

UNIVERZA V NOVI GORICI  
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

**SPREMINJANJE KONCENTRACIJE RADONA V  
TURISTIČNI KRAŠKI JAMI V ODVISNOSTI OD  
ZUNANJE TEMPERATURE IN TLAKA**

DIPLOMSKO DELO

Kristina OBU

Mentorici: prof. dr. Janja VAUPOTIČ  
doc. dr. Barbara ČENČUR CURK

Nova Gorica, 2010



## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoricama prof. dr. Janji Vaupotič in doc. dr. Barbari Čenčur Curk za usmerjanje in strokovno pomoč pri izdelavi diplomskega dela ter prof. dr. Ivanu Kobalu za strokovne pripombe.

Zahvaljujem se tudi Branetu Čuku za pomoč pri postavitvi merilnikov v Kostanjeviški jami in njeno predstavitev ter Zorku Vičarju iz Agencije Republike Slovenije za okolje za posredovane meteorološke podatke.

Posebna zahvala gre vsem mojim domačim in Ivanu Vaznerju, ki so me podpirali tako med študijem, kot tudi v času nastajanja diplomskega dela.



## **POVZETEK**

Cilj diplomske naloge je bil ugotoviti in ovrednotiti vplive zunanje temperature in tlaka na koncentracijo radona v zraku Kostanjeviške jame. Kontinuirane meritve radona smo izvajali na treh različnih mestih jame. Podatke o zunanji temperaturi in zračnem tlaku smo dobili z bližnje meteorološke postaje. V Kapniški dvorani smo radon merili kontinuirano od aprila do novembra 2009. Rezultati so pokazali, da se koncentracija radona v jami spreminja sorazmerno zunanji temperaturi, vendar s krajšimi časovnimi zamiki. Na splošno je vpliv temperature na koncentracijo radona neprimerno večji takrat, ko je zunanja temperatura nižja od temperature v jami, ki je konstantna. Vpliv zračnega tlaka je manjši, in sicer obratno sorazmeren s koncentracijo radona. Za primerjavo smo koncentracijo radona kontinuirano merili julija 2009 še v Mali jami ter novembra in decembra 2009 v Podorni dvorani. Glavna ugotovitev je, da se zaradi spremembe zunanje temperature koncentracija radona na različnih mestih v jami ne spreminja enako intenzivno in tudi ne istočasno. Dodatno smo v različnih letnih obdobjih na devetih mestih v jami petkrat izmerili trenutno koncentracijo radona in trikrat koncentracijo ogljikovega dioksida. Kot smo pričakovali, povprečje koncentracije radona vsakega vzorčevalnega mesta od vhoda v notranjost jame narašča in je precej višja poleti kot v ostalih obdobjih. Koncentracija radona je bila višja tudi ob povišani gladini podzemne vode in nižja na mestih, kjer je zaradi prelomov in razpok izmenjava zraka v jami z zunanjim zrakom hitrejša. Zveza med koncentracijo radona in koncentracijo ogljikovega dioksida je premo sorazmerna.

Ključne besede: radon, ogljikov dioksid, kraška jama, temperatura zraka, zračni tlak, geologija

## **SUMMARY**

The goal of this study was to evaluate the influences of outdoor air temperature and pressure on radon concentration in the Kostanjevica Cave. Continuous radon monitoring in air was carried out at three different points in the cave. Outdoor temperature and barometric pressure data were provided from nearby meteorological station. In the 'Kapniška dvorana' place, radon concentration was continuously measured from April to October 2009. An increase in outdoor air temperature is followed (with short time delay) by increase in radon concentration. In general, the influence of indoor air temperature on radon concentration is much higher when the air temperature outdoors is lower than in the cave. Barometric pressure has been found to have a minor influence on radon concentration. During its decrease, radon concentration increases, and vice versa. For sake of comparison, radon concentration was measured continuously also in July 2009 in the 'Mala jama' and in November and December 2009 in the 'Podorna dvorana' places. Time variations of radon concentration have appeared to have different intensities at different points in the cave. In addition, at nine points in the cave radon concentration was measured five times and carbon dioxide concentration three times in different yearly seasons. As expected, radon average concentration of each sampling is lowest at the entrance and gradually increases towards the interior parts of the cave, the levels being much higher in summer period than in other seasons. Radon concentration was higher in periods of higher levels of groundwater and lower at points where air exchange between outdoor and cave air is faster due to breaks and cracks of the cave. Relatively good correlation between radon and carbon dioxide concentrations in the cave has been found out.

Key words: radon, carbon dioxide, karst cave, air temperature, barometric pressure, geology



## KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Cilji diplomskega dela.....	1
2	TEORETIČNE OSNOVE.....	3
2.1	Radioaktivnost.....	3
2.2	Radon.....	4
2.2.1	Fizikalno-kemijske lastnosti radona.....	4
2.2.2	Izvor in porazdelitev radona.....	6
2.2.3	Emanacijski koeficient.....	6
2.2.4	Transport radona v tleh.....	6
2.2.5	Ekshalacija (izhajanje) radona.....	7
2.2.6	Radon v zraku kraških jam.....	8
2.3	Geologija.....	8
2.3.1	Geologija širše okolice Kostanjeviške jame.....	8
2.3.2	Kras.....	11
2.3.3	Kostanjeviška jama.....	11
3	EKSPERIMENTALNI DEL.....	13
3.1	Meritve radona.....	13
3.1.1	Alfa scintilacijska celica.....	13
3.1.2	Merilnik RadonScout.....	14
3.1.3	Merilnik EQF 3020–2.....	15
3.2	Meritve ogljikovega dioksida z merilnikom Testo 435.....	15
3.3	Potek meritev.....	16
4	REZULTATI IN RAZPRAVA.....	19
4.1	Kontinuirane meritve radona.....	19
4.1.1	Kapniška dvorana.....	19
4.1.2	Mala jama.....	25
4.1.3	Podorna dvorana.....	28
4.1.4	Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Mali jami.....	31
4.1.5	Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Podorni dvorani.....	33
4.2	Rezultati meritev trenutnih koncentracij radona.....	35
4.3	Rezultati meritev trenutnih koncentracij ogljikovega dioksida.....	38
4.4	Koncentracija radona in ogljikovega dioksida.....	38
5	ZAKLJUČEK.....	41
6	VIRI.....	43
	PRILOGE	





## KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Eksponentni zakon radioaktivnega razpada (Stritar in sod., 1997).....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2: Razpadni nizi torija, urana in aktinija (Valkovič, 2000).....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 3: Transport radona (povzeto po Otton, 1993) .....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4: Geološka karta Kostanjevice na Krki z okolico (Pleničar in sod., 1975) in lokacija Kostanjeviške jame (rdeči krog). .....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 5: Prelomi na območju Gorjancev (Pleničar in sod., 1975) .....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 6: Prenosni merilnik radona PRM 145 (Ames, Slovenija) s scintilacijsko celico. 13</i>	
<i>Slika 7: Merilnik RadonScout (Sarad, Nemčija) .....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 8: Merilnik EQF 3020–2 (Sarad, Nemčija).....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 9: Testo 435 z IAQ tipalom.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 10: Izsek tlorisa Kostanjeviške jame (Gams, 2004) z označenimi vzorčevalnimi (T1 do T9) in merilnimi (K1 do K3) mesti. Legenda je ista kot v prilogi A. ....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 11: Odvisnost koncentracije radona v Kapniški dvorani od zunanje temperature 20</i>	
<i>Slika 12: Odvisnost koncentracije radona v Kapniški dvorani od zračnega tlaka .....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 13: Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje temperature v obdobju od 23. 4. 2009 do 30. 4. 2009 .....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 14: Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka v obdobju od 23. 4. 2009 do 30. 4. 2009 .....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 15: Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje temperature v obdobju od 15. 7. 2009 do 22. 7. 2009 .....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 16: Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka v obdobju od 15. 7. 2009 do 22. 7. 2009 .....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 17: Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje temperature v obdobju od 27. 10. 2009 do 30. 10. 2009 .....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 18: Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka v obdobju od 27. 10. 2009 do 30. 10. 2009 .....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 19: Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanje temperature .....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 20: Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanje temperature v obdobju od 20. 7. 2009 do 22. 7. 2009 .....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 21: Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanje tlaka.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 22: Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanje tlaka v obdobju od 20. 7. 2009 do 22. 7. 2009 .....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 23: Rezultati meritev koncentracije radona v Podorni dvorani .....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 24: Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje temperature za obdobje od 25. 11. 2009 do 30. 11. 2009.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 25: Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka za obdobje od 25. 11. 2009 do 30. 11. 2009 .....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 26: Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje temperature za obdobje od 1. 12. 2009 do 7. 12. 2009.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 27: Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka za obdobje od 1. 12. 2009 do 7. 12. 2009 .....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 28: Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Mali jami v obdobju od 20. 7. 2009 do 25. 7. 2009 .....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 29: Spreminjanje zunanje temperature in tlaka v obdobju od 20. 7. 2009 do 25. 7. 2009 .....</i>	<i>32</i>

<i>Slika 30: Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Podorni dvorani v obdobju od 25. 11. 2010 do 30. 11. 2010</i> .....	34
<i>Slika 31: Spreminjanje zunanje temperature in tlaka v obdobju od 25. 11. 2010 do 30. 11. 2010</i> .....	34
<i>Slika 32: Trenutne koncentracije radona na različnih vzorčevalnih mestih in globinah v jami v različnih terminih meritev</i> .....	37
<i>Slika 33: Koncentracija ogljikovega dioksida v ppm na različnih merilnih mestih (T1 do T9) v jami</i> .....	38
<i>Slika 34: Primerjava trenutne koncentracije radona in koncentracije ogljikovega dioksida na različnih vzorčevalnih oziroma merilnih mestih in v različnih obdobjih</i> ...	39
<i>Slika 35: Korelacija med koncentracijo radona in ogljikovega dioksida v Kostanjeviški jami</i> .....	40

## KAZALO TABEL

<i>Tabela 1: Obdobja in lokacije kontinuiranih meritev v Kostanjeviški jami.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 2: Pregled vzorčenj zraka za meritve trenutnih koncentracij radona in meritve ogljikovega dioksida na vzorčevalnih mestih od T1 do T9.....</i>	<i>17</i>



# 1 UVOD

Radon je radioaktiven žlahten plin, ki nastaja v zemeljski skorji z radioaktivnim razpadom alfa iz radija v razpadnih verigah urana ( $^{238}\text{U}$  in  $^{235}\text{U}$ ) ter torija ( $^{232}\text{Th}$ ) (Nero Jr., 1988). Ker sta uran in torij široko razširjena elementa, čeprav v nizkih koncentracijah, ga najdemo v vseh okoljih. Od mesta nastanka se širi z difuzijo in na daljše razdalje z advekcijo, bodisi kot raztopljen v vodi ali nosilnem plinu (Etiopie in Martinelli, 2002). Kemijsko sicer ne reagira z okolico, pač pa radioaktivno razpada. Na njegov transport v kamninah vplivajo geološki (strukturni) in hidrometeorološki parametri. V tleh, v podzemnih prostorih (kraške jame, rudniki), v ozračju ter v našem bivalnem in delovnem okolju najpogosteje dosega merljive ravni le izotop  $^{222}\text{Rn}$  (ki ga zato, če ni drugače navedeno, imenujemo radon), ki nastaja v razpadni verigi  $^{238}\text{U}$  in ima od ostalih dveh (torona  $^{220}\text{Rn}$  in aktinona  $^{219}\text{Rn}$ ) znatno daljšo razpolovno dobo (3,82 dneva).  $^{222}\text{Rn}$  dalje razpada in pri tem nastajajo kratkoživi razpadni produkti (RnDP)  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  in  $^{214}\text{Po}$ , ki se v zraku pojavljajo kot nano aerosoli. Pri dihanju se jih del deponira v pljučih, kjer s svojim sevanjem poškodujejo tkivo in povečujejo možnost za razvoj pljučnega raka (Nero Jr., 1988).

Specifična aktivnost  $^{238}\text{U}$  v apnencu je med 16 in 31 Bq kg<sup>-1</sup> in je glede na druge kamnine nizka (Hakl in sod., 1997), zato je apnenec šibek izvir  $^{222}\text{Rn}$ . Vendar zaradi zakrasedlosti apnenca (podzemni jaški, razpoke, rovi) radon tu potuje na daljše razdalje in se kopiči v podzemnih prostorih, tako da lahko dosega v zraku kraških jam tudi zelo visoke koncentracije (Cigna, 2005; Field, 2007; Hakl in sod., 1996; Vaupotič in sod., 2001). Dodaten vzrok za hiter transport radona od izvora do kraških jam in v ozračje so tudi tektonski prelomi. Raven koncentracije seveda določa tudi geometrija jame ter število in smer rofov, skozi katere ima jama stik z zunanjim ozračjem, zato je poznavanje strukturno-geoloških parametrov pomembno. Na časovno spreminjanje koncentracije pa vplivajo hidrometeorološki parametri, med katerimi običajno prevladujeta zračni tlak in razlika v temperaturi zraka v jami in zunaj (Garavaglia in sod., 1998; Przylibski, 1999). Jama deluje kot velik dimnik: pozimi je temperatura v jami višja kot zunaj in topel z radonom bogat jamski zrak izhaja skozi vertikalne rove in jaške v ozračje, v jamo pa skozi horizontalne odprtine doteka zunanji zrak z znatno nižjo koncentracijo radona in tako znižuje raven radona v jami.

Trenutno je v Sloveniji registriranih več kot 8500 kraških jam, od tega okrog 20 turističnih, med njimi tudi Kostanjeviška, ostale pa so dostopne le za speleologe in jamarje. Vsako leto odkrijejo več kot 100 novih jam. Koncentracije radona v zraku teh jam so med 100 in 7000 Bq m<sup>-3</sup>, dosega pa lahko tudi nekaj 10000 Bq m<sup>-3</sup> (Kobal in sod., 1987; Kobal in sod., 1988). Medtem ko je za obiskovalce izpostavljenost radonu zanemarljiva, pa lahko doze turističnih vodnikov in speleologov, ki preživijo dalj časa v jami, presegajo vrednosti, ki že imajo vpliv na organizem (Vaupotič in sod., 2001). Da to preprečimo, je potrebno poznati koncentracijo radona in tudi razumeti dejavnike, ki nanjo vplivajo (Vaupotič in sod., 2008). Za razliko od rudnikov, jam namreč ne moremo umetno prezračevati, ker želimo ohraniti neokrnjeno tvorbo kapnikov ter jamske flore in favne.

## 1.1 Cilji diplomskega dela

Cilj diplomskega dela je bil raziskati in ovrednotiti vplive zunanje temperature in tlaka na časovno in prostorsko porazdelitev koncentracije radona v Kostanjeviški jami. Raziskava je zato temeljila (i) na kontinuiranih meritvah radona v zraku v jami preko

daljšega časovnega obdobja ter na podatkih o zunanji temperaturi in zračnem tlaku z bližnje meteorološke postaje Cerklje-letališče za ugotavljanje časovne porazdelitve koncentracije radona in (ii) na meritvah trenutnih koncentracij radona in ogljikovega dioksida na različnih točkah vzdolž jame za ugotavljanje prostorske porazdelitve koncentracije radona. Da bi bolje razumeli dobljene rezultate smo pregledali strukturno-geološko zgradbo področja jame (morebitni prelomi).

Z rezultati diplomskega dela smo pokazali časovni potek koncentracije radona v zraku jame, z značilnimi koncentracijami v toplem in hladnem delu leta, spreminjanje koncentracije radona od vhoda v jamo do končne točke turistične poti ter vplive geomorfoloških značilnosti jame na koncentracijo radona na posameznih merskih točkah v jami.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

### 2.1 Radioaktivnost

Radioaktivnost je spontan proces, pri katerem nestabilno atomsko jedro odda energijo in preide v jedro nižje energije ali v stabilno jedro. Pri tem se sproščajo:

- delci  $\alpha$ ,
- delci  $\beta^-$  in  $\beta^+$ ,
- nevtroni, protoni in drugi težki delci,
- fotoni  $\gamma$ .

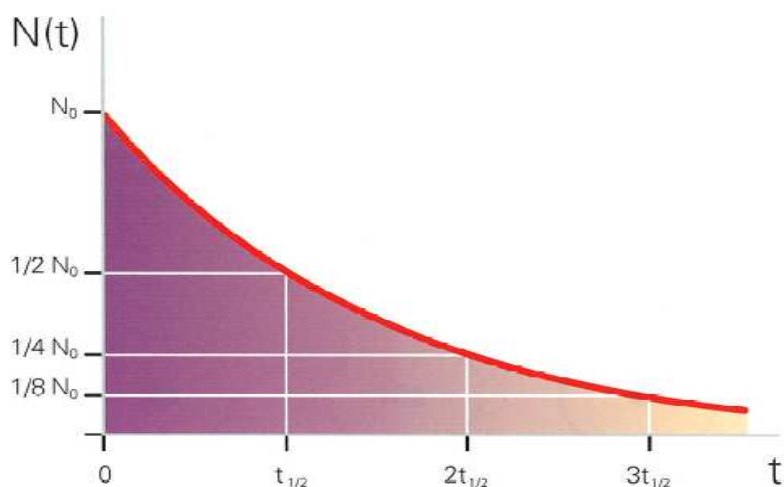
Če jedro elementa A odda delce, se preobrazi v jedro elementa B, če seva fotone  $\gamma$ , pa nastane jedro nižje energije (ali stabilno) istega elementa A (Vaupotič in Kobal, 2008).

Pri preobrazbi  $\alpha$  jedro odda delec  $\alpha$ , to je helijevo jedro z dvema protonoma in dvema neutronoma ( ${}^4_2\text{He}_2^{2+}$ ). Imamo tri vrste preobrazb  $\beta$ , in sicer preobrazbo  $\beta^-$ : jedro odda negatron ( $e^-$ ), preobrazbo  $\beta^+$ : jedro odda pozitron ( $e^+$ ) in zajetje elektrona: jedro zajame elektron iz atomske orbitale (najbolj pogosto K). Ker so jedra, ki nastanejo pri preobrazbah  $\alpha$  in  $\beta$ , pogosto vzbujena, sevajo fotone  $\gamma$  in s tem prehajajo v manj vzbujeno ali stabilno stanje (Vaupotič in Kobal, 2008).

Število določene vrste atomskih jeder ( $N$ ) nekega radionuklida se zaradi radioaktivne preobrazbe s časom ( $t$ ) manjša (slika 1). Hitrost zmanjševanja števila jeder imenujemo aktivnost A:

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

V zgornji enačbi je  $\lambda$  konstanta radioaktivne preobrazbe z enoto  $s^{-1}$ , aktivnost A pa ima enoto Bq (becquerel), pri čemer 1 Bq ustreza enemu razpadu v sekundi. S staro enoto Curie (1 Ci je aktivnost 1 g  ${}^{226}\text{Ra}$ ) je v naslednji zvezi: 1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  Bq. Koncentracijo aktivnosti nekega radionuklida v nekem mediju podajamo v enotah Bq  $m^{-3}$  ali Bq  $kg^{-1}$ .



**Slika 1:** Eksponentni zakon radioaktivnega razpada (Stritar in sod., 1997)

Če enačbo 1 preuredimo, dobimo diferencialno enačbo:

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

Rešitev te diferencialne enačbe (enačba 2) je eksponentna funkcija (enačba 3).

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

$N_0$  je število radioaktivnih jeder v času  $t = 0$ ,  $N$  pa je število teh jeder v času  $t = t$ .

Razpolovni čas ( $t_{1/2}$ ) je čas, v katerem pade število atomov na polovico:

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

## 2.2 Radon

### 2.2.1 Fizikalno-kemijske lastnosti radona

Radon (Rn) je radioaktiven žlahten plin, ki so ga odkrili v začetku 20. stoletja (Bodansky, 1987). Ima več kot 20 izotopov, vendar se naravno pojavljajo le trije, in sicer  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  in  $^{219}\text{Rn}$ .  $^{222}\text{Rn}$ , ki je obravnavam v diplomskem delu, nastaja z  $\alpha$ -preobrazbo  $^{226}\text{Ra}$  v radioaktivnem nizu  $^{238}\text{U}$  in ima od vseh radonovih izotopov najdaljši razpolovni čas (3,82 dneva) (slika 2).

