnih prostorih okoliških stanovanjskih hiš v oddaljenosti manj kot 500 metrov od mesta merjenja talnega zraka (Preglednica 9).

Preglednica 9: Koncentracije radona (C_{Rn}) v zraku okoliških stanovanjskih hiš, leto izgradnje hiše ter talna izolacija na lokacijah Sedraž in Ponikve.

Stanovanjska hiša	Klastiti (lokacija Sedraž) 6. 9. 2010			Karbonati (lokacija Ponikve) 4. 9. 2010		
	C_{Rn} Bq m ⁻³	leto izgradnje	talna izolacija	C_{Rn} Bq m ⁻³	leto izgradnje	talna izolacija
1	195 ± 15	okrog 2000	beton	64 ± 10	okrog 1950	beton
2	3870 ± 60	1951	beton	85 ± 10	okrog 1900	beton
3	138 ± 12	okrog 1950	beton	251 ± 15	1930	beton
4	71 ± 10	1957	beton	153 ± 12	1954	beton
5	22 ± 6	neznano	beton	324 ± 20	1950	beton
6	11 ± 6	2009	beton	6900 ± 80	1995	beton in ploščice
7	117 ± 12	1991	beton in ploščice	505 ± 20	1995	beton
8	386 ± 20	1989	beton	2880 ± 35	1961	beton
AM	601 ± 1326			1395 ± 2414		

Koncentracije radona v zraku zgradb na klastitih so v območju od 11 do 3870 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 601 Bq m⁻³, v zgradbah na karbonatih pa od 64 do 6900 Bq m⁻³ z aritmetično srednjo vrednostjo 1395 Bq m⁻³. Vidimo, da so koncentracije radona približno za faktor 2 višje na karbonatnih podlagah, kar je v skladu z meritvami radona v vrtcih in šolah, kjer so dobili največ povišanih vrednosti radona na karbonatnih podlagah (Vaupotič in sod., 1994; Vaupotič in sod., 2000). V vseh primerih hiš, kjer sem izvedel meritve, je bila talna izolacija beton, leto izgradnje pa zelo različno. Praviloma najdemo višje koncentracije radona v starejših zgradbah slabše kakovosti gradnje, kar je verjetno primer stanovanjske hiše 2 (zgrajena leta 1951) na klastitih s koncentracijo radona 3870 Bq m⁻³ ali stanovanjske hiše 8 (zgrajena leta 1961) na karbonatih s koncentracijo 2880 Bq m⁻³. Visoka koncentracija radona pa je tudi v novejši stanovanjski hiši 6 (zgrajena leta 1995) na karbonatni podlagi, in sicer kar 6900 Bq m⁻³.

4.2. Primerjave rezultatov

V naslednjem poglavju podajam grafične primerjave, in sicer najprej koncentracij radona in ogljikovega dioksida v talnem zraku na obeh globinah, nato pa še njihove prostorske porazdelitve.

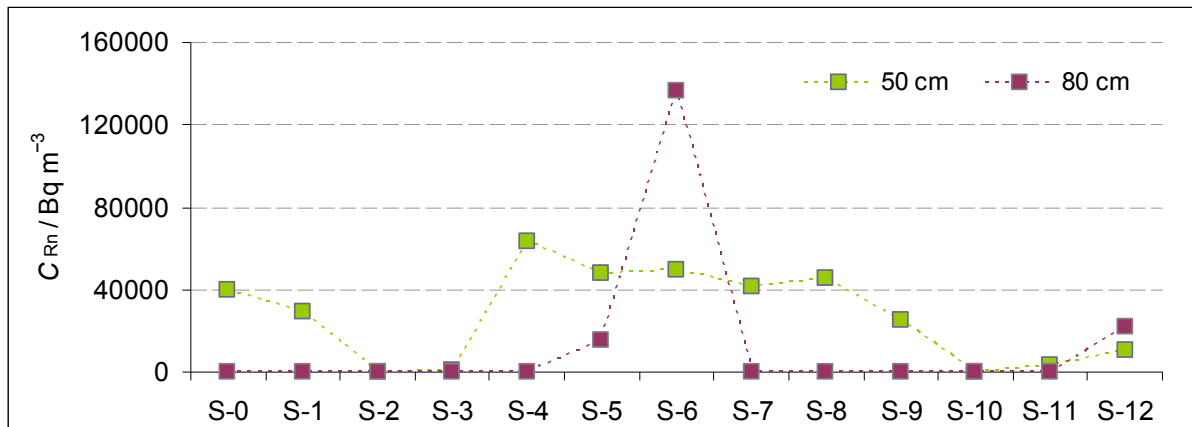
4.2.1 Primerjava koncentracij radona in ogljikovega dioksida na različnih globinah

4.2.1.1 Lokacija Sedraž

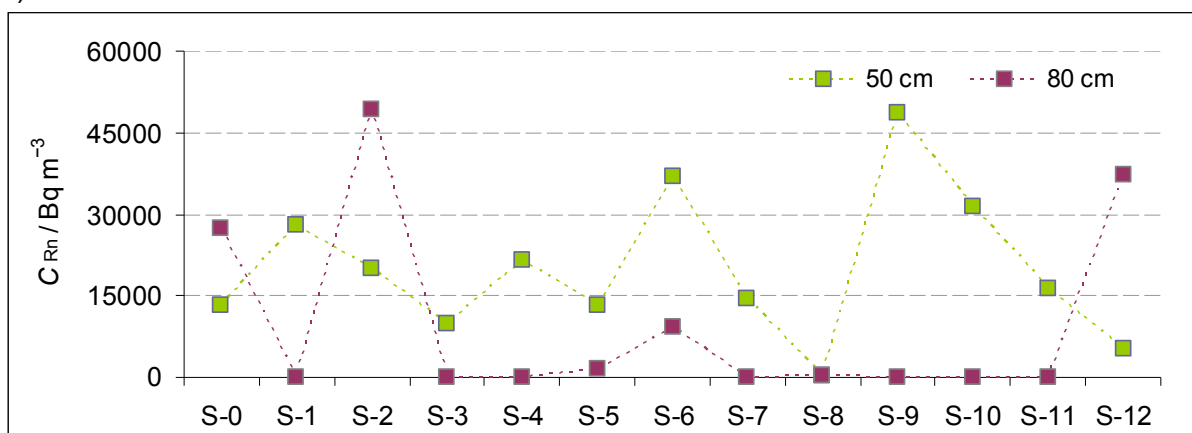
4.2.1.1.1 Primerjava koncentracij radona

Na lokaciji Sedraž sem imel opravka s problematičnimi tlemi, saj klastiti očitno tudi po daljšem času stabilnega in suhega vremena zadržijo večji delež vlage in je bilo zato izvajanje meritev oteženo. Rezultati kažejo, da je bila zemljina na globini 80 cm praktično neprepustna in sem razen na točki S-6 povsod izmeril prenizke vrednosti. Na globini 50 cm je bila zemljina bolj prepustna (verjetno bolj suha) in zato so koncentracije radona višje (Slika 23a). Drugi merilni dan (Slika 23b) sem na globini 80 cm spet izmeril večinoma vrednosti pod spodnjo mejo detekcije, medtem ko so bile na 50 cm podobne kot pri prvi meritvi. Pri tretji meritvi (Slika 23c) že opazim vzorec, po katerem so koncentracije radona višje na večji globini, vendar na polovici točk še vedno zelo nizke. Korelacijski koeficient med koncentracijo radona na globini 50 cm in 80 cm je 0,53. Najbolj verjetno je za velika nihanja koncentracije radona kriva tudi nehomogenost zemljine. Žal nisem analiziral njene sestave na posameznih točkah. Rose s sodelavci (Rose in sod., 1990) navaja, da je lahko koncentracija radona v razmočeni zemljini nižja za faktor 3 do 10 od običajno pričakovane vrednosti.

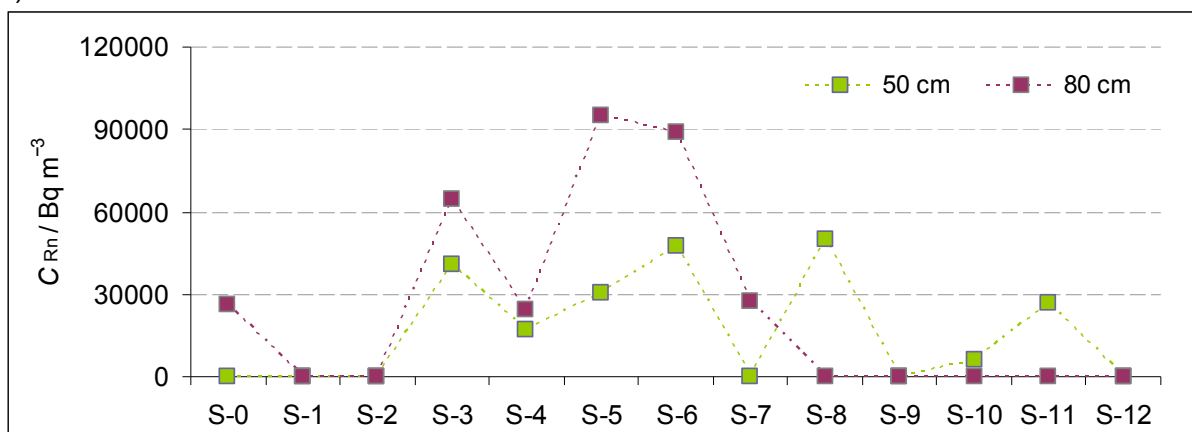
a)



b)



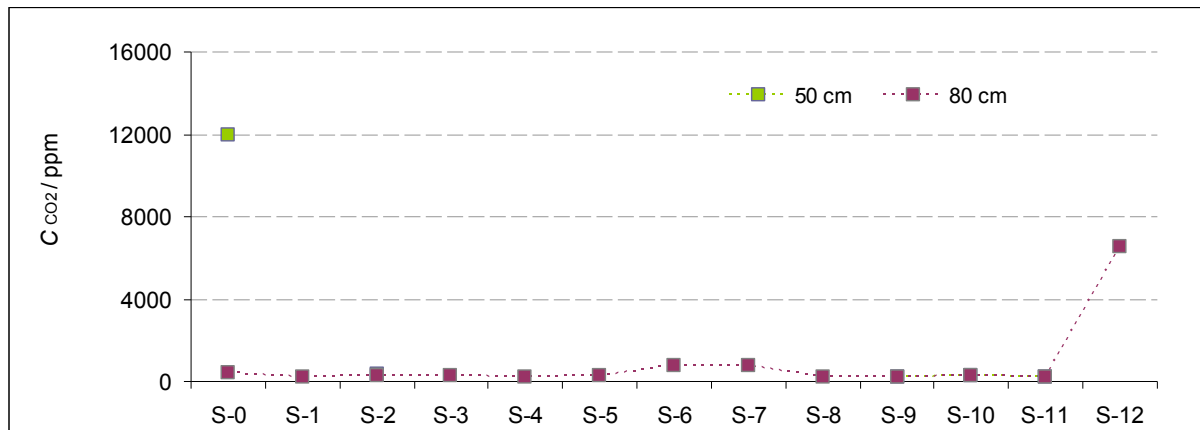
c)



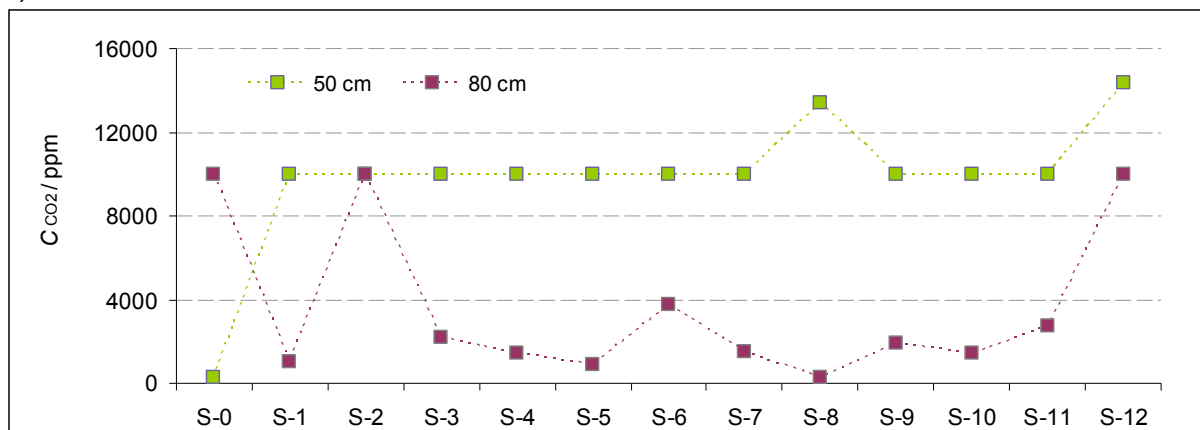
Slika 23: Koncentracije radona ($C_{Rn} / Bq m^{-3}$) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Sedraž na klastitih (a – prva meritev, b – druga meritev, c – tretja meritev).

