

Stručni članak / Professional paper

UDK: 551.44 (497.5): 539.16: 546.29

MJERENJE KONCENTRACIJE RADIOAKTIVNOG PLINA RADONA U SPELEOLOŠKIM OBJEKTIMA U HRVATSKOJ

PIŠE: dr.sc. Dalibor Paar
Fizički odsjek, PMF, Zagreb
Speleološki odsjek PDS "Velebit"
Zagreb

IZVADAK

Radon je radioaktivni plin koji predstavlja više od 50 % prirodne radioaktivnosti na Zemlji. Mjerenja koncentracije radona mogu dati informacije o izloženosti čovjeka prirodnoj radioaktivnosti, ali omogućuju i praćenje širokog spektra različitih pojava na površini i u unutrašnjosti Zemlje. Od 2004. do 2009. provode se mjerenja koncentracije radona na području Velebita i Žumberka. Dok su u dubokim jamama Velebita izmjerene koncentracije do 3820 Bq/m³, u špiljama Žumberka izmjerene su znatno više vrijednosti. Najveća koncentracija izmjerena je u špilji Dolači u ljetnom razdoblju i iznosi 21 800 Bq/m³. Što se tiče boravka u podzemlju, smatra se da povišene koncentracije iznad 1000 Bq/m³ predstavljaju rizik za istraživače i pristup takvim lokacijama valjalo bi kontrolirati.

Znatne razlike koncentracije između pojedinih speleoloških objekata uvjetovane su njihovim mikroklimatskim parametrima, geomorfološkim i hidrološkim karakteristikama. Zbog izmjerene povišene prirodne radioaktivnosti u nekim špiljama i znatnih razlika koncentracija radona između špilja, nameće se potreba sustavnijeg monitoringa na više lokacija kroz dulje vremensko razdoblje. To se posebno odnosi na turističke i druge špilje u kojima ljudi dulje borave.

KLJUČNE RIJEČI: koncentracija radona, prirodna radioaktivnost, Velebit, Žumberak

KEY WORDS: radon concentration, natural radioactivity, Mt.Velebit, Mt.Žumberak

UVOD

Radon – ²²²Rn je radioaktivni plemeniti plin bez boje i mirisa s vremenom poluživota 3,82 dana. Nastaje kao produkt serije raspada izotopa urana ²³⁸U koji je sastavni dio Zemljine kore. Alfa raspadom radona nastaje serija izotopa od kojih su važniji izotopi polonija ²¹⁸Po, ²¹⁴Po, ²¹⁰Po i olova ²¹⁴Pb, ²¹⁰Pb. Oni su također alfa-radioaktivni, a udisanjem u pluća predstavljaju zdravstveni rizik. Uran se često pomiče s podzemnim vodama i taloži u vapnencima i dolomitima. Procesom emanacije radon se od mjesta nastanka kreće kroz pore u stijenama te ulazi u unutrašnjost špilje. Velika prohodnost radona unutar Zemlje, podzemnih voda i atmosfere čini ga vrlo korisnim sredstvom za praćenje širokog spektra različitih pojava na Zemlji i njezinoj unutrašnjosti (proučavanje naslaga urana, ugljikovodika, gibanje fluida u unutrašnjosti Zemlje). Novija istraživanja povezuju koncentraciju radona sa seizmičkom

aktivnošću, kao mogući parametar za rano predviđanje potresa.

Koncentraciju radona izražavamo u jedinici Bq/m³. Bq (becquerel) je SI jedinica za radioaktivnost, pri čemu je 1 Bq definiran kao aktivnost radioaktivnog materijala u kojem se u jednoj sekundi raspadne jedna jezgra. Prosječne koncentracije u špiljama u kršu u svijetu kreću se prema nekim procjenama od 100 do 20 000 Bq/m³ (Hakl i sur., 1997). Najniže koncentracije zabilježene su u špiljama s velikim dvoranama ili jakom vertikalnom ventilacijom. Visoke koncentracije karakteriziraju zatvorene, slabo ventilirajuće objekte i one s povećanom koncentracijom urana u stijenama i sedimentima. Radon se više koncentrira pri dnu prostora u kojem se nalazi jer je znatno teži od ostalih molekula u zraku. Također je opaženo da su na lokacijama unutar špilja daleko od ulaza, koje imaju slabiju ventilaciju, koncentracije

radona visoke (Przylibski, 1999).