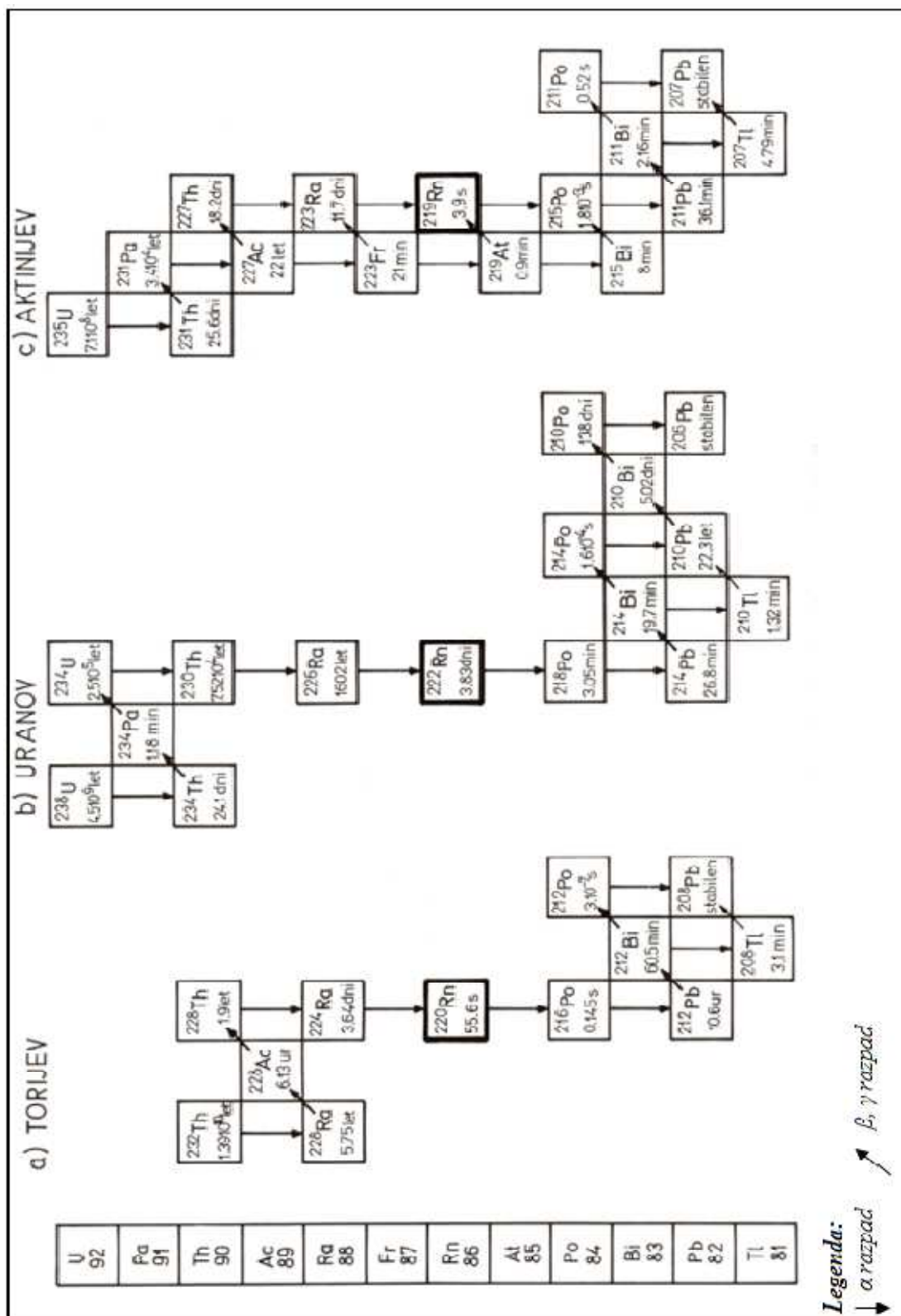
V nizu  $^{232}\text{Th}$  nastaja izotop  $^{220}\text{Rn}$  (imenovan toron) in v nizu  $^{235}\text{U}$  izotop  $^{219}\text{Rn}$  (imenovan aktinon). Razpolovni čas torona je znatno krajši (55 s) od razpolovnega časa radona, zato so razen v izjemnih primerih koncentracije aktivnosti radona v okolju znatno višje od koncentracij torona (Bodansky, 1987). Če ni posebej naglašeno, v strokovni literaturi uporabljamo za  $^{222}\text{Rn}$  ime radon, za  $^{220}\text{Rn}$  pa toron. To poimenovanje je uporabljeno tudi v diplomskem delu.

Rezultat  $\alpha$ -preobrazbe radona so radonovi kratkoživi razpadni produkti (RnDP) (slika 2):  $^{218}\text{Po}$  ( $\alpha$ ,  $t_{1/2} = 3.05$  min),  $^{214}\text{Pb}$  ( $\beta/\gamma$ ,  $t_{1/2} = 26.8$  min),  $^{214}\text{Bi}$  ( $\beta/\gamma$ ,  $t_{1/2} = 19.7$  min) in  $^{214}\text{Po}$  ( $\alpha$ ,  $t_{1/2} = 164$  ns). Ti so ob nastanku pozitivno nabiti kovinski ioni, ki se sčasoma rekombinirajo in v zraku tvorijo gruče velikosti do 10 nm (imenujemo jih nevezani RnDP). Kasneje se deloma (odvisno od koncentracije aerosolov in vlažnosti zraka) vežejo na aerosole ter so prisotni v zraku kot radioaktivni aerosoli velikosti od 200 do 600 nm (vezani RnDP). Zaradi gibanja in mešanja zraka ter usedanja aerosolov se praktično nikoli ne vzpostavi radioaktivno ravnotežje med radonovimi kratkoživimi razpadnimi produkti in radonom (Makofske in Edelstein, 1988; Vaupotič in Kopal, 2008). Stopnjo ravnotežja med radonom in kratkoživimi razpadnimi produkti podajamo z ravnotežnim faktorjem  $F$ , ki je podan z izrazom:

$$F = \frac{C_{\text{RnDP}}}{C_{\text{Rn}}}, \quad (5)$$

v katerem sta  $C_{\text{RnDP}}$  in  $C_{\text{Rn}}$  koncentraciji radonovih kratkoživih razpadnih produktov oziroma radona.





**Slika 2:** Razpadni nizi torija, urana in aktinija (povzeto po Valković, 2000)

### 2.2.2 Izvor in porazdelitev radona

Uran je široko razširjen element v zemlji, čeprav v nizkih koncentracijah. Zato se radon skupaj s svojimi kratkoživimi produkti pojavlja v vseh medijih okolja: v zraku, vodi in zemlji (Nero Jr., 1988)

Vsebnost urana  $^{238}\text{U}$  v kamnini je odvisna od njenega nastanka. Z informacijami o sestavi kamnine, o porazdelitvi litoloških enot in drugih geoloških oblik lahko načeloma ocenimo vsebnost  $^{226}\text{Ra}$  in s tem radona v kamnini. Tako nam litološki in mineraloški opisi ne podajo le informacije o možnih koncentracijah urana, temveč podajo tudi oceno o razširjenosti radona. Povišane vsebnosti urana najdemo na primer v granitih (4,8 ppm) ali skrilavih glinavcih (3,5 ppm) in manjše v apnencu (2,0 ppm). (Abmurad in Al-Tamimi, 2001; Choubey in sod., 1999; Gillmore in sod., 2000).

Čeprav višje vsebnosti radona povezujemo s kamninami, ki imajo visoko vsebnost urana, je višji odstotek nastalega radona, ki preide na površje, iz sekundarnih rud (drugačne od primarnih) urana, ki so nastale v razpokanih kamninah. Razpoke v kamnini omogočajo, da se radon hitreje dviguje na površje (Gillmore in sod., 2000).

So pa tudi območja z nižjo koncentracije urana (nižja od povprečne razširjenosti v zemeljski skorji), na katerih je nadpovprečno visoka koncentracija radona. Razlog za to je velika prepustnost kamnine. Tak primer so kraški apnenci. Opazili so tudi obratno: območja z visoko vsebnostjo urana in nizko vsebnostjo radona. Razlog za to so neprepustne kamnine, ki ležijo nad plastmi, bogatimi z uranom (Gillmore in sod., 2000; Vaupotič in sod., 2000).

Povečane vsebnosti radona so našli tudi ob tektonskih prelomih, in sicer predvsem na potresno aktivnih prelomih. Tu se kamninska bloka premikata drug mimo drugega. To se lahko dogaja zvezno ali pa občasno in sunkovito. V drugem primeru, se vzdolž preloma nabira potencialna energija, ki se spremeni v kinetično in povzroči potres. Ti pojavi v zemeljski skorji spremenijo transport radona, kar vpliva na koncentracijo radona, ki jo merimo na površini, bodisi v talnem zraku ali v termalni vodi. Tako nam lahko radon služi kot indikator aktivnosti tektonskih prelomov ali znanilec pojava potresov (Garavaglia in sod., 1998; Khan in sod., 1990; Tsvetkova in sod., 2004).

### 2.2.3 Emanacijski koeficient

Emanacija je prehod radona iz zrna kamnine, kjer je nastal, v pore med zrn (Gillmore in sod., 2002). Odvisna je predvsem od vlage, temperature in geološke strukture kamnin (Choubey in sod., 1999; Nazaroff in sod., 1988).

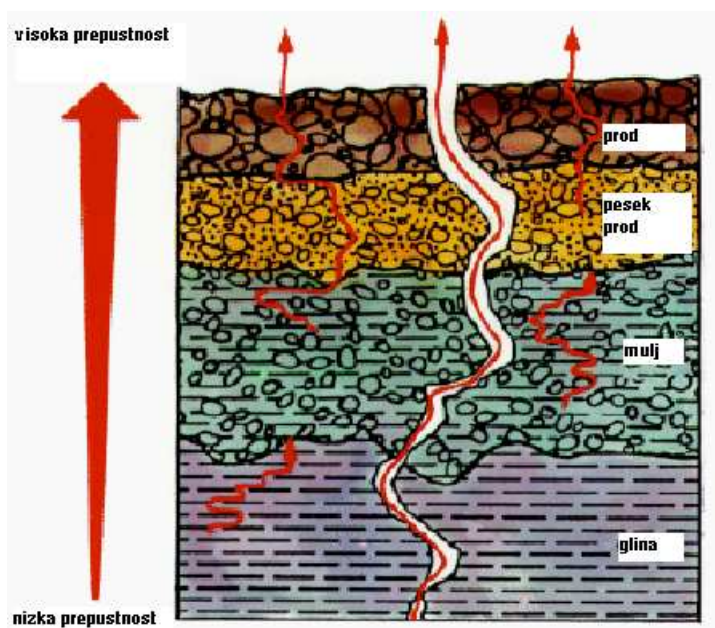
Delež atomov radona, ki jim ta izstop uspe, imenujemo emanacijski koeficient in ima vrednosti v obsegu od 0,05 do 0,7 (Nazaroff in sod., 1988).

### 2.2.4 Transport radona v tleh

Radon potuje (migrira) v mediju z difuzijo (na krajše razdalje) in z advekcijo (na daljše razdalje), bodisi kot raztopljen v vodi ali v plinski zmesi (geoplin) (Etiope in Martinelli, 2002). Na prenos plinov prvenstveno vplivata gradient tlaka in gradient temperature. Prenos z advekcijo zahteva hitri tok plina, saj gravitacijske sile delujejo le na pline, ki se

pojavljajo v zadostnih koncentracijah. Zaradi tega radon, ki je v izredno majhnih količinah v podzemlju, ne more ustvariti tako hitrega toka plina, ki bi reagiral na gradient tlaka in neodvisno potoval z advekcijo. To pomeni, da se morajo plini kot je radon prenesti s pomočjo drugih plinov, ki imajo hitri tok proti površju. Plini, ki se pojavljajo v zadostnih koncentracijah, da lahko potujejo z advekcijo so na primer ogljikov dioksid, metan in dušik (Etiope in Martinelli, 2002).

Razumljivo je, da radon potuje hitreje skozi prepustna tla, kot sta debelozrnat pesek in prod, kot pa skozi neprepustna tla, kot je glina (slika 3). Prelomi in razpoke v sedimentu ali kamnini omogočajo radonu lažji prehod. Na svoji poti se radon kopiči v podzemnih prostorih kot so kraške jame in brezna ter podzemni rudniki, predori in kleti.



**Slika 3:** Transport radona (povzeto po Otton, 1993)

### 2.2.5 Ekshalacija (izhajanje) radona

Ko radon na svoji poti dospe do površine tal, sten v podzemnih prostorih ali sten v zgradbah, končno preide v ozračje oziroma v zrak prostora. To zadnjo stopnjo njegovega potovanja imenujemo ekshalacija. Nanjo v glavnem vplivajo hidrometeorološki dejavniki, kot so: temperatura zraka in tal (sten), zračni tlak, vlažnost tal (sten) in zraka, padavine, veter, pokritost površine z vodo, snegom ali ledom. Koncentracija radona v zraku okolja je rezultat vseh treh zgoraj navedenih procesov: emanacije, migracije in ekshalacije. Koncentracija v talnem zraku je običajno od nekaj  $10 \text{ kBq m}^{-3}$  do nekaj  $100 \text{ kBq m}^{-3}$ . V ozračju se radon hitro razredči in na prostem redko preseže njegova koncentracija  $50 \text{ Bq m}^{-3}$ . V notranjem zraku pa so vrednosti običajno od nekaj  $100 \text{ kBq m}^{-3}$  do nekaj  $1000 \text{ kBq m}^{-3}$  (Nazaroff in sod., 1988).

Za razliko od drugih plinov ima pri mehanizmu transporta radona pomembno vlogo tudi njegova radioaktivnost: čeprav kot žlahtni plin ne reagira z medijem, skozi katerega potuje, se število njegovih atomov zaradi  $\alpha$ -preobrazbe stalno manjša s časom. Zato izhaja v ozračje le radon, ki je nastal do nekaj metrov globoko v tleh, in pa radon, ki je

nastal sicer globlje, pa mu nosilni fluid (plin ali voda) ali struktura tal (prelomi, razpoke) omogočajo potovanje na daljše razdalje (Etiope in Martinelli, 2002).

### 2.2.6 Radon v zraku kraških jam

Jame so večinoma na kraških območjih, kjer so prevladujoče karbonatne kamnine (apnenec, dolomit) (Sajo-Bohus in sod., 1997). Apnenec vsebuje v povprečju od 1,3 ppm do 2,5 ppm  $^{238}\text{U}$ . (Hakl in sod., 1997). Radon, ki nastane v teh kamninah lahko potuje skozi razpoke in prelome in se zadržuje in kopiči v dvoranh kraških jam, ki so slabo prezračene. Koncentracija radona v zraku kraških jam je odvisna od številnih dejavnikov: razlika v temperaturi med zunanjim zrakom in zrakom v jami, prezračenost jame, spremembe zračnega tlaka, oblika jame, poroznosti kamnin in vsebnost urana v kamninah (Cigna, 2003; Cigna, 2005; Kies in sod., 1997; Lario in sod., 2006; Field, 2007).

Prezračevanje igra odločilno vlogo pri kopičenju radona v jamah in pri sezonskih spremembah koncentracije radona. Bolj ko so jame prezračene, manj se radon zadržuje v njih. Prav tako pa je prezračevanje pomembno pri prostorski porazdelitvi radona v jami (Przylibski, 1999). Za razliko od rudnikov, jam namreč ne moremo umetno prezračevati, ker želimo ohraniti neokrnjeno tvorbo kapnikov ter jamske flore in favne.

Glede na obliko lahko jame delimo na (Hakl in sod., 1996; Vaupotič, 2008):

- Pretežno vodoravne jame (ali horizontalne): v njih je zračni tlak praktično povsod enak in zato ne vpliva na pretok zraka; lahko je enaka tudi temperatura, ki se običajno le malo spreminja z letnimi časi. Ker je pozimi zrak v jami toplejši od zunanjega, deluje jama kot ogromen dimnik, skozi katerega v ozračje izhaja toplejši, z radonom bogati jamski zrak, v jamo pa skozi vodoravne rove in razpoke doteka zunanji zrak z nizko koncentracijo radona, kar zagotavlja nizko koncentracijo radona pozimi. Tega vleka dimnika poleti, ko je zunanja temperatura višja kot v jami, ni in je koncentracija radona v jami visoka. To pomeni, da v teh jamah igra prevladujočo vlogo pri prezračevanju razlika temperatur med jamskim in zunanjim zrakom.
- Poševne ali navpične jame (ali vertikalne): v teh jamah je lahko razlika med zračnim tlakom na najnižji in najvišji točki že tako velika, da prevzame odločujočo vlogo pri pretoku zraka v jami in s tem pri določanju koncentracije radona v zraku jame.

## 2.3 Geologija

### 2.3.1 Geologija širše okolice Kostanjeviške jame

Dolenjska leži na prehodu med ravnino in gorami ter med oblim posavskim hribovjem in primorskimi kraškimi planotami. Kraško podzemlje na Dolenjskem je bogato in zanimivo tako v naravnem kot tudi zgodovinskem in gospodarskem pogledu (Kranjc, 1990).

Dolenjski kras ali kras srednje Dolenjske je na severovzhodu in severu omejen z Ljubljanskim barjem in Posavskim hribovjem, na severovzhodu, vzhodu in jugovzhodu z dolino Save, Krško kotlino in Gorjanci, na jugu s Kočevskim oziroma Roškim

višavjem, ter na zahodu z Dobropoljem in Žemeljsko dolino (Kranjc, 1990). Kostanjeviška jama, ki je obravnavana v diplomski nalogi, je v Gorjancih.

Gorjance, ki z juga omejujejo srednjo Dolenjsko, bi lahko šteli k visokemu krasu, saj njihovi najvišji deli presegajo 1000 m, vendar tega ne dopušča njihova geološka zgradba. Predvsem vzhodni del pogorja ima pestro geološko sestavo, kjer se menjavajo različno prepustne in s tem različno izpostavljene zakrasevanju kamnine. Na njih sta razvita kraški in fluvialni (rečni) relief, ki dopuščata tako površinski kot tudi podzemni odtok vode. Južno od Kostanjevice na Krki, pod Opatovo goro je 800 do 900 m visoka kraška planota Ravna gora, sicer pa je večji del tega krasa v vznožnem delu Gorjancev (Kranjc, 1990).

Kostanjevica na Krki leži na območju med spodnjo in zgornjo kredno, terciarjem in kvartarjem (slika 4). Spodnjekredni skladi valangijske starosti so južno od Kostanjevice na Gorjancih, kjer je svetlo siv in biosparitni apnenec s *Favreina sp.* Prehod med spodnjekrednimi in cenomanskimi skladi (svetlo rjav plastovit apnenec) je postopen in le na redkih mestih jih lahko ločimo. Debelina cenomanskih plasti je od 30 m do 120 m. Na tem območju so zgornjekredni skladi v pelagičnem razvoju. Jugovzhodno od Kostanjevice lahko ločimo spodnji in zgornji del teh sedimentov. V spodnjem delu je siv in črn apnenec s polami in gomolji črnega ali sivnega roženca in s plastmi zelenega ali rdečega lapornatega skrilavega glinavca s polami roženca. Zgoraj leži rdeč ploščat apnenec, rdeč in siv lapor in skrilavi glinavec s polami roženca. Vmes so debeli vložki apnenčeve breče. V kosih breče so preseki radiolitov in polžev, pa tudi mikrofavna, ki kaže na jursko ali spodnjekredno starost. Ti kosi izvirajo iz starejših sedimentov in gradijo zgornjekredno brečo. Pomemben je še siv sljudnat peščenjak, ki je podoben flišnemu krednemu peščenjaku (Pleničar in Premru, 1977).

Severno od Kostanjevice na Krki najdemo terciarne kamnine, in sicer srednje miocenske starosti. V to obdobje spada beli litolamnijski apnenec, litolamnijski kalcirudit, sivi lapor, beli in peščeni rjavi lapor, peščenjak in kremenov pesek. Severno in južno od Kostanjevice na Krki najdemo tudi kvartarne nanose. Tako na severu najdemo pleistocensko glino in alevrolit, južno pa holocenske aluvialne rečne naplavine (Pleničar in Premru, 1977).

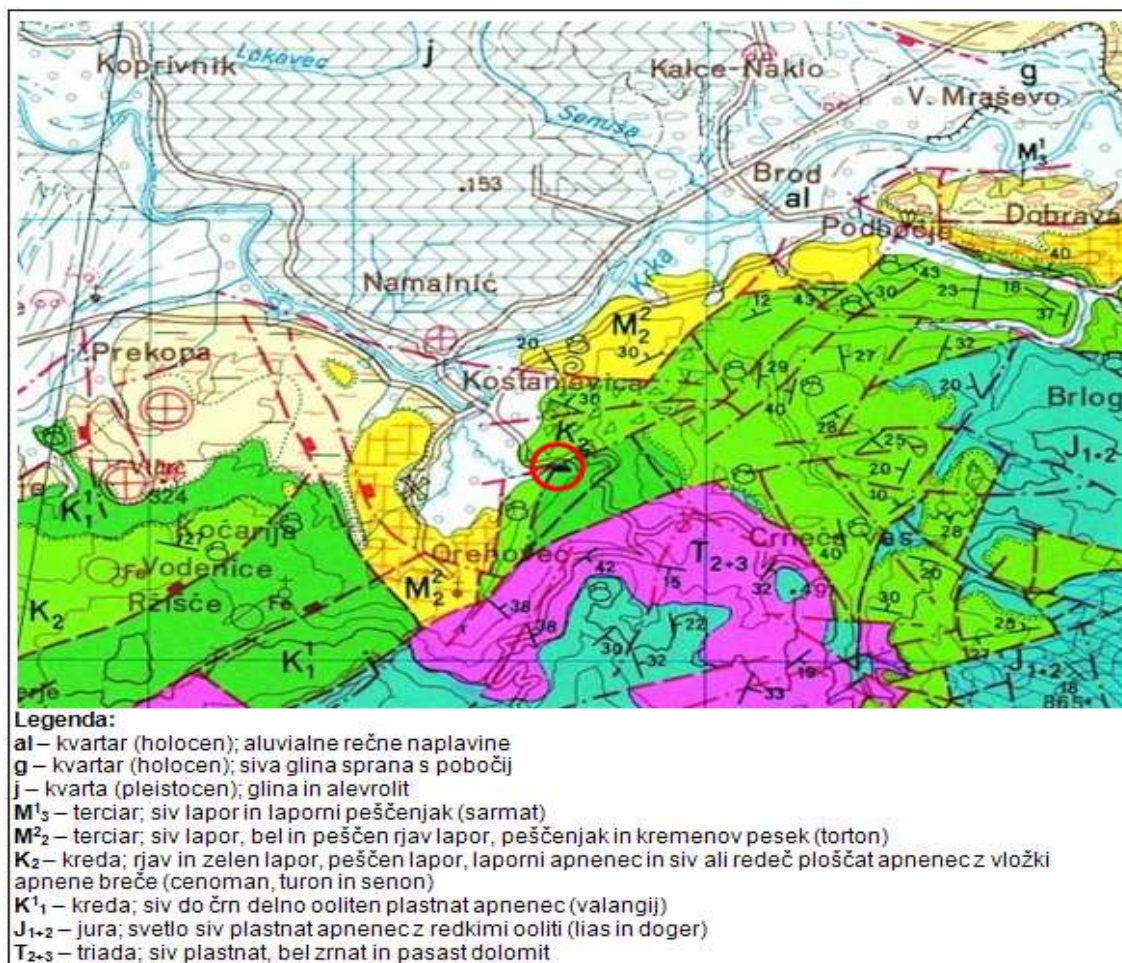
Pod plastmi spodnje krede najdemo zgornjetriadni sivi plastnat, beli zrnati in pasasti dolomit. Pod njimi pa najdemo juro s svetlo sivimi plastnatimi dolomiti s plastmi oolitnega apnenca (Gams, 2004).