4.2.1.1.2 Primerjava koncentracij ogljikovega dioksida

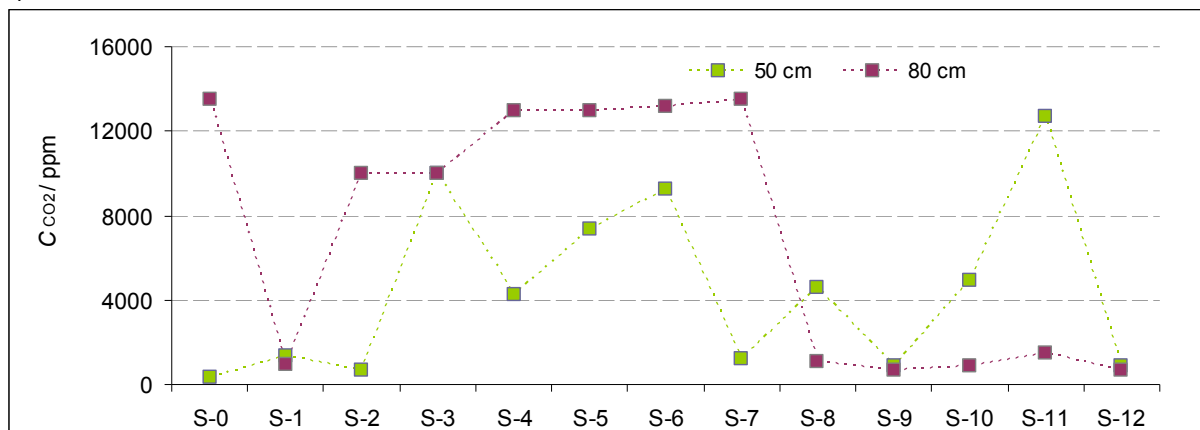
a)



b)



c)



Slika 24: Koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Sedraž na klastitih (a – prva meritev, b – druga meritev, c – tretja meritev).

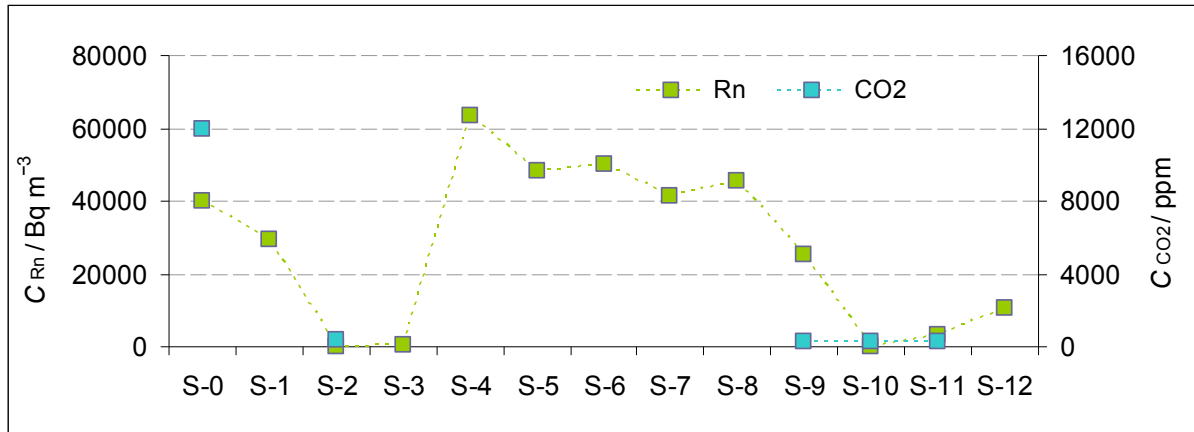
Podobne težave kot pri rezultatih radona imam tudi pri rezultatih ogljikovega dioksida. Pri prvi meritvi (Slika 24a) koncentracij CO_2 med seboj ne morem primerjati, ker sem imel težave z merilnikom CO_2 in sem koncentracije večinoma meril le na globini 80 cm (razen na točki S-12 so tu koncentracije podobne). Pri drugi meritvi (Slika 24b) so koncentracije CO_2 na globini 50 cm večinoma presegle zgornjo mejo detekcije merilnika (10000 ppm). Ujemanja nisem opazil niti pri tretji meritvi (Slika 24c).

4.2.1.1.3 Primerjava koncentracij radona in ogljikovega dioksida

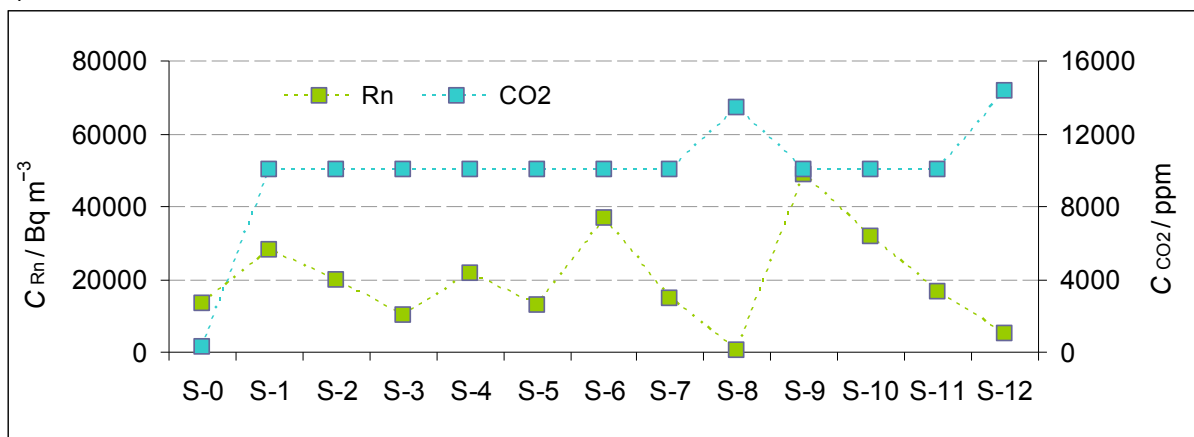
Korelacija med koncentracijama radona in ogljikovega dioksida na globini 50 cm se jasno vidi pri tretji meritvi (Slika 25c), saj se z višanjem koncentracijo radona viša tudi koncentracija ogljikovega dioksida. Korelacijski koeficient je 0,69. Ujemanja nisem opazil pri prvih dveh meritvah (Slika 25a in Slika 25b), ker pri prvi nisem imel dovolj vzorcev CO₂, pri drugi pa so koncentracije CO₂ v večini točk presegle zgornjo mejo detekcije 10000 ppm.

Korelacija med koncentracijama radona in ogljikovega dioksida na globini 80 cm je že jasneje izražena. Na Sliki 26a vidimo, da so koncentracije obeh plinov nizke na večini točk, z izjemo točke S-6, kjer je koncentracija radona visoka glede na ostale točke, medtem ko ostaja koncentracija CO₂ nizka. Obraten primer je točka S-12 z visoko koncentracijo CO₂ in nizko koncentracijo radona. Pri drugi in tretji meritvi (Slika 26b in 26c) so koncentracije radona in ogljikovega dioksida višje, z izjemo le nekaj točk. Korelacija obeh plinov je po večini dobra, s korelacijskima koeficientoma 0,87 pri drugi meritvi in 0,41 pri tretji meritvi.

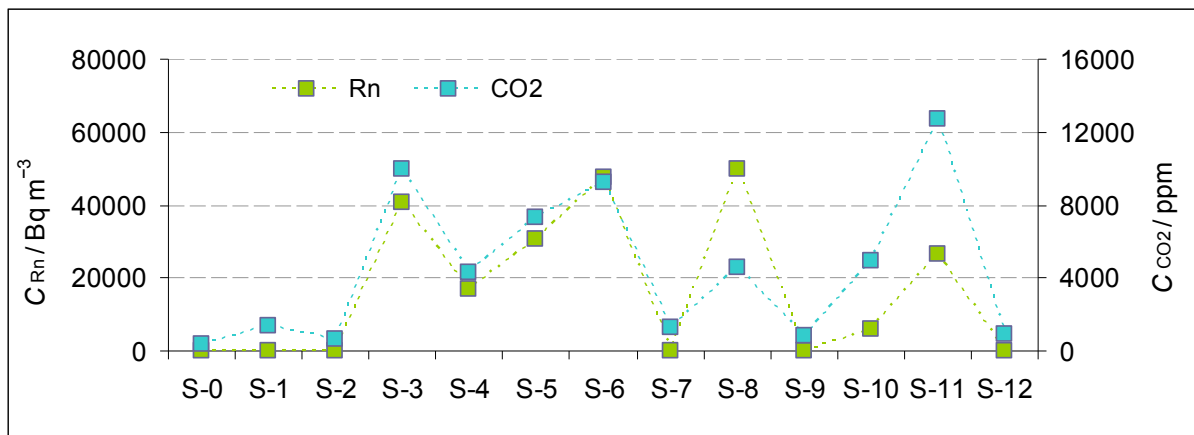
a)



b)

