

Mjerenje radona u okolišu

Valić, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Medicine / Sveučilište u Rijeci, Medicinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:184:323935>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Medicine - FMRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

MEDICINSKI FAKULTET

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ SANITARNOG INŽENJERSTVA

Petra Valić

MJERENJE RADONA U OKOLIŠU

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
MEDICINSKI FAKULTET
DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ SANITARNOG INŽENJERSTVA

Petra Valić

MJERENJE RADONA U OKOLIŠU

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

Mentor rada: prof. dr. sc. Gordana Žauhar

Diplomski rad obranjen je dana 28.09.2023. na Medicinskom fakultetu,
Sveučilište u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Izv. prof. dr. sc. Gordana Čanadi Jurešić, dipl. ing.
2. Izv. prof. dr. sc. Jadranka Vraneković, prof. biol. i kem.
3. Prof. dr. sc. Gordana Žauhar, prof. fiz. i kem.

Rad sadrži 63 stranica, 29 slika, 9 tablica, 59
literaturnih navoda.

Zahvala

Prije svega, željela bi zahvaliti svojoj mentorici Prof. dr. sc. Gordani Žauhar na strpljenju, utrošenom vremenu, te što mi je svojim znanjem i brojnim savjetima pomogla tijekom pisanja ovog diplomskog rada.

Nadalje htjela bih se zahvaliti Nini Trinajstić, asistentici s Hrvatskog geološkog instituta u Zagrebu i članici Speleološkog kluba Ozren Lukić u Rijeci na podacima i pomaganju oko njih. Veliku zahvalu želim uputiti Fakultetu za fiziku u Rijeci koji mi je ustupio uređaj AlphaE na korištenje. Također se želim zahvaliti i zaposlenicima NATURA 2000 u Rijeci što su mi omogućili ulaz u špilje i pomogli mi prilikom postavljanja uređaja. Želim se zahvaliti i višoj tehničarki Marijani Majetić na pomoći oko obrade podataka.

Veliko hvala i mojoj obitelji, prijateljima i kolegama koji su mi uvijek bili podrška.

Sažetak

Plemeniti plin radon jedan je od najvećih uzročnika prirodnog zračenja na Zemlji. Stoga je mjerenje koncentracije radona u okolišu važno kako za znanost tako i za identifikaciju područja s povišenim koncentracijama radona što je ključan korak u sprečavanju štetnih učinaka radona na ljude. U ovome radu mjerena je koncentracija radona u tri špilje, u Šparožnoj pećini na Kastvu, Grgosovoj špilji na Žumberku te u špilji Biserujka na Krku. Mjerenja su provedena pomoću uređaja AlphaE koji omogućuje mjerenje radona u realnom vremenu. Cilj ovoga rada bio je izmjeriti koncentracije radona u navedenim špiljama, zatim usporediti koncentracije oslobođenog radona u različitim špiljama te procijeniti koliko iznosi efektivna doza koju prime turistički vodiči i posjetitelji špilja. U Šparožnoj pećini mjerenje koncentracije radona provedeno je periodu dužem od godinu dana, odnosno od 2.12.2021. do 29.01.2023. U Grgosovoj špilji mjerenja su se provodila u mjesecu ožujku 2023., dok je u špilji Biserujka uređaj bio postavljen kroz tri mjeseca, odnosno u lipnju, srpnju i kolovozu 2023. godine. Mjerenja su pokazala da su najveće koncentracije radona izmjerene u Šparožnoj pećini u ljeto 2022. i iznosile su $(15,5 \pm 2,8)$ kBq/m³. Koncentracije radona u Grgosovoj špilji u mjesecu ožujku 2023. iznosile su $(3,8 \pm 0,4)$ kBq/m³, dok su u špilji Biserujka tijekom ljeta izmjerene vrijednosti koje su iznosile $(6,4 \pm 1,5)$ kBq/m³.

Izračunato je da u polusatnom razgledavanju posjetitelji špilje Biserujka prime efektivnu dozu od približno 10,1 μSv, dok godišnja doza turističkog vodiča iznosi približno 8,03 mSv, što je ispod maksimalno dopuštenih vrijednosti. Mjerenja koncentracije radona potrebno je provoditi kako bi se pomoću ograničavanja maksimalnog vremena boravka u špilji smanjila mogućnost štetnog utjecaja radona na pojedince.

Ključne riječi: radon, zračenje, efektivna doza, Šparožna pećina, Grgosova špilja, špilja Biserujka

Summary

The noble gas radon is one of the greatest causes of natural radiation on earth. Therefore, measuring radon concentration in the environment is important both for science and for identifying areas with elevated radon concentrations, which is an important step in preventing the harmful effects of radon on humans. In this work, radon concentration was measured in three caves: Sparožna cave on Kastav, Grgosova cave on Žumberak and Biserujka cave on Krk. The measurements were carried out with the AlphaE device, which allows radon measurements in real time. The aim of this work was to measure the radon concentrations in the mentioned caves, then compare the concentrations of released radon in different caves and estimate the effective dose received by tourist guides and cave visitors.

In Sparožna Pećina, the radon concentration was measured over a period of more than one year, from 2 December 2021 to 29 January 2023. In Grgosova Cave, the measurements were carried out in March 2023, while in Biserujka Cave the device was installed over three months, i.e. in June, July and August 2023. The measurements showed that the highest radon concentrations were measured in Sparožna cave in summer 2022 and were (15.5 ± 2.8) kBq/m³. The radon concentration in Grgosova Cave was (3.8 ± 0.4) kBq/m³, and in Biserujka Cave values of (6.4 ± 1.5) kBq/m³ were measured. During a half-hour guided tour, visitors to Biserujka Cave receive a effective dose of about 10.1 μSv, while the annual dose of tour guide is about 8.03 mSv, which is significantly lower than the recommended maximum levels. Measurements of radon concentration should be carried out to reduce the possibility of harmful effects of radon on individuals by limiting the maximum time spent in the cave.

Key words: radon, radiation, effective dose, Sparožna cave, Grgosova cave, Biserujka cave

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Radioaktivnost	1
1.1.1. Alfa raspad	2
1.1.2. Beta raspad	2
1.1.3. Gama zrake.....	3
1.2. Radioaktivnost u okolišu.....	5
1.3. Radioaktivnost u zatvorenim prostorima	7
1.4. Radioaktivnost kojoj je pojedinac izložen.....	8
1.5. Zaštita od zračenja.....	9
1.6. Prirodni radioaktivni nizovi	10
1.6.1. Uranijev niz.....	10
1.7. Utjecaj radona na zdravlje.....	11
1.8. Mjerenje radona u otvorenim i zatvorenim prostorima.....	12
1.9. Propisi o dopuštenim koncentracijama radona u kućama i radnom okruženju.....	13
1.10. Zakonska regulativa u Hrvatskoj o dozvoljenim koncentracijama radona.....	15
1.11. Mjerenje radona u Republici Hrvatskoj.....	15
1.12. Pregled istraživanja radona u špiljama	18
2. Ciljevi rada	19
3. Eksperimentalni dio.....	20
3.1. Metode i materijali	20
3.2. Lokacije mjerenja.....	22
3.2.1. Šparožna pećina	22
3.2.2. Grgosova špilja	24
3.2.3. Špilja Biserujka.....	25
4. Rezultati	27
4.1. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini	27

4.1.1.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini od rujna 2022. do siječnja 2023.....	29
4.1.2.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u rujnu 2022.....	30
4.1.3.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u listopadu 2022.	31
4.1.4.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u studenom 2022.	32
4.1.5.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u prosincu 2022. .	33
4.1.6.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u siječnju 2023....	34
4.2.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u Grgosovoj špilji	35
4.3.	Rezultati mjerenja koncentracije radona u špilji Biserujka	38
4.4.	Kretanje koncentracije radona tijekom dana	46
4.5.	Usporedba koncentracija radona u Šparožnoj i Grgosovoj špilji	47
4.6.	Usporedba koncentracije radona u špilji Biserujka i Šparožnoj pećini	49
4.7.	Procjena efektivne doze koju prime posjetitelji i turistički vodiči u špiljama.....	50
5.	Rasprava	52
6.	Zaključci.....	56

1. Uvod

Plemenit plin, radon, jedan je od najrjeđih kemijskih elemenata na Zemlji, ali je ujedno i najveći izvor prirodnog radioaktivnog zračenja na Zemlji, jer predstavlja više od 50% prirodne radioaktivnosti, te najviše pridonosi ukupnoj dozi zračenja koju prima ljudska populacija. Označava se kemijskim simbolom Rn, te posjeduje atomski broj 86. Poznata su tri prirodna izotopa radona i to su: aktinon ^{219}Rn , toron ^{220}Rn i radon ^{222}Rn . Međutim, u studijama o okolišu, ^{220}Rn i ^{219}Rn se obično zanemaruju zbog njihovog ekstremno kratkog vremena poluraspada, a samo se radon uzima u obzir zbog njegovog vremena poluraspada od 3,8235 dana. Radon je kemijski inertan, radioaktivni plin bez okusa, mirisa i boje, koji nastaje iz radija, kao međuprodukt lanca raspada uranija ^{238}U , koji se pronalazi u svim tlima i stijinama u Zemljinoj kori. Nastajući u tlu, radon se vrlo brzo oslobađa u atmosferu, gdje se njegova koncentracija ubrzo razrjeđuje i time se smanjuje njegova štetnost. Radon ima kratko vrijeme poluraspada, što znači da se brzo raspada i nastaju njegovi radioaktivni produkti. Kao posljedica udisanja zraka u kojem postoji velika koncentracija radona, mogu u tijelu nastati potomci radona koji se mogu taložiti na stanicama koje oblažu dišne putove gdje proizvedene alfa čestice mogu oštetiti DNK i potencijalno uzrokovati rak pluća (1). Iako radon na otvorenim prostorima ne predstavlja bitnu opasnost, kada dođe do oslobađanja u zatvorenim prostorima, kao što su špilje, rudnici, jame, te također podrumi, ali i ostali dijelovi kuća i stanova koji nisu dobro izgrađeni ili je ventilacija nedovoljna, dolazi do njegovog nakupljanja i tada on predstavlja ozbiljan problem za ljudsko zdravlje. Također štetne koncentracije radona mogu se pronaći u pojedinim izvorskim vodama i u postrojenjima koja služe za pročišćavanje voda (2).