Na vzhodnem delu južne Slovenije se mešajo narivi različnih faz. Tako je na Krškem hribovju, Gorjancih, jugozahodnem delu Medvednice in severnem delu Bele krajine balatonsko-dinarsko narivna zgradba. Na območju Gorjancev prevladujejo prelomi, ki se razprostirajo v smeri severovzhod–jugozahod (balatonska linija). Te tektonske deformacije so po izvoru terciarne starosti (mlajši zemeljski vek). V smeri severozahod–jugovzhod potekajo dinarski prelomi. Ti naj bi izvirali iz obdobja kenozoika. Pri Kostanjevici se narivata zgornjetriadni dolomit in spodnjekredni apnenec v inverznem položaju (Premru, 1982). Balatonski niz je razdeljen v manjše tektonske enote: Krška sinklinala, horst Gorjancev in žužemberška grudasta zgradba (slika 5) (Brenčič in sod., 2002; Pleničar in Premru, 1977).

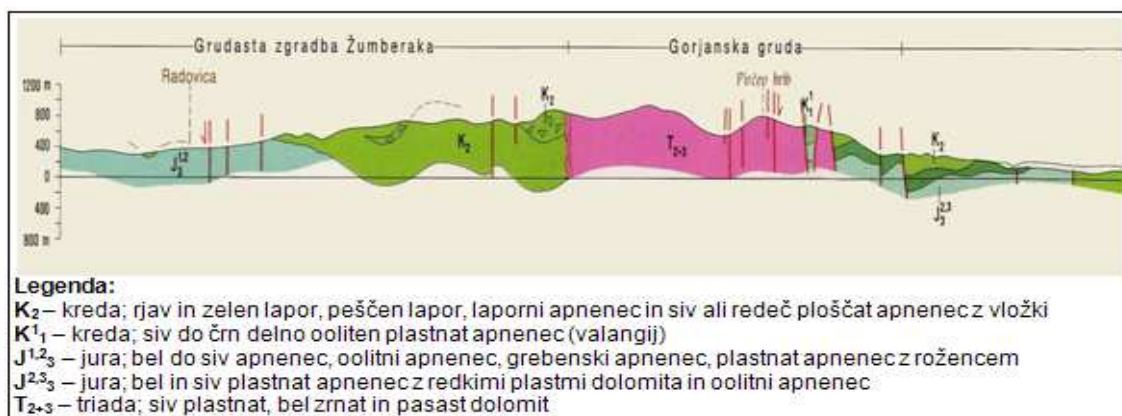
Horst Gorjancev omejuje na severu Cerovski prelom, na jugu pa Soški prelom. Starejše strukture znotraj horsta so dinarsko usmerjene. Neotektonsko dvigovanje je dalo na obeh straneh stržena stopničasto zgradbo. Gorjanci se sestoje iz triadnega



dolomita, jurskega apnenca in pelagičnih krednih sedimentov (Pleničar in Premru, 1977).



**Slika 4:** Geološka karta Kostanjevice na Krki z okolico (Pleničar in sod., 1975) in lokacija Kostanjeviške jame (rdeči krog).



**Slika 5:** Prelomi na območju Gorjancev (Pleničar in sod., 1975)

### 2.3.2 Kras

Kras je posebna oblika dela zemeljske skorje (površje, podzemlje) na trdnih, a razpokanih karbonatnih kamninah, predvsem apnencih in dolomitih. Ker se kamnina v vodi topi in ker je zvezno razpokana, voda ne odteka le po površju, ampak prenika tudi v podzemlje. S tem širi razpoke in jih pretvarja v podzemeljske rove in dvorane, v kraške jame in brezna (Kranjc, 1990).

Proces raztapljanja kamnine je odvisen od različnih dejavnikov, in sicer od temperature (oziroma od nekdanjega in današnjega podnebja), od množine ogljikovega dioksida raztopljenega v vodi ter končno od množine vode, ki pronica v podzemlje. Ogljikov dioksid je temeljnega pomena, saj daje vodi kislost ter tako povečuje njeno agresivnost, to je zmožnost raztapljanja karbonatnih kamnin. Z ogljikovim dioksidom so bogate tiste vode, ki pronicajo skozi gost rastlinski pokrov in tiste, ki na kras pritekajo iz nekraškega ozemlja. Prav tako so z ogljikovim dioksidom bogate hladnejše vode, saj topnost ogljikovega dioksida v vodi pada z višanjem temperature (Badino in Verša, 1998).

Večina jam je nastala z raztapljanjem kamnine s podzemno vodo. Raztapljanje je bilo precej močno ob srečanju toplih in hladnih vod, prav tako tudi ob toku vod z različnimi kemijskimi sestavinami iz rovov. Zato pride do nastanka ozkih hodnikov in velikih dvoran, ki se izmenjujejo (Somlai in sod., 2007).

### 2.3.3 Kostanjeviška jama

Kostanjeviška jama leži v dolini pod strmimi pobočji Gorjancev. Pod jamo je stalen izvir Studena in več vodnih bruhalnikov. Jama so odprle narasle podzemne vode po močnem neurju nad Gorjanci leta 1937 (Ladišič, 1999).

V zaledju Kostanjevice na Krki se na pobočju Gorjancev razteza eden najbolj skrajnih in izoliranih otokov dolenjskega krasa. Prav tu je podzemna Studena izdolbla najdaljši in najmogočnejši dolenjski jamski splet (priloga A). Jama je nastala v močno prelomljenih karbonatnih kamninah, ki so jih preoblikovali dinamični tektonski procesi ob vznožju Gorjancev. Do sedaj je bilo raziskanih 1813 m podzemskih rovov, ki jih sestavlja niz suhih občasno poplavljenih podzemskih rovov starega dela jame, mogočne podorne dvorane ter vodni in potopljeni rovi na novo odkritih delov (Brenčič in sod., 2002).

Tako kot v večini slovenskih jam, tudi v Kostanjeviški zasledimo potek rovov v različnih smereh. Na podlagi tega sklepamo, da je na smer rovov vplivala lomna tektonika. Te smeri so predstavljene z bolj ali manj ravnimi linijami, ki jih prekinjajo dvorane nepravilnih oblik. Kljub temu se v teh dvoranah razločijo prevladujoče smeri. Zahodni deli jame se razprostirajo v glavni smeri severozahod–jugvzhod (znani že od konca 30 let prejšnjega stoletja). Predeli jame, odkriti sredi devetdesetih let, so v smeri vzhod–zahod. Natančnejši pogled tlorisa pa pokaže, da prevladuje več smeri. V jami se lahko razločijo štiri glavne (priloga A):

- v smeri azimuta (kot med smerjo proti severu in smerjo opazovanega predmeta) 20–200° so v vzhodnem delu jame razviti Veliko jezero, Šumeča dvorana in Kanjon. V zahodnejših delih jame so v tej smeri še razviti prehodi iz Križne dvorane v Kapniško dvorano, prehod iz Križne dvorane proti izhodu iz jame in več rovov v Mali jami, zlasti izrazita je Martinova dvorana;

- v smeri azimuta 45–225° so Kapniška dvorana, Črni meander, Vroči rov in rov pri Naravnem mostu, ki se nadaljuje proti Brzicam ter rov, v katerega se nadaljuje Kanjon;
- v smeri azimuta 140–320° so razviti nekateri rovi v Mali jami, vhodni rovi v jamo, del Rova šestih jezer, rov, ki vodi proti Naravnemu mostu in začetni del Črnega rova;
- zadnja, četrta smer je vzhod–zahod. V tej smeri sta razvita Dvorana netopirjev in skrajno vzhodni rov Kostanjeviške jame (Brenčič in sod., 2002).

Čeprav na površju jame ni prelomov dinarske smeri, pa so smeri razpok v jami v tej smeri jasno izražene. V jami je več dvoran, v katerih so veliki podorni bloki. To so Podorna dvorana, Dvorana netopirjev in Dvorana balvanov. Veliki podorni bloki so posledica premikov ob prelomih. Domnevajo, da so predvsem rezultat nateznih napetosti znotraj blokov, ki so bili poškodovani v zgodnejših tektonski fazah (Brenčič in sod., 2002).



### 3 EKSPERIMENTALNI DEL

#### 3.1 Meritve radona

Koncentracijo radona merimo bodisi z (i) detekcijo delcev  $\alpha$  samega radona, skupaj radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov ( $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$ ) ali samo razpadnih produktov ( $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$ ) (ii) ter detekcijo sevanja  $\gamma$  razpadnih produktov ( $^{214}\text{Pb}$  in  $^{214}\text{Bi}$ ). V tem poglavju bodo opisani merilniki, ki smo jih uporabili pri izvedbi meritev za diplomsko delo.

##### 3.1.1 Alfa scintilacijska celica

Ohišje celice (slika 6) je valjaste oblike prostornine  $700\text{ cm}^3$  in izdelana iz bakrene pločevine. Notranje stene, razen dna, ki je iz prozornega stekla in služi za optični stik s fotopomnoževalko, so prevlečene s scintilatorjem cinkovim sulfidom, aktiviranim s srebrom. Vzorec vnesemo v celico tako, da zrak na mestu meritve prepihujemo z ročno ali električno črpalko skozi celico tako dolgo, da prvotni zrak v celici zamenjamo z vzorcem – kar je vsaj pet prostornin celice. Aktivnost celice merimo v merilniku PRM 145 (Ames, Slovenija) (slika 6) šele tri ure po vzorčenju, ko se je že vzpostavilo sekularno radioaktivno ravnotežje med radonom in njegovimi produkti. Delci alfa, ki se sproščajo pri  $\alpha$ -preobrazbah radona,  $^{218}\text{Po}$  in  $^{214}\text{Po}$  in zadanejo scintilator, sprožijo v njem sevanje fotonov z valovno dolžino okrog  $600\text{ nm}$ . Fotopomnoževalka jih pretvori v električne signale, ki jih preštejemo z merilnikom PRM. Po končanem štetju se izpiše to število na zaslonu (Vaupotič in sod., 1992).



**Slika 6:** Prenosni merilnik radona PRM 145 (Ames, Slovenija) s scintilacijsko celico

Koncentracijo radona, ki pomeni trenutno vrednost ob času zajema vzorca na nekem mestu, smo izračunali po spodnji enačbi iz števila sunkov, ki smo jih dobili pri meritvi vzorca in ozadja:

$$C_{\text{Rn}} = \frac{\frac{n_s}{t_s} - \frac{n_b}{t_b}}{60 \times b \times e^{-\ln 2 \times \frac{t-3}{t_{1/2}}}} \quad (6)$$

Pomen oznak je naslednji:

$C_{\text{Rn}}$  – koncentracija radona v enotah  $\text{Bq m}^{-3}$   
 $n_s, n_b$  – število impulzov na števcu pri merjenju vzorca (s) in ozadja (b)  
 $t_s, t_b$  – čas merjenja vzorca oziroma ozadja (v sekundah)  
 $b$  – izkoristek alfa scintilacijske celice ( $\text{s}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$ ); izmerjen za vsako celico posebej  
 $t$  – čas med odvzemom vzorca in meritvijo; najmanj 3 ure (v minutah)  
 $t_{1/2}$  – razpolovni čas radona (91,68 ur)  
 $LLD$  – spodnja meja določitve (lower limit of detection) ( $\text{Bq m}^{-3}$ )

LLD smo računali po enačbi:

$$LLD = \frac{4,66 \times \sqrt{n_b}}{t_b \times b \times 60} \quad (7)$$

### 3.1.2 Merilnik RadonScout

Merilnik RadonScout (Sarad, Nemčija) (slika 7) ima na sprednji plošči odprtine, skozi katere in dodatno še skozi filter, zrak difundira v merilno celico s polprevodniškim detektorjem. Napetosti 50 V na detektorju povzroča, da se nanj deponirajo radonovi produkti, ki so nastali v celici. Ker je difuzija počasen proces, je koncentracija torona v celici in s tem njegovih produktov zanemarljiva. Instrument podaja koncentracijo aktivnosti radona na osnovi spektrometrije alfa radonovih kratkoživih razpadnih produktov. Frekvenco meritve nastavimo; v tem primeru je bila enkrat ali trikrat na uro. Merilno območje za radon je od  $50 \text{ Bq m}^{-3}$  do  $1 \text{ MBq m}^{-3}$ . Poleg koncentracije radona merilnik meri tudi temperaturo in relativno vlažnost zraka. Vse izmerjene podatke pokaže na koncu vsake meritev na zaslonu in jih shrani v svoj pomnilnik. Po določenem obdobju (običajno nekaj tednov) smo podatke prenesli na računalnik, kjer smo jih obdelali.

Ta merilnik smo uporabljali za kontinuirano spremljanje koncentracije radona ter temperature in relativne vlažnosti zraka preko daljših časovnih obdobj. To je omogočilo študijo odvisnosti koncentracije radona od meteoroloških dejavnikov (temperature zunanega zraka in zračnega tlaka).



**Slika 7:** Merilnik RadonScout (Sarad, Nemčija)

### 3.1.3 Merilnik EQF 3020–2

Merilnik EQF 3020 (Sarad, Nemčija) (slika 8) vsaki 2 uri po 6 minut črpa zrak pri pretoku  $2,4 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$  preko filtra za odstranjevanje grobih prašnih delcev in preko kovinske mrežice, ki ločuje aerosole, manjše od 50 nm (nevezani RnDP), od večjih (vezani RnDP). Merilnik ima dva polprevodniška detektorja, ki analizirata vsako frakcijo posebej. Sunke šteje v treh zaporednih in različno dolgih intervalih, ki skupno trajajo 110 minut ter po metodi Markova (Markov, 1962) izračuna in poda posebej koncentracije  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  in  $^{214}\text{Bi}$  v nevezani in posebej v vezani obliki. Uporablja se za daljše obdobje meritev koncentracij radona in njegovih razpadnih produktov. Poleg tega izračuna in poda ravnotežni faktor med radonom in njegovimi kratkoživimi produkti ter koncentracijo potencialne  $\alpha$ -energije, in sicer poleg skupne tudi posebej za vezano in nevezano obliko produktov. Podobno kot RadonScout, tudi ta merilnik meri temperaturo in relativno vlažnost zraka. Ta merilnik smo uporabljali za kontinuirano spremljanje koncentracije radona ter temperature in relativne vlažnosti zraka preko daljših časovnih obdobj. To je omogočilo študijo odvisnosti koncentracije radona od meteoroloških dejavnikov (temperature zunanjega zraka in zračnega tlaka).

V isti namen kot RadonScout, smo tudi ta merilnik uporabljali za kontinuirano spremljanje koncentracije radona preko daljših časovnih obdobj, le da so bila tu obdobja krajša.



**Slika 8:** Merilnik EQF 3020–2 (Sarad, Nemčija)

## 3.2 Meritve ogljikovega dioksida z merilnikom Testo 435

Koncentracijo  $\text{CO}_2$  smo merili z merilnikom Testo 435, povezanim s tipalom IAQ, ki dela na principu toplotne kapacitete plinov (Testo, ZDA) (slika 9). Poleg tega meri tudi relativno vlažnost zraka, temperaturo zraka in tlak. Frekvenco prikaza izmerjenih vrednosti nastavimo. V tem primeru je bila nastavljena na 2 minuti, nato pa smo počakali, da se je vrednost ustalila. Poleg tega lahko merilnik izmerjene podatke shrani v svojem pomnilniku, od koder jih lahko prenesemo na osebni računalnik za nadaljnjo statistično obdelavo.



**Slika 9:** Testo 435 z IAQ tipalom

### 3.3 Potek meritev

Kontinuirane meritve radona smo izvajali v treh delih jame, in sicer v Kapniški dvorani (merilno mesto K1) in Podorni dvorani (merilno mesto K2) z merilnikom RadonScout ter v Mali jami (merilno mesto K3) z merilnikom EQF 3020–2 (slika 10). Obdobja meritev so prikazana v tabeli 1.

**Tabela 1:** Obdobja in lokacije kontinuiranih meritev v Kostanjeviški jami

<b>Merilno mesto</b>	<b>Obdobje</b>	<b>Opomba</b>
<i>K1 (Kapniška dvorana)</i>	22. 4. 2009 do 23. 5. 2009, 15. 7. 2009 do 29. 8. 2009, 1. 10. 2009 do 9. 10. 2009, 26. 10. 2009 do 30. 10. 2009, 25. 11. 2009 do 30. 11. 2009	<i>prekinitve so posledica nedelovanja merilnika</i>
<i>K2 (Podorna dvorana)</i>	25. 11. 2009 do 23. 12. 2009	-
<i>K3 (Mala jama)</i>	14. 7. 2009 do 1. 8. 2009	-

Koncentracije radona smo s scintilacijskimi celicami izmerili petkrat, in sicer v začetku avgusta, oktobra in novembra 2009 ter januarja in marca 2010. Vzorce zraka smo zajeli na 9 mestih (T1 do T9) v jami (slika 10). Na prvem vzorčenju v mesecu avgustu smo vzeli vzorce na šestih lokacijah. Nato smo dodali še nekaj vzorčevalnih mest, da bi dobili boljšo sliko prostorske porazdelitve koncentracije radona v jami. V mesecu oktobru smo vzorce zraka vzeli na osmih mestih v jami, novembra, januarja in marca pa na devetih. Pri zadnjih treh meritvah smo izmerili tudi koncentracijo CO<sub>2</sub>. Tabela 2 prikazuje pregled vzorčenj zraka za meritve trenutnih koncentracij radona in meritve CO<sub>2</sub>. Termine, ko smo opravljali meritve, smo v tabeli označili z znakom "+", ko meritev nismo opravljali, smo označili z znakom "-".