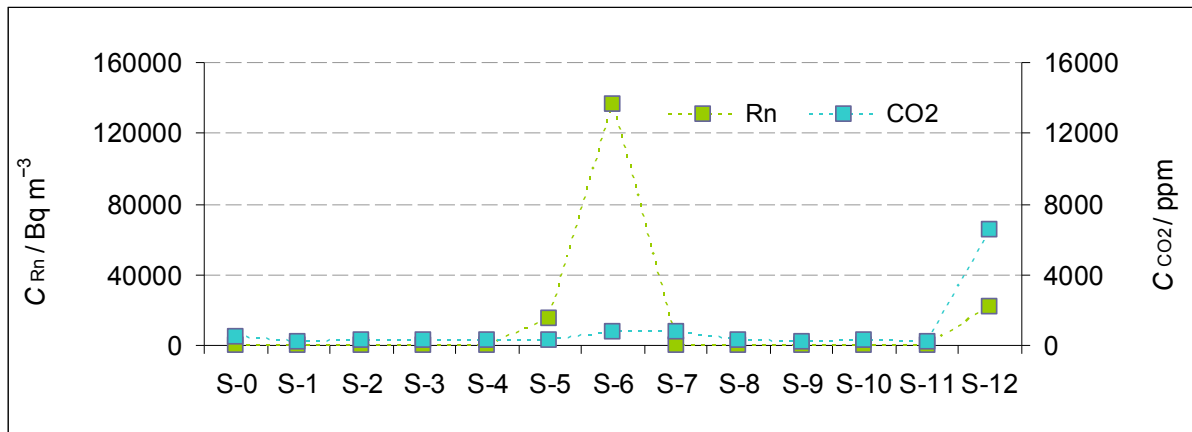


c)

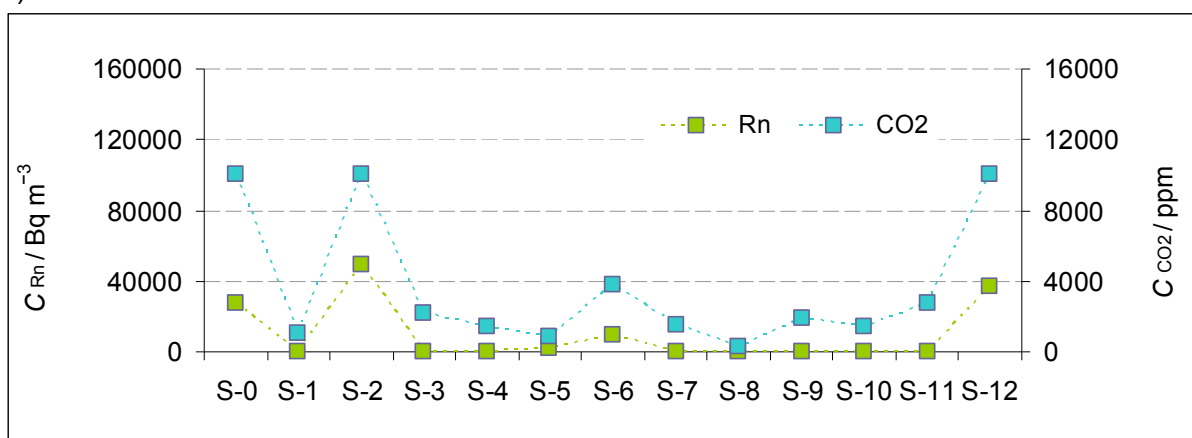


Slika 25: Koncentracije radona ($C_{Rn} / Bq m^{-3}$) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm na lokaciji Sedraž na klastitih (a – prva meritev, b – druga meritev, c – tretja meritev).

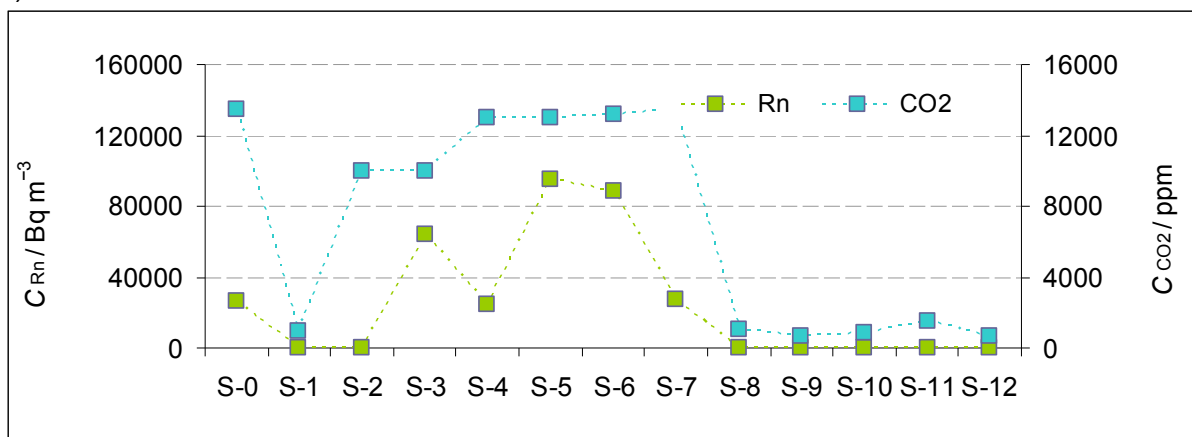
a)



b)



c)

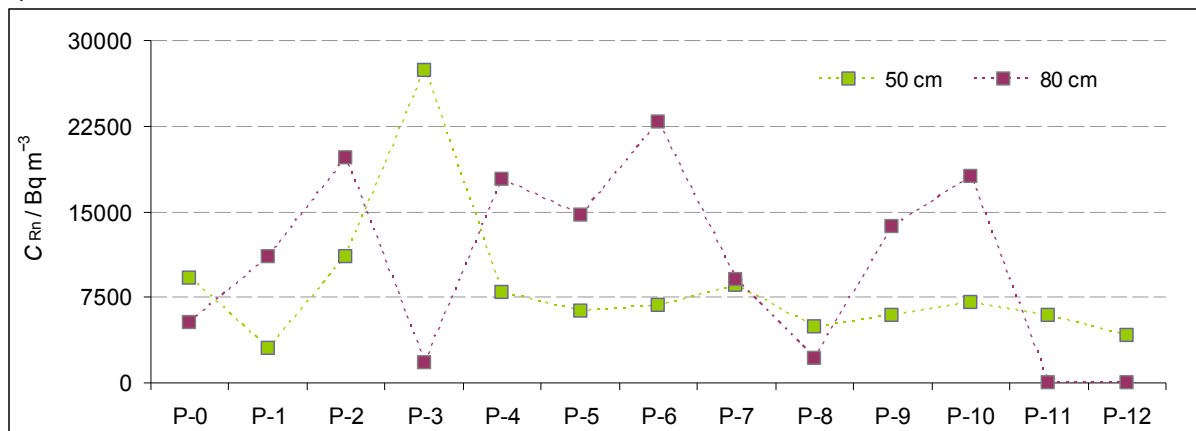


Slika 26: Koncentracije radona ($C_{Rn} / Bq m^{-3}$) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 80 cm na lokaciji Sedraž na klastitih (a – prva meritev, b – druga meritev, c – tretja meritev).

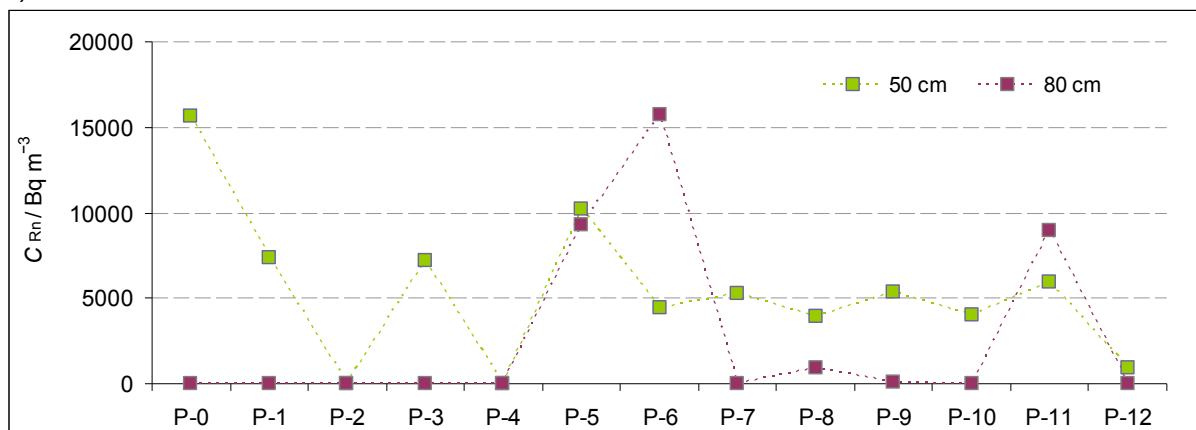
4.2.1.2 Lokacija Ponikve

4.2.1.2.1 Primerjava koncentracij radona

a)



b)



Slika 27: Koncentracije radona ($C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih (a – prva meritve, b – druga meritve).

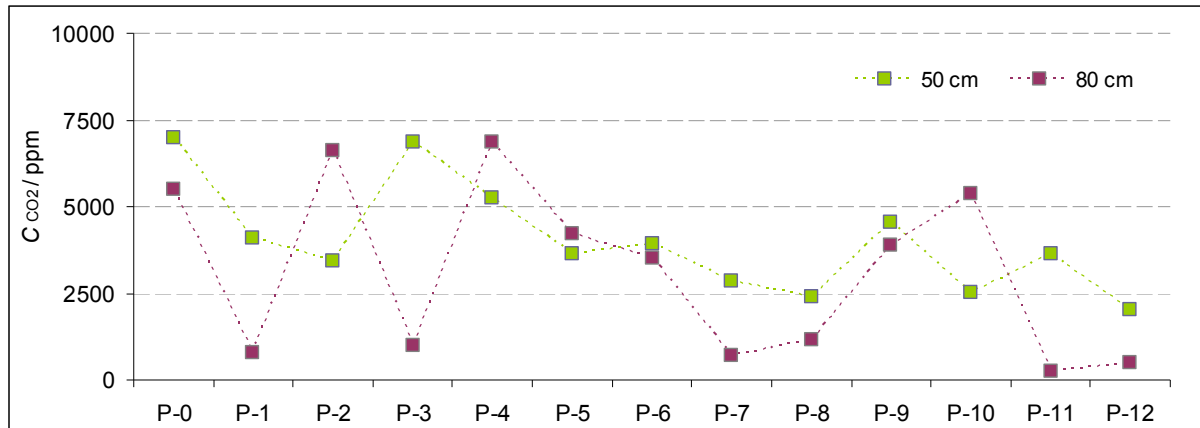
Ujemanje koncentracij radona med obema globinama je na lokaciji Ponikve neizrazito, pravzaprav podobno kot pri lokaciji Sedraž. Medtem, ko pri prvi meritvi (Slika 27a) še opazim podobno porazdelitev koncentracije radona po posameznih točkah, kot tudi to, da je le-ta večinoma višja na večji globini (zadnjih dve meritvi na globini 80 cm sem opravil naslednji dan ob drugačnih razmerah), pa je pri drugi meritvi (Slika 27b) stanje obrnjeno. Koncentracije radona so na globini 80 cm na spodnji meji detekcije z izjemo treh točk (P-5, P-6 in P-11), kjer so koncentracije višje, najverjetneje zaradi bližine večjih kamnov in tako boljše prepustnosti zemlje v okolici točk. Nasploh so koncentracije na obeh globinah pri drugi meritvi nižje kot pri prvi, kar je še posebej dobro vidno na globini 80 cm.

Tik pred koncem prve meritve je lastnik travnika, na katerem sem izvajal meritve, pričel s košnjo. Naslednji dan, ko sem prišel merit, me je na travniku pričakala sveže pokošena trava, za katero se je izkazalo, da je očitno vplivala na rezultate meritev. Vzrok nižjih koncentracij radona je verjetno povsem drugačna vlažnost zemlje zaradi pokrivne plasti mokre trave, kar se odraža predvsem na globini 80 cm. Ker sem začel meritve izvajati okrog poldneva, predvidevam, da se je zemljina do globine 50 cm že posušila, ne pa tudi na globini 80 cm.