1.1. Radioaktivnost

Radioaktivnost opisujemo kao svojstvo koje pokazuju određene vrste tvari da spontano emitiraju energiju i subatomske čestice. Pojam radioaktivnosti prva je predložila Marie Curie, te mu dala ime prema radiju, novootkrivenom kemijskom elementu, čije je radioaktivno zračenje bilo milion puta veće nego zračenje tada poznatog uranija (3). U radioaktivnom raspadu najčešće se emitiraju alfa i beta čestice, koje su često praćene i emitiranjem gama elektromagnetskih valova. Tim procesom dolazi do promjene svojstva tvari, odnosno prelaska jednog kemijskog elementa u drugi uz oslobađanje kinetičke energije čestica koje su emitirane ili energije elektromagnetskih valova (3). Nestabilna jezgra će se spontano razgraditi, ili raspasti, u stabilniju konfiguraciju, ali će to učiniti samo na nekoliko specifičnih načina,

emitiranjem određenih čestica ili određenih oblika elektromagnetske energije. Radioaktivni raspad svojstvo je nekih elemenata koji se pojavljuju u prirodi, ali i umjetno proizvedenih izotopa. Brzina kojom se radioaktivni element raspada izražava se preko njegovog poluživota, odnosno vremena poluraspada, a to je vrijeme potrebno da se polovica početne količine radioaktivnog izotopa raspadne. Vrijeme poluraspada karakterizira određenu vrstu atomske jezgre i može iznositi od 10^{-8} s (za ^{216}Ra) do 10^{24} godina (za ^{128}Te). Produkt radioaktivnog raspada, može i sam biti nestabilan, te se u tom slučaju i on dalje raspada. Ovaj proces se nastavlja sve dok se ne formira stabilni nuklid. Prirodna radioaktivnost potječe od približno 60 prirodnih radionuklida koji se nalaze u tlu, zraku i vodi.

Do radioaktivnoga raspada dolazi zbog nestabilnosti atomske jezgre. Neke su atomske jezgre prirodno nestabilne, a neke to mogu postati kad na njih djeluju čestice visoke energije. Radioaktivni raspad je pretvorba jedne atomske jezgre u drugu uz emitiranje ili α -čestica ili β -čestica ili γ -zračenja (4).

1.1.1. Alfa raspad

Alfa čestica je zapravo jezgra atoma helija, ^4_2He , s dva pozitivna naboja, te se prilikom alfa raspada maseni broj elementa, zbog otpuštanja jezgre helija, smanjuje za 4, a atomski za 2. Jednadžba (1.1) prikazuje alfa raspad uranija, gdje je alfa čestica prikazana kao jezgra atoma helija (5).



Prodornost alfa čestica u tvari je mala jer na putu kroz tvar stvaraju puno iona koji nastaju kao posljedica sudara alfa čestica sa atomima tvari kroz koju prolaze. Alfa zračenje ima najkraći domet koji u zraku iznosi od 2 cm do 8 cm, a već je debljina papira dovoljna za njegovo zaustavljanje, što je prikazano na slici 1. Alfa-čestice mogu se otklanjati u električnom i magnetskom polju zbog pozitivnog naboja (4).

1.1.2. Beta raspad

Beta čestice mogu biti negativno nabijene (beta minus, simbol β^-) ili pozitivno nabijene (beta plus, simbol β^+). Beta minus (β^-) čestica zapravo je elektron stvoren u jezgri tijekom beta raspada bez ikakve veze s elektronima u elektronskom omotaču atoma (5).

U tipičnom β^- raspadu, kao što je raspad prikazan jednadžbom (1.2), možemo zamisliti da se jedan neutron iz jezgre atoma spontano pretvara u proton i elektron. Novonastali proton ostaje u jezgri, dok se elektron emitira kao β^- čestica. Zbog dodatnog protona, atomski broj jezgre

poveća se za jedan, dok maseni broj ostaje nepromijenjen. Pri β^- raspadu se emitira i čestica bez mase i naboja antineutrino ($\bar{\nu}$) (5).

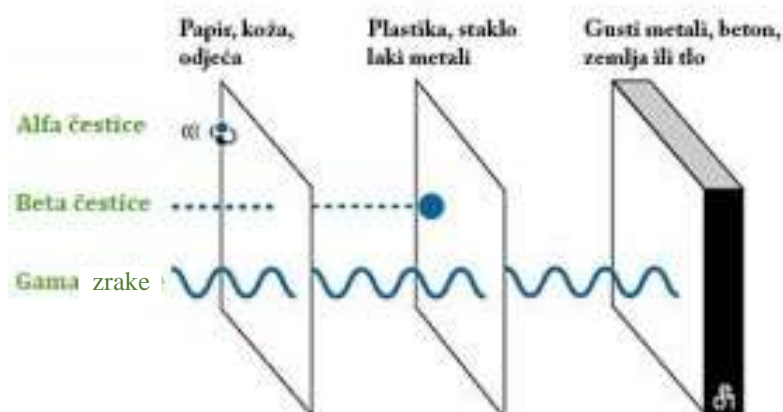


Beta plus raspad događa se obično kod umjetno proizvedenih radioaktivnih jezgara. Prilikom beta plus raspada atomski broj jezgre se smanjuje za jedan zbog pretvorbe protona u neutron, a iz jezgre se emitiraju pozitron i neutrino.

Beta zračenje dostiže domet do 10 m u zraku, a može ga zaustaviti aluminijski lim, plastika, staklo debelo nekoliko milimetara, što se također može vidjeti iz slike 1. Beta-minus čestice se u magnetskom polju ponašaju kao negativne čestice (4).

1.1.3. Gama zrake

Gama zrake su elektromagnetski valovi velike frekvencije, a time i energije. Neki radioaktivni raspad koji rezultiraju emisijom α ili β čestica često puta ostavljaju jezgru u pobuđenom stanju. Jezgra se zatim relaksira te otpušta višak energije u obliku elektromagnetskog zračenja koje nazivamo gama zračenjem. Gama (γ) zrake su jako prodoran oblik zračenja koje ne mijenja smjer pod utjecajem električnog i magnetskog polja. Od svih vrsta zračenja, gama zračenje je najprodornije, dometa do 100 m u zraku, te ga može zaustaviti tek gusti beton, olovo, zemlja ili tlo kao što je prikazano na slici 1 (4).



Slika 1. Prodornost različitih vrsta radioaktivnog zračenja Slika je preuzeta iz (6).

Ionizirajuće zračenje, kao što samo ime kaže, u međudjelovanju s tvari stvara ione. To znači da ionizirajuće zračenje ima dovoljnu energiju za kidanje kemijskih veza pa može štetno djelovati na čovjeka.

Mjerna jedinica koja se koristi za izražavanje radioaktivnosti ili aktivnosti izvora zračenja je bekerel (Bq) dok se za izražavanje primljenih doza zračenja kao jedinice koriste grej (Gy) i sivert (Sv).

Bekerel (Bq) je izvedena mjerna jedinica u međunarodnom sustavu jedinica. Njome se izražava aktivnost radioaktivnog izvora, odnosno broj raspada u jednoj sekundi. Aktivnost radioaktivnog uzorka od jednog bekerela odgovara raspadu jedne atomske jezgre u sekundi, stoga možemo reći da je Bq poseban naziv za recipročnu sekundu (7).

Grej (Gy) je jedinica apsorbirane doze, odnosno određuje kolika je količina energije ionizirajućeg zračenja apsorbirana po jedinici mase neke tvari, pa sukladno tome možemo napisati da je $Gy = J/kg$ (8).

Sivert (Sv) je jedinica ekvivalentne doze. Ekvivalentna doza je dozimetrijska veličina koja uzima u obzir učinak određenog ionizirajućeg zračenja na tkivo. Izračunava se kao umnožak apsorbirane doze i određenog težinskog faktora koji ovisi o vrsti i energiji zračenja. Kao primjer možemo navesti kako iste apsorbirane doze različitih vrsta zračenja mogu nanijeti različita oštećenja u tijelu.

Različite vrste tkiva i pojedini organi nisu jednako osjetljivi na izlaganje ionizirajućem zračenju. Naročito su na djelovanje zračenja osjetljive spolne žlijezde (gonade), koštana srž i sve nediferencirane stanice. Težinski koeficijenti tkiva, mjera su različite osjetljivosti pojedinih organa ili tkiva na zračenje, a neke od vrijednosti težinskih koeficijenata tkiva prikazane su u Tablici 1. Zbog toga je uvedena još jedna fizička veličina u dozimetriji ionizirajućeg zračenja, a to je efektivna doza E . Jedinica joj je također sivert (Sv). Efektivna doza jednaka je zbroju umnoška ekvivalentne doze u tkivu i odgovarajućeg težinskog koeficijenta tkiva.

Tablica 1. Prikaz težinskih koeficijenata različitih dijelova tijela u čovjeka (9) koji se koriste pri izračunu efektivne doze koju prima osoba.

Tkivo ili organ	Težinski koeficijenti tkiva W_T
Gonade	0,20
Koštana srž (crvena)	0,12
Debelo crijevo	0,12
Pluća	0,12
Želudac	0,12
Mjehur	0,05
Grudi	0,05
Jetra	0,05
Jednjak	0,05
Štitna žlijezda	0,05
Površina kosti	0,01
Koža	0,01
Ostatak	0,05

1.2. Radioaktivnost u okolišu

Zračenje u našem okolišu dolazi iz raznih prirodnih i umjetnih izvora. Često se zračenje iz okoliša naziva "pozadinsko zračenje". Godišnja doza zračenja iz okoliša koju će primiti pojedinac varirati će od osobe do osobe ovisno o aktivnostima kojima se bavi i lokaciji na kojoj boravi. Prirodno zračenje možemo podijeliti u tri oblika, koja se javljaju na Zemlji, te kojima su ljudi izloženi, a to su prema (10):

1. Kozmičko zračenje

Kozmičko zračenje je zračenje koje na Zemlju stiže velikom brzinom iz svemira u svim smjerovima. Najveći izvor kozmičkog zračenja koje dopire do Zemlje šalju Sunce i zvijezde te je to primarno kozmičko zračenje. Sekundarno zračenje nastaje prilikom sudara čestica primarnog zračenja s česticama koje se nalaze u Zemljinoj atmosferi. Razlike u visini, atmosferskim uvjetima i Zemljinom magnetskom polju uvelike utječu na zračenje koje se emitira (10).

2. Zemaljsko zračenje

Izvor Zemaljskog zračenja je Zemlja. Pojedini radioaktivni elementi kao što su uranij, torij i radij, prirodno postoje u tlu i stijenama, te emitiraju ionizirajuće zračenje prilikom radioaktivnih raspada. Najveći dio doze koju ljudi primaju svake godine iz prirodnih izvora dolazi kao posljedica udisanja zraka, u kojem se nalazi i radioaktivni plin radon. Osim zrakom, radioaktivnosti smo izloženi i putem vode koja sadrži male količine otopljenog uranija i torija, a sva organska tvar (biljna i životinjska) sadrži radioaktivni ugljik i kalij. Neki od tih elemenata se unose hranom i vodom, dok se drugi (kao što je radon) udišu. Doza zračenja iz zemaljskih izvora varira u različitim dijelovima svijeta. Lokacije s višim koncentracijama uranija i torija u tlu općenito imaju veće doze zračenja. Plin radon doprinosi gotovo dvije trećine naše prirodne pozadinske izloženosti zračenju (10).