Transportni procesi radona bitno ovise o morfologiji špilja. U slučaju špilje s jednim ulazom promjene atmosferskog tlaka, povezane s izmjenom zraka zbog razlike temperatura, glavni su kontrolni parametri. Ako su ulazi dosta veliki, transport zbog temperaturnih razlika je dominantan. Kod sustava s dva ili više ulaza (gdje neki od ulaza mogu biti i neprolazne pukotine), strujanje zraka zbog efekta dimnjaka ima dominantan utjecaj na transport radona. Općenito iznos migracije radona u krškom sustavu ovisi o brzini transportnog medija (zraka, vode; Hakl i sur., 1997). Ventilacija igra važnu ulogu u procesima akumulacije radona u špiljama, od sezonskog utjecaja na koncentraciju do prostorne distribucije koncentracije unutar špilje. Interpretacija koncentracije radona u podzemlju zahtijeva složeni model koji mora uzeti u obzir geološke, hidrološke, meteorološke, fizikalne, morfološke i druge karakteristike.

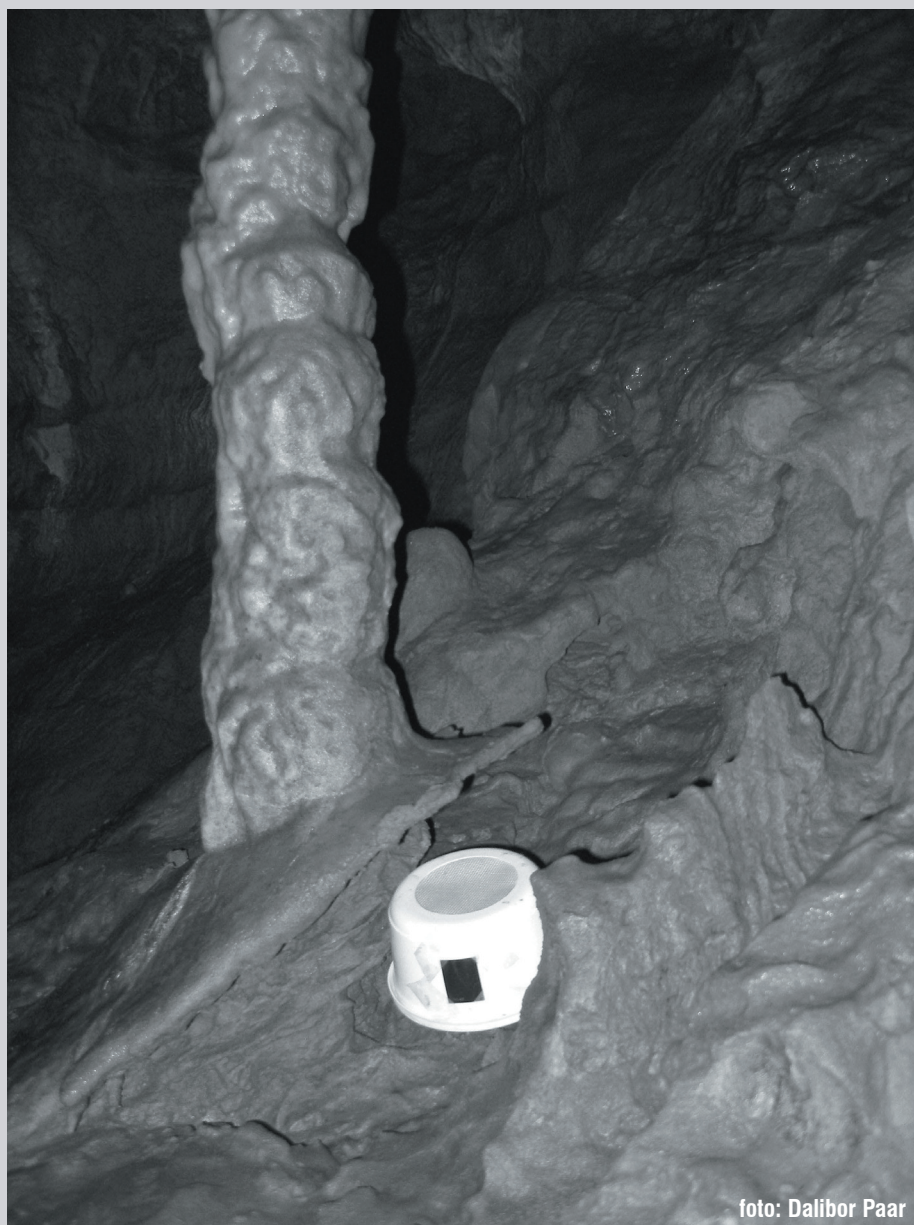


foto: Dalibor Paar

njegovih kratkoživućih potomaka u zraku provedena su detektorima nuklearnih tragova LR-115, tip II (Kodak Pathé, Francuska). U cilindričnu detektorsku posudu, promjera 10,5 cm i visine 7 cm, koja je zatvorena filter-papirom površinske gustoće 0,078 kg/m², postavi se film LR-115 (difuzni film). Na vanjskom obodu posude pričvrsti se drugi LR-115 film (otvoreni film). Koncentracija radona u zraku određuje se kao produkt koeficijenta, gustoće tragova na difuzijskom filmu i broja dana ekspozicije. Metoda mjerenja s dva detektora nuklearnih tragova (otvoreni i difuzijski) omogućuje određivanje ravnotežnog faktora za radon i njegove kratkoživuće potomke (Radolić, 2000).