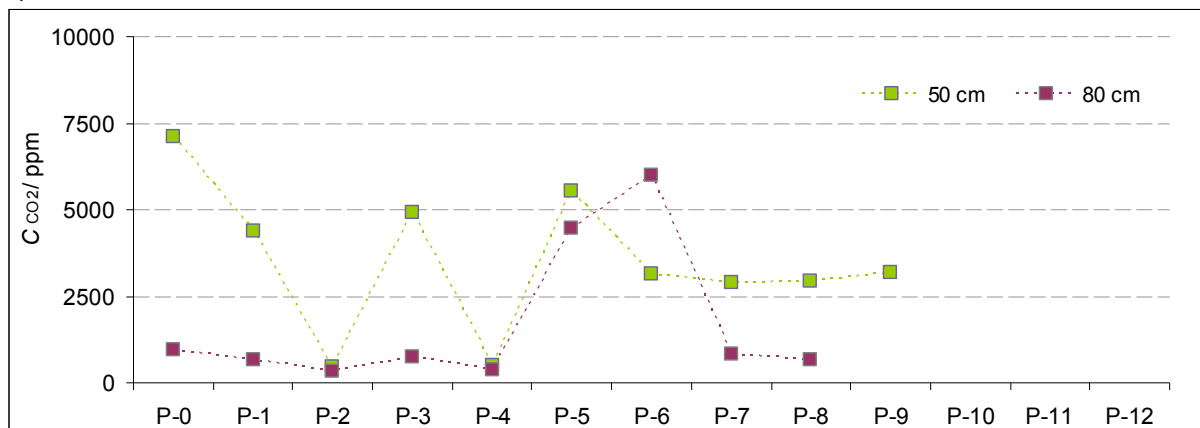
4.2.1.2.2 Primerjava koncentracij ogljikovega dioksida

Korelacija koncentracij ogljikovega dioksida na obeh globinah je na lokaciji Ponikve slaba, s korelacijskim koeficientom 0,16 za prvo meritev in 0,02 za drugo meritev, kar je razvidno tudi z obeh grafov (Slika 28a in 28b). Dodatno vidimo, da je koncentracija na večjem številu točk na globini 80 cm nižja kot na globini 50 cm.

a)



b)

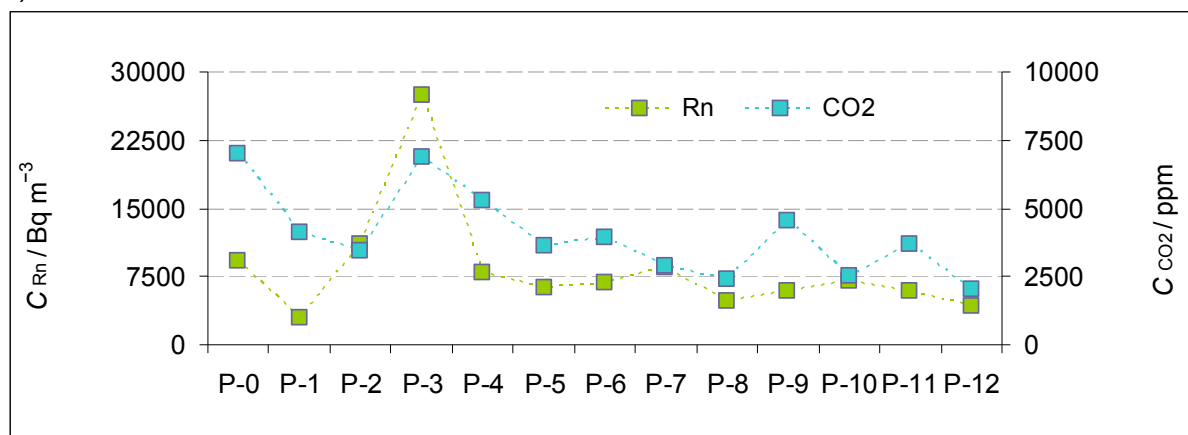


Slika 28: Koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm in 80 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih (a – prva meritev, b – druga meritev).

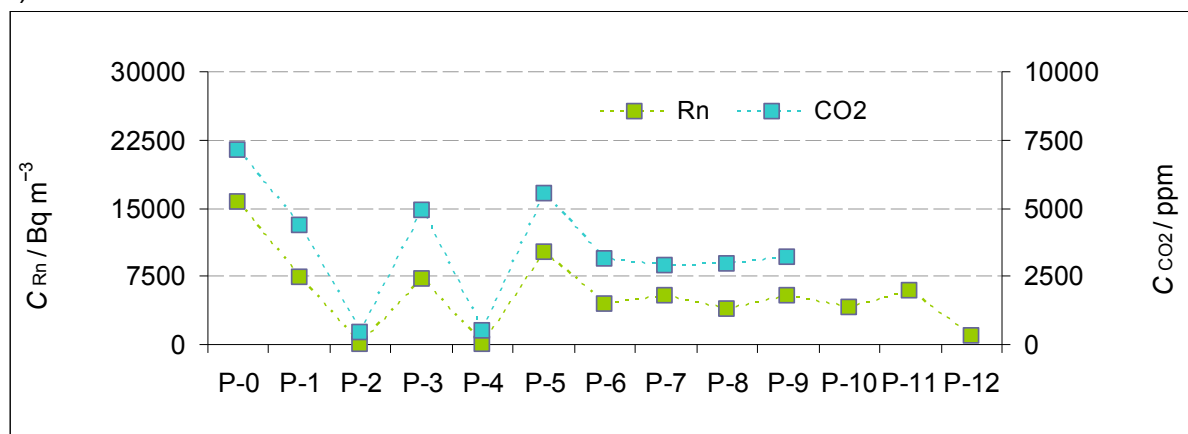
4.2.1.2.3 Primerjava koncentracij radona in ogljikovega dioksida

Korelacija koncentracij radona in ogljikovega dioksida na globini 50 cm na lokaciji Ponikve je lepo vidna, še posebej pri drugi meritvi (Slika 29b), ko je korelacijski koeficient kar 0,94. Pri prvi meritvi je korelacijski koeficient 0,61 (Slika 29a). Ob povišanju koncentracije radona naraste tudi koncentracije ogljikovega dioksida in obratno.

a)



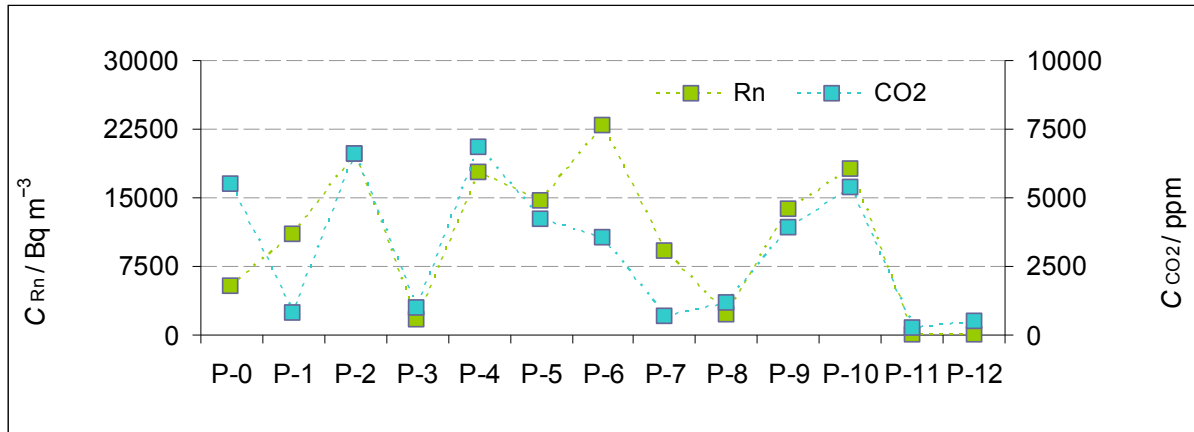
b)



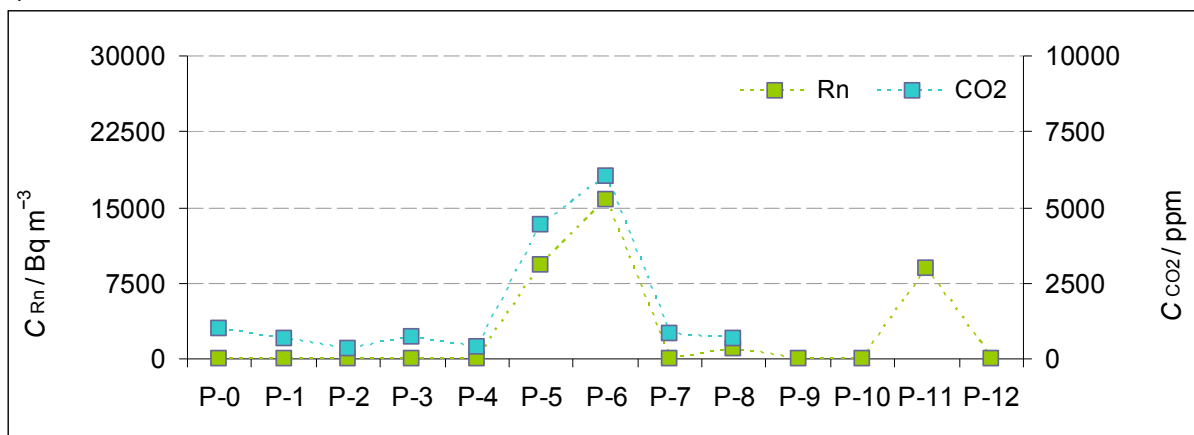
Slika 29: Koncentracije radona ($C_{Rn} / Bq\ m^{-3}$) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 50 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih (a – prva meritev, b – druga meritev).

Korelacija koncentracij radona in ogljikovega dioksida na globini 80 cm je na lokaciji Ponikve vidna pri obeh meritvah. Pri prvi meritvi (Slika 30a) se koncentraciji ujemata na večini točk (od P-2 do P-5 in od P-8 do P-12). Korelacijski koeficient je 0,69. Pri drugi meritvi (Slika 30b) je korelacija še višja, s korelacijskim koeficientom kar 0,95.

a)



b)



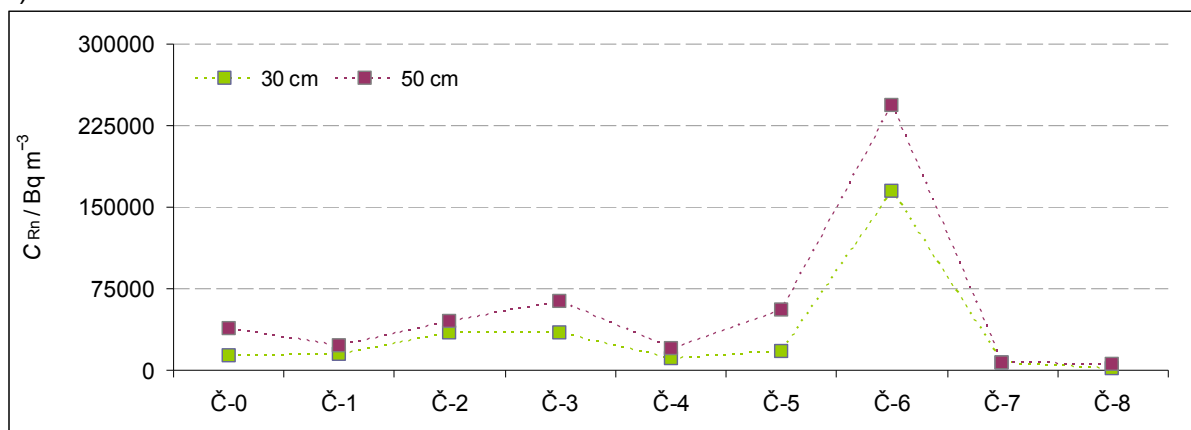
Slika 30: Koncentracije radona ($C_{Rn} / Bq\ m^{-3}$) in ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 80 cm na lokaciji Ponikve na karbonatih (a – prva meritev, b – druga meritev).