3. Unutarnje zračenje

Od rođenja u ljudskim tijelima postoji unutarnje zračenje koje potječe od radioaktivnog kalija ^{40}K i ugljika ^{14}C koji se nalaze u našim tijelima. Varijacije u razlici doza zračenja između pojedinaca nisu velike kao one koje su povezane s kozmičkim i zemaljskim izvorima zračenja (10).

4. Ostalo zračenje

U svim prehrambenim namirnicama sadržani su prirodni radionuklidi. Osim toga, nuklearna katastrofa u Černobilu i pokusi nuklearnog oružja u atmosferi doveli su do stvaranja umjetnih radionuklida koji su zbog toga postali prisutni u hrani. Prirodna radioaktivnost u hrani koja pridonosi izloženosti čovjeka zračenju uglavnom je uzrokovana izotopom kalija (^{40}K) i dugoživućim radionuklidima lanca raspada uranij-radij i lanca raspada torija. Među umjetnim radionuklidima u hrani, posebno je bitan cezij (^{137}Cs) (12).

Osim prirodnih izvora zračenja, izloženi smo i onima koje su ljudi stvorili, odnosno umjetnim. U nastavku su navedeni neki umjetni izvori zračenja: medicinski izvori (koji predstavljaju daleko najznačajniji umjetni izvor), vožnja avionom, zatim pojedini građevinski i cestograđevni materijali, zapaljiva goriva, uključujući plin i ugljen, televizije, detektori dima koji u sebi sadrže americij, svjetleći satovi s tricijem, duhan (polonij ^{210}Po) i brojni drugi (10).

U manjoj mjeri, javnost je također izložena zračenju iz ciklusa nuklearnog goriva, počevši od rudarenja i mljevenja uranija preko odlaganja iskorištenog goriva. Osim toga, javnost je

minimalno izložena transportu radioaktivnih materijala i zračenju uslijed testiranja nuklearnog oružja i reaktorskih nesreća (kao što je Černobil) (11).

1.3. Radioaktivnost u zatvorenim prostorima

Radioaktivnost u zatvorenim prostorima odnosi se na prisutnost radioaktivnih materijala ili izvora zračenja unutar zatvorenih prostora. To može predstavljati potencijalne zdravstvene rizike za pojedince koji su izloženi povišenim razinama zračenja tijekom duljeg razdoblja. Radioaktivni materijali emitiraju ionizirajuće zračenje, koje može prodrijeti u živa tkiva i među djelovati s njima, što dovodi do oštećenja stanica i potencijalno dugoročnih učinaka na zdravlje čovjeka (10).

Postoje različiti potencijalni izvori radioaktivnosti u zatvorenim prostorima te oni uključuju:

1. Industrijska okruženja

Određene industrije, kao što su nuklearne elektrane, istraživačke ustanove ili medicinske ustanove koje koriste radioaktivne materijale, mogu imati kontrolirana područja u kojima su prisutni izvori zračenja. U takvom okruženju provode se strogi sigurnosni protokoli i sustavi nadzora kako bi se osigurala zaštita radnika i okoliša.

2. Kontaminirani okoliši

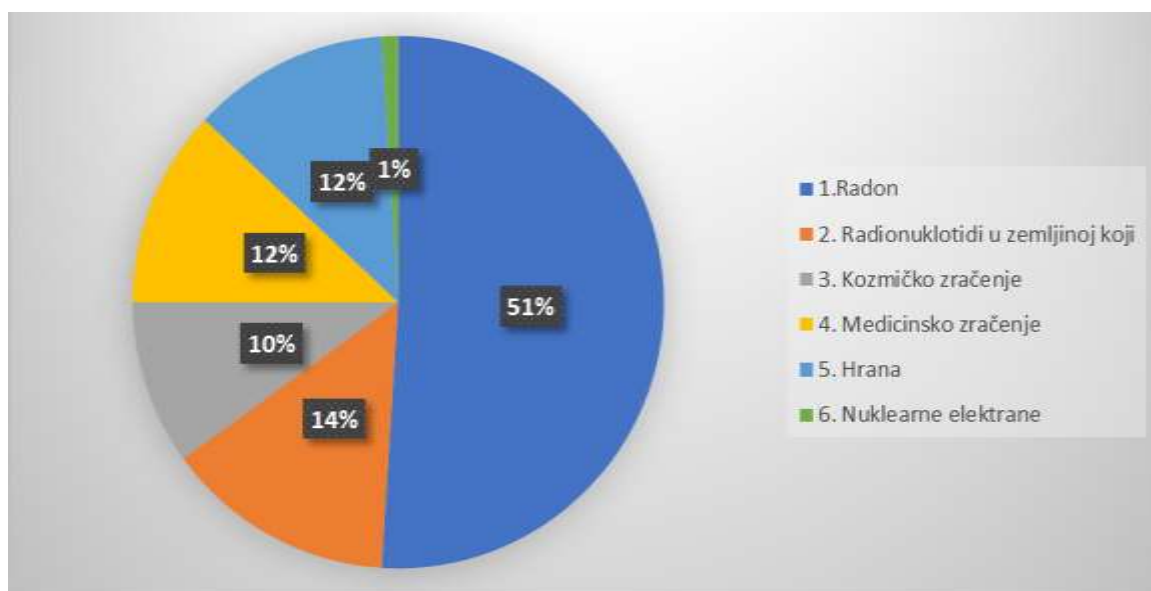
U nekim slučajevima, zatvoreni prostori mogu postati kontaminirani radioaktivnim materijalima zbog nesreća, nuklearnih incidenata ili nepravilnog rukovanja radioaktivnim tvarima. Ove situacije zahtijevaju trenutnu sanaciju i dekontaminaciju kako bi se rizici izloženosti sveli na minimum.

3. Plin radon

Radon je prirodni radioaktivni plin koji može prodrijeti u zgrade iz zemlje. Čest je izvor zračenja u zatvorenim prostorima i može se akumulirati u slabo prozračenim ili dobro zatvorenim prostorima. Dugotrajna izloženost visokim razinama radona može povećati rizik od raka pluća (10).

1.4. Radioaktivnost kojoj je pojedinac izložen

U godišnjoj efektivnoj dozi izloženosti pojedinca ukupnom zračenju prema UNSCEAR, 2000 (13) najveći udio zračenja, čak 51 %, pojedinac prima udisanjem radona. Na slici 2. prikazan je udio pojedinih komponenti zračenja u ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi pojedinca.



Slika 2. Udio pojedinih komponenti zračenja u ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi pojedinca [UNSCEAR](13).

1.5. Zaštita od zračenja

Kako bi se opasnost od zračenja u zatvorenim prostorima svela na minimum potrebno je provoditi nekoliko mjera zaštite (14):

1. Procjena rizika i praćenje

Potrebno je provoditi redovite procjene zbog identifikacije potencijalnih izvora radioaktivnosti i procijeniti rizik izloženosti. Kontinuirano praćenje razina zračenja pomoću specijalizirane opreme može pružiti podatke u stvarnom vremenu kako bi se osiguralo da razine ostanu unutar sigurnih granica.

2. Zadržavanje i zaštita

Odgovarajuće mjere zadržavanja, kao što su zapečaćene barijere ili materijali za zaštitu, trebaju se primijeniti kako bi se spriječilo raspršivanje radioaktivnih tvari unutar zatvorenih prostora. To uključuje korištenje olova, betona ili drugih materijala s visokom sposobnošću apsorpcije zračenja.

3. Osobna zaštitna oprema

Pojedinci koji rade ili ulaze u zatvorene prostore s potencijalnom radioaktivnom kontaminacijom trebaju nositi odgovarajuća odjeću koja uključuje oznake radijacije, rukavice, maske ili odijela, ovisno o prisutnoj razini zračenja.

4. Ventilacija i kvaliteta zraka

Ventilacijski sustavi moraju biti zadovoljavajući kako bi se osiguralo kruženje zraka te konstantni dotok svježeg zraka i uklanjanje radioaktivnih čestica ili plinova.

5. Obuka i obrazovanje

Odgovarajuća obuka i obrazovanje o sigurnosnim protokolima radijacije, uključujući rukovanje radioaktivnim materijalima, postupke odgovora na hitne slučajeve i korištenje opreme za nadzor, ključni su za pojedince koji rade u zatvorenim prostorima izloženim radioaktivnosti ili oko njih.

Neophodno je slijediti lokalne propise i smjernice u vezi s radioaktivnošću u zatvorenim prostorima i konzultirati se sa stručnjacima za radijacijsku sigurnost kako bi se osiguralo pravilno upravljanje i zaštita od mogućih zdravstvenih rizika povezanih s izloženošću zračenju.

1.6. Prirodni radioaktivni nizovi

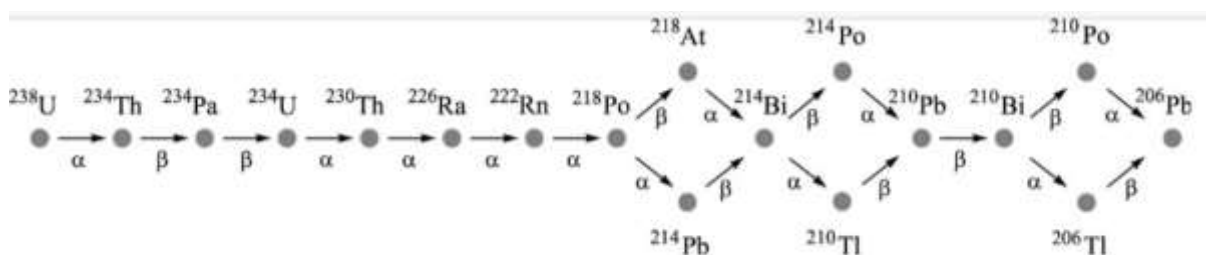
Većina radioaktivnih elemenata može se svrstati u četiri prirodna radioaktivna niza a to su: torijev, neptunijev, uranijev i aktinijev (Tablica 2) (4). Radioaktivni nizovi su skupine prirodnih radionuklida koji nastaju jedni od drugih. Najdulje vrijeme poluraspada ima početni radionuklid, a konačni radionuklidi su stabilni.