**Tabela 2:** Pregled vzorčenj zraka za meritve trenutnih koncentracij radona in meritve ogljikovega dioksida na vzorčevalnih mestih od T1 do T9

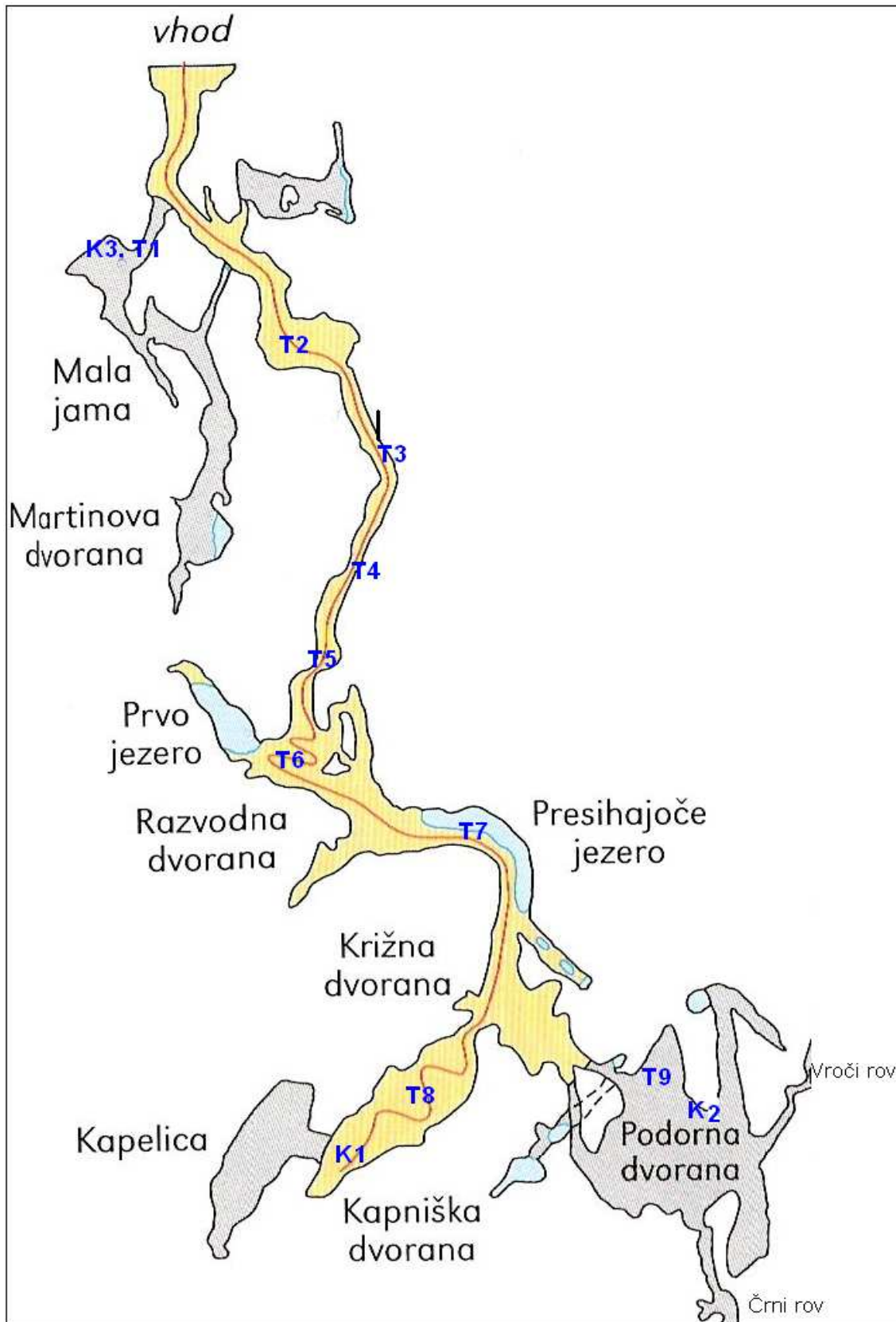
Merilno mesto	8. 1. 2009		26. 10. 2009		25. 11. 2009		26. 1. 2010		23. 3. 2010	
	Rn	CO <sub>2</sub>	Rn	CO <sub>2</sub>	Rn	CO <sub>2</sub>	Rn	CO <sub>2</sub>	Rn	CO <sub>2</sub>
1	+	–	+	–	+	+	+	+	+	+
2	–	–	+	–	+	+	+	+	+	+
3	+	–	+	–	+	+	+	+	+	+
4	+	–	+	–	+	+	+	+	+	+
5	+	–	+	–	+	+	+	+	+	+
6	+	–	+	–	+	+	+	+	+	+
7	+	–	+	–	+	+	+	+	+	+
8	–	–	+	–	+	+	+	+	+	+
9	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+

Merilna mesta so označena na sliki 10. V nadaljevanju sledi njihov opis:

- T1: prvo vzorčevalno mesto je bilo v Mali jami (priloga B). Le-ta leži na začetku jame, in sicer po nekaj metrih vhodnega rova turistične poti (60 m) se desno spusti skozi ozek rov. Vzorce zraka smo vzeli na začetku Male jame. Ta predel jame se nadaljuje v Martinovo dvorano in se z njo tudi zaključí;
- T2: drugo vzorčevalno mesto (priloga B) je bila prva dvorana turistične poti. Dvorano seka prelom;
- T3: do tretjega vzorčevalnega mesta se pot nadaljuje po rovu s trikotnim presekom (priloga B), kjer je tudi vhod v manjši stranski rov (slika 10);
- T4: četrto vzorčevalno mesto je bilo pred stopnicami, ki vodijo približno 4 m navzgor (priloga B);
- T5: peto vzorčevalno mesto je bilo na vrhu stopnic. Od tukaj vodi dimnik na površje (priloga B);
- T6: s petega vzorčevalnega mesta smo se po stopnicah spustili 16 m globoko do šestega vzorčevalnega mesta, to je do Prvega jezera (priloga B);
- T7: pot smo nadaljevali skozi Razvodno dvorano ob strugi plitvega potočka do Presihajočega jezera, kjer je bilo sedmo vzorčevalno mesto (priloga B);
- T8: od sedmega vzorčevalnega mesta vodijo strme stopnice do višje ležeče Križne dvorane, na koncu katere je Kapniška dvorana (priloga B). V njej je bilo osmo vzorčevalno mesto. Potrebno je poudariti, da se kontinuirane meritve niso merile v istem delu dvorane kot trenutne. Ta dvorana je zadnji del turistične poti od koder vodi pot le še do Kapelice.
- T9: deveto vzorčevalno mesto je bilo v Podorni dvorani. Prehod do nje je na dnu Križne dvorane. Iz Podorne dvorane se odpirata dva rova, in sicer Črni rov ter Vroči rov (priloga B).

Za ovrednotenje rezultatov smo potrebovali tudi temperaturo in tlak zraka, ki smo jih dobili od Agencije Republike Slovenije za okolje za najbližjo, 5 km oddaljeno meteorološko postajo Cerklje–letališče.

Za obdelavo podatkov smo uporabljali program Microsoft Office Excel 2007.



**Slika 10:** Izsek tlorisa Kostanjeviške jame (Gams, 2004) z označenimi vzorčevalnimi (T1 do T9) in merilnimi (K1 do K3) mesti. Legenda je ista kot v prilogi A.

## 4 REZULTATI IN RAZPRAVA

### 4.1 Kontinuirane meritve radona

#### 4.1.1 Kapniška dvorana

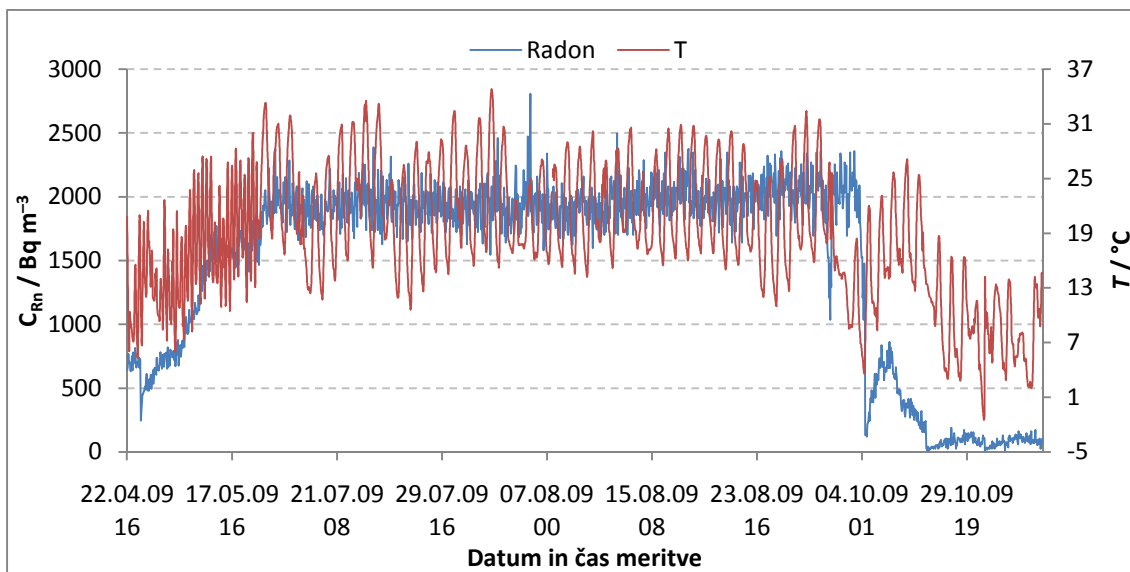
Kapniška dvorana je zaprt in zato slabo prezračen del jame. Radon se v njej zadržuje in kopiči, kar so potrdili tudi rezultati naših meritev. Najvišjo koncentracijo radona smo izmerili v poletnem času, in sicer  $2808 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ , najnižjo pa jeseni, in sicer le  $9 \pm 4 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Iskali smo medsebojno odvisnost med koncentracijo radona ter zunanjo temperaturo in tlakom. Kontinuirane meritve smo izvajali od druge polovice pomladi, čez poletje in del jeseni in tako zajeli v raziskavo obdobje treh letnih časov.

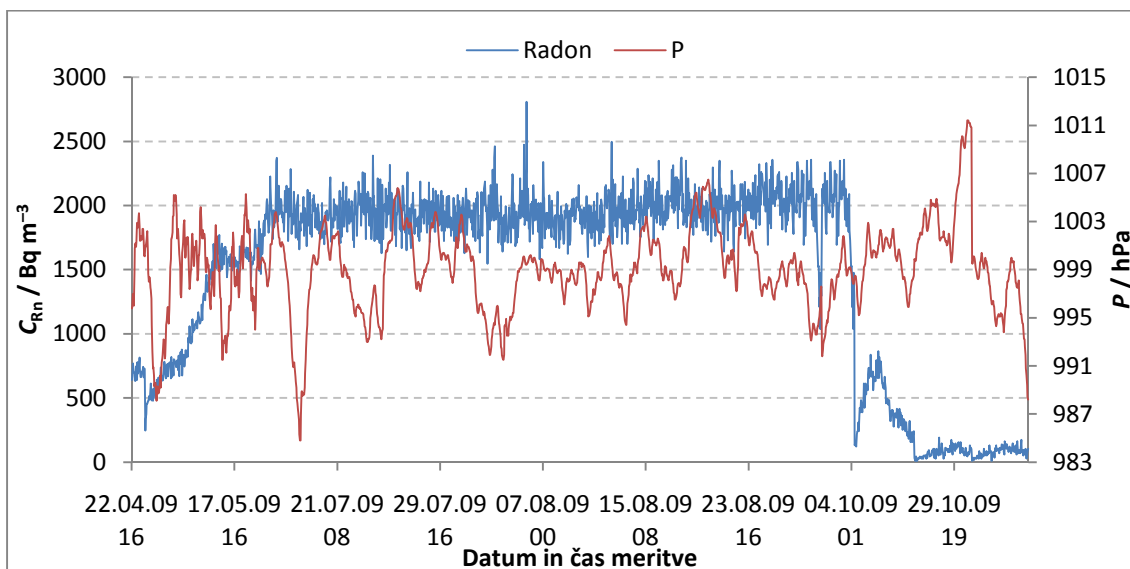
Ugotovili smo, da se ob zvišanju zunanje temperature poveča koncentracija radona v jami in obratno, da se ob znižanju zunanje temperature koncentracija radona v jami zmanjša (slika 11). Dobili smo pozitivno korelacijo med obema parametroma s korelacijskim koeficientom 0,59. Tudi Przylibski (2000) v dveh jamah (Niedźwiedzia jama in Radochowska jama) na Poljskem in Vaupotičeva (2008) v Postojnski jami sta v svojih raziskavah ugotovila, da so v toplejšem delu leta (od aprila do septembra) koncentracije radona v jamah višje kot v hladnejšem delu.

Kot kaže slika 11, se je v pomladanskem času zunanja temperatura postopoma dvigovala, dnevna nihanja so bila v območju od  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kot posledica dvigovanja temperature se je pričela postopoma dvigovati tudi koncentracija radona v jami in dosegla vrednost do  $1880 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ , povprečje v tem obdobju je bilo  $1120 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ . V poletnem času je bila zunanja temperatura še višja, od  $11 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  in zato tudi koncentracije radona višje. Povprečje koncentracij radona v tem obdobju je  $1960 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ . Zaradi visoke zunanje temperature v začetku oktobra smo v Kapniški dvorani izmerili visoke koncentracije radona, ki so presegle vrednost  $2000 \text{ Bq m}^{-3}$ . Ob nenadnem padcu zunanje temperature na le  $3,6 \text{ }^\circ\text{C}$  se je tudi koncentracija radona hitro spustila pod  $150 \text{ Bq m}^{-3}$ . Kasneje se je temperatura ponovno pričela dvigovati in dosegla vrednost  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . To je povzročilo dvig koncentracije radona v jami, ki je dosegla vrednost  $860 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ . Za tem pa je temperatura ponovno padla in posledično z njo tudi koncentracija radona. Povprečna koncentracija radona v jesenskem času je bila  $490 \pm 30 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Na sliki 12 sta prikazana kontinuirana poteka koncentracije radona v Kapniški dvorani in zračnega tlaka, izmerjenega na bližnji meteorološki postaji. Odvisnost med parametroma je na grafu slabo vidna. To potrjuje tudi šibka negativna korelacija s korelacijskim koeficientom  $R = -0,11$ . To pomeni, da je ob naraščanju tlaka koncentracija radona padala in obratno.



**Slika 11:** Odvisnost koncentracije radona v Kapniški dvorani od zunanje temperature

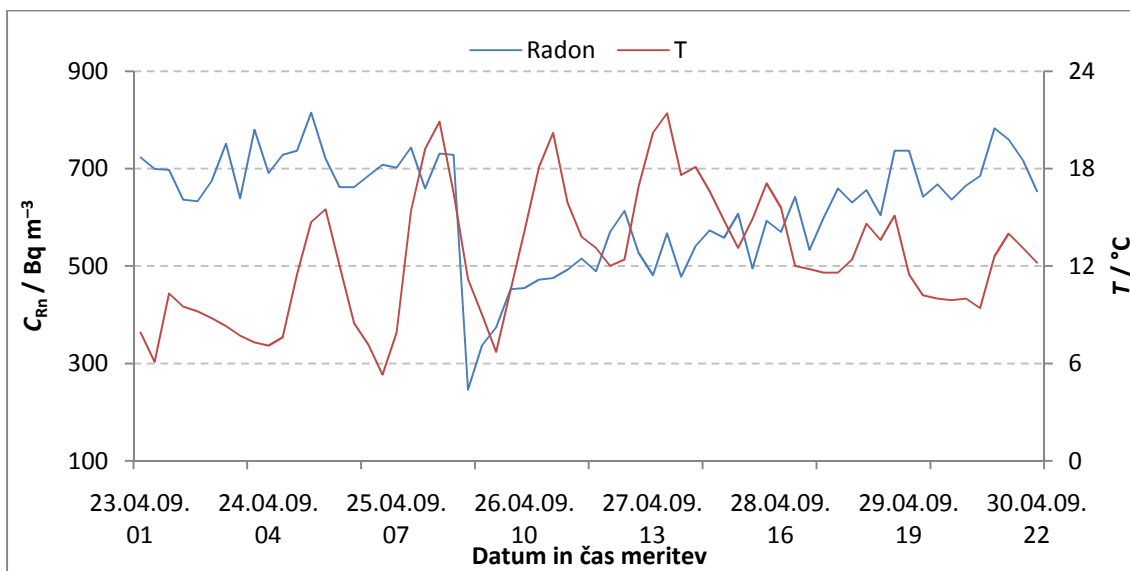


**Slika 12:** Odvisnost koncentracije radona v Kapniški dvorani od zračnega tlaka

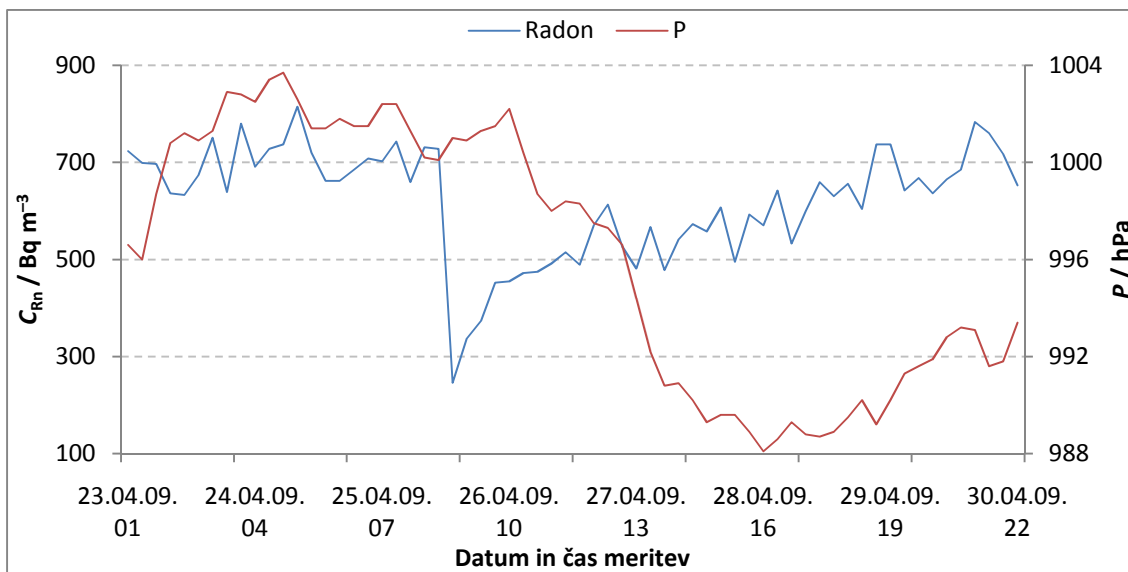


Da bi natančneje ugotovili, kako se je spreminjala koncentracija radona v odvisnosti od temperature in tlaka, smo v vsakem letnem času naključno izbrali po en teden in opazovali odvisnost parametrov. V spomladanskem času smo izbrali obdobje od 23. 4. 2009 do 30. 4. 2009. Frekvenca meritev koncentracije radona je bila vsake 3 ure. Na sliki 13 vidimo, da se koncentracija radona ne spreminja v isti smeri kot zunanja temperatura. To pomeni, da zvišanje temperature vodi do znižanja koncentracije radona in obratno. Izračunali smo tudi korelacijo, ki je negativna. Korelacijski koeficient je  $-0,22$ . V celotnem spomladanskem obdobju je korelacija pozitivna, korelacijski koeficient pa  $0,54$ . To pomeni, da se zunanja temperatura in koncentracija radona spreminjata z zamiki. Ugotovili smo tudi, da krajše opazovano obdobje ne poda točne slike in moramo vedno gledati daljše.

Odvisnost koncentracije radona od zračnega tlaka v spomladanskem času je prikazana na sliki 14. V začetku opazovanega obdobja se je koncentracija radona spreminjala v isti smeri kot zunanji tlak. Drugi del krivulje pa kaže, da koncentracija radona pada, ko vrednost tlaka narašča in obratno. Že potek obeh krivulj kaže na zelo šibko zvezo obeh parametrov, kar potrjuje tudi nizek korelacijski koeficient, in sicer le  $0,05$ .



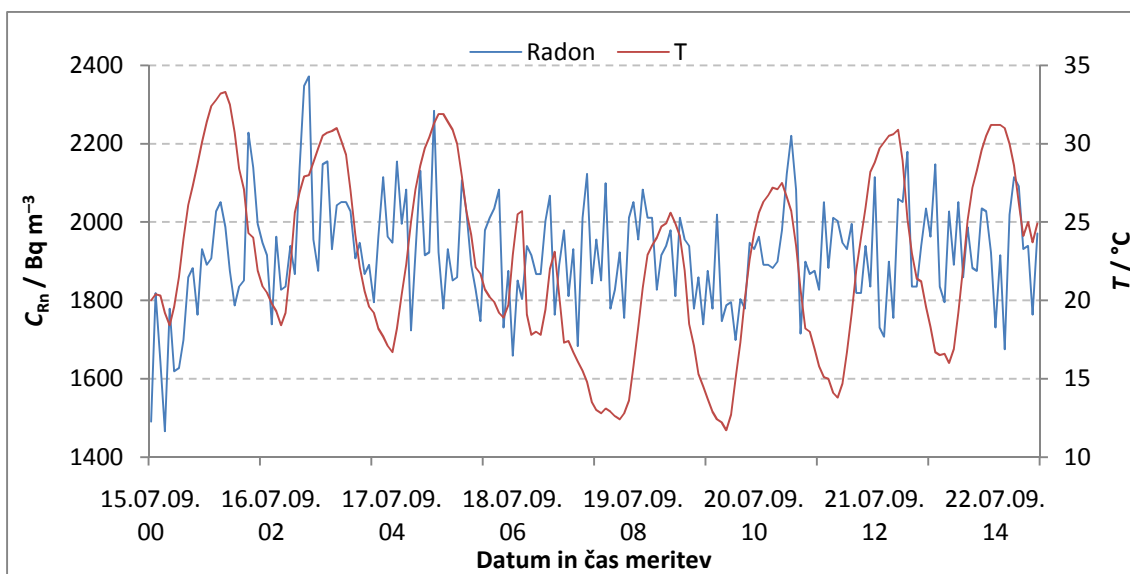
**Slika 13:** Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje temperature v obdobju od 23. 4. 2009 do 30. 4. 2009



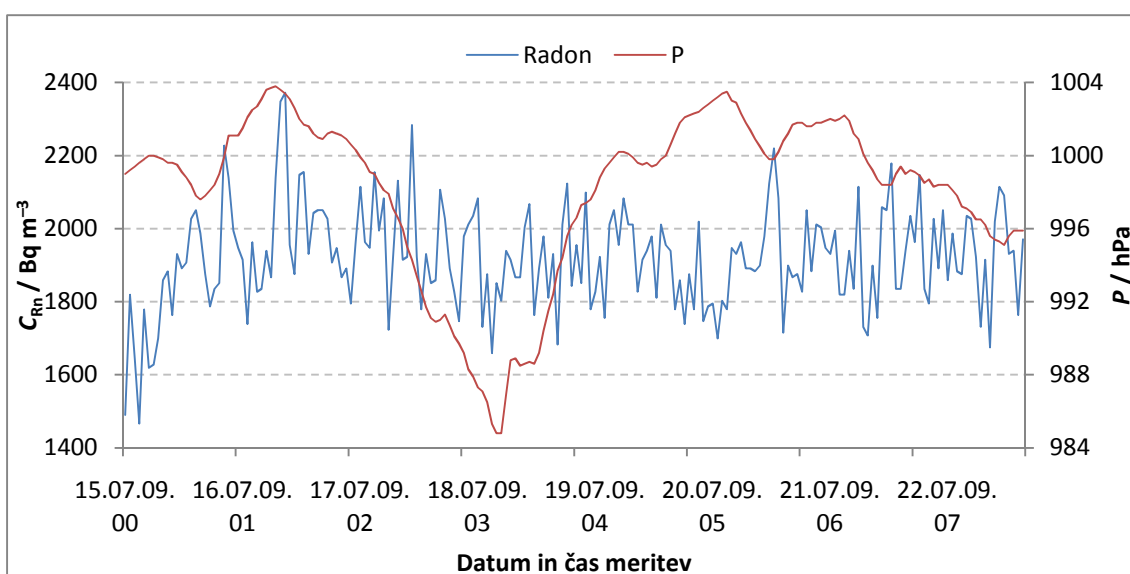
**Slika 14:** Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanjega tlaka v obdobju od 23. 4. 2009 do 30. 4. 2009

V poletnem času smo naključno izbrali obdobje med 15. 7. 2009 in 22. 7. 2009 (slika 15). Frekvenca meritev koncentracije radona je bila vsako uro. V tem obdobju se je koncentracija radona spreminjala v isti smeri kot zunanja temperatura, vendar se parametra nista spreminjala istočasno. Koncentracija radona se je glede na temperaturo spreminjala s časovnim zamikom, ki ni bil vedno enako dolg. Zato najvišje ali najnižje koncentracije radona niso bile vedno ob isti uri. Korelacijski koeficient je bil 0,18. Tudi v poletnem času se korelacija med parametroma razlikuje med opazovanim terminom in celotnim obdobjem. Korelacije v celotnem obdobju ni ( $R = 0$ ). Poleti je izmenjava zunanjega zraka z zrakom v jami počasnejša in je zaradi tega koncentracija radona v jami ves čas povišana. To pomeni, da zunanja temperatura ne more imeti večjega vpliva na koncentracijo radona v jami, razen v primerih, ko tudi v tem letnem času pride do večjih sprememb temperature, kar se je zgodilo tudi v izbranem terminu. Temperatura je padla celo pod  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Prišlo je do v dora svežega zraka v jamo, kar pomeni, da je imela temperatura večji vpliv na koncentracijo radona. To bi lahko bil vzrok, zakaj je v izbranem terminu korelacija med koncentracijo radona in temperaturo pozitivna. Na sliki 15 je dnevno nihanje temperature in koncentracije radona vidno bolj jasno kot na sliki 13. V primerjavi z rezultati spomladanskega dela meritev, ki smo jih izvajali vsake tri ure, je nihanje obeh parametrov v poletnem obdobju bolj enakomerno, zato so tudi zamiki med njima bolj vidni.