4.2.1.3 Lokacija Črnotiče

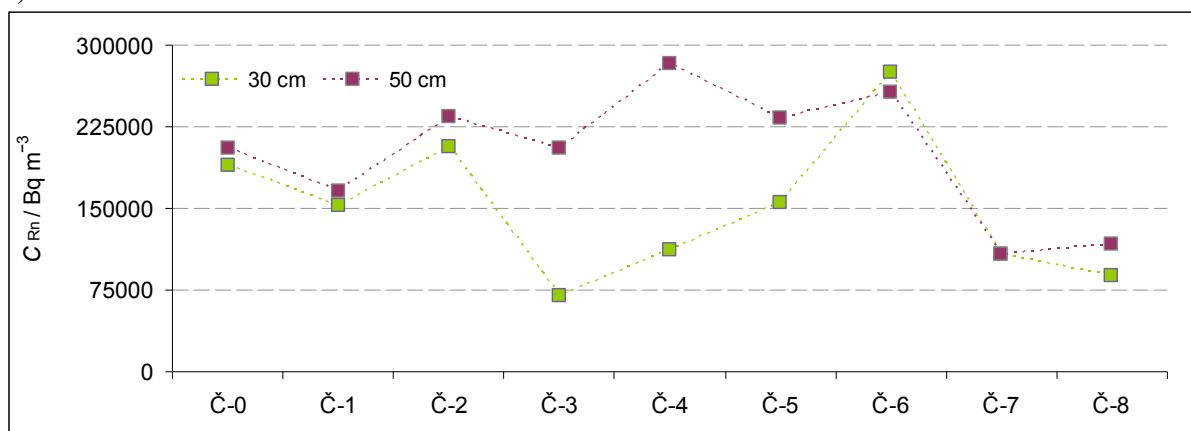
4.2.1.3.1 Primerjava koncentracij radona

Na lokaciji Črnotiče je skupno število točk le devet, saj sem bil omejen z velikostjo vrtače in sem zato izpustil zunanje štiri točke. Ujemanje koncentracij radona med globinama 30 cm in 50 cm je bilo pri prvi meritvi odlično, s korelacijskim koeficientom 0,99. (Slika 31a). Pri drugi meritvi (Slika 31b) je bilo ujemanje še vedno zelo dobro, s korelacijskim koeficientom 0,47.

a)

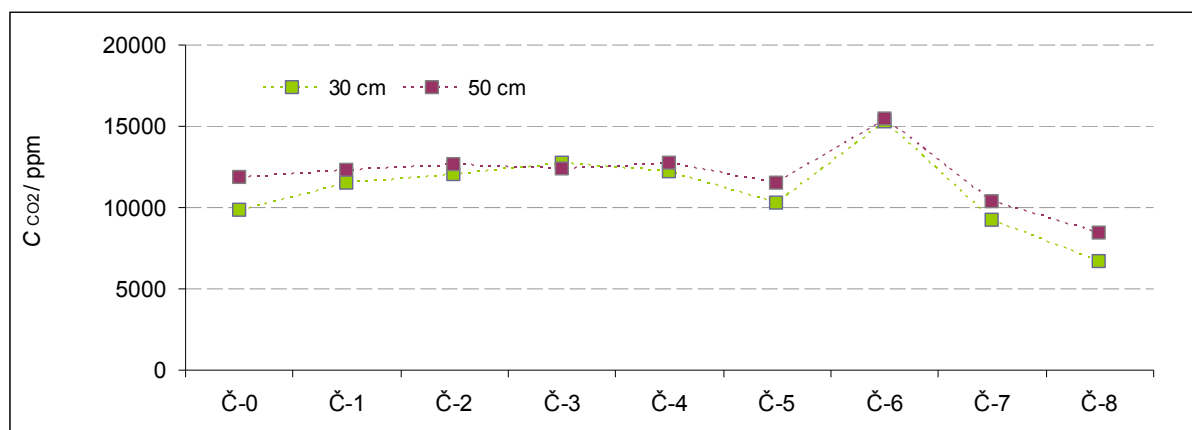


b)



Slika 31: Koncentracije radona ($C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$) na globini 30 cm in 50 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih (a – prva meritev, b – druga meritev).

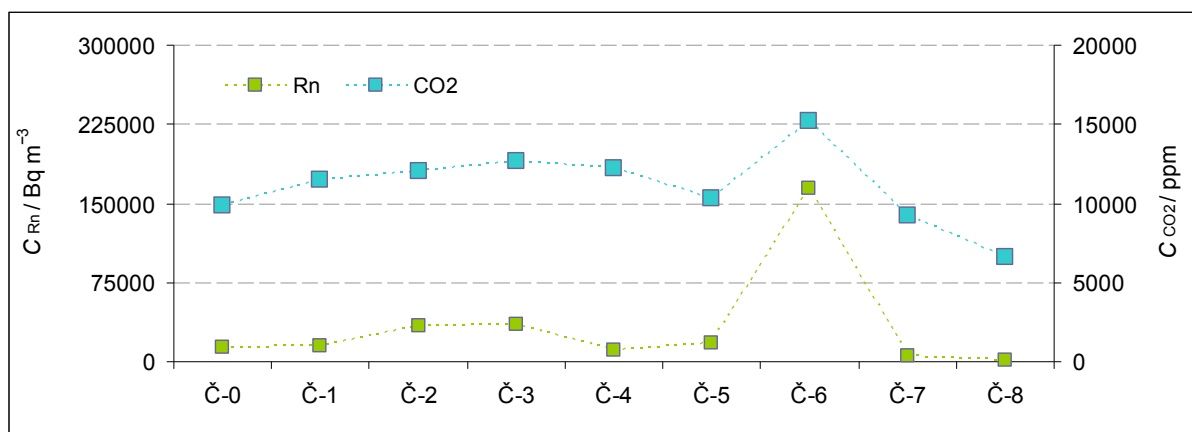
4.2.1.3.2 Primerjava koncentracij ogljikovega dioksida



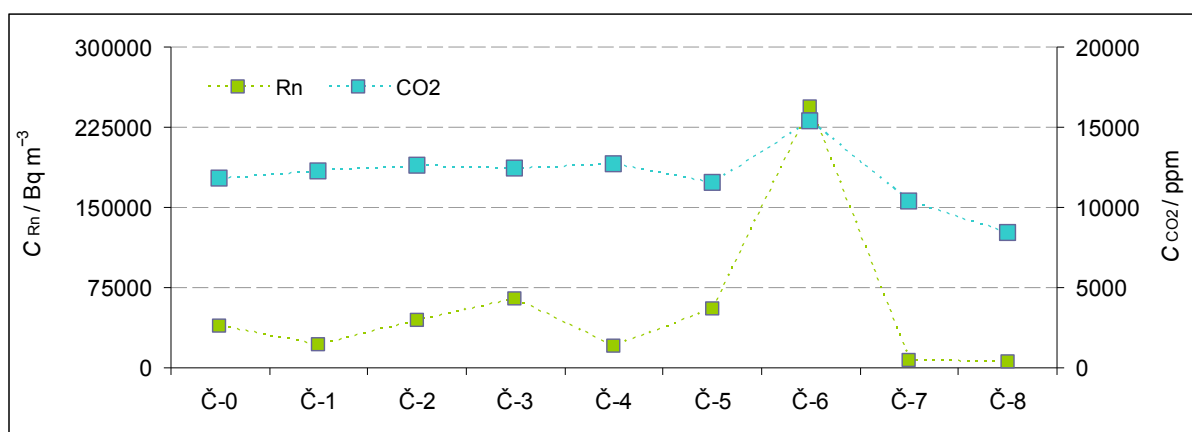
Slika 32: Koncentracije ogljikovega dioksida (C_{CO_2} / ppm) na globini 30 cm in 50 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih (prva meritev).

Ujemanje koncentracij ogljikovega dioksida na globini 30 cm in 50 cm (Slika 32) na lokaciji Črnotiče je zelo visoko, s korelacijskim koeficientom 0,89. Ogljikov dioksid sem meril samo enkrat.

4.2.1.3.3 Primerjava koncentracij radona in ogljikovega dioksida



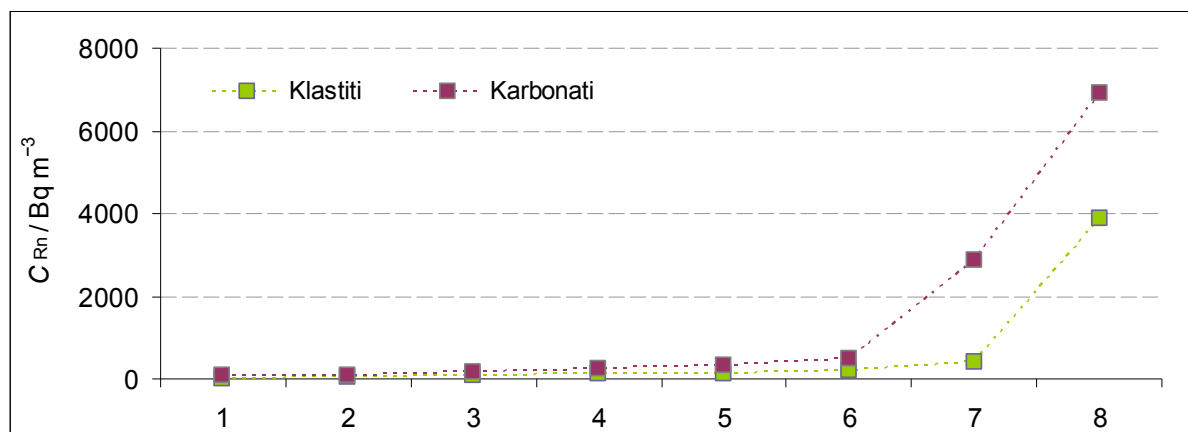
Slika 33: Koncentracije radona ($C_{Rn} / Bq\ m^{-3}$) in ogljikovega dioksida (C_{CO2} / ppm) na globini 30 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih.



Slika 34: Koncentracije radona ($C_{Rn} / Bq\ m^{-3}$) in ogljikovega dioksida (C_{CO2} / ppm) na globini 50 cm na lokaciji Črnotiče na karbonatih.

Korelacija koncentracij radona in ogljikovega dioksida je na obeh globinah zelo očitna, s korelacijskim koeficientom 0,75 na globini 30 cm (Slika 33) in 0,78 na globini 50 cm (Slika 34). Ogljikov dioksid sem na lokaciji Črnotiče meril le enkrat. Ujemanje potrjuje teorijo, da prihaja pretežni del radona na karbonatih iz globljih plasti s advekcijo, pri čemer je ogljikov dioksid nosilni plin za radon (Etiope in Martinelli, 2002).