REZULTATI I DISKUSIJA

Na temelju rezultata mjerenja koncentracije radona obavljenih između 2004. i 2009. godine na Velebitu (Paar i sur., 2008) i Žumberku (Paar i sur., 2005) te rezultata novijih mjerenja može se zaključiti da koncentracija radona nije samo funkcija geografskog položaja špilje ili jame već znatno ovisi o njezinim geomorfološkim, hidrološkim, mikroklimatskim i drugim svojstvima. Daljnja istraživanja i analize su u tijeku. Na slici 2 dan je aktualni pregled maksimalnih vrijednosti koncentracije koje pokazuju znatnu razliku između Žumberka i Velebita. Najveća koncentracija radona izmjerena je u špilji Dolači na Žumberku u ljetnom razdoblju i iznosi 21 800 Bq/m³.

Potencijalno važan izvor radona može biti voda. Radon je od plemenitih plinova najtopiviji u vodi i može se transportirati na veće udaljenosti od mjesta gdje je nastao. Faktori koji kontroliraju razinu radona u vodi su mineralizacija urana i vrijeme u kojem je voda u kontaktu s vapnencem (Gillmore i sur., 2000). Turbulencije vode kakve su opažene u donjoj etaži špilje Provale na Žumberku mogu dovesti do oslobađanja radona iz vode u iznosima ovisnim o koncentraciji radona u vodi, i time dovesti do povećanja koncentracije radona u zraku. Upravo je to i izmjereno te su maksimalne vrijednosti koncentracije na toj etaži 12 440 Bq/m³.