Tablica 2. Radioaktivni raspadni nizovi (4)

Niz	Radionuklid s najduljim vremenom poluraspada	Vrijeme poluraspada početnog radionuklida /godine	Konačan nuklid
Torijev	^{232}Th	$1,14 \times 10^{10}$	^{208}Pb
Neptunijev	^{237}Np	$2,14 \times 10^6$	^{209}Bi
Uranijev	^{238}U	$4,47 \times 10^9$	^{206}Pb
Aktinijev	^{235}U	$7,04 \times 10^8$	^{207}Pb

1.6.1. Uranijev niz

Uranij (^{238}U) je prirodno prisutan u svim stijinama i tlima. Radon (^{222}Rn) je dio lanca raspada uranija (slika 3) i budući da je plemeniti plin, može pobjeći iz matrice stijene i tla u kojem nastaje. Kao plin ili otopljen u vodi, kreće se kroz pukotine u stijinama ili pore u tlu. Radon (^{222}Rn) se raspada s vremenom poluraspada od 3,8 dana na niz radionuklida koji se nazivaju potomci radona.



Slika 3. Raspadni niz uranija (15).

Uranijev raspadni niz je složeni proces u kojem se prirodni radioaktivni element uranij kroz niz uzastopnih raspada pretvara u druge elemente.

Uranij je poznat po svom velikom atomskom broju, koji iznosi 92. Njegov najstabilniji i najčešći izotop je uranij (^{238}U), koji je prisutan u značajnim količinama u Zemljinom kori i drugim prirodnim izvorima te ima dugo vrijeme poluraspada. Proces raspadanja uranija počinje emitiranjem alfa čestica, koje su sastavljene od dva protona i dva neutrona. Ovaj proces rezultira transformacijom uranija (^{238}U) u torij (^{234}Th) (vidi jednadžbu 1.1).

Radioaktivni torij (^{234}Th) podliježe beta raspadu i pretvara se u protaktinij (^{234}Pa), a zatim u uranij (^{234}U). Uranij (^{234}U) je nestabilan i raspadanjem emitira alfa čestice, pretvarajući se u torij (^{230}Th). Ovaj proces se nastavlja daljnjim raspadanjem i pretvorbama između različitih elemenata, sve do stabilnih izotopa olova (^{206}Pb) (15).

Važno je napomenuti da neki elementi u uranijevom raspadnom nizu imaju izuzetno kratko vrijeme poluraspada. Na primjer, vrijeme poluraspada protaktinija (^{234}Pa) iznosi samo oko jedne minute, što predstavlja problem u izoliranju i detaljnijem proučavanju ovih elemenata.

Torij (^{230}Th) ima relativno dugo vrijeme poluživota, ali nastavlja se raspadati, stvarajući radioaktivni radij (^{226}Ra). Radij (^{226}Ra) je plinoviti radioizotop koji može biti štetan za zdravlje ako se udiše u visokim koncentracijama.

Daljnje raspadanje radija (^{226}Ra) dovodi do stvaranja različitih izotopa radona, uključujući radon (^{222}Rn). Ostali izotopi također su radioaktivni i poznati po svom kratkom vremenu poluraspada. Radioaktivno zračenje koje proizlazi iz raspadanja radija koristi se u medicinskim aplikacijama, poput terapije zračenjem i dijagnostike (16).

Alfa raspadom radona nastaje serija izotopa od kojih su važniji izotopi polonija ^{218}Po , ^{214}Po , ^{210}Po i olova ^{214}Pb , ^{210}Pb (slika 3). Oni su također alfa-radioaktivni, a udisanjem radona u pluća predstavljaju zdravstveni rizik (1).

1.7. Utjecaj radona na zdravlje

Radon je glavni uzročnik raka pluća, nakon pušenja. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) procjenjuje da je između 3% do 14% svih karcinoma pluća u svijetu uzrokovano radonom, ovisno o nacionalnoj prosječnoj razini radona i prevalenciji pušenja. Povećana stopa raka pluća prvi put je uočena kod rudara uranija koji su bili izloženi vrlo visokim koncentracijama radona (17). Osim toga, studije u Europi, Sjevernoj Americi i Kini potvrdile su da čak i niske

koncentracije radona poput onih koje se obično nalaze u stambenim okruženjima te speleološkim objektima također predstavljaju rizike za zdravlje i pridonose pojavi raka pluća diljem svijeta. Rizik od raka pluća povećava se za oko 16% na 100 Bq/m³ nakon dugotrajne izloženosti toj prosječnoj koncentraciji radona. Pretpostavlja se da je odnos doza-odgovor linearan to jest da rizik od raka pluća raste proporcionalno s povećanjem izloženosti radonu. Postoji veća vjerojatnost da će radon izazvati rak pluća kod ljudi koji su pušači. Zapravo, procjenjuje se da su pušači 25 puta više izloženi riziku zbog izlaganja radonu nego nepušači. Do danas nisu utvrđeni nikakvi drugi rizici od raka ili drugi zdravstveni učinci, iako inhalirani radon može isporučiti zračenje u druge organe, ali na puno nižoj razini nego u plućima (18).

1.8. Mjerenje radona u otvorenim i zatvorenim prostorima

Najveći udio doze zračenja od izloženosti radonu dobije se putem emisije alfa zračenja od raspadnih produkata radona. Radon se prilikom dolaska u zrak brzo raspršuje. Tipično, prosječna koncentracija radona u vanjskom zraku iznosi oko 10 Bq/m³. Međutim, kada radon uđe u zatvoreni prostor, poput špilje, rudnika ili zgrade, ne može se lako raspršiti, pa se obično nakuplja i koncentriraniji je nego na otvorenom. U svijetu, prosječna koncentracija radona u zatvorenim prostorima iznosi oko 50 Bq/m³, iako postoje velike razlike. U nekim zemljama nacionalni prosjeci koncentracije radona manji su od 10 Bq/m³ ali u nekim drugim mogu biti i veći od 100 Bq/m³. U rijetkim slučajevima razine radona u pojedinačnim domovima mogu iznositi čak do 10 000 Bq/m³ (13).

Koncentracija radona (²²²Rn) u zraku obično se izražava u bekerelima po kubnom metru (Bq/m³), odnosno kao aktivnost radona po metru kubičnom zraka. Radna razina (WL) je mjera koncentracije radona u zraku, odnosno koncentracije radona i njegovih potomaka. Radnom razinom možemo bolje istaknuti izloženost radonu, posebno u složenim radnim okruženjima kao što su podzemni rudnici i špilje. Mjesečna radna razina (WLM) radona je mjera akumulirane izloženosti, a može se izračunati množenjem radne razine WL s brojem radnih sati u mjesecu (19).

Godine 1970. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) osnovala je radnu skupinu za istraživanje izloženosti zračenju u rudnicima uranija koja je izdala ICRP Publikaciju 24 1977. godine (20). Iako je fokus bio na rudnicima uranija, primijećeno je da je radij (²²⁶Ra) dio lanca raspada uranija koji se nalazi gotovo posvuda, pa stoga istraživanje nije bilo ograničeno samo na rudnike uranija. Uočavajući brzi razvoj epidemiologije radona,

preporučeno je da maksimalno godišnje ograničenje izloženosti radonu i njegovim potomcima iznosi 12 WLM.

1.9. Propisi o dopuštenim koncentracijama radona u kućama i radnom okruženju

Godine 1993. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) donijela je Publikaciju 65 (21), kojom su utvrđene maksimalne dopuštene koncentracije radona. Za zaštitu od radona u stanovima preporučeno je raspon od 200 do 600 Bq/m³, što odgovara godišnjoj efektivnoj dozi od oko 3 do 10 mSv, uz pretpostavku da 7000 sati godišnje provedemo kod kuće. Zaštita na radnom mjestu razmatrana je odvojeno od zaštite u stanovima, i zaštita od radona razmatrana je odvojeno od zaštite izloženosti drugim zračenjima. Preporučene razine koncentracije radona bile su u rasponu od 500 do 1500 Bq/m³, a izračunate su korištenjem iste osnovne godišnje efektivne doze od 3 do 10 mSv koja se koristi za stanove, ali s drugačijim faktorom pretvorbe doze za radnike, te uzevši u obzir godišnje vrijeme izlaganja od 2000 sati na radnom mjestu.

Nakon novih otkrića o povezanosti raka pluća s izloženosti radonu, u Publikaciji 115 (22) gornja vrijednost za referentne razine radona smanjena je sa 600 Bq/m³ na 300 Bq/m³.

Najnoviji skup temeljnih preporuka o radiološkoj zaštiti objavljen je 2007., kao ICRP Publikacija 103. U godini ICRP Publikacija 126 pružila je ažurirane preporuke o zaštiti od izloženosti radonu prema načelima iz 2007. i metodologiji, te odražava novu znanstvenu procjenu rizika od radona u ICRP Publikaciji 115. U tim publikacijama preporučeno je integrirani pristup zaštiti od izloženosti radonu u svim zgradama. Bez obzira na namjenu građevine, primjenjuje se ista referentna razina i zaštita bi trebala biti optimizirana u svim okolnostima. Gornja referentna vrijednost od 10 mSv godišnje, iz Publikacije ICRP-a 65, nastavlja biti preporučena (23). Publikacija ICRP-a 126 preporučuje poseban pristup stupnjevanja za radna mjesta, gdje se ne uzima u obzir izloženost radnika radonu kao profesionalna (npr. izloženost u poslovnim zgradama). Prvi korak je smanjiti koncentraciju radona do razine koja je najniža koliko je to razumno moguće postići. Neka zanimanja kao što su rudari i speleolozi te određene poslovne aktivnosti trebali bi biti okarakterizirani profesionalnim rizikom zbog povećane i neizbježne izloženosti radonu, bez obzira na to jesu li koncentracije iznad ili ispod referentne razine. Unatoč posebnoj karakterizaciji efektivna doza izlaganja ne bi smjela prekoračiti 20 mSv na godinu (23).

Koristeći nominalni koeficijent rizika iz ICRP publikacije 115 (22) od $1,4 \times 10^{-4}$ po mJ h/m^3 te vrijednost štetnosti iz ICRP Publikacije 103, dobije se vrijednost doze od $3,3 \text{ mSv na } \text{mJ h/m}^3$ za odrasle osobe temeljeno na epidemiološkim dokazima (24).

Korištenjem dozimetrijskih modela koeficijenti efektivne doze su $3,3 \text{ mSv po } \text{mJ h/m}^3$ za radnike u rudnicima i $4 \text{ mSv po } \text{mJ h/m}^3$ za službene radnike u uredima. Koristeći istu metodologiju, dozni koeficijent za izloženost u domovima je $3,7 \text{ mSv po } \text{mJ h/m}^3$.

Za turističke špilje i radna mjesta u zatvorenim prostorima gdje se pretpostavlja da će radnici provesti dvije trećine vremena krećući se, dozni koeficijenti su $6,7$ i $5,7 \text{ mSv po } \text{mJ h/m}^3$.