4.2.1.4 Primerjava koncentracij radona v notranjem zraku



Slika 35: Koncentracije radona ($C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$) v zraku stanovanjskih hiš na litoloških podlagah klastiti (lokacija Sedraž) in karbonati – pokriti kras (lokacija Ponikve).

Kot vidimo na Sliki 35, sem v zraku osmih naključno izbranih stanovanjskih hiš na vsaki litološki podlagi dobil večinoma nizke koncentracije radona. Vendar pa se tudi na tako majhnem vzorcu hiš vidi, da so koncentracije na karbonatni podlagi zaznavno višje, kot se je to pokazalo že v prejšnjih raziskavah radona v vrtcih in šolah po Sloveniji (Vaupotič in sod., 1994; Vaupotič in sod., 2000; Popit in Vaupotič, 2002).

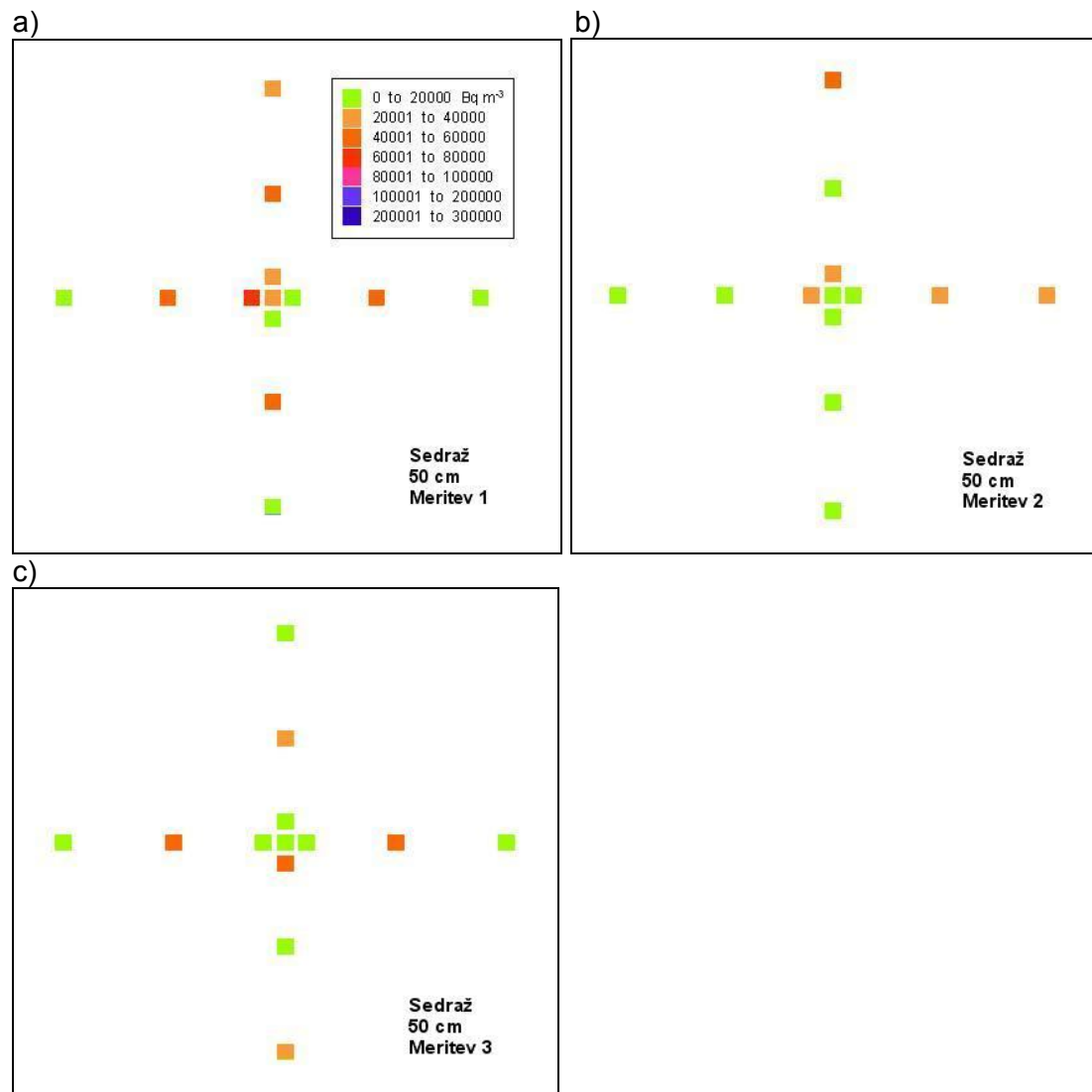
4.2.2 Prostorska primerjava koncentracij radona

Za izdelavo prostorskih primerjalnih shem sem uporabil program Surfer 8 (Golden Software, ZDA). Uporabil sem dve skali, eno za lokaciji Sedraž in Črnotiče, drugo za lokacijo Ponikve. Ker so vrednosti koncentracij radona na lokaciji Ponikve dosti nižje kot pri drugih dveh, sem za boljše preglednost uporabil skalo z nižjimi vrednostmi. Koncentracije radona pri lokacijah Sedraž in Črnotiče sem razdelil v sedem razredov, in sicer prvih pet razredov po 20000 Bq m^{-3} (od 0 do 100000 Bq m^{-3}) in zadnja dva po 100000 Bq m^{-3} (od 100001 do 300000 Bq m^{-3}) (Slike 36, 37, 40 in 41). Pri lokaciji Ponikve sem koncentracije radona prav tako razdelil v sedem razredov, in sicer prvih šest razredov po 4000 Bq m^{-3} (od 0 do 24000 Bq m^{-3}) in zadnjega od 24001 do 1000000 Bq m^{-3} (Slike 38 in 39).

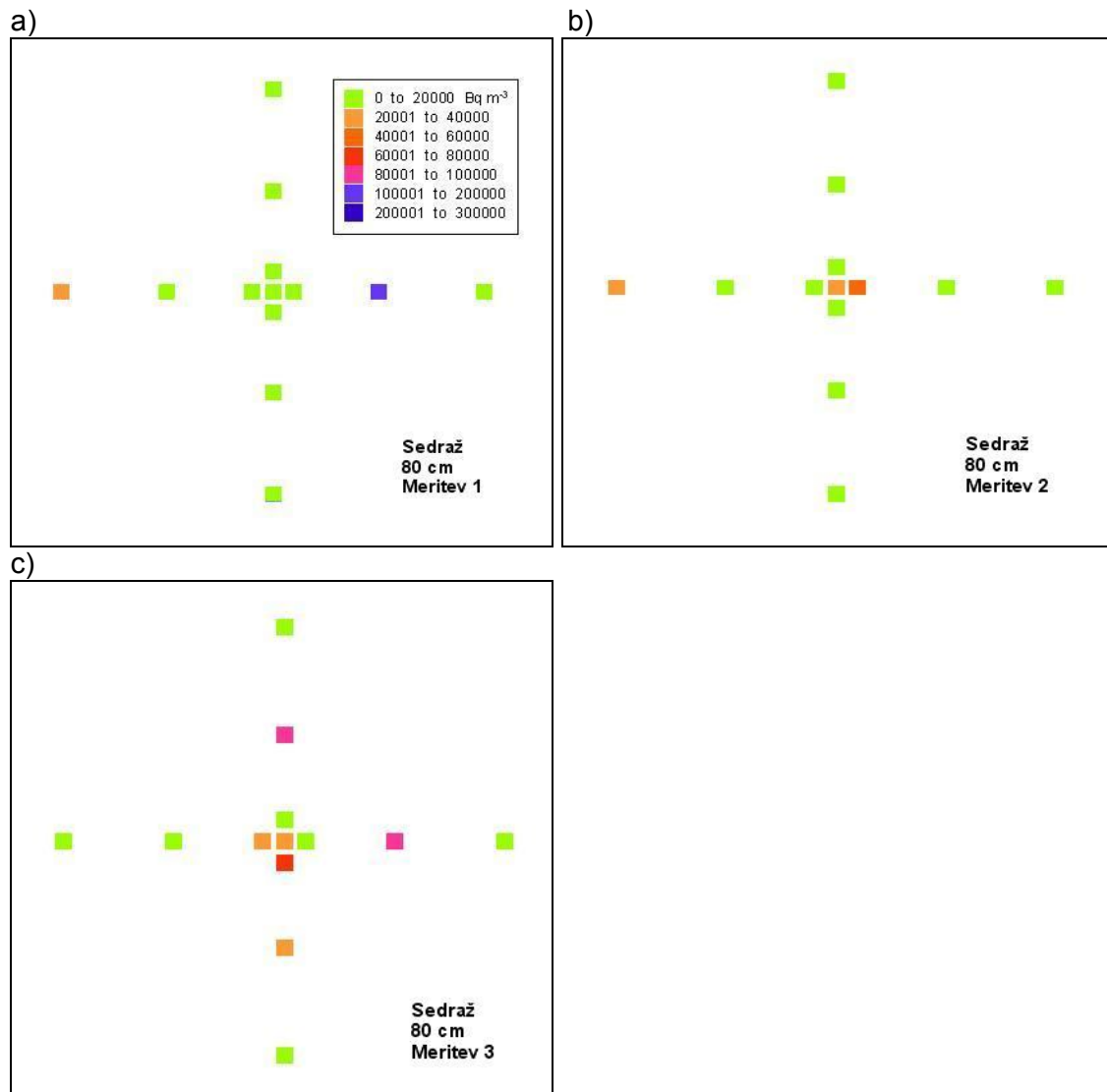
Kot vidimo na Slikah 36 do 41, so koncentracije radona lahko v širokem razponu tudi znotraj merilnih mrež tako majhnih dimenzij kot v mojem delu. Včasih so občutne razlike opazne že v oddaljenosti le 1 m od središčne točke, drugič pa so vrednosti na točkah podobne in se le v eni ali dveh točkah izjemno veliko razlikujejo.

Zaradi težav same izvedbe meritev, povezanih s slabo prepustnostjo zemljine, ti rezultati odražajo realne razmere na terenu. Kot vidimo, je ponovljivost rezultatov slaba, delno zaradi nepredvidenih dejavnosti na posamezni lokaciji, kot je bila na primer košnje trave v Ponikvah, kar sem zasledil povsem po naključju, kot tudi na splošno. Verjetno so poleg hidrometeoroloških razmer, katerih vlogo na koncentracijo radona v talnem zraku dovolj dobro poznamo, še drugi vplivi, ki pa jih je težko natančno opredeliti in spremljati, še posebej v poletnem času. Tem negotovostim se nisem mogel izogniti, četudi sem meritve skrbno načrtoval in jih izvedel v času stabilnega in suhega vremena

4.2.2.1 Lokacija Sedraž

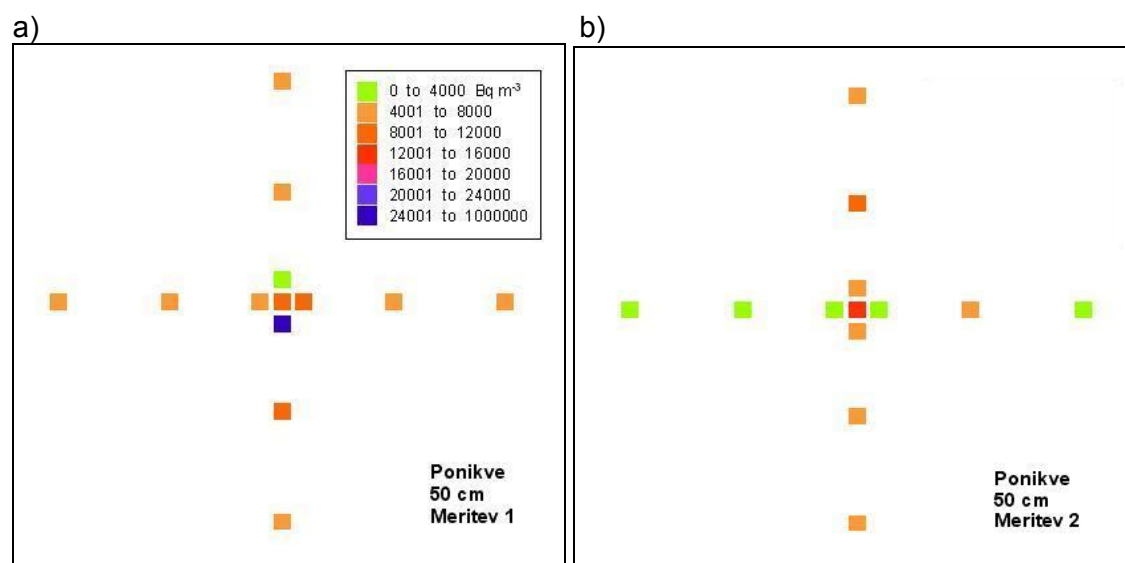


Slika 36: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m⁻³) na klastitih na globini 50 cm na lokaciji Sedraž (a – prva meritev, b – druga meritev, c – tretja meritev).