Tudi v poletnem času se v izbranem obdobju iz grafa (slika 16) ne da določiti odvisnosti med koncentracijo radona in zračnim tlakom. V določenih obdobjih koncentracija radona narašča, ko narašča tlak in obratno. V določenih obdobjih pa koncentracija radona pada, ko vrednost tlaka narašča in obratno. Dobili smo šibko pozitivno korelacijo s korelacijskim koeficientom 0,05. Glede na to, da je korelacija pozitivna, je prevladovalo stanje, kjer je koncentracija radona naraščala, ko je naraščal tudi tlak in obratno.



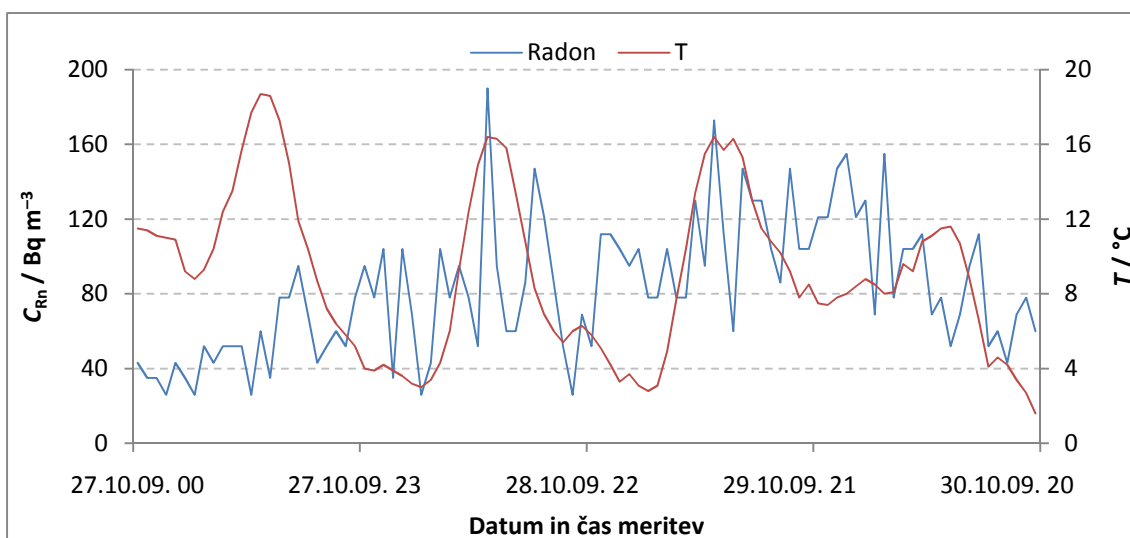
**Slika 15:** Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje temperature v obdobju od 15. 7. 2009 do 22. 7. 2009



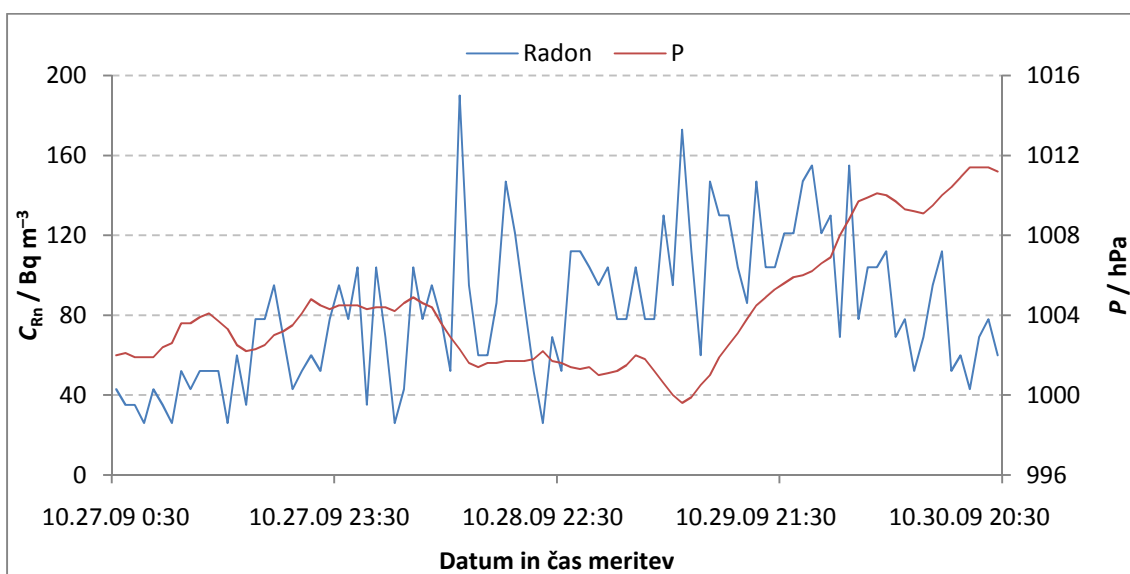
**Slika 16:** Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka v obdobju od 15. 7. 2009 do 22. 7. 2009

V jesenskem času smo izbrali obdobje od 27. 10. 2010 do 30. 10. 2010. Meritve smo izvajali vsako uro. Kot v poletnem času, se je tudi v tem obdobju koncentracija radona spreminjala tako kot temperatura, s časovnimi zamiki (slika 17). Tudi tukaj smo dobili pozitivno korelacijo s korelacijskim koeficientom le 0,03. To pomeni, da sta bili v tem primeru prisotni obe stanji. Prvo stanje je stanje, ko temperatura narašča, narašča tudi koncentracija radona in obratno. Drugo stanje: ko temperatura narašča, koncentracija radona pada in obratno. Prevladovalo je prvo stanje. To potrjuje tudi izračunan korelacijskega koeficienta za celotno jesensko obdobje 0,24.

Na sliki 18 je prikazana odvisnost koncentracije radona od zračnega tlaka v jesenskem obdobju. Krivulji nam ne kažeta medsebojne odvisnosti, kar nam potrjuje tudi izračun korelacijskega koeficienta  $R = 0,0$ .



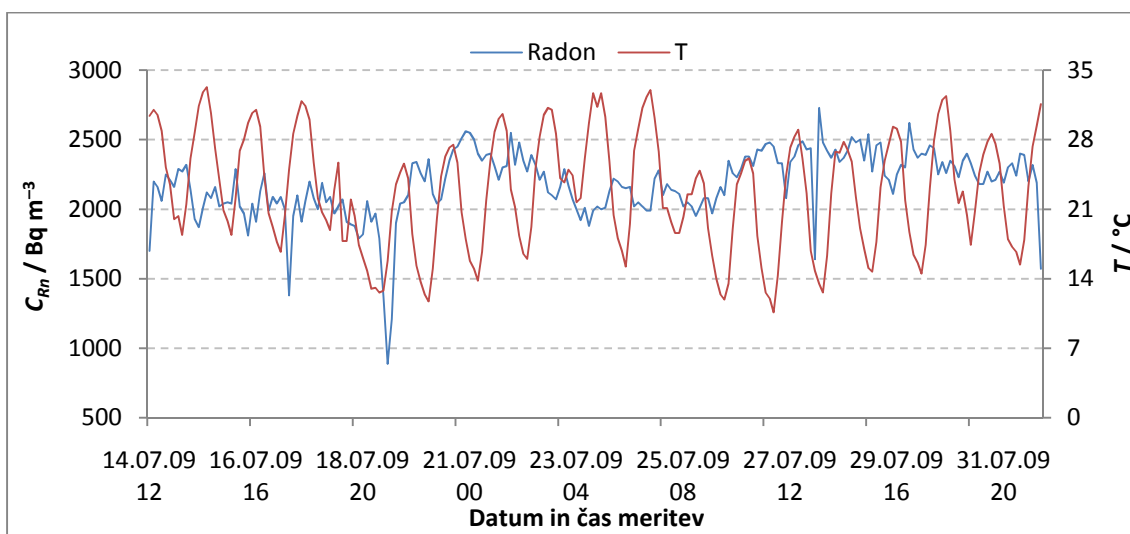
**Slika 17:** Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje temperature v obdobju od 27. 10. 2009 do 30. 10. 2009



**Slika 18:** Koncentracija radona v Kapniški dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka v obdobju od 27. 10. 2009 do 30. 10. 2009

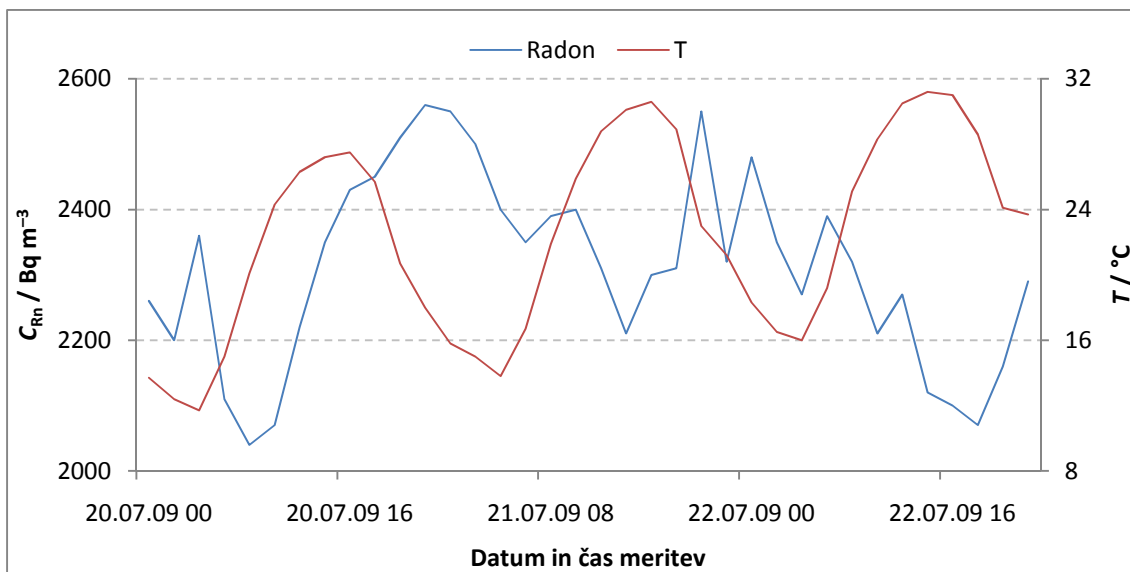
#### 4.1.2 Mala jama

Mala jama je prostor, ki se nahaja na začetku Kostonjeviške jame (slika 10). Meritve smo v njej izvedli v času od 14. 7. 2009 do 1. 8. 2009. Ker se jama nahaja nekoliko nižje od vhoda, smo pričakovali večji vpliv zunanega zraka in posledično manjše koncentracije radona. Meritve so pokazale ravno obratno. Vhod v ta predel je ozek in tudi v nadaljevanju ni rovov, ki bi vodili na površje, zato je tudi prezračevanje slabše. Najvišja koncentracija je bila  $2730 \pm 190 \text{ Bq m}^{-3}$ , najnižja pa  $890 \pm 60 \text{ Bq m}^{-3}$ . Le-ta je lahko posledica nekaj dnevnega zniževanja zunanje temperature. Opazovanje koncentracije radona v odvisnosti od zunanje temperature je pokazalo, da se je koncentracija radona v večini primerov spreminjala obratno kot pa temperatura (slika 19). Korelacijski koeficient je bil  $-0,14$ . To je ponovno posledica počasnejše izmenjave zraka med zunanostjo in notranostjo jame.



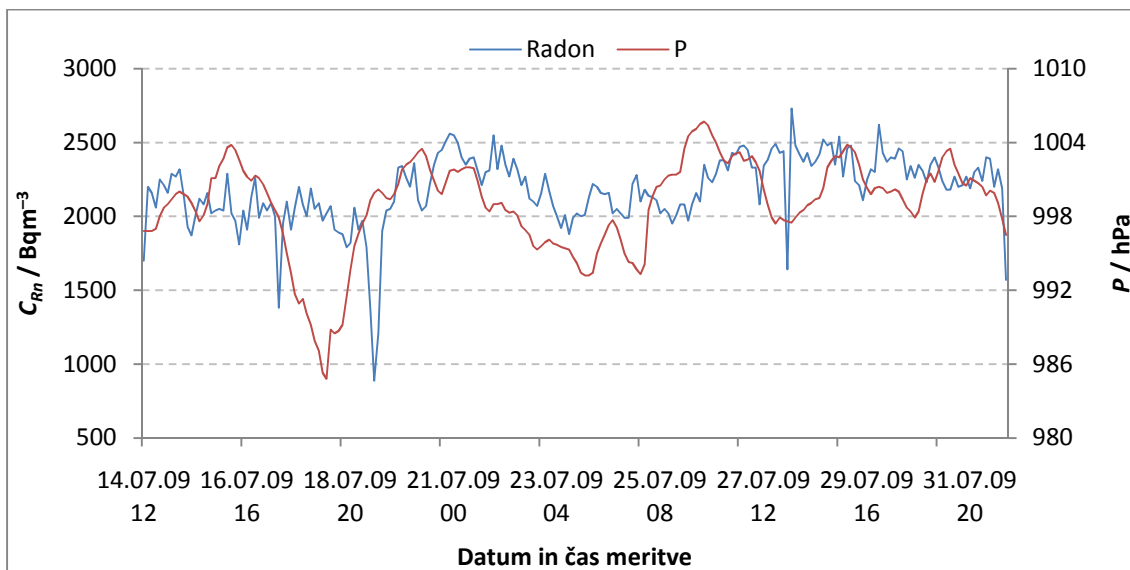
**Slika 19:** Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanje temperature

Da bi natančneje videli, kako se spreminja koncentracija radona v odvisnosti od temperature, smo si naključno izbrali obdobje treh dni, in sicer od 20. 7. 2009 do 22. 7. 2009. Na sliki 20 vidimo, da se koncentracija radona zniža, ko se temperatura zviša, vendar z zamiki. Vidimo, da so zamiki tudi po več ur. To je lahko tudi razlog, zakaj je tukaj korelacija med parametroma negativna ( $R = -0,31$ ).



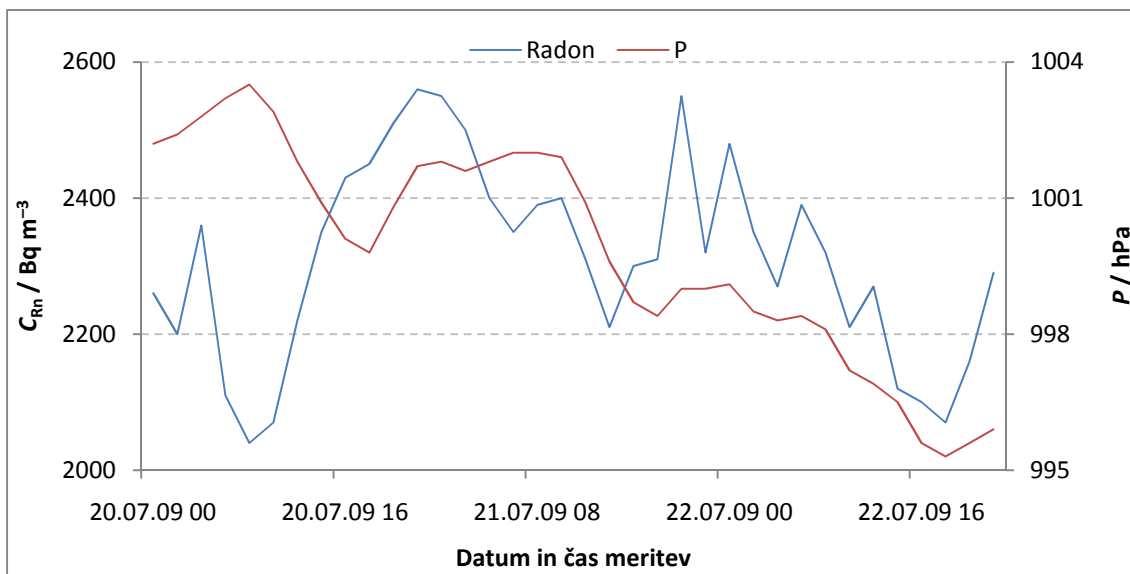
**Slika 20:** Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanje temperature v obdobju od 20. 7. 2009 do 22. 7. 2009

Odvisnost koncentracije radona od zunanjega tlaka je v tem primeru zelo različna (slika 21). V nekaterih dneh, ko je tlak padal, je koncentracija radona naraščala in obratno, v drugih dneh, ko je tlak naraščal, je naraščala tudi koncentracija radona in obratno. Izračunali smo korelacijo, ki je pozitivna ( $R = 0,30$ ). Prevladovalo je stanje, kjer je koncentracija radona naraščala, ko je naraščal zunanji tlak in obratno.



**Slika 21:** Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanjega tlaka

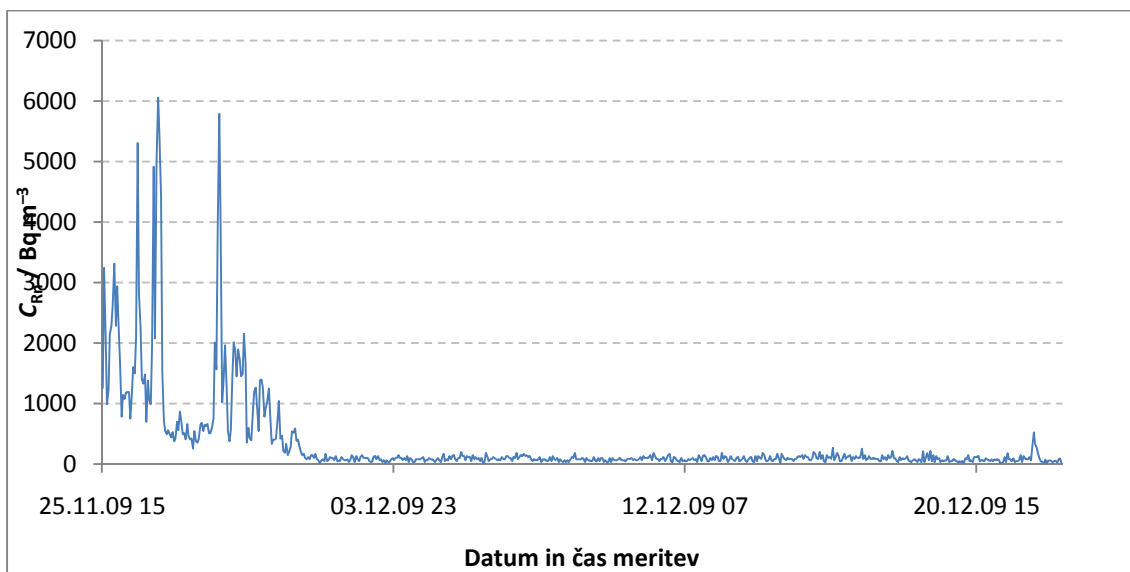
Tudi v primeru iskanja povezave med radonom in zunanjim tlakom smo bolj natančno pogledali krajše obdobje (20. 7. 2009 – 22. 7. 2009) (slika 22). V izbranem obdobju je v večjem delu koncentracija radona naraščala, ko je naraščal zunanji tlak. Korelacija je bila pozitivna, vendar šibka, s korelacijskim koeficientom 0,21.