U ICRP publikaciji 137 (24), preporučeni dozni koeficijent iznosi $3 \text{ mSv po } \text{mJ h/m}^3$ odnosno 10 mSv na WLM . Odgovarajući dozni koeficijent izražen kao izloženost plinu radonu (^{222}Rn) ovisi o faktoru ravnoteže, F , između plina radona i njegovih potomaka. Koristeći standardnu pretpostavku da je $F = 0,4$ za većinu situacija u zatvorenim prostorima, dozni koeficijent iznosi $6,7 \times 10^{-6} \text{ mSv po Bq h/m}^3$.

Koristeći ovaj dozni koeficijent, izloženost radonu u najvišim vrijednostima propisanim nacionalnim referencama, dopušteno je izlaganje razini radona od 300 Bq/m^3 , što prema ICRP publikaciji 126 odgovara godišnjoj efektivnoj dozi od $4 \text{ mSv na radnom mjestu}$ i 14 mSv kod kuće (19).

Za računanje efektivne doze (E) koristi se slijedeća formula (19):

$$E [\text{mSv}] = \text{dozni koeficijent} [\text{mSv po Bq h/m}^3] \times c_{\text{Rn}} [\text{Bq/m}^3] \times t [\text{h}]$$

Za posebne uvjete rada u zatvorenom prostoru koji uključuje značajnu tjelesnu aktivnost, izloženost u turističkim špiljama, preporučeni dozni koeficijent iznosi $6 \text{ mSv po } \text{mJ h/m}^3$ (približno 20 mSv po WLM) (19).

Iako postoje preporuke o dozvoljenim dozama, zbog velike koncentracije radona u špiljama postoji opasnost da dio zaposlenika rudnika i špilja primi dozu koja je veća od preporučene. Kako bi se to izbjeglo teutjecalo na smanjenje primljene doze kod radnika ograničava se broj radnih sati unutar rudnika i špilja. Pomoću gore navedene jednadžbe može se izračunati maksimalno dopušteno vrijeme boravaka u špilji za speleologe te za turističke vodiče (25-27).

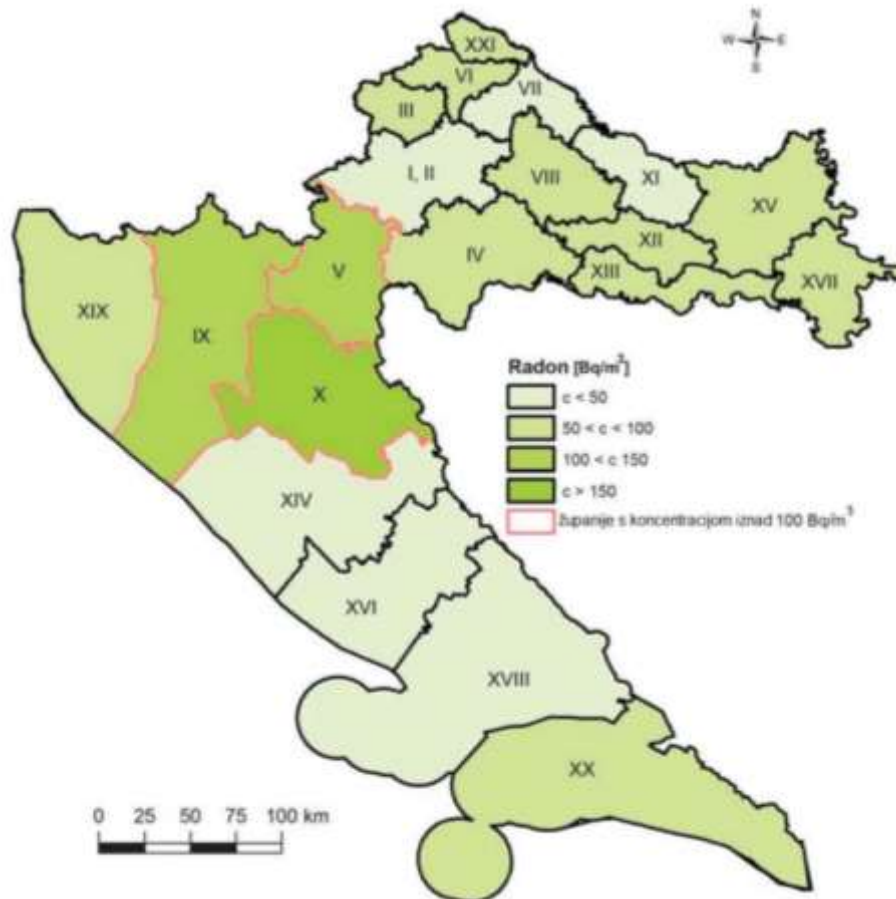
1.10. Zakonska regulativa u Hrvatskoj o dozvoljenim koncentracijama radona

Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom koeficijentu i procjenjivanju osobnog ozračenja (28) koji je na snazi u Republici Hrvatskoj temelji se na Direktivi vijeća 2013/59/Euroatom od 5.12.2013. o osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od opasnosti koje potječu od izloženosti ionizirajućem zračenju. Tim pravilnikom naglašena je potreba za praćenjem razine radona u stambenim objektima te mjestima obavljanja radnih aktivnosti i određene su referentne vrijednosti koje ne smiju prelaziti 300 Bq/m^3 . Ukoliko se dogodi da izmjerene vrijednosti premašuju dozvoljene, preporuča se ponoviti mjerenja, ali sada uz prozračivanje prostorija, te ako su i tada vrijednosti povišene potrebno je uvesti neke od mjera izolacije ili poboljšati ventilaciju. Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost donio je 27.12.2018. godine Akcijski plan za radon za razdoblje 2019. – 2024 NN 118/2018 (27. 12. 2018.) (29) čiji je dugoročni cilj dovesti do smanjene izloženosti radonu te time smanjiti pojavu karcinoma pluća kod ljudi u RH. Za provedbu plana propisane su osnovne aktivnosti u koje ubrajamo: mjerenje koncentracije radona u zatvorenim prostorima, tlu, vodi za ljudsku potrošnju, nadalje izradu radonskih zemljovida te postupci za smanjenje koncentracije radona na minimalnu.

1.11. Mjerenje koncentracije radona u Republici Hrvatskoj

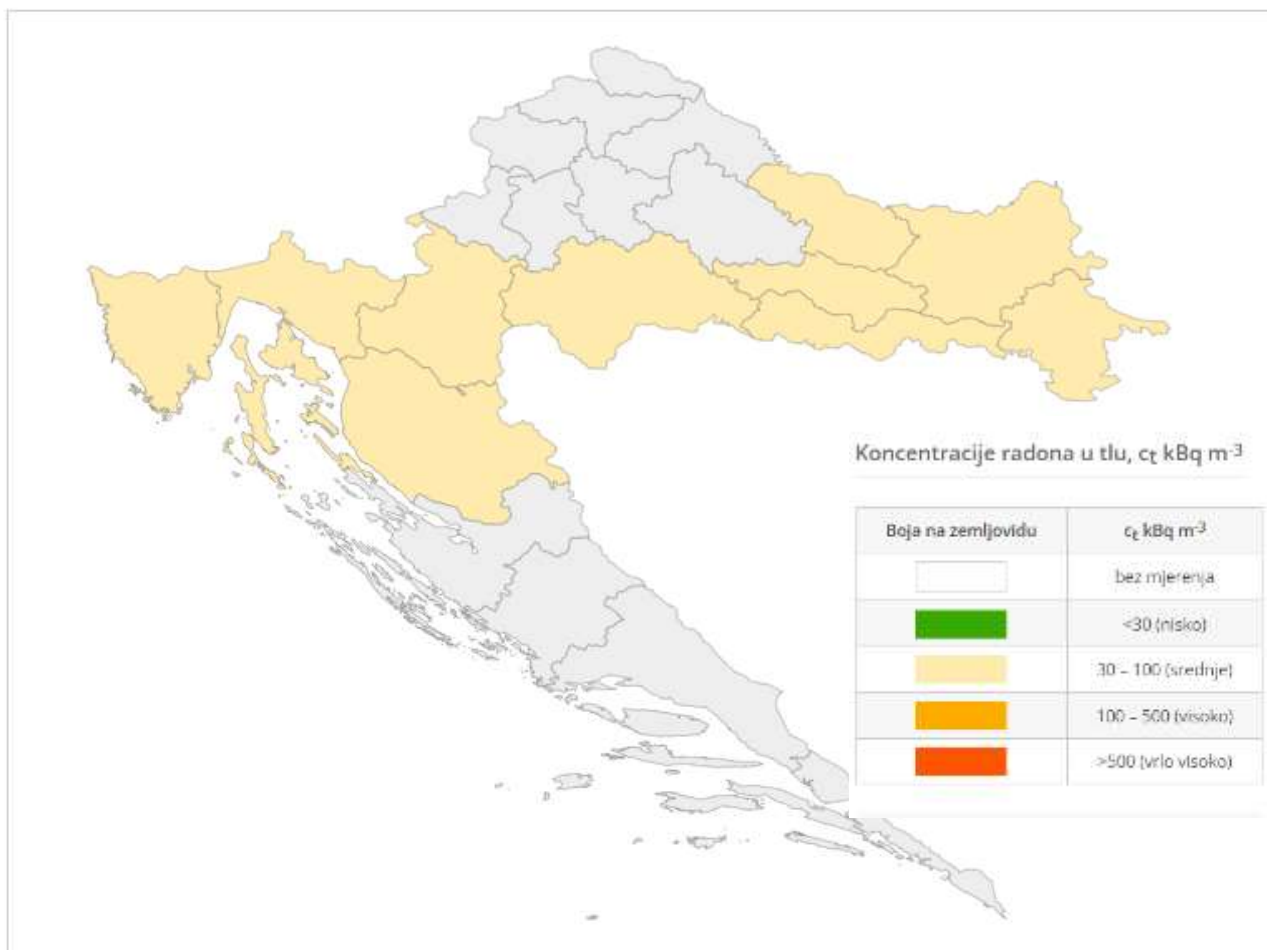
Hrvatske inicijative u području analize rizika od radona uglavnom se odnose na istraživanja radona u zatvorenim prostorima odnosno određivanju koncentracije te identifikaciji područja sklonih oslobađanju radona kroz jednu nacionalnu studiju i nekoliko usmjerenih studija. Godine 2006. Radolić i suradnici (30) proveli su jednogodišnje nacionalno istraživanje radona u nasumično odabranim kućanstvima u Hrvatskoj. Aritmetička sredina dobivenih rezultata imala je vrijednost od 68 Bq/m^3 , a geometrijska sredina iznosila je 50 Bq/m^3 . Koncentracije radona u zatvorenim prostorima izmjerene u Hrvatskoj bile su slične vrijednostima koje su izmjerene u središnjoj i južnoj Europi. Nacionalnim istraživanjem iz 2006. (31) godine utvrđene su nacionalne referentne vrijednosti za Hrvatsku. Tim istraživanjem utvrđeno je da područje Ličko-senjske županije ima povećanu koncentraciju radona u odnosu na ostatak zemlje. Rezultati rada Surić i suradnici (32) pokazali su da su koncentracije radona bile pod velikim utjecajem fizičkih uvjeta poput vjetra, temperature i tlaka.