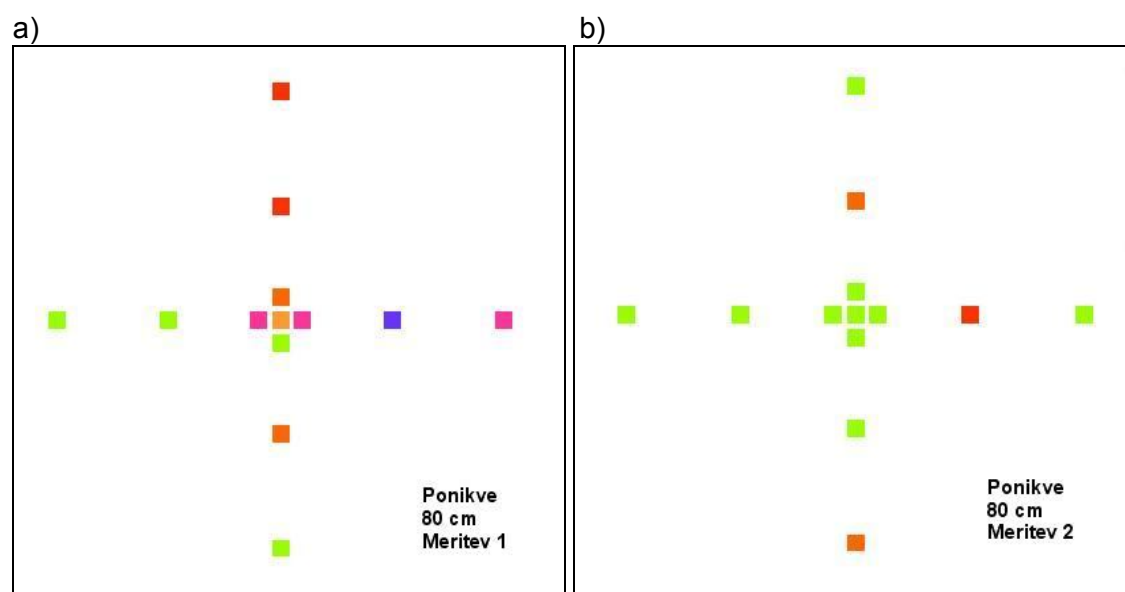


Slika 37: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v $Bq\ m^{-3}$) na klastitih na globini 80 cm na lokaciji Sedraž (a – prva meritev, b – druga meritev, c – tretja meritev).

4.2.2.2 Lokacija Ponikve

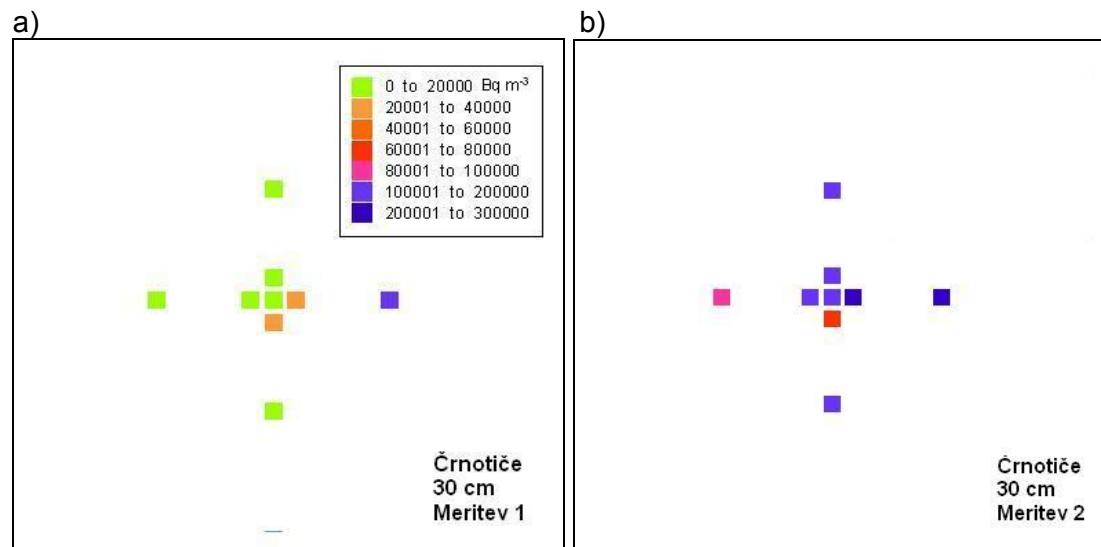


Slika 38: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v $Bq\ m^{-3}$) na karbonatih – pokriti kras na globini 50 cm na lokaciji Ponikve (a – prva meritev, b – druga meritev).

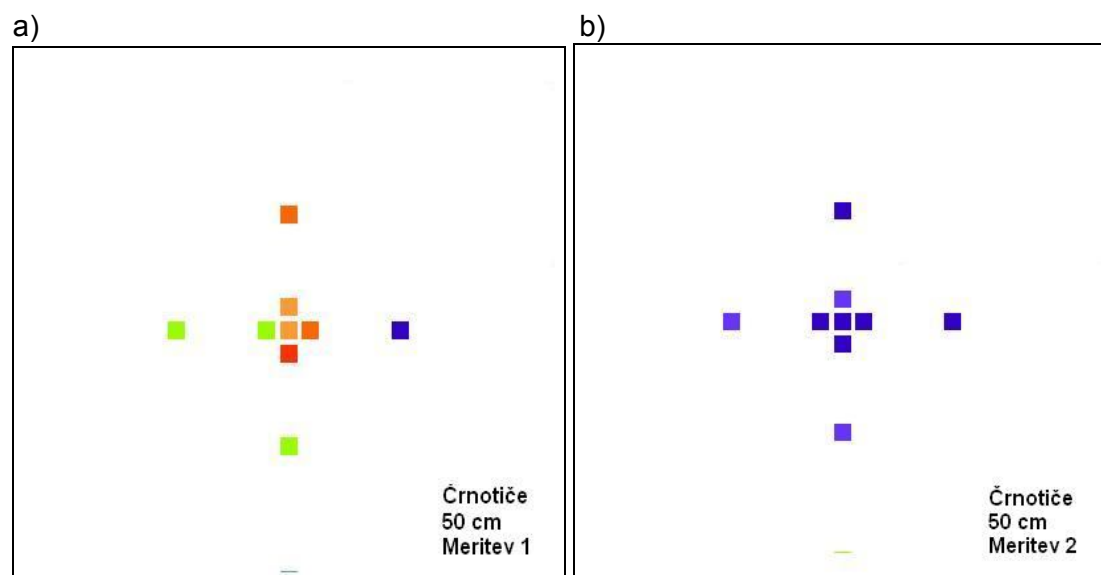


Slika 39: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v $Bq\ m^{-3}$) na karbonatih – pokriti kras na globini 80 cm na lokaciji Ponikve (a – prva meritev, b – druga meritev).

4.2.2.3 Lokacija Črnotiče



Slika 40: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m^{-3}) na karbonatih – goli kras na globini 30 cm na lokaciji Črnotiče (a – prva meritev, b – druga meritev).



Slika 41: Prostorska porazdelitev koncentracije radona (v Bq m^{-3}) na karbonatih – goli kras na globini 50 cm na lokaciji Črnotiče (a – prva meritev, b – druga meritev).

5 ZAKLJUČKI

V diplomskem delu sem meril koncentracije radona in ogljikovega dioksida v talnem zraku na dveh globinah na dveh različnih litoloških podlagah, in sicer v Sedražu (klastiti), v Ponikvah (karbonati – pokriti kras) in v Črnotičah (karbonati – goli kras). Na vsaki lokaciji sem meritve izvedel trikrat na trinajstih točkah v pravilni mreži 20 m × 20 m. Na osnovi dobljenih rezultatov sem prišel do naslednjih ugotovitev.

Koncentracije radona, ki sem jih izmeril v talnem zraku na klastitih, so bile v območju od 3000 do 65000 Bq m⁻³ na globini 50 cm in od 9000 do 140000 Bq m⁻³ na globini 80 cm. Na karbonatih so bile te vrednosti na pokritem krasu od 4000 do 30000 Bq m⁻³ na globini 50 cm ter od 5000 do 23000 Bq m⁻³ na globini 80 cm. Na golem krasu so bile koncentracije radona od 6000 do 275000 Bq m⁻³ na globini 30 cm in od 5000 do 285000 Bq m⁻³ na globini 50 cm.

Koncentracije radona v talnem zraku so bile na različnih točkah v mreži na isti lokaciji le redko podobne, največkrat pa so se znatno razlikovale. Včasih so bile vrednosti celo višje v plitki vrtini kot v globlji. Tako so bile na klastitih v povprečju za faktor 2,4 na globini 80 cm višje kot na globini 50 cm, a le v 23 % vzorcev. Primere, ko so bile koncentracije višje na globini 50 cm, povezujem predvsem z večjo vlažnostjo zemlje v globlji plasti in z njo povezano manjšo prepustnostjo, zaradi katere je bil odvzem vzorcev nepopoln in s tem dobljeni rezultat prenizek. Na karbonatih so na večji globini prevladovale tudi višje koncentracije radona. Na pokritem krasu so bile v 35 % vzorcev koncentracije radona v povprečju za faktor 2,3 višje na globini 80 cm kot na globini 50 cm. Na golem krasu so bile v vseh vzorcih za faktor 1,4 višje na globini 50 cm kot na globini 30 cm.

Čeprav sem vse meritve izvedel v obdobju stabilnega vremena z vsaj petimi predhodnimi dnevi brez padavin, v času s temperaturami od 25°C do 35°C, je bila ponovljivost rezultatov slaba. Poleg splošnih dejavnikov (emanacija, migracija, litološka podlaga, hidrometeorološki vplivi), katerih vpliv na koncentracijo radona je dobro poznan, so bili še drugi vplivi (kot v mojem primeru košnja), ki jih nisem predvidel in jih tudi nisem znal ovrednotiti.