**Slika 22:** Odvisnost koncentracije radona v Mali jami od zunanlega tlaka v obdobju od 20. 7. 2009 do 22. 7. 2009

### 4.1.3 Podorna dvorana

Meritve v Podorni dvorani so potekale od 25. 11. 2009 do 22. 12. 2009 (slika 23). Ker je koncentracija radona nihala v širokem razponu, kar od  $12 \pm 5 \text{ Bq m}^{-3}$  do  $6060 \pm 40 \text{ Bq m}^{-3}$ , smo opazovano obdobje razdelili na dva dela. Prvo obdobje je bilo od 25. 11. 2009 do 30. 11. 2009, drugo obdobje (1. 12. 2009 do 22. 12. 2009) pa nismo zajeli celotno, temveč le nekaj naključno izbranih dni (1. 12. 2009 do 7. 12. 2009), da bi natančneje videli odvisnosti koncentracije radona od zunanje temperature in tlaka. Kot je že opisano v eksperimentalnem delu, iz te dvorane vodita še dva rova, ki se združita v Dvorani netopirjev (priloga A). Od tukaj vodi več rovov v ostale predele jame. Konec novembra je bila koncentracija radona izredno visoka, saj je dosegla najvišjo vrednost,  $6060 \pm 40 \text{ Bq m}^{-3}$ . V začetku decembra je koncentracija radona padla celo pod  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  kot posledica znižanja zunanje temperature na vrednost  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

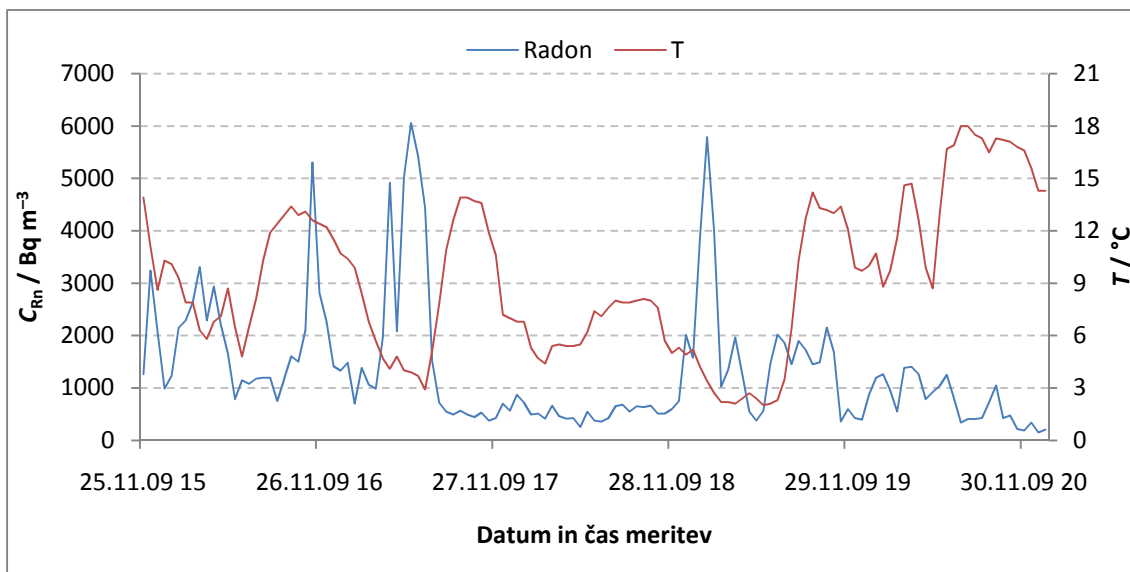


**Slika 23:** Rezultati meritev koncentracije radona v Podorni dvorani

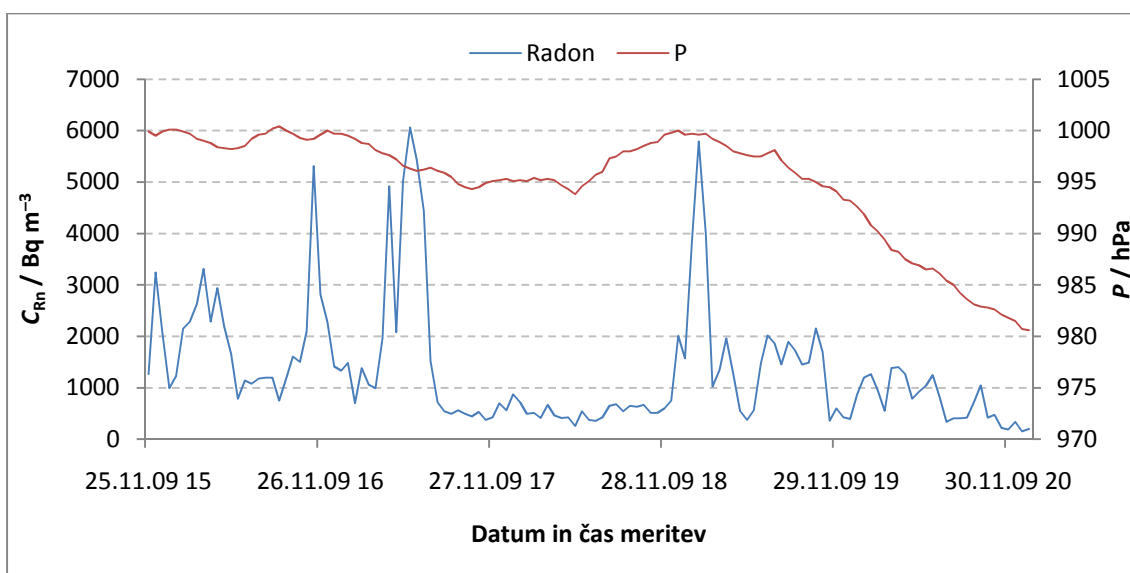
Koncentracija radona je konec novembra zelo nihala, in sicer od  $150 \pm 40 \text{ Bq m}^{-3}$  do  $6060 \pm 40 \text{ Bq m}^{-3}$  (slika 24), kar je posledica spreminjanja režima prezračevanja jame. Gre za prehod iz režima, ko je temperatura v jami nižja kot zunaj, v režim, ko je temperatura v jami višja kot zunaj. V tem prehodnem obdobju je temperatura v jami in zunaj nje približno enaka. Na sliki 24 je težko razbrati kakšna je odvisnost med koncentracijo radona in zunanjo temperaturo. Izračunali smo korelacijski koeficient, ki je negativen, in sicer  $-0,31$ . To pomeni, da je koncentracija radona naraščala, ko je temperatura padala in obratno.

V tem obdobju smo iskali tudi odvisnost koncentracije radona od zunanjega tlaka (slika 25). Tlak je postopoma padal, medtem ko je koncentracija radona veliko bolj nihala. Ker je iz grafa težko razbrati odvisnost, smo preverili korelacijo. Le-ta je bila pozitivna, korelacijski faktor pa  $0,36$ .



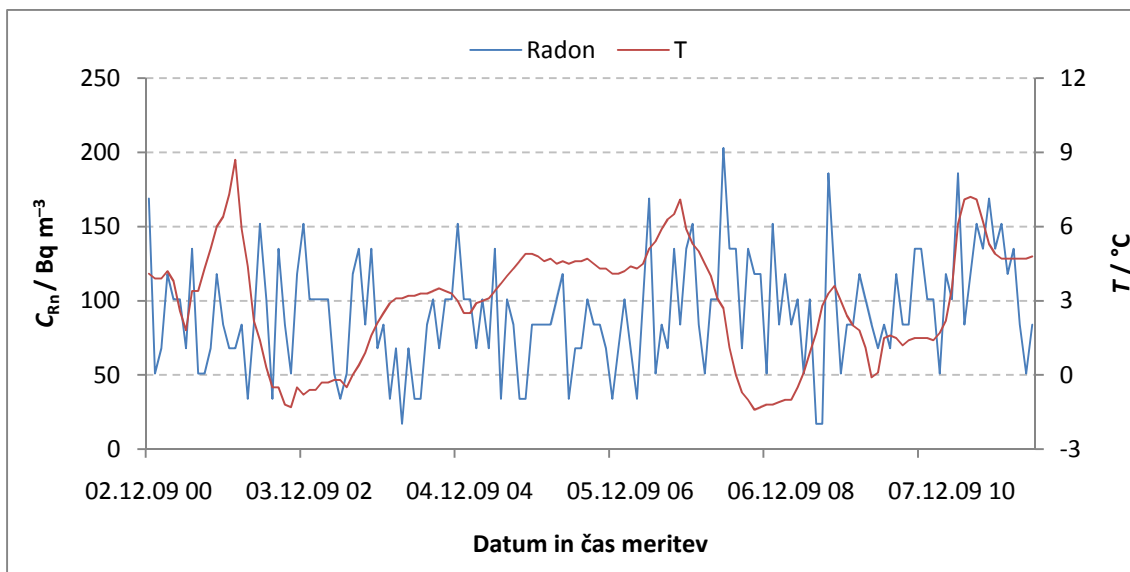


**Slika 24:** Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje temperature za obdobje od 25. 11. 2009 do 30. 11. 2009

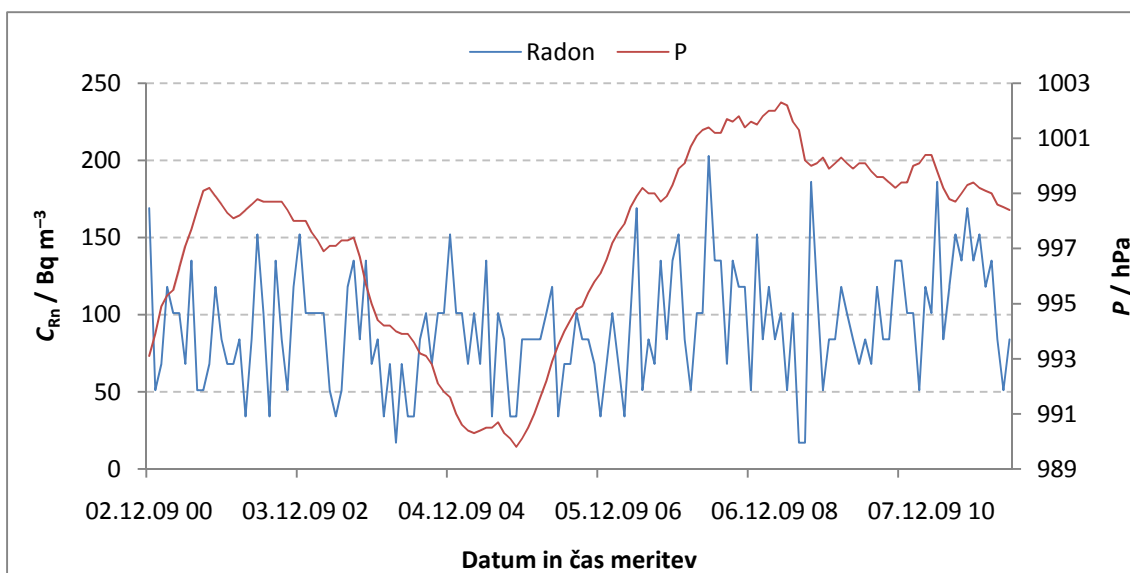


**Slika 25:** Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka za obdobje od 25. 11. 2009 do 30. 11. 2009

V obdobju od 2. 12. 2009 do 7. 12. 2009 so bile koncentracije radona v jami nizke, v primerjavi s koncentracijami konec novembra. Koncentracija radona je bila v območju od  $17 \pm 9 \text{ Bq m}^{-3}$  do  $203 \pm 40 \text{ Bq m}^{-3}$ . Celodnevne (štiriindvajseturne) temperaturne spremembe v decembru niso bile tako velike, kot v ostalih obdobjih meritev. Odvisnost koncentracije radona v jami od zunanje temperature v izbranem obdobju je težko razbrati (slika 26). Zato smo izračunali še korelacijo, ki je bila negativna ( $R = -0,14$ ). Tudi odvisnost koncentracije radona od zračnega tlaka (slika 27) je težko razbrati. Na dnevnem nivoju ni opaziti večjih sprememb zunanje tlaka. Te so opazne v daljšem časovnem obdobju. Sprememba tlaka v tem obdobju je bila tudi 10 hPa in več. Korelacija med parametroma je bila pozitivna ( $R = 0,21$ ).



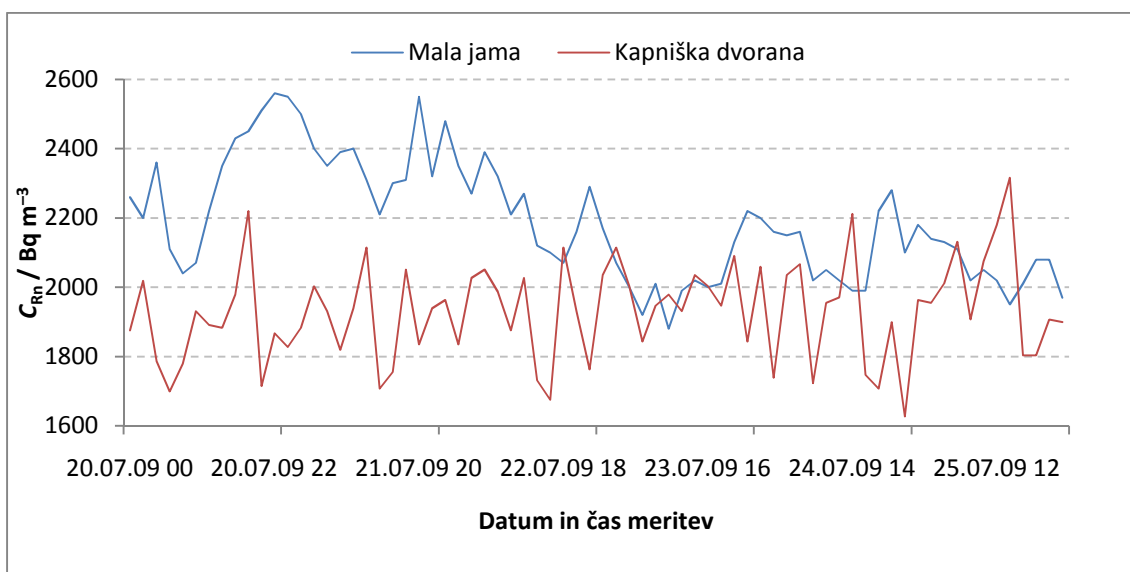
**Slika 26:** Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje temperature za obdobje od 1. 12. 2009 do 7. 12. 2009



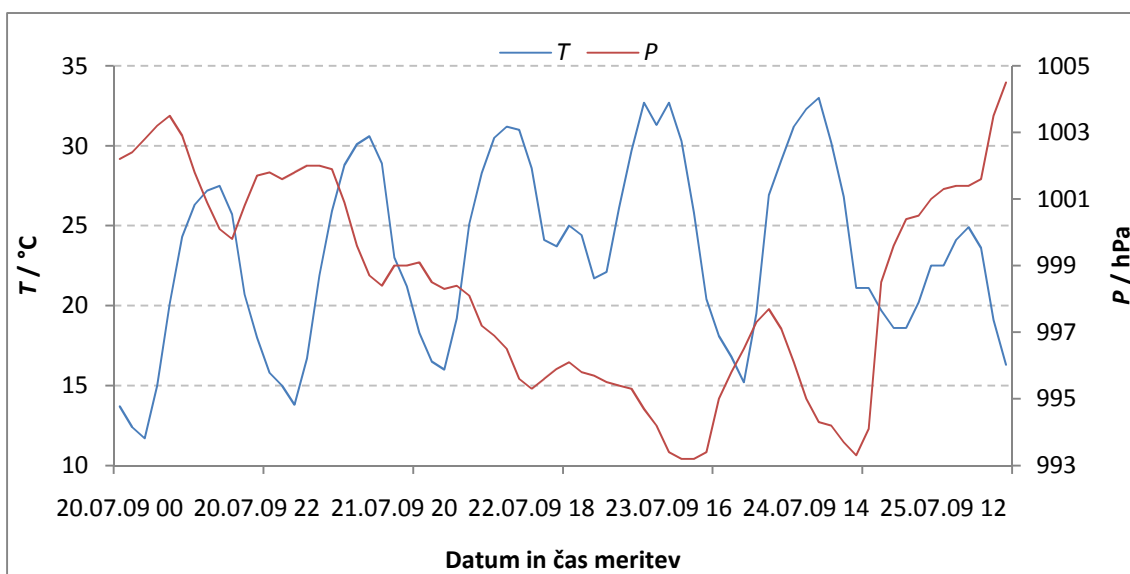
**Slika 27:** Koncentracija radona v Podorni dvorani v odvisnosti od zunanje tlaka za obdobje od 1. 12. 2009 do 7. 12. 2009

#### 4.1.4 Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Mali jami

Naključno izbrano obdobje, v katerem smo primerjali koncentraciji radona v Kapniški dvorani in v Mali jami ter iskali njuno odvisnost od zunanje temperature in tlaka, je od 20. 7. 2009 do 25. 7. 2009 (sliki 28 in 29). V povprečju je koncentracija radona nekoliko višja v Mali jami, in sicer  $2190 \pm 150 \text{ Bq m}^{-3}$ . V Kapniški dvorani je to povprečje  $1929 \pm 11 \text{ Bq m}^{-3}$ . Na osnovi visokih koncentracij radona lahko sklepamo, da sta oba dela jame zelo zaprta, kar pomeni, da so geološke strukture slabo prepustne. V primerjavi z Malo jamo je nihanje koncentracije radona v Kapniški dvorani manj izrazito. Za oba prostora v jami smo izračunali korelacije med koncentracijo radona in zunanjo temperaturo ter koncentracijo radona in zračnim tlakom. V tem obdobju v Kapniški dvorani korelacij med omenjenimi parametri ni bilo. V Mali jami je bila korelacija med koncentracijo radona in zunanjo temperaturo negativna ( $R = -0,34$ ), med koncentracijo radona in zunanjim tlakom pa pozitivna ( $R = 0,33$ ). Vpliv zunanje temperature in tlaka na koncentracijo radona v Mali jami povezujemo z njeno neposredno bližino vhoda. Prav tako povezujemo vpliv meteoroloških parametrov na koncentracijo radona z letnim časom, v katerem so se izvajale meritve, saj je pretok zraka počasnejši in pride do večjih zamikov med spremembo temperature oziroma tlaka in koncentracijo radona.



**Slika 28:** Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Mali jami v obdobju od 20. 7. 2009 do 25. 7. 2009

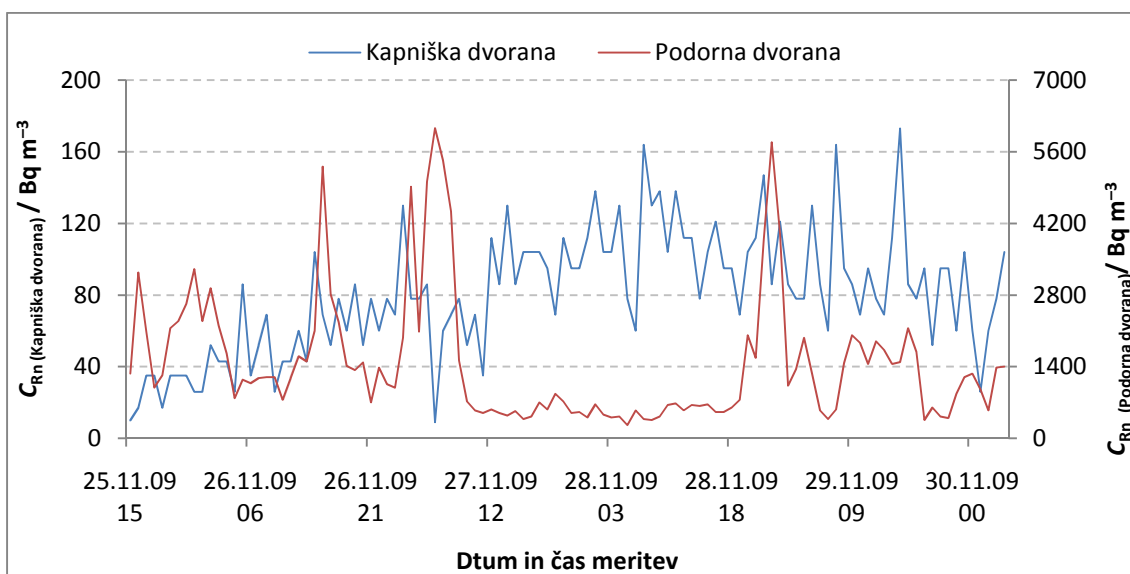


**Slika 29:** Spreminjanje zunanje temperature in tlaka v obdobju od 20. 7. 2009 do 25. 7. 2009

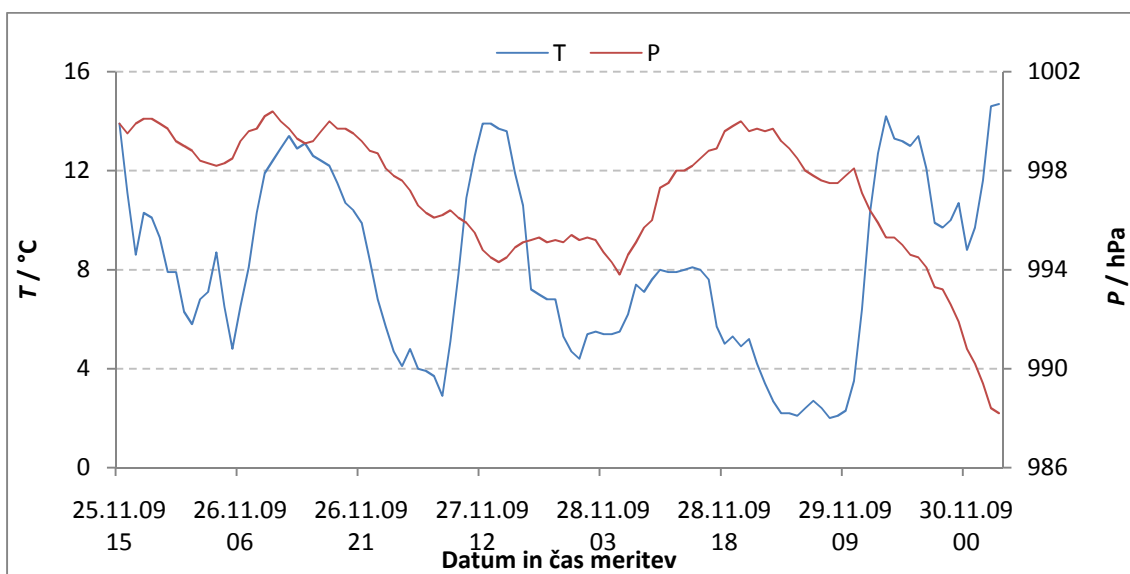
#### 4.1.5 Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Podorni dvorani

Naključno izbrano obdobje, v katerem smo primerjali koncentraciji radona v Kapniški dvorani in Podorni dvorani ter iskali njuno odvisnost od zunanje temperature in tlaka, je od 25. 11. 2009 do 30. 11. 2009 (sliki 30 in 31). Povprečje koncentracije radona je v Podorni dvorani znatno višje ( $1470 \pm 40 \text{ Bq m}^{-3}$ ) kot v Kapniški dvorani ( $80 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ ). V Podorni dvorani je najvišja dosežena koncentracija radona kar  $6060 \pm 40 \text{ Bq m}^{-3}$ . Kot je že omenjeno v poglavju 4.1.3, je to obdobje, ko je zunanja temperatura že lahko nižja od temperature v jami, zaradi česar pride do vdora hladnega zraka v jamo in redčenja koncentracije radona (prehod iz poletnega na zimski režim prezračevanja jame). To je lepo vidno v Podorni dvorani v času od 27. 11. 2009 do 28. 11. 2009. V Kapniški dvorani so bile te spremembe že v začetku oktobra, v obdobju sočasnih meritev pa tako izrazitih nihanj ni bilo. Vidimo, da se koncentracija radona v obeh dvoranah ne spreminja sočasno, kar kaže na posebnosti mikrolokacij oziroma na drugačen režim prezračevanja različnih delov jame. Iz tega sledi, da so strukture, ki omogočajo izmenjavo zraka iz Kapniške dvorane na površje in obratno precej bolj prepustne kot strukture v Podorni dvorani.