U Hrvatskoj praćenje ionizirajućeg zračenja provodi Hrvatski državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS). Na karti na slici 4. prikazane su koncentracije radona u stambenim i javnim prostorima dobivene mjerenjima u 2012. i 2013. godini u županijama Republike Hrvatske (RH). Županije u kojima je prosječna koncentracija radona prekoračila 100 Bq/m³ na ovoj karti imaju crveni obrub (33).



Slika 4. Koncentracije radona u stambenim i javnim prostorima dobivene mjerenjima u 2012. i 2013. godini u županijama RH (33)

Na slijedećoj karti koja se nalazi na slici 5. prikazane su županije u RH u kojima je proveden određeni broj mjerenja koncentracije radona u tlu. Najveći broj mjerenja proveden je u Osječko – baranjskoj županiji te aritmetička sredina tih mjerenja iznosi 31,8 kBq/m³ s maksimalnom izmjerenom vrijednošću od 106 kBq/m³. U Primorsko-goranskoj županiji provedena su 52 mjerenja. Aritmetička sredina tih mjerenja iznosi 78,8 kBq/m³, a maksimalna izmjerena vrijednost iznosila je 424,3 kBq/m³ (34).



Slika 5. Koncentracije radona u tlu po županijama u Republici Hrvatskoj (34).

1.12. Pregled istraživanja radona u špiljama

Ponašanje radona u špiljama i špiljskom okruženju proučava se u cijelom svijetu počevši od pionirskog rada Wilkeninga i Watkins (1976) (35) pa do danas. Provode se analize razine radona, uključujući korištenje radona kao trag plina, te kao pokazatelja tektonske aktivnosti i opasnosti za zdravlje. U krškom području glavni izvor radona je uranij, koji je prisutan unutar vapnenca u malim količinama od 1,3–2,5 ppm-a, ali čak i te količine rezultiraju relativno visokom koncentracijom radona u špiljama. Radon se oslobađa iz minerala u obliku plina te difuzijom migrira u zrak ili vodu koja se nalazi u pukotinama.

U dinarskom kršu najveća i opsežnija istraživanja o radonu u špiljama provedena su u Sloveniji, i to najviše u Postojnskoj jami (36-43). (Kobal i sur., 1988; Vaupotič i sur., 2001.; Vaupotič, 2008.; Šebela i sur., 2010.; Gregorič & Vaupotič, 2011.; Gregorič i sur., 2011., 2013., 2014.).

U Hrvatskoj su mjerenja koncentracije radona u špiljama započela 2004. godine (Paar, 2009; Paar i sur., 2005., 2008.; Radolić i sur., 2009., 2011., 2012.) (44-49). U provedenim istraživanjima mjerene su koncentracije radona u 20 špilja i jama u primorskom dinarskom kršu i u kontinentalnom izoliranom kršu. Izmjerene su maksimalne koncentracije radona od 3,8 kBq/m³ na Velebitu u Lubuškoj jami, na Žumberačkoj gori vrijednosti su dosegle 12,4 kBq/m³ i 21,8 kBq/m³ u Provali, odnosno špilji Dolača, što su istraživali Paar i sur., 2009.godine (43). Najviše koncentracije radona zabilježene su u Šparožnoj pećini gdje je u prethodnim istraživanjima zabilježena koncentracija radona veća od 30 kBq/m³ (Šumonja i sur., 2022.) (50), na čije se istraživanje i podatke nadovezuje i ovaj rad. Što se tiče turistički uređenih izložbenih špilja, preliminarna studija provedena je u špilji Manita peć (49), koja se nalazi u Nacionalnom parku Paklenica na Velebitu te je otkrivena relativno niska prosječna razina koncentracije radona s ljetnim pikom od samo 1,1 kBq/m³, te je time ova špilja proglašena prihvatljivom za turističko gospodarenje špiljom. Nadalje u istraživanju koje je provedeno na jugu Hrvatske, u Đurovića Špilji kod Dubrovnika (47), izmjerene su koncentracije radona do 25 kBq/m³ te se dovelo u pitanje turističko korištenje ove špilje.

2. Ciljevi rada

Cilj ovoga rada bio je usporediti koncentracije oslobođenog radona u špiljama smještenim na različitim lokacijama unutar Republike Hrvatske te utvrditi jesu li izmjerene količine radona potencijalno opasne za posjetioce i radnike koji rade u špiljama kao vodiči. U skladu s tim cilj je bio izračunati dozvoljeni broj sati boravka u špilji za pojedinca kako primljena efektivna doza od radona ne bi premašila zakonski dopuštenu vrijednost.

Pored toga, cilj rada bio je nastaviti monitoring koncentracije radona u Šparožnoj pećini (50), te vidjeti dolazi li do sezonskih promjena koncentracije radona u špilji i utvrditi koji još faktori utječu na promjene koncentracije radona. Monitoringom radona u Šparožnoj pećini cilj je bio i pokušati utvrditi utječe li seizmička aktivnost na razinu oslobođenog radona.

Usporedit će se koncentracije radona izmjerene u Šparožnoj pećini sa koncentracijama radona u Grgosovoj špilji i špilji Biserujka kako bi se vidjelo utječe li različita vrsta tla i različita morfologija špilje na koncentraciju radona.

U radu će se po prvi put izmjeriti koncentracija radona u špilji Biserujka koja je otvorena za posjetitelje i utvrditi dolazi li do ustaljenih dnevnih promjena koncentracije radona u špilji Biserujka. Nadalje cilj je bio izračunati približnu efektivnu dozu koju prime posjetitelji špilje Biserujke tijekom obilaska, te koliku godišnju dozu prime turistički vodiči.

3. Eksperimentalni dio

3.1. Metode i materijali

Mjerenje se provodilo na tri lokacije odnosno u tri špilje koje se nalaze na različitim lokacijama u Republici Hrvatskoj. Prva lokacija na kojoj se vršio monitoring je Šparožna pećina, koja se nalazi na Kastvu, općini u okolici grada Rijeke. U Šparožnoj pećini uređaj je bio postavljen u periodu od prosinaca 2021. do siječanja 2023. godine. Druga lokacija je bila u Grgosovoj špilji koja se nalazi na području Žumberka a mjerenja su se provodila u ožujku 2023. Zadnja lokacija mjerenja bila je špilja Biserujka koja se nalazi na otoku Krku, a mjerenja koncentracije radona provodila su se od 26. svibnja do 19. kolovoza 2023.

Mjerenje se vršilo pomoću uređaja AlphaE (SAPHYMO GmbH, Frankfurt, Njemačka) (51), koji je prikazan na slici 6. Njega možemo opisati kao maleni prijenosni uređaj kojim se mjeri trenutna osobna izloženost radonu (^{222}Rn). Uređaj je pogodan za provođenje mjerenja u zatvorenim i otvorenim prostorima te u rudnicima, špiljama i jamama. Točna procjena izloženosti i doza može se dobiti korištenjem aktivnih mjernih uređaja koji daju podatke u stvarnom vremenu i koje osobe pod nadzorom stalno nose te se na taj način kontrolira izlaganje radonu. Mjerni uređaj AlphaE temelji se na difuzijskoj komori izrađenoj od silicijske diode. To je lagani osobni ekspozimetar, koji je razvijen u suradnji Minhenskog centra Helmholtz i Saphymo GmbH u Njemačkoj. Ovaj uređaj omogućuje mjerenje koncentracije radona, temperature i relativne vlažnosti. Kombinirajući sve prikladne značajke AlphaE predstavlja odgovarajući alat za bilježenje osobne izloženosti radonu i akumulirane doze, kao i za stacionarno kratkoročno i dugoročno praćenje koncentracije radona u zatvorenim prostorima. Detektor omogućuje širok raspon mjerenja do 10 MBq/m^3 , a dovoljno je osjetljiv i za pouzdana mjerenja ispod 100 Bq/m^3 . Uređaj za provođenje mjerenja u radu bilo je potrebno postaviti u posebnu vrećicu koja ga štiti od utjecaja vlage, a omogućuje nesmetano mjerenje koncentracije radona, vlage i temperature.

Podatci preuzeti s uređaja obrađeni su i prikazani grafički korištenjem programskog paketa Microsoft Excel te pomoću programa Statistica 14.0. (TIBCO Software Inc.). Podatci snimljeni na uređaju AlphaE prebačeni su pomoću DataVIEW za AlphaE / MiniTRACE / RadTRACE / AlphaGUARD / GammaTRACER Version 15. u Excel. Dnevne aritmetičke sredine koncentracije radona izračunate su na temelju 96 izmjerenih vrijednosti trenutne koncentracije

radona. Za usporedbu podataka između različitih špilja koristio se Studentov T-test za nezavisne uzorke te je određeno postoji li statistički značajna razlika.



Slika 6. Prikaz AlphaE uređaja koji je korišten za mjerenje koncentracije radona.

3.2. Lokacije mjerenja

3.2.1. Šparožna pećina

Šparožna pećina speleološki je objekt koji se nalazi na krškom području u okolici Rijeke točnije u općini Kastav između dva sela Breza i Brajani. Nazvana je prema dijelu šume Šparožna lužina u kojem se nalazi. Temperatura u špilji je gotovo stalna i varira između 8,5°C i 9°C (52). Duboka je 112 m, a njen glavni horizontalni kanal, te nekoliko sporednih kanala imaju ukupne duljinu od 607 m te je zbog toga svrstana u kategoriju velikih speleoloških objekata. Špilju krase brojni hodnici i kanali, dvorane visine do 12 metara, te ostali špiljski ukrasi, kalcitne nakupine stalaktiti i vijugave kalcitne kamenice što možemo vidjeti na slici 7 (52). Sastoji se od više dijelova, a najpristupačniji je prvi dio špilje. Špilja je otkrivena 1885. godine te je već godinu dana kasnije pod okriljem Austro-Ugarske vlasti bila uređena za turističke posjete. Zbog svog prirodnog bogatstva 1988. godine speleološka udruga Estavela i grad Kastav tražili su pravnu zaštitu špilje. Danas špilja nije turistički uređena, no zbog blizine planinarske šetnjice ima velik broj turističkih, ali i speleoloških posjetitelja. Monitoring radona za ovu špilju zanimljiv je i zbog toga što se špilja nalazi na seizmički aktivnom području te bi se monitoringom možda moglo utvrditi utječe li seizmička aktivnost na razinu oslobođenog radona. Na slici 8. prikazan je tlocrt Šparožne pećine i crvenom točkom označena je lokacija u slijepom ogranku špilje gdje je uređaj bio postavljen.