Godišnja promjena koncentracije radona temelji se na dva procesa (Hakl i sur., 1997). Temperaturni gradijenti uzrokuju vertikalni kolektivni transport radona kroz ulaze u špilju. Moguća su i kretanja kroz pukotine zbog gradijenta tlaka. To je dosta očekivano za gornje slojeve u kršu. Spuštajući se dublje, koncentracija radona je stabilnija, kako se kretanje zraka

Što se tiče utjecaja na čovjeka, radon je plemeniti plin i zato je gotovo u potpunosti izbačen nakon inhalacije. Međutim, produkti raspada radona vrlo su reaktivni te se mogu zalijepiti na čestice aerosola koje čovjek udiše, a zbog njihova kratkog vremena poluzivota (manje od 30 minuta) one se raspadaju u plućima oštećujući tkivo (Gillmore i sur., 2002) Radon čini više od 50 % radioaktivnosti koju čovjek na godinu primi. U mnogim su europskim zemljama preporučene razine koncentracije radona 200 Bq/m³ za novogradnju, a 400 Bq/m³ za stare zgrade. Granična koncentracija radona na radnome mjestu je 1000 Bq/m³ (na temelju te koncentracije se i radi gornji prag izračuna doze na radnome mjestu u dozimetrijskim modelima). Što se tiče boravka u podzemlju, smatra se da povišene koncentracije iznad 1000 Bq/m³ predstavljaju rizik za istraživače i pristup takvim lokacijama valjalo bi kontrolirati (Sperrin i sur., 2000).

U Hrvatskoj do početka naših istraživanja 2004. godine nisu rađena sustavna mjerenja koncentracije radona u speleološkim objektima. Novija istraživanja u zatvorenim prostorima (kućama) u Hrvatskoj dala su prosječne vrijednosti koncentracije radona po županijama od 30 do 200 Bq/m³ (Radolić i sur., 2006).

Rezultati mjerenja u Sloveniji upućuju na visoke koncentracije u pojedinim špiljama (Vaupotič i sur., 2004). Stoga smo 2004. godine započeli s istraživanjima koncentracije radona u speleološkim objektima u suradnji Fizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu, Odjela za fiziku Sveučilišta u Osijeku, Speleološkog odsjeka PDS Velebit i Speleološkog kluba Samobor. Suradnici u istraživanjima su dr. sc. Vanja Radolić, dr. sc. Nenad Buzjak, dr. sc. Darko Bakšić te članovi navedenih speleoloških udruga.

METODA MJERENJA

Integralna mjerenja koncentracije radona i

smanjuje. Radon u dubokim kompleksnim špiljama ne može se jednostavno povezati s vanjskim atmosferskim parametrima. Na vrijednosti koncentracije radona u špiljama utječu gibanja fluida (zraka i vode) zbog promjena parametara okoline (temperature, tlaka, vlage, itd.) te vrsta stijena i njihovo zasićenje radonom. Za razumijevanje valja pratiti dinamiku tih fluida kroz dulje vremensko razdoblje. Mjerenja u svijetu pokazala su da postoji sezonska varijacija koncentracije radona u krškim područjima, većinom takva da su koncentracije zimi minimalne, a ljeti maksimalne. To je posljedica gibanja zraka zbog razlike gustoće zraka u špilji i na površini, do koje dolazi zbog promjene vanjske temperature (temperatura u špilji može se smatrati konstantnom). Maksimalne koncentracije radona javljaju su kada su razlike temperatura vani i unutra minimalne. Mjerenja u špiljama na Žumberku koja su izvođena posebno u zimskom, a posebno u ljetnom razdoblju u skladu su s tim pojavama.