Izračunali smo korelacijo med koncentracijo radona v Kapniški dvorani oziroma Podorni dvorani in zunanjo temperaturo oziroma tlakom. Korelacija med koncentracijo radona v obeh predelih jame in zunanjo temperaturo je negativna. Korelacijski faktor v Kapniški dvorani je bil  $-0,18$ , v Podorni dvorani pa  $-0,20$ . Korelacija med koncentracijo radona v Kapniški dvorani in zunanjim tlakom je bila negativna ( $R = -0,24$ ), v Podorni dvorani pa je bila pozitivna ( $R = 0,27$ ).



**Slika 30:** Primerjava koncentracij radona v Kapniški dvorani in Podorni dvorani v obdobju od 25. 11. 2010 do 30. 11. 2010



**Slika 31:** Spreminjanje zunanje temperature in tlaka v obdobju od 25. 11. 2010 do 30. 11. 2010

## 4.2 Rezultati meritev trenutnih koncentracij radona

Rezultati so pokazali, da so bile trenutne koncentracije radona v različnih terminih izvajanja meritev različne. Podobno kot pri rezultatih kontinuiranih meritev, so bile v toplejšem delu leta koncentracije radona višje kot v hladnejšem. Avgusta je bila koncentracija radona na vseh merilnih mestih v jami najvišja, povprečje je  $2090 \pm 70 \text{ Bq m}^{-3}$ . Oktobra je padla, v novembru in januarju pa je bila še nižja, običajno le nekaj  $10 \text{ Bq m}^{-3}$ . Povprečje v jesenskem času je bilo  $330 \pm 30 \text{ Bq m}^{-3}$ , v zimskem pa  $70 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ . Marca se je koncentracija radona ponovno pričela zviševati (povprečje je  $250 \pm 20 \text{ Bq m}^{-3}$ ). Ta nihanja trenutnih koncentracije radona so primerljiva s potekom kontinuiranih meritev v Kapniški dvorani (slika 11), kjer je opazen izrazit trend spreminjanja koncentracije radona v jami glede na letne čase. Primerjava z Malo jamo in Podorno dvorano ni možna, ker na teh mestih ni dovolj dolgega niza podatkov.

Glede na izhodiščno točko nam je jamski vodnik pomagal oceniti nadmorsko višino naših vzorčevalnih mest. Ugotovili smo, da koncentracija radona ni odvisna od nadmorske višine posameznega vzorčevalnega mesta, temveč so pomembne strukturne značilnosti posameznega vzorčevalnega mesta in vpliv vode, če je le-ta prisotna na izbrani točki. Povprečne vrednosti koncentracij naraščajo z oddaljenostjo od vhoda v jamo. Tudi Przylibski (2000) je v svojih raziskavah ugotovil, da se koncentracija radona viša z oddaljenostjo od vhoda.

Vzorčevalna mesta (slika 10):

- T1: prvo vzorčevalno mesto je bilo v Mali jami. Le-ta leži na začetku jame, kakšen meter nadmorske višine nižje, kot je sam vhod v jamo. Ta del je nekoliko zaprt, tako da se radon v tem prostoru lahko kopiči. Povprečna koncentracija petih vzorčenj je bila  $569 \pm 32 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- T2: drugo vzorčevalno mesto je bilo pred meandrom oziroma prva dvorana na turistični poti. To dvorano seka prelom in zato lahko pride na tem mestu do večje izmenjave med zunanjim zrakom in zrakom v jami. To je vzrok, da so na tem vzorčevalnem mestu nižje koncentracije radona. Tukaj nismo vzorčili v avgustu, ampak smo prve meritve opravili šele oktobra. Povprečna vrednost radona je bila  $133 \pm 18 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- T3: tretje vzorčevalno mesto je bilo v rovu s trikotnim presekom (priloga B) pod prvimi stopnicami turistične poti. Na levem delu od vzorčevalne točke je manjši stranski rov, ki lahko ima vpliv na koncentracijo radona. Da so na tem vzorčevalnem mestu nizke koncentracije radona, je lahko vzrok trikotni presek, kjer lahko pride do izmenjave zraka med zunanostjo in notranostjo jame. Prav tako lahko ima vpliv prelom na drugem vzorčevalnem mestu. Povprečna vrednost koncentracije radona je bila  $485 \pm 29 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- T4: četrto vzorčevalno mesto je bilo pred stopnicami, ki vodijo 4 m navzgor. Vidimo, da se je povprečna koncentracija radona petih meritev postopoma višala in je bila v tem zaprtem delu, kjer se radon lahko kopiči, že  $521 \pm 29 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- T5: peto vzorčevalno mesto je bilo na vrhu teh stopnic. Koncentracija radona je še večja, čeprav je po opisu jamskega vodnika nad tem vzorčevalnim mestom dimnik, ki vodi na površje in bi zaradi tega lahko prišlo do manjšega prezračevanja. Povprečna vrednost je bila  $585 \pm 32 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- T6: do šestega vzorčevalnega mesta smo se spustili 16 m globoko in prišli do Prvega jezera. Povprečna koncentracija radona petih meritev je še vedno naraščala. V mesecu marcu je bila gladina jezera višja v primerjavi z ostalimi obdobji, ko smo izvajali meritve. Voda je skozi jamo vidno dotekala v jezero, saj se je v tem času na površju talil sneg, kar pa ni bistveno vplivalo na koncentracijo

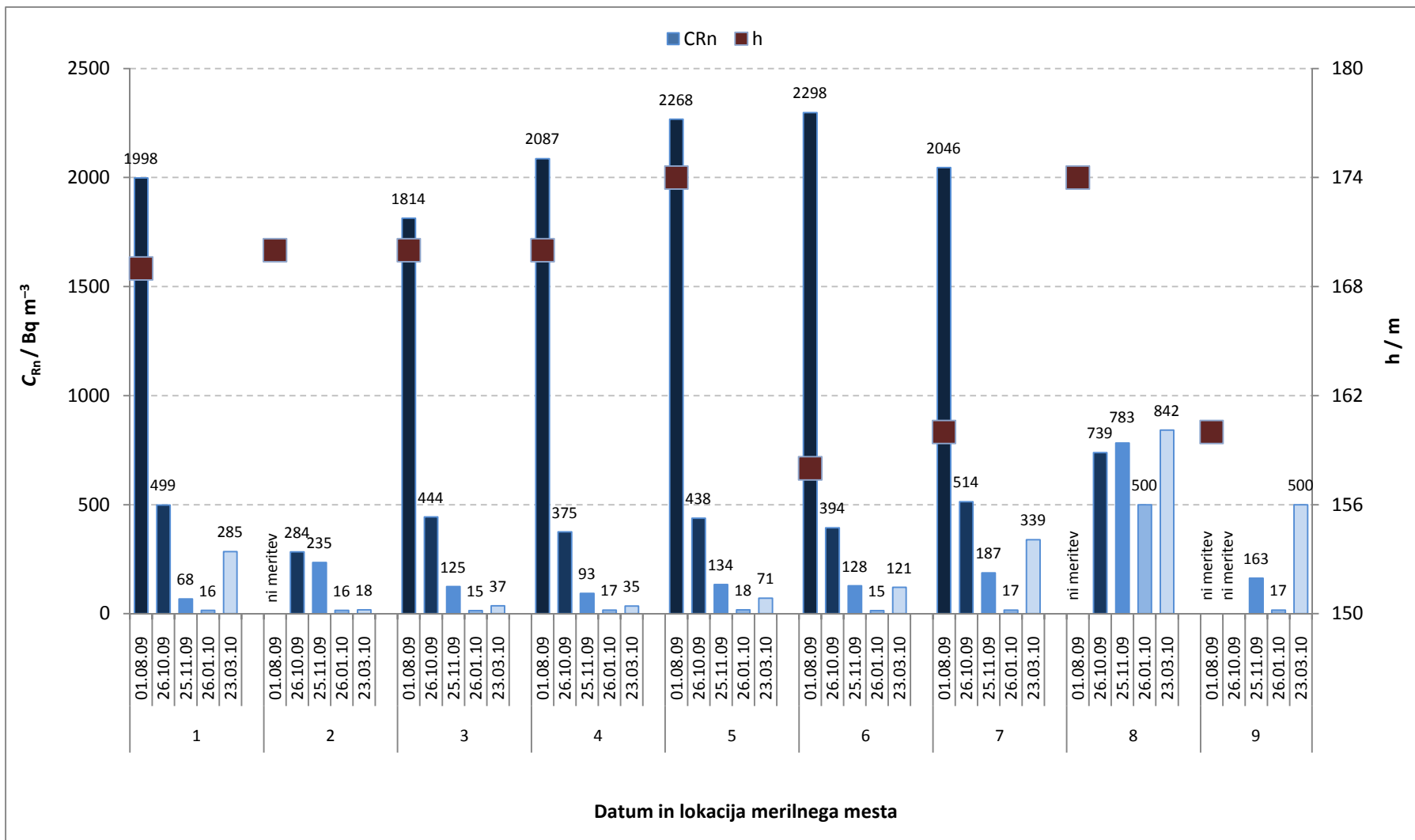
radona. Vzrok so višje koncentracije radona v podzemnih vodah kot pa v površinskih (Kobal in sod., 1990). Voda iz podzemlja s seboj prinaša raztopljen radon. Faktor prehoda radona iz vode v zrak je  $10^{-4}$  (Vaupotič, 1995). Povprečna koncentracija radona na tem mestu je bila  $589 \pm 31 \text{ Bq m}^{-3}$ .

- T7: sedmo vzorčevalno mesto je bilo Presihajoče jezero. Jezero se na tem območju pojavi le v času, ko se sneg tali in v mesecu marcu je bilo opaziti v njem nekaj vode. V toplejših obdobjih leta vode ni. V vseh terminih vzorčenja, razen avgusta, so bile izmerjene koncentracije radona višje kot pri Prvem jezeru. To je lahko posledica prelomov na tem območju, saj je poletje obdobje, ko je izmenjava zunanega zraka z zrakom v jami počasnejša in se radon lahko zadržuje in kopiči na tem delu. V ostalih mesecih pa je izmenjava hitrejša in je vdor zunanega zraka skozi prelom večji, kar posledično privede do nižjih koncentracij kot na šestem vzorčevalnem mestu. Povprečna vrednost je bila  $620 \pm 35 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- T8: osmo vzorčevalno mesto je bilo v Kapniški dvorani. Tudi na tem mestu nismo vzorčili v mesecu avgustu. Vendar so rezultati ostalih štirih meritev pokazali, da so v tem delu jame skozi vse leto najvišje vsebnosti radona. To je izmed vseh vzorčevalnih mest pravzaprav najbolj zaprt del jame. Povprečje štirih meritev je  $716 \pm 44 \text{ Bq m}^{-3}$ .
- T9: deveto vzorčevalno mesto je bila Podorna dvorana. Na tem mestu smo vzeli vzorce le trikrat, in sicer v hladnejšem delu leta. Zaradi tega so tudi koncentracije radona nižje. V Kapniški dvorani so bile višje koncentracije radona kot v Podorni dvorani, vendar približno enake kot pri Presihajočem jezeru. Povprečje treh meritev je  $226 \pm 24 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Trenutne koncentracije radona so skupaj z označeno nadmorsko višino posameznega vzorčevalnega mesta prikazane na sliki 32.

Potrebno je poudariti, da se rezultati kontinuiranih meritev v Kapniški dvorani in Podorni dvorani včasih razlikujejo od meritev trenutnih koncentracij radona v teh dvoranah. Vzrok je oddaljenost vzorčevalnih točk od mest kontinuiranih merilnikov pa tudi sama razlika merilnih tehnik. Kontinuirani merilniki delujejo na principu pasivnega vzorčenja, medtem ko so scintilacijske celice aktivna metoda in njihovih rezultatov v nekem določenem trenutku ne moremo enačiti. Kljub temu so bili rezultati v Mali jami obeh meritev podobni (v okviru merskih napak), saj smo vzorce zraka odvzeli blizu mesta kontinuiranega merilnika.

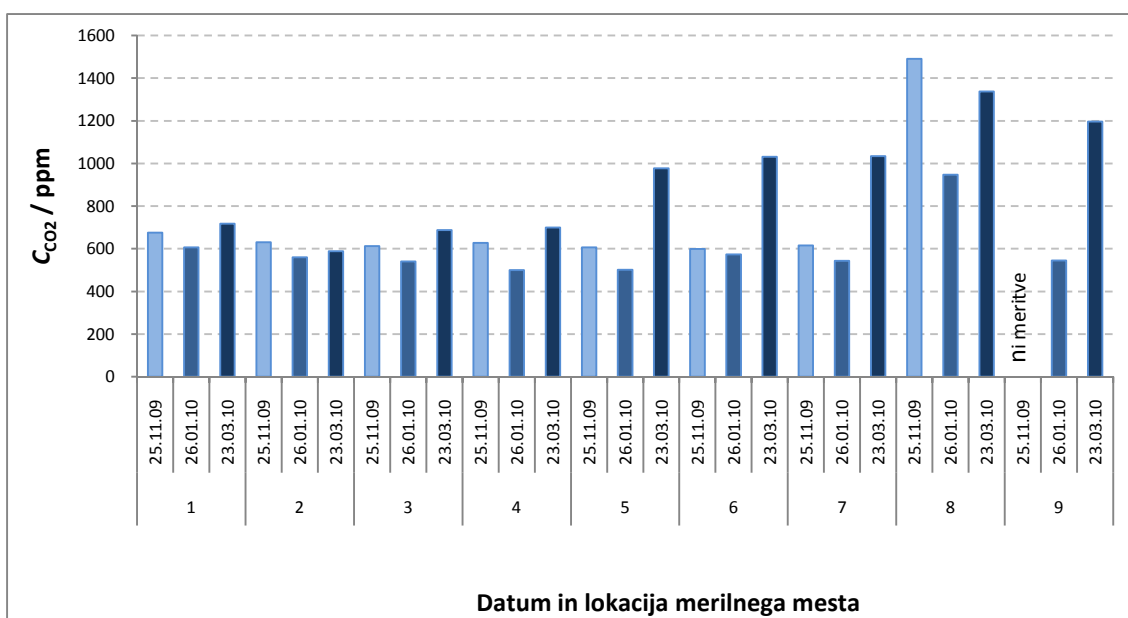




**Slika 32:** Trenutne koncentracije radona na različnih vzorčevalnih mestih in globinah v jami v različnih terminih meritev

### 4.3 Rezultati meritev trenutnih koncentracij ogljikovega dioksida

Koncentracijo ogljikovega dioksida smo v jami merili v hladnejšem delu leta, in sicer novembra 2009 ter januarja in marca 2010. Na prvih štirih merilnih mestih, ki so najbližje vhodu, so bile koncentracije ogljikovega dioksida med seboj primerljive. Povprečje teh meritev je bilo 620 ppm (slika 33). Na petem, šestem in sedmem merilnem mestu je bila koncentracija ogljikovega dioksida v zadnjem terminu meritev veliko višja kot v prvih dveh. Vzrok je zvišanje zunanje temperature. V marcu je zunanja temperatura že lahko višja od temperature v jami in zato se režim prezračevanja v jami spremeni. Prezračevanje je manj izrazito, radon in ogljikov dioksid se kopičita v jamskem zraku. Na prvih dveh meritvah petega, šestega in sedmega merilnega mesta so bile koncentracije ogljikovega dioksida približno enake tistim na prvih štirih merilnih mestih. Najvišje koncentracije smo izmerili v Kapniški in Podorni dvorani (osmo in deveto merilno mesto). Zaradi slabe prezračenosti obeh dvoran je bila koncentracija ogljikovega dioksida višja.

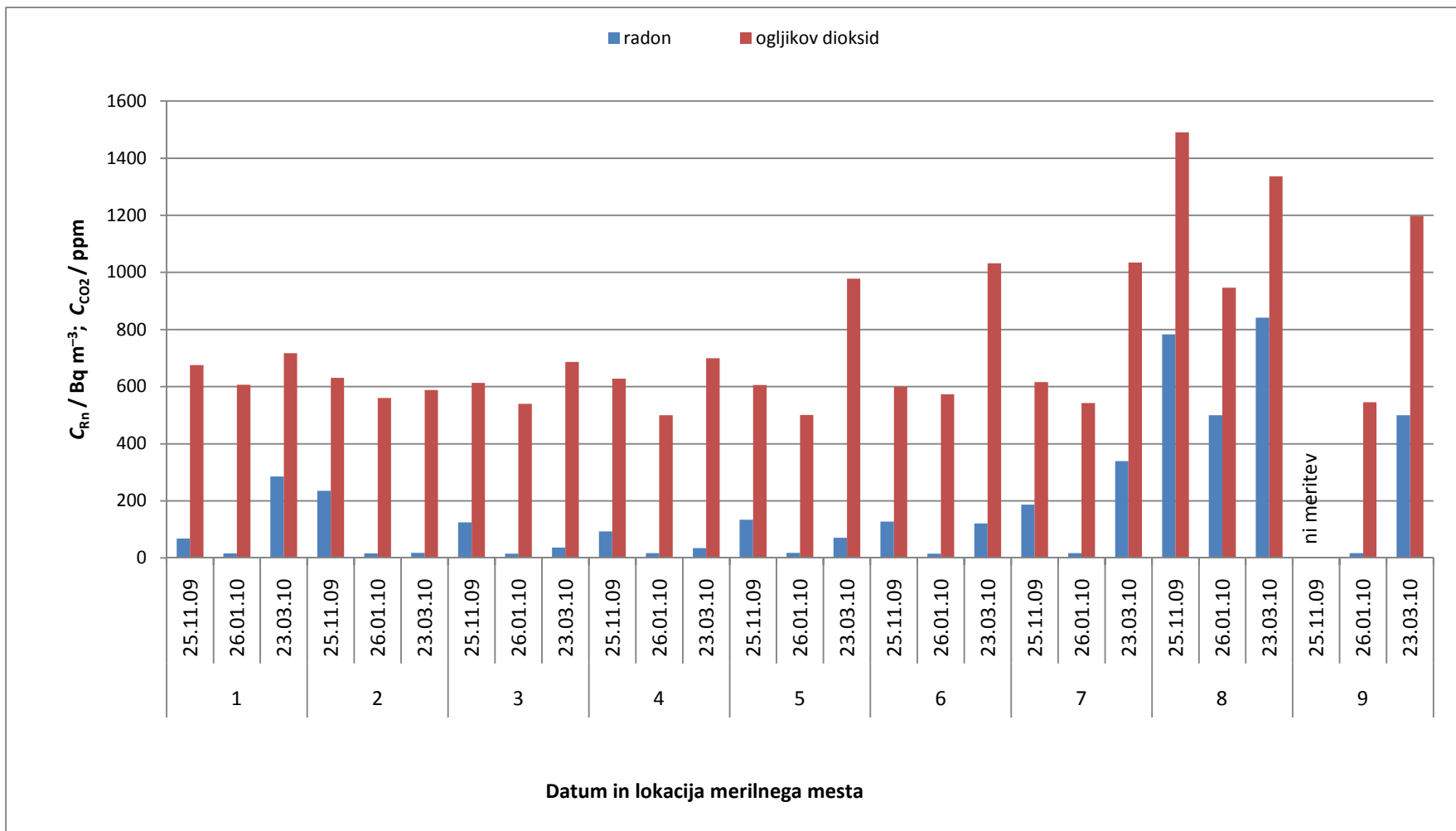


**Slika 33:** Koncentracija ogljikovega dioksida v ppm na različnih merilnih mestih (T1 do T9) v jami

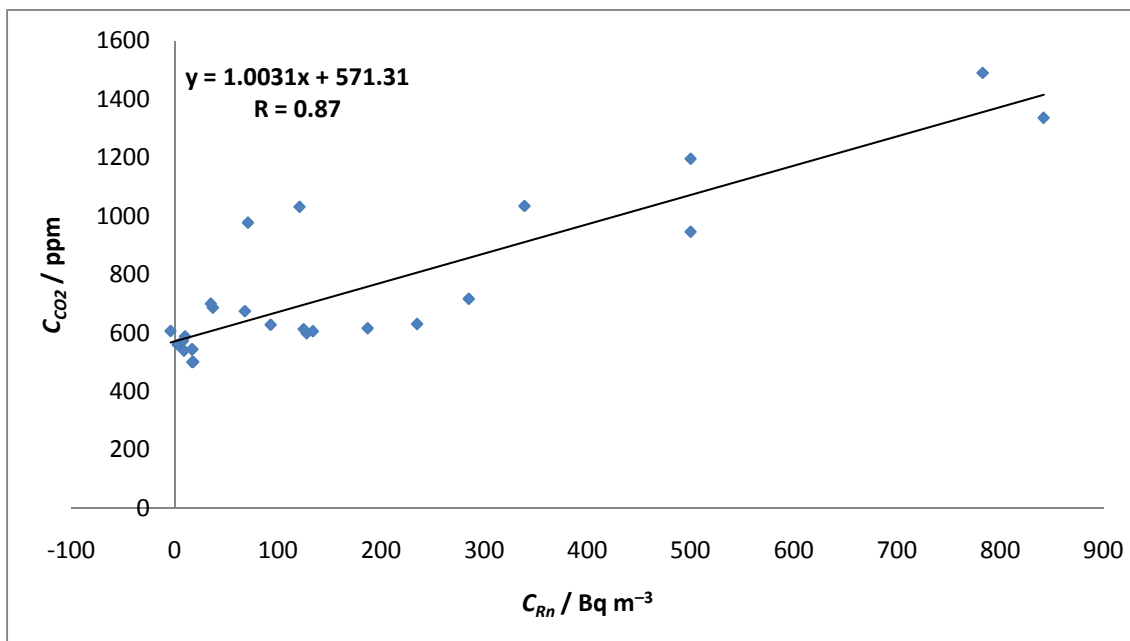
### 4.4 Koncentracija radona in ogljikovega dioksida

Ker je ogljikov dioksid plin, s katerim radon potuje, smo pričakovali, da bo korelacija med parametroma pozitivna. Na sliki 34 vidimo, da se koncentracija radona zvišuje, ko se zviša tudi koncentracija CO<sub>2</sub>. To potrjuje tudi graf na sliki 35, ki prikazuje korelacijo med koncentracijo radona in ogljikovega dioksida. Korelacijski koeficient je visok (0,87).