Slika 7. Prikaz jednog dijela Šparožne pećine sa špiljnim ukrasima.

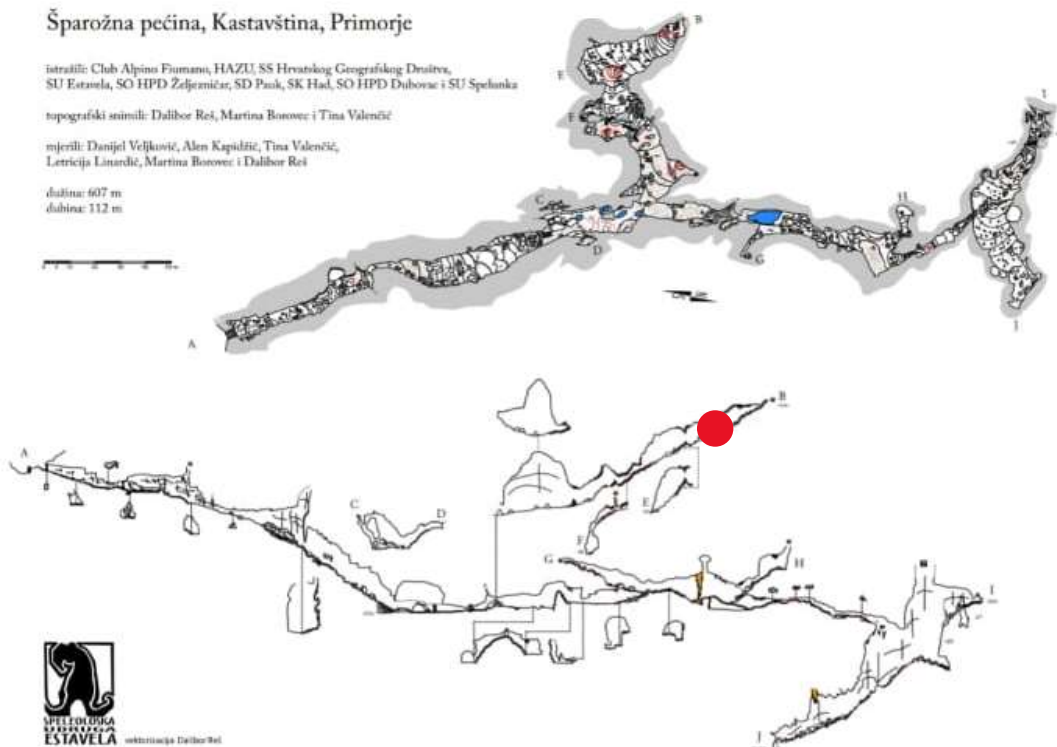
Šparožna pećina, Kastavština, Primorje

istražili: Club Alpino Fiumano, HAZU, SS Hrvatskog Geografskog Društva,
SU Estavela, SO HPD Željeznica, SD Pauk, SK Had, SO HPD Dubovac i SU Spelunka

topografski snimili: Dalibor Reš, Martina Borovec i Tina Valentić

mjerili: Danijel Veljković, Alen Kapidžić, Tina Valentić,
Letricija Linardić, Martina Borovec i Dalibor Reš

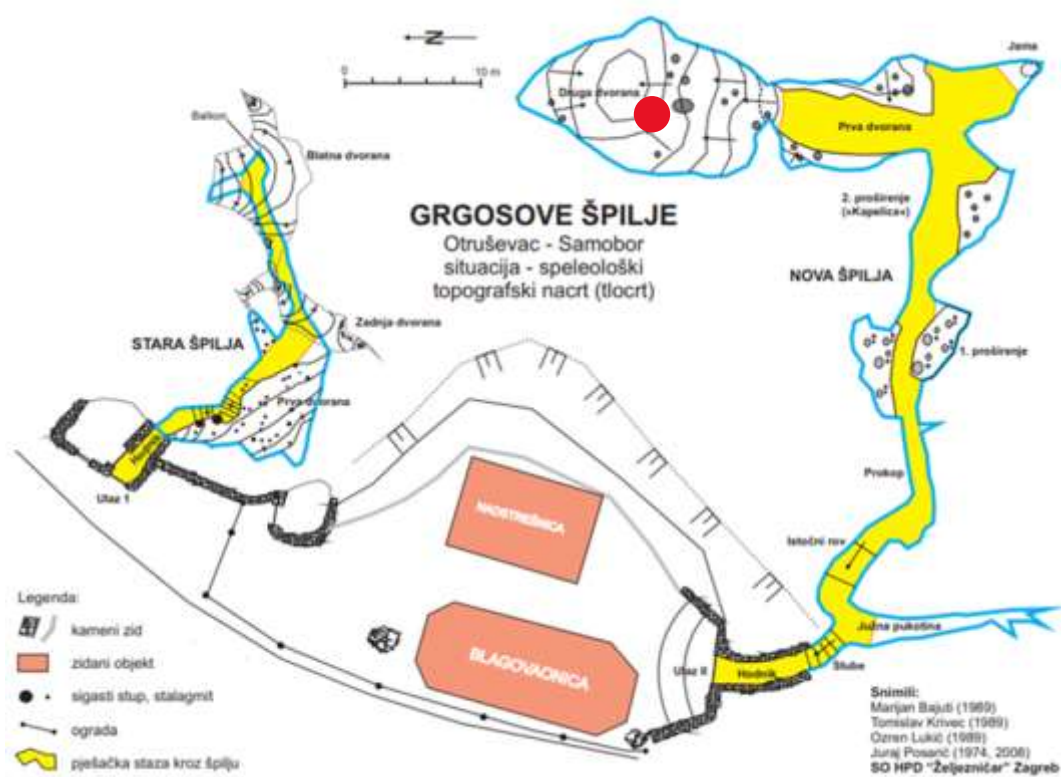
dužina: 607 m
dubina: 112 m



Slika 8. Tlocrt Šparožne pećine (52). Crvenom točkom je označena lokacija na kojoj je postavljen uređaj za mjerenje.

3.2.2. Grgosova špilja

Grgosova špilja nalazi se u najistočnijem predjelu Samoborskog gorja u Žumberku, koje se velikom strminom spušta u tom dijelu prema rijeci Savi. Smještena je u selu Ortuševac, te se sastoji od Stare i Nove Grgosove špilje. Stara špilja otkrivena je 1973, godine prilikom kopanja kamena za dobivanje vapna, a četrdeset godina kasnije otkriven je ulaz u Novu špilju, prilikom uređivanja stare za posjete turista. Obje špilje su uređene za posjetitelje, stoga velik broj ljudi može potencijalno biti ugrožen ukoliko se mjerenjem utvrdi da su koncentracije radona velike. Stara špilja dugačka je 52 m, a njezina dubina u odnosu na ulaz iznosi 19 m, dok je Nova špilja nešto duža, te njena duljina iznosi 97 m, dok je duboka svega 14 m. Analizom sig utvrđeno je da se špilja najviše, čak 95% sastoji od kalcijeva karbonata, te 5% od alumosilikata. Također je izračunato da je najstariji dio špilje star oko 40 000 tisuća godina (53). Temperatura u špilji varira tijekom godine između 10 i 11 °C. Ova špilja je zanimljiva upravo zato što je turistički uređena te otvorena za posjetitelje, ali i zato što se nalazi u drugom dijelu Republike Hrvatske, gdje je tlo drugačijeg sastava od tla u Primorsko-goranskoj županiji gdje su smještene druge dvije špilje. Uređaj za mjerenje koncentracije radona bio je postavljen u Drugoj dvorani unutar Nove špilje što se može vidjeti na slici 9.

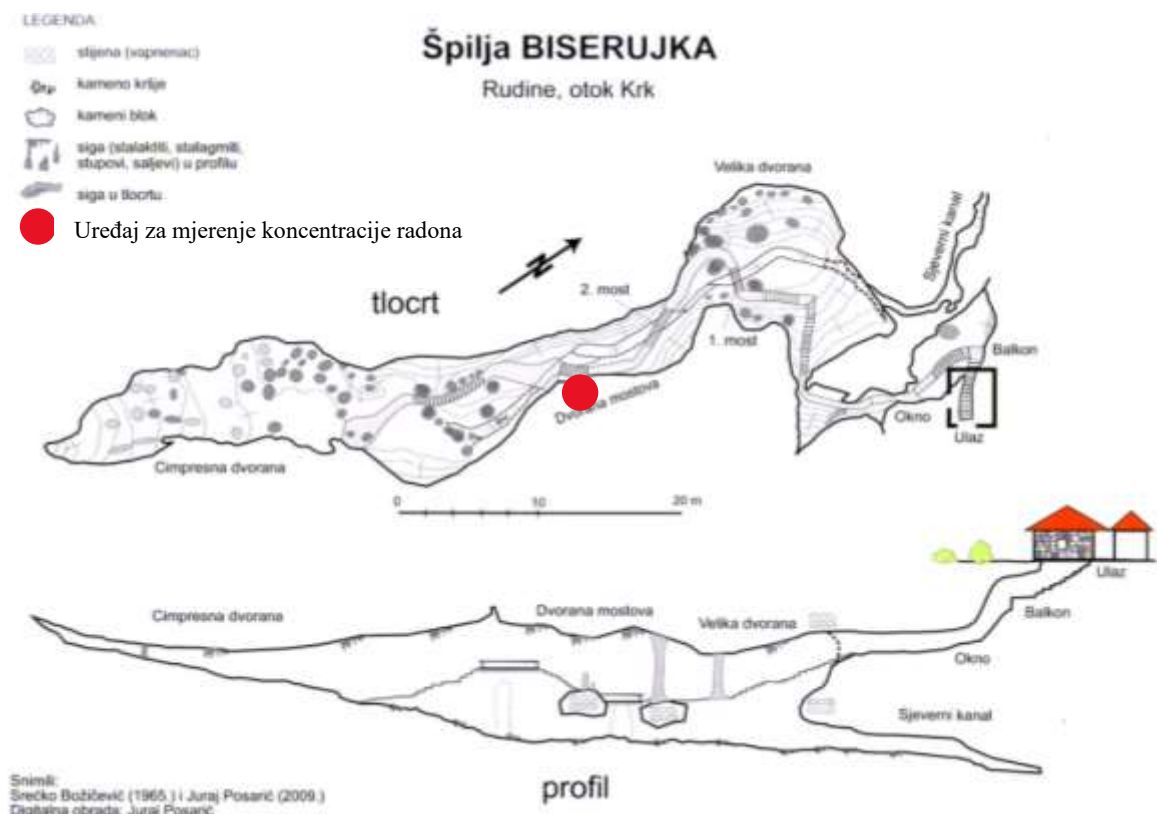


Slika 9. Tlocrt Grgosove špilje (53). Crvenom točkom je označena lokacija na kojoj je postavljen uređaj za mjerenje.