ZAKLJUČAK

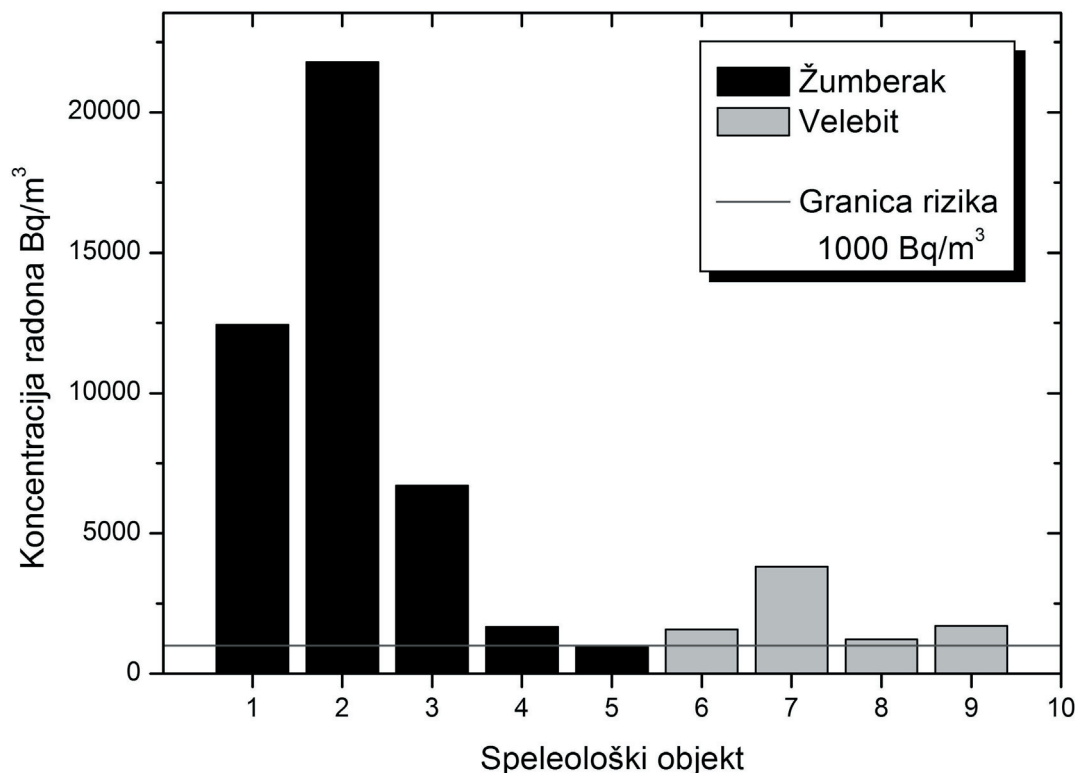
Mjerenja koncentracije radioaktivnog plina u speleološkim objektima na Velebitu i na

Žumberku pokazala su da postoje velike razlike u vrijednostima koncentracije između ta dva područja, a u nekim slučajevima i u samim objektima.

Špilje se obično smatraju statičnim sustavima u kojima su parametri poput temperature i relativne vlažnosti zraka poprilično stabilni. No s druge strane, postoji niz parametara koji se mogu znatno mijenjati zbog izmjena zraka unutar špilje i okoline te dinamike podzemnih voda. Koncentracija radona u zraku jedan je od tih parametara koji ima znatnu dinamiku kao odgovor na meteorološke, klimatske, geološke, pedološke i druge faktore. Zbog toga dolazi do promjena koncentracije radona na skali minuta, sati, dana ili godišnjih doba. Sezonske razlike koncentracija radona posljedica su kretanja zraka zbog razlike gustoće zraka u špilji i izvan nje do kojih dolazi zbog promjene vanjske temperature (dok temperaturu u špilji možemo smatrati približno konstantnom), zatim promjene vanjskih uvjeta poput atmosferskog tlaka, vjetra, vlažnosti i padalina. U hladnom razdoblju radonom bogat zrak lakši je od

vanjskog zraka te se diže u špilji i struji kroz izlaz špilje. Koncentracija radona najveća je kada su najmanja kretanja zraka u špilji.