Korelacija med koncentracijami radona in ogljikovega dioksida je po pričakovanju zelo dobra. Na klastitih je bil korelacijski koeficient od 0,41 do 0,87, na karbonatih pa 0,47 do 0,99.

Znotraj izbranih mrež so bile velike prostorske razlike radona na obeh litoloških podlagah in na vseh globinah. Razlike so bile očitne celo na razdalji le enega ali dveh metrov, in ne samo med najbolj oddaljenimi točkami. Verjetno je razlog za to v največji meri razlika v sestavi in vlažnosti tal, kar je oboje povezano s prepustnostjo tal. Zelo težko bi ocenil, kolikšno bi bilo najmanjše število meritev, da bi dobil zadovoljivo zanesljivo koncentracijo radona na neki lokaciji. Trinajst merilnih točk je bilo očitno premalo.

Meritve koncentracij radona v nekaj stanovanjskih hišah na obeh litoloških enotah so pokazale, da se tudi na tako majhnem vzorcu hiš vidi, da so koncentracije na karbonatni podlagi zaznavno višje kot na klastitih.

Pri tovrstnih meritvah bi bilo potrebno pogoje odvzema vzorcev prilagoditi vlažnosti zemlje in med črpanjem meriti pretok plina skozi scintilacijsko celico.

Po vsem tem se zastavlja vprašanje, koliko natančne in zanesljive so lahko karte radonskega potenciala v tleh in koliko je njihova izdelava smotrna. Za zelo grobo oceno ravni radona v tleh so še sprejemljive, da bi pa na njihovi osnovi odločali o tehničnih ukrepih za graditev radonsko varnih zgradb, pa je zelo tvegano.

6 VIRI

- Albering H.J., Hoogeweff J.A., Kleinjans J.S.C. 1996. Survey of ^{222}Rn concentrations in dwellings and soils in the Dutch Belgian border region. *Health Physics* 70: 64 – 69
- Ames (Avtomatski merilni sistem za okolje). 2000. PRM 145 Prenosni merilnik radona; opis in navodilo za uporabo. Ljubljana
- ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje). 2006. Podnebne razmere v Sloveniji (Obdobje 1971 – 2000). Ljubljana. Str. 1 – 19
http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/podnebne_razmere_Slo71_00.pdf (24. avg 2011)
- Baykara O., Dođru M., Inceöz M., Aksoy E. 2005. Measurements of radon emanation from soil samples in triple-junction of North and East Anatolian active faults systems in Turkey. *Radiation Measurements* 39: 209 – 212
- Bossew P. 2003. The radon emanation power for building materials, soil and rock. *Applied Radiation and Isotopes* 59: 389 – 392
- Buser S. 1974. Tolmač lista Ribnica. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Beograd, Zvezni geološki zavod, L 33 – 76
- Buser S. 1979. Tolmač lista Celje. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Beograd, Zvezni geološki zavod, L 33 – 67
- 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
- EC (European Commission). 2005. An Overview of Radon Surveys in Europe. EUR 21892 EN, PUBSY 1429
- Etiope G., Martinelli G. 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physich of the Earth and Planetary Interiors* 129: 185 – 204
- Fujiyoshi R., Haraki Y., Sumiyoshi T., Amano H., Kobal I., Vaupotič J. 2009. Tracing the sources of gaseous components (^{222}Rn , CO_2 and its carbon isotopes) in soil air under a cool-deciduous stand in Sapporo, Japan. *Environmental Geochemistry and Health* 32: 73 – 82
- Fujiyoshi R., Sakamoto K., Imanishi T., Sumiyoshi T., Sawamura S., Vaupotič J., Kobal I. 2006. Meteorological parameters contributing to variability in ^{222}Rn activity concentration in soil gas at a site in Sapporo, Japan. *Science of the Total Environment* 370: 224 – 234
- Gams I. 1962. Terminologija večjih kraških površinskih oblik. *Geografski vestnik* 34, Ljubljana

- Geodetski inštitut Slovenije, a. Pedološka karta. Geopedia
http://www.geopedia.si/?params=T153_vT_b4_s9#T153_L6250_F216_x514109_y111197_s15 (24. avg 2011)
- Geodetski inštitut Slovenije, b. Pedološka karta. Geopedia
http://www.geopedia.si/?params=T153_vT_b4_s9#T153_L6250_F1365_x473163.109375_y79411.59765625_s16 (24. avg 2011)
- Geodetski inštitut Slovenije, c. Pedološka karta. Geopedia
http://www.geopedia.si/?params=T153_vT_b4_s9#T153_L6250_F1181_x416686.109375_y44912.59765625_s14 (24. avg 2011)
- iTouchMaps.com. Mobile and Desktop Maps
<http://iTouchMaps.com/langlong.html> (24. avg 2011)
- Jacobi W. 1996. Basic of concern: the possible lung cancer risk from residential radon. Proceedings of the Ninth International Congress of the International Radiation Protection Association, Dunaj. Str. 267 – 273
- Jönsson G., Baixeras C., Devantier R., Enge W., Font L.I., Freyer K., Ghose R., Treutler H.C. 1999. Soil radon levels measured with SSNTD's and the soil radium content. Radiation Measurements 31: 291 – 294
- Kemski J., Klingel R., Siehl A. 1996. Classification and mapping of radon-affected areas in Germany. Environmental International 22: 789 – 798
- Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M. 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. The Science of the Total Environment 272: 217 – 230
- Koželj M., Erman R., Istenič R., Radež Č.M. 2006. Delo z viri sevanj. 1. izdaja. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost. Str. 96
- Križman M., Ilić R., Škvarč J., Jeran Z. 1996. A survey of indoor radon concentrations in dwellings in Slovenia. V: Proceedings of Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries in Central Europe. Glavič-Cindro D. (ur.). Ljubljana, Jožef Stefan Institute: 66 – 70
- 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 A.V. (ur.). John Wiley and Sons: 57 – 112
- Nero A.V. Jr. 1988. Radon and its decay product in indoor air: an overview. V: Radon and its decay product in indoor air. Nazaroff W. W., Nero A. V. (ur.). John Wiley and Sons, New York: 1 – 53
- Neznal M., Matolín M., Just G., Turek K. 2004. Short-term temporal variations of soil gas radon concentration and comparison of measurement techniques. Radiation Protection Dosimetry 108: 55 – 63
- Neznal Mar. in Neznal Mat. 2005. Determination of soil-gas radon concentration in low permeability soils. Radioactivity in the Environment 7: 722 – 725

- Neznal M., Šmarda J. 1996. Assessment of radon potential of soils – A five-year experience. *Environmental International* 22: 819 – 828
- Pleničar M., Polšak A., Šikič D. 1973. Tolmač za list Trst. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Beograd, Zvezni geološki zavod, L 33 – 88
- Popit A., Vaupotič J. 2002. Indoor radon concentrations in relation to geology in Slovenia. *Environmental Geology* 42: 330 – 337
- Quindos-Poncela L.S., Fernandez P.C., Sainz C., Arteché J., Arozamena J.G., George A.C. 2003. An improved scintillation cell for radon measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 512: 606 – 609
- Rose A.W., Hutter A.R., Washington J.W. 1990. Sampling variability of radon in soil gases. *Journal of Geochemical Exploration* 38: 173 – 191
- Schmid K., Kuwert T., Drexler H. 2010. Radon in indoor spaces: An underestimated risk factor for lung cancer in environmental medicine. *Deutsches Ärzteblatt International* 107: 181 – 186
- Schumann R.R., 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
- Singh B., Virk H. 1996. Effects of soil and sand moisture content on radon diffusion using plastic track etched detector. *Radiation Measurements* 26: 49 – 50
- Sroor A., El-Bahi S.M., Ahmed F., Abdel-Haleem A.S. 2001. Natural radioactivity and radon exhalation rate of soil in southern Egypt. *Applied Radiation and Isotopes* 55: 873 – 879
- Strandén 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
- Testo. 2009. Multi-function measuring instruments. Brošura, ZDA. http://www.testosites.de/export/sites/default/testo435/en_INT/local_downloads/Brochure_Multi-Function.pdf (24. avg 2011)
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 1993. Sources, effects and risk of ionizing radiation. UNSCEAR Publication, E.94.IX.2, United Nations, New York
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 2000. Report to the General Assembly, with scientific annexes. 2000. Vol. 1

- Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih. Uradni list RS (Ur. l. RS, št. 49/2004)
- Varley N.R., Flowers A.G. 1998. The influence of geology on radon levels in SW England. *Radiation Protection Dosimetry* 77: 171 – 176
- Vaupotič J. 1995. Koncentracija radona in njegovih razpadnih produktov v bivalnem okolju ter modelni izračuni doz. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo. Oddelek za kemijo kemijsko tehnologijo. Str. 123
- Vaupotič J. 2002. Radon. V: Navodila in priročnik za vaje iz higijene. Čakš T. (ur.). Ljubljana, Medicinska fakulteta, Inštitut za higieno: 124 – 131
- Vaupotič J. 2003. Indoor radon in Slovenia. *Nuclear Technology & Radiation Protection* 18: 36 – 43
- Vaupotič J., Ančik M., Škofljanec M., Kobal I. 1992. Alpha scintillation cell for direct measurement of indoor radon. *Journal of Environmental Science and Health A* 27: 1535 – 1540
- Vaupotič J., Gregorič A., Kobal I., Žvab P., Kozak K., Mazur J., Kochowska E., Grzadziel D. 2010a. Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Ravne fault in NW Slovenia. *Natural Hazards Earth Systems Sciences* 10: 895 – 899
- Vaupotič J., Kobal I. 1997. Radon v naravi in našem okolju. V: Kemizacija okolja in življenja – Do katere meje? Lah A. (ur.). Ljubljana, Slovensko ekološko gibanje: 124 – 144
- Vaupotič J., Kobal I., Križman M. 2010b. Background outdoor radon levels in Slovenia. *Nukleonika* 55: 579 – 582
- Vaupotič J., Križman M., Planinič J., Pezdič J., Adamič K., Stegnar P., Kobal I. 1994. Systematic indoor radon and gamma measurements in kindergartens and play schools in Slovenia. *Health Physics* 66: 550 – 556
- Vaupotič J., Šikovec M., Kobal I. 2000. Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools. *Health Physics* 78: 559 – 562
- Vaupotič J., Žvab P., Gregorič A., Dujmovič P., Kocman D., Kobal I., Kozak K., Mazur J., Kochowska E., Haber R. 2007. Radonski potencial v tleh na območjih s povišanimi koncentracijami radona v zaprtih prostorih. Delovno poročilo. Ljubljana, IJS-DP-9694
- Vaupotič J., Žvab P., Gregorič A., Kobal I., Kocman D., Kotnik J., Križman M. 2008. Radon mapping in Slovenia based on its levels in soil gas. V: 33rd International Geological Congress, 6-14 August 2008, Oslo, Norway. Abstracts
- Wiegand J. 2001. A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters. *Environmental Geology* 40: 949 – 963
- Zimmer K., Erzinger J. 2003. Continuous H₂O, CO₂, ²²²Rn and temperature measurements on Merapi volcano, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 125: 25 – 38

- 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. Str. 47
- Žunić Z.S., Kobal I., Vaupotič J., Kozak K., Mazur J., Birovljev A., Janik M., Čeliković I., Ujić P., Demajo A., Krstić G., Jakupi B., Quarto M., Bochicchio F. 2006. High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niška Banja (Balkan region). *Journal of Environmental Radioactivity* 89: 249 – 260