Na sliki 34 vidimo, da sta na vseh merilnih mestih koncentraciji radona in CO<sub>2</sub> v zimskih mesecih nižji, kot v jesenskih in pomladanskih mesecih. Visoke koncentracije radona in ogljikovega dioksida so značilne za toplejši del leta in nizke za hladnejše obdobje leta. To sta v svojih raziskavah ugotovila tudi Kowalczyk in Froelich (2010).



**Slika 34:** Primerjava trenutne koncentracije radona in koncentracije ogljikovega dioksida na različnih vzorčevalnih oziroma merilnih mestih in v različnih obdobjih



**Slika 35:** Korelacija med koncentracijo radona in ogljikovega dioksida v Kostanjeviški jami

## 5 ZAKLJUČEK

Koncentracija radona v kraških jamah je odvisna od več dejavnikov. V diplomski nalogi smo se osredotočili na vpliv zunanje temperature in tlaka zraka ter koncentracije ogljikovega dioksida na koncentracijo radona v Kostanjeviški jami. To jamo lahko obravnavamo kot horizontalno. V njej so na določenih mestih vidni prelomi in razpoke, sama jama pa je nastala na sečišču dveh večjih prelomov.

Rezultati kontinuiranih meritev v Kapniški dvorani (K1) so pokazali, da se koncentracija radona v zraku spreminja v odvisnosti od zunanje temperature in tlaka. Celotno obdobje opazovanja, to je od aprila do novembra 2009, je pokazalo, da se koncentracija radona spreminja premo sorazmerno s temperaturo. To pomeni, da se ob naraščanju temperature poveča tudi koncentracija radona in obratno. Korelacija med koncentracijo radona v jami in zunanjo temperaturo je bila pozitivna ( $R = 0,59$ ). Izjema je poletje, ko je korelacija šibka, oziroma je v določenih obdobjih sploh ni. Poleti je temperatura zunanjega zraka višja kot temperatura zraka v jami, zato se zrak izmenjuje zelo počasi, ker vleka zraka praktično ni in je zato koncentracija radona ves čas povišana. V preostalih letnih časih je pozitivna korelacija bolj izrazita in koncentracije radona v jami so nižje. Za bolj natančno ovrednotenje povezave bi potrebovali daljše meritve. Tudi zračni tlak vpliva na koncentracijo radona v jami. Korelacija med koncentracijo radona in zračnim tlakom je slaba in negativna ( $R = -0,11$ ). Dvig zračnega tlaka povzroči znižanje koncentracije radona in obratno. Povprečna koncentracija radona v Kapniški dvorani v celotnem obdobju meritev je bila  $1500 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ , v poletnem času  $1960 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ , v prehodnem pomladanskem  $1120 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$  in jesenskem obdobju pa  $490 \pm 30 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Koncentracijo radona v Kapniški dvorani (K1) smo primerjali s koncentracijo radona v Mali jami (K3) in Podorni dvorani (K2). Primerjava z Malo jamo v mesecu juliju 2009 je pokazala, da je koncentracija radona tudi v neposredni bližini vhoda, kjer leži Mala jama, zelo visoka. To dokazuje, da je poleti izmenjava zraka med jamo in okolico v splošnem slaba in se v jami zadržuje zrak z visoko koncentracijo radona. Primerjava koncentracij radona v novembru 2009 med Kapniško in Podorno dvorano je pokazala, da se zaradi spremembe zunanje temperature koncentracija radona na teh dveh mestih v jami ne spreminja enako intenzivno in tudi ne istočasno. Vzrok za to so različno prepustne geološke strukture. V Kapniški dvorani smo znižanje koncentracije radona, zaradi nižje zunanje temperature od temperature v jami, zaznali v začetku oktobra, v Podorni dvorani pa šele konec novembra.

Trenutne koncentracije radona, izmerjene v različnih obdobjih na devetih točkah vzdolž jame so pokazale, da na koncentracijo radona poleg letnega časa (zunanja temperatura in tlak) vpliva še geomorfologija jame in strukturne značilnosti. Povprečna koncentracija radona raste od vhoda v jamo do končne točke turistične poti. V splošnem so bile visoke koncentracije radona v bolj zaprtih in zato slabše prezračenih delih jame. Na posameznih točkah so v skalah vidni prelomi in razpoke, ponekod tudi stranski jamski rovi. V teh predelih jame so bile koncentracije radona praviloma nižje. V zadnjem delu turistične poti, v Kapniški dvorani (T8), so bile koncentracije radona najvišje. Očitno je ta del jame in dvorane slabše prezračen. Koncentracije radona vzdolž jame so bile v območju  $2090 \pm 70 \text{ Bq m}^{-3}$  poleti,  $330 \pm 30 \text{ Bq m}^{-3}$  jeseni,  $70 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$  pozimi in  $250 \pm 20 \text{ Bq m}^{-3}$  pomladi. Najvišja koncentracija je bila v avgustu pri Prvem jezeru, in sicer  $2300 \pm 80 \text{ Bq m}^{-3}$ . V Kapniški dvorani, kjer so bile koncentracije radona praviloma najvišje, ta mesec meritve trenutne koncentracije nismo izvedli.

Na istih devetih točkah smo trikrat sočasno z radonom merili tudi ogljikov dioksid v zraku. Korelacija med obema koncentracijama je premo sorazmerna ( $R = 0,87$ ); na točkah z višjimi koncentracijami radona smo dobili tudi višje koncentracije ogljikovega dioksida. Ker radon potuje z ogljikovim dioksidom, smo to zvezo med obema parametroma tudi pričakovali.

Za ovrednotenje vpliva zunanje temperature in tlaka na koncentracijo radona v jami je potrebno kontinuirano spremljanje vseh parametrov preko daljšega časovnega obdobja. Koncentracija radona v jami niha bolj izrazito od zunanje temperature in lahko v dnevnu doseže več najvišjih oziroma najnižjih vrednosti, medtem ko ima zunanja temperatura značilen dnevni ritem z najvišjo vrednostjo popoldne in najnižjo v zgodnjih jutranjih urah. Ugotovili smo, da se koncentracija radona v jami spreminja zaradi sprememb v zunanji temperaturi s krajšim časovnim zamikom, ki pa ni vedno enak. Da bi bolj natančno ovrednotili odvisnost koncentracije radona v jami od sprememb v zunanji temperaturi in tlaku, bi morali spremljati parametre kontinuirano tudi več let; koncentracije radona istočasno v različnih delih jame, zunanjo temperaturo in tlak pa v neposredni bližini jame.

Na koncentracijo radona pa ne vplivajo samo zunanja temperatura in tlak ter geomorfologija jame, temveč tudi podzemne vode in vlaga. Ker je pod jamo stalen izvir Studena in več vodnih bruhalnikov, bi bilo potrebno tudi na mestih, kot sta Prvo jezero in Presihajoče jezero, izvajati kontinuirane meritve radona, da bi lahko ovrednotili vpliv podzemne vode na koncentracijo radona v jami. Prav tako bi bilo potrebno na vseh merilnih mestih meriti hitrost vetra, ki bi potrdila ali ovrgla naše domneve o prezračevnosti posameznega merilnega mesta v jami.

Vsaka jama je edinstven sistem, zato ni pričakovati, da bo koncentracija radona zaradi sprememb zunanje temperature in tlaka nihala v vsaki jami enako, kakor tudi ne v vsakem delu jame. Zato zgornjih ugotovitev ne smemo posploševati, temveč je potrebno vsako jamo obravnavati in raziskati kot samostojen sistem ob upoštevanju njenih geomorfoloških in strukturnih značilnosti ter drugih posebnosti.

## 6 VIRI

Abmurad K.M., Al-Tamimi M. 2001. Emanation power of radon and its concentration in soil and rocks. *Radiation Measurement*, 34: 423–426.

Badino G., Verša D. 1998. Jame in Jamarji. Ljubljana. Jamarska zveza Slovenije: 77 str.

Bodansky D. 1987. Overview of the Indoor Radon Problem. V: *Indoor Radon and its Hazards*. Bodansky D., Robkin M.A., Stadtler D.R., Washington, University of Washington Press: 3–16.

Brenčič M., Ladišič B., Polak S., Sket B., Hudoklin A. (ur.), Pršina M. 2002. *Kostanjeviška jama*. Novo mesto, Jamarski klub Novo mesto, Klub jamarjev Kostanjeviška jama: 70–89.

Choubey V.M., Bist K.S., Saini N.K., Ramola R.C. 1999. Relation between soil-gas radon variation and different lithotectonic units, Garhvwal Himalaya, India. *Applied Radiation and Isotopes*, 51: 587–591.

Cigna A.A. 2003. The distribution of radon concentration in caves. *International Journal of Speleology*, 32(1–4): 113–115.

Cigna A.A. 2005. Radon in caves. *International Journal of Speleology*, 34(1–2): 1–18.

Etiopie G. and Martinelli G. 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129(3–4): 185–204.

Field M.S. 2007. – Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing a radiation from  $^{222}\text{Rn}$  decay in caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1): 207–228.

Gams I. 2004. *Kras v Sloveniji v prostoru in času*. 2. izdaja. Ljubljana. Založba ZRC, ZRC SAZU: 515 str.

Garavaglia M., Braitenberg C., Zadro M. 1998. Radon monitoring in a cave in north-eastern Italy. *Physics and Chemistry of the Earth*, 23(9–10): 949–952.

Gillmore G.K., Sperrin M., Phillips P., Denman A. 2000. Radon hazards, geology and exposure of cave users: A case study and some theoretical perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 46: 279–288

Gillmore G.K., Phillips P.S., Denman A.R., Gilbertson D.D. 2002. Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves. *Environmental Radioactivity*, 62: 165–179.

Hakl J., Csige I., Hunyadi I., Varhegyi A., Geczy G. 1996. Radon transport in fractured porous media – experimental study in caves. *Environmental International*, 22(1): 433–437.

Hakl J., Hinyadi I., Csige I., Geczy G., Lenart L., Varhegyi A. 1997. Radon transport phenomena studied in karst caves – international experiences of radon levels and exposure. *Radiation Measurements*, 28(1–6): 675–684.

Khan H.A., Tufail M., Qureshi A.A 1990. Radon signal for earthquake prediction and geological prospection. *Journal of Islamic Academy of Sciences*, 3: 229–231.

Kies A., Massen F., Fieder M. 1997. Measuring Radon in underground locations. V: *Rare Gas Geochemistry*. Virk H.S. (ur.). Amritsar, GuruNanak Dev University: 1–8.

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

Kobal I., Ančik M., Škofljanec M. 1988. Variations of  $^{222}\text{Rn}$  air concentrations in Postojna cave. *Radiation Protection Dosimetry*, 25(3): 207–211.

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

Kowalczk A. J., Froelich P.N. 2010. Cave air ventilation and  $\text{CO}_2$  outgassing by  $^{222}\text{Rn}$  modeling: How fast do caves breathe?. *Earth and Planetary Science Letters*, 289: 209–219.

Kranjc A. 1990. Dolenjski kraški svet. Novo mesto. Dolenjska založba Novo mesto: 240 str.

Ladišič B. 1999. Nova Kostanjeviška jama. V: *Naše jame*. Aljančič M. Ljubljana, Jamarska zveza Slovenije: 82–88.

Lario J., Sánchez-Morel S., Cuezva S., Taborda M., Soler V. 2006. High  $^{222}\text{Rn}$  levels in a show cave (Castañar de Ibor, Spain): Proposal and application of management measures to minimize the effects on guides and visitors. *Atmospheric Environment*, 40: 7395–7400.

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

Markov KR. 1962. A rapid method to estimate radiation hazards related to radon decay products in air. *Atom Energiya*, 12: 315–322.

Merilnik za merjenje pri prezračevanju in merjenju kvalitete zraka Testo 435; <http://www.testo.de/> (5. 3. 2010)

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 product in indoor air*. Nazaroff W. W., Nero A. V. (ur.). New York, John Wiley and Sons: 57–112.

Nero Jr. A.V. 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.). New York, John Wiley and Sons: 1–53.

Otton J.K., Gundersen L.C.S, Schumann R.R. 1993. *The geology of radon*. US Department of the Interior. US Geological Survey.

Pleničar M., Premru U. 1977. Tolmač za list Novo mesto. Osnovna geološka karta 1:100000. Beograd, Zvezni geološki zavod: 98 str.



Pleničar, M., Premru U., Herak, M. 1975: Osnovna geološka karta SFRJ, list Novo mesto 1:100.000. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana.

Premru U. 1982. Geološka zgradba južne Slovenije. *Geologija*, Ljubljana 25 (1): 95–126.

Przylibski T.A. 1999. Radon concentration changes in the air of two caves in Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*, 45: 81–94.

Radon and radon progeny–monitor EQF 3120 / 3020. User manual. 2004. Sarad. Dresden, Sarad: 51 str.

Sajo-Bohus L., Greaves E.D., Palfalvi J., Urbani F., Merlo G. 1997. Radon concentration measurements in Venetuelan caves using SSNTDS, 28(1–6): 725–728.

Somlai J., Kavasi N., Szabo T., Varhegyi A., Kovacs T. 2007. The function of radon in curing respiratory diseases in the therapeutic cave of Topolca. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 273(2): 363–370.

Stritar A., Dimic V., Istenič R. 1997. Radioaktivni odpadki – Z znanjem proti strahu. Ljubljana. Agencija za radioaktivne odpadke: 89 str.

Tsvetkova T., Przylibski T.A., Nevisny I., Nevisny V. 2005. Measurement of radon in the East Europe under the ground. *Radiation Measurement*, 40: 98–105.

User manual Radon Scout. 2003. Sarad. Dresden, Sarad: 8 str.

Vaupotič J., Ančik M., Škofljanec M., Kobal I. 1992. Alpha Scintillation Cell for Direct Measurement of Indoor Radon. *Journal of Environmental Science and Health*, A27(6): 1535–1540.

Valković V. 2000. Radioactivity in the environment. Amsterdam. Elsevier: 681 str.

Vaupotič J., Šikovec M., KOBAL I. 2000. Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools. *Health Physics*, 78: 559-562.

Vaupotič J., Csige I., Radolič V., Hunyadi I., Planinič J., Kobal I. 2001. Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave, Slovenia. *Health Physics*, 80: 142–147.

Vaupotič J. 2008. Nanosize radon short-lived decay products in the air of the Postojna Cave. *Science of the Total Environment*, 393(1): 27–38.

Vaupotič J., Kobal I. 2008. Radioaktivnost in zaščita pred sevanji, poglavje 10: šolsko leto 2007/2008. Nova Gorica: Univerza v Novi Gorici, Univerzitetni študijski program Okolje, 1.el optični disk (CD-ROM).

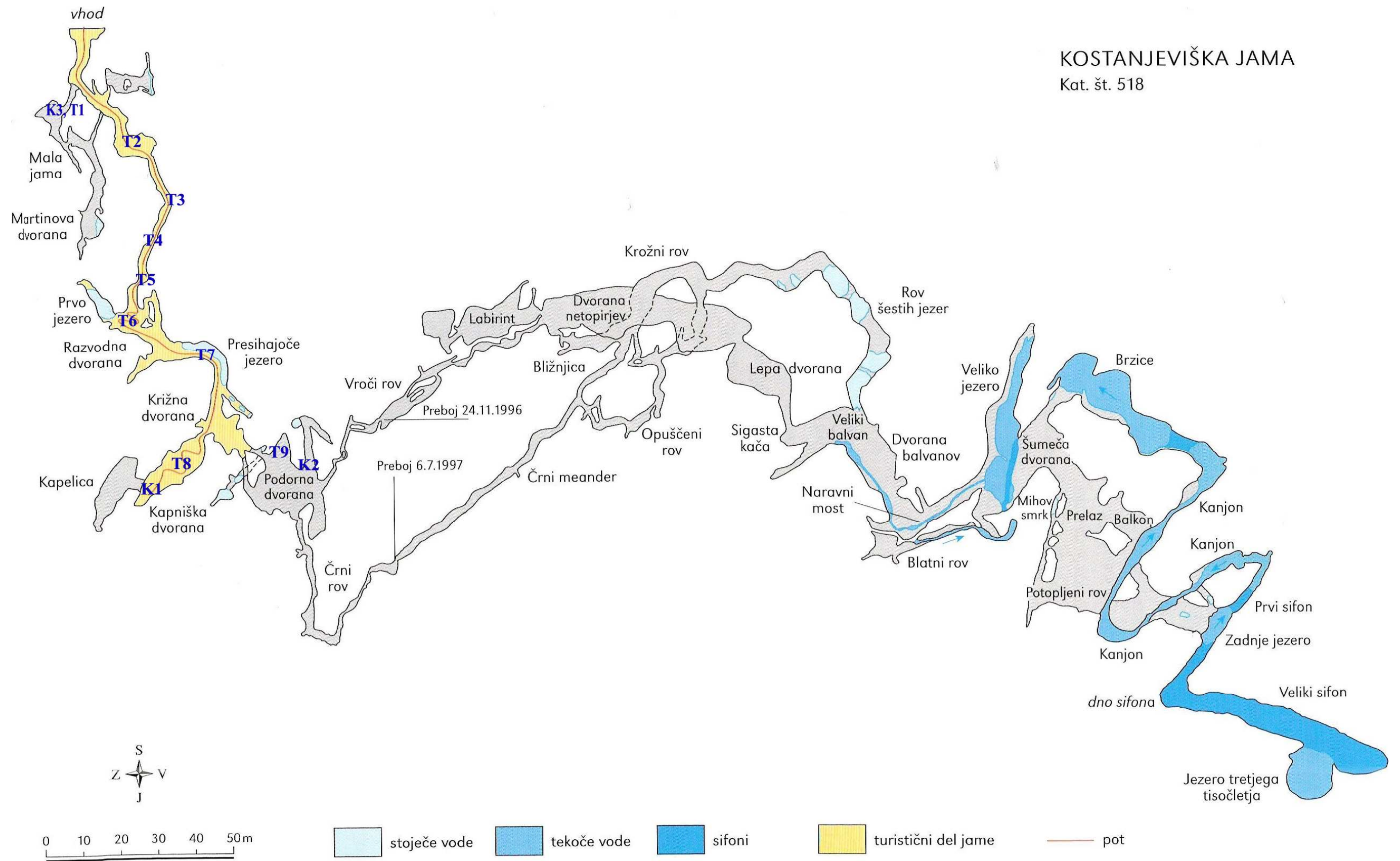


***Priloga A:***

Tloris Kostanjeviške jame



KOSTANJEVIŠKA JAMA  
Kat. št. 518



Tloris Kostanjeviške jame (Gams, 2004) z označenimi vzorčevalnimi (T1 do T9) in merilnimi (K1 do K3) mesti.



## ***Priloga B***

Fotografije vzorčevalnih mest (T1 do T9)







Prvo vzorčevalno mesto (T1)



Drugo vzorčevalno mesto (T2)



Tretje vzorčevalno mesto (T3)



Četrto vzorčevalno mesto (T4)



Peto vzorčevalno mesto (T5)



Šesto vzorčevalno mesto (T6)





Sedmo vzorčevalno mesto (T7)



Osmo vzorčevalno mesto (T8)



Deveto vzorčevalno mesto (T9)