Izmjerene visoke koncentracije radona koje znatno premašuju graničnu dozvoljenu vrijednost 1000 Bq/m³ i velike razlike koncentracija između pojedinih speleoloških objekata upućuju na potrebu sustavnog praćenja koncentracije radona u hrvatskim špiljama, na većem broju lokacija i kroz dulja vremenska razdoblja. Mjerenja svakako valja obaviti u turističkim špiljama gdje su riziku posebno izloženi vodiči te u onima u kojima speleolozi dulje borave zbog istraživanja. U speleološkim objektima u kojima su zabilježene povećane koncentracije radona valja kontrolirati vrijeme boravka u njima, a ako se radi o speleološkim istraživanjima, planirati ih u zimskom razdoblju kada su koncentracije radona niže.



Slika 2: Maksimalne izmjerene vrijednosti u speleološkim objektima na području Žumberka (1-Provala, 2-Dolača, 3-Bedara, 4-Rogovac, 5-Pogana jama) i Velebita (6-Jamski sustav Velebita, 7-Lubuška jama, 8-Kita Gačešina, 9-Munižaba). Mjerenja su izvođena u različitim razdobljima između 2004. i 2009. godine.

LITERATURA:

Gillmore, G.K., Sperrin, M., Phillips, P., Denman, A., 2000.: Radon hazards, geology, and exposure to cave users, *Ecotox. and Environ. Safety* 46, 279-288.

Gillmore, G.K., Phillips, P.S., Danman, A.R., Gilbertson, D.D., 2002.: Radon in Creswell Crags Permian limestone caves, *J. Env. Rad.* 62, 165-179.

Hakl, J., Hunyadi, I., Csige, I. i sur., 1997.: Radon transport phenomena studied in karst caves, *Rad.Meas.* 28 (1-6) 675-684.

Paar, D., Ujević, M., Bakšić, D., Lacković, D., Čop, A., Radolić, V., 2008.: Physical and Chemical Research in Velebita pit (Croatia), *Acta Carsologica* 37/2-3, 273-278.

Paar, D., Radolić, V., Buzjak, N., 2005.: Mjerenja koncentracije radioaktivnog plina radona u špiljama Žumberka. Znanstveno-stručni skup istraživača krša Žumberačke gore, 20, Bregana.

Przylibski, T.A., 1999.: Radon concentration changes in the air of two caves in Poland. *J. Env. Rad.* 45, 81-94.

Radolić, V., 2000.: Mjerenje radona i radonovih potomaka u zraku pri različitim koncentracijama aerosola, Magistarski rad, Fizički odsjek, PMF, Zagreb.

Radolić, V., Vuković, B., Stanić, D., Katić, M. i dr., 2006.: National survey of indoor radon levels in Croatia, poslano u *J. Env. Rad.*

Sperrin, M., Denman, T., Phillips P.S., 2000.: Estimating the dose from radon to recreational cave users in the Mendips, UK, *J. Environ. Rad.* 49, 235-240.

Vaupotič, J., Kopal, I., 2004.: Unattached fraction of radon decay products as a crucial parameter for radon dosimetry in Postojna cave, *Acta Carsologica* 33/1 (6), 85-100.

Vaupotič, J., Kopal, I., 2004.: Radon doses based on alpha spectrometry, *Acta Chim. Slov.* 51, 159-168.

SUMMARY**MEASURING RADON CONCENTRATION IN CROATIAN SPELEOLOGICAL OBJECTS**

Radon, a radioactive gas, is a source of more than 50% of natural radioactivity. Measuring radon concentration can give us more information about natural radioactivity risk, and about various processes on and under the Earth's surface. Since 2004 we have been measuring radon concentration on Mt. Velebit and Mt. Žumberak. Concentrations of up to 3820 Bq/m³ were measured in deep pits of Velebit, while much higher values were measured in Žumberak. The highest concentration was measured in Dolača cave in summer, that is 21800 Bq/m³. Concentrations above 1000 Bq/m³ present health risk for explorers, and access to these locations must be controlled.

Various microclimatic, geological, hydrological and other characteristics cause the differences in concentrations. Due to high natural radioactivity and notable differences in concentrations, continuous monitoring is required. That is of big importance especially for show caves and caves visited by speleologists.