3.2.3. Špilja Biserujka

Špilja Biserujka nalazi se na otoku Krku u krškom području. Njene geografske koordinate su $45^{\circ}11'14,9''N$; $14^{\circ}36'35,25''E$ a nalazi se u blizini mjesta Rudine u općini Omišalj. Tlocrt i profil špilje Biserujka prikazan je na slici 10. Ulaz u ovu po klasifikaciji jednostavnu špilju, s jamskim ulazom nalazi se na nadmorskoj visini od 43 m. Najveća dubina špilje iznosi 13 metara, a dužina podzemnih kanala 111 metara. Temperatura u špilji je stalna i iznosi između 13 i $15^{\circ}C$, a relativna vlažnost je oko 95% (54). Ova krška špilja obiluje prirodnim ukrasima, kalcitnim sigama, stupovima i stalaktitima. Špilja je otkrivena 1834. godine, a od 1913. je uređena za turističke posjete. Zbog posjeta mnogobrojnih turista svake godine, praćenje koncentracije radona vrlo je bitno za daljnje upravljanje ovim objektom. Zaštićena je kao spomenik prirode te je time uvrštena u popis NATURA 2000 (55).

U špilji Biserujka uređaj za mjerenje koncentracije radona postavljen je 26.05.2023. ispod dvorane mostova na visini od jedan metar iznad tla što se može vidjeti na slici 11.



Slika 10. Tlocrt i profil špilje Biserujka. Crvenom točkom je označena lokacija na kojoj je postavljen uređaj za mjerenje.



Slika 11. Postavljanje uređaja za mjerenje radona u špilji Biserujka

4. Rezultati

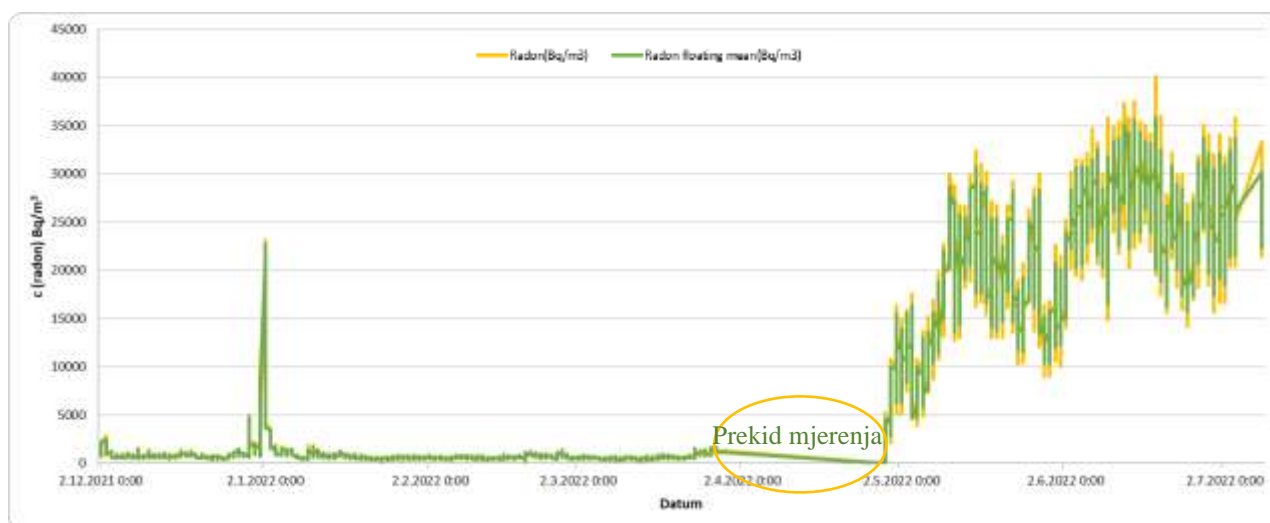
4.1. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini

U ovom odjeljku prikazani su rezultati mjerenja koja su se provodila u Šparožnoj pećini od 2. prosinca 2021. do 29. siječnja 2023. godine. Rezultati mjerenja koja su provedena u periodu od 2.12.2021. do 15.08.2022. objavljeni su u radu Monitoring koncentracije radona u Šparožnoj pećini (50) te se ovaj rad nadovezuje na ta mjerenja. Postavljeni uređaj za mjerenje koncentracije radona mjerio je i temperaturu u špilji koja je bila prilično konstantna te je njena vrijednost iznosila $(7,8 \pm 0,6)$ °C. Uređaj je dodirivao stijene unutar špilje te postoji mogućnost da je izmjerena temperatura niža od stvarne temperature u špilji. Detaljniji prikaz rezultata mjerenja koncentracije radona prikazan je za mjesece koji nisu obuhvaćeni prethodno navedenim radom, odnosno za period od rujna 2022. do siječnja 2023. godine. U tablici 3. prikazane su aritmetičke sredine koncentracije radona sa standardnom devijacijom po mjesecima tijekom cijelog perioda mjerenja. U tablici nedostaju rezultati za siječanj i travanj 2022., zato što je tada mjerenje bilo prekinuto. U prikazanim rezultatima za mjesece kolovoz i rujna 2022. godine mjerenja nisu provedena kroz cijeli mjesec nego samo za jednu polovicu mjeseca. U kolovozu su koncentracije radona mjerene od 1. do 15.08.2022. U rujnu je mjerena koncentracija radona samo za drugu polovicu mjeseca, odnosno od 16. do 30.09.2022. Iz podataka prikazanih u tablici 3 i na slici 12 može se vidjeti da su koncentracije radona u ljetnim mjesecima bile značajno veće, od onih u zimskim mjesecima. Primijećeno je također da koncentracija radona u špilji raste s porastom temperature izvan špilje, te od svibnja uočavamo njen značajni porast. Prema izračunu aritmetičke sredine za pojedini mjesec, najveće koncentracije radona izmjerene su u srpnju 2022. godine i iznosile su $28\,460$ Bq/m³, a najniže vrijednosti izmjerene su u veljači 2022. godine te su iznosile 634 Bq/m³. U zimskom periodu, odnosno u periodu od prosinaca 2021. do ožujaka 2022. prosječna vrijednost koncentracije radona iznosila je $(0,97 \pm 0,22)$ kBq/m³, a maksimalna trenutna izmjerena vrijednost bila je $1\,444$ Bq/m³. U ljetnom periodu, koji obuhvaća razdoblje od svibanja 2022. do kolovoza 2022. prosječna vrijednost izmjerene koncentracije radona iznosila je $(15,5 \pm 2,8)$ kBq/m³ s maksimalnom trenutnom vrijednošću većom od 30 kBq/m³.

Tablica 3. Prosječne mjesečne koncentracije radona (Bq/m^3) izmjerene u Šparožnoj pećini u periodu od prosinca 2021. do siječnja 2023.

Mjeseci	Aritmetička sredina koncentracije radona (Bq/m^3)	Standardna devijacija (Bq/m^3)	Min (Bq/m^3)	Max (Bq/m^3)
Prosinac (2021.)	844	425	292	971
Veljača (2022.)	634	170	83	974
Ožujak (2022.)	643	250	228	1 444
Svibanj (2022.)	21 730	6 010	970	32 384
Lipanj (2022.)	25 730	4 430	10 144	40 064
Srpanj (2022.)	28 460	3 910	16 768	35 840
Kolovoz (2022.)	28 300*	4 120	16 512	39 936
Rujan (2022.)	7 960*	2 280	273	17 664
Listopad (2022.)	20 720	10 440	130	46848
Studeni (2022.)	15 150	7 830	130	39552
Prosinac (2022.)	1 340	1 350	2 728	14432
Siječanj (2023.)	1 022	550	130	5792

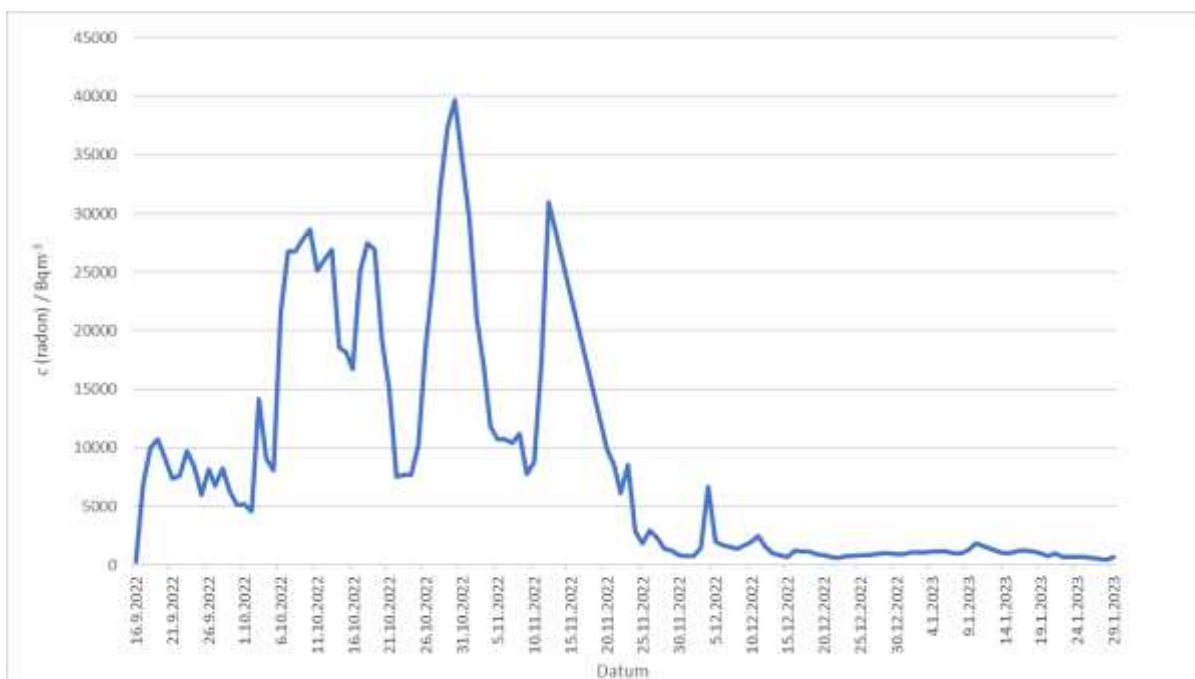
* Mjerenja su vršena samo tijekom jedne polovice mjeseca



Slika 12. Kretanje koncentracije radona u razdoblju od 2. 12. 2021. do 9. 07. 2022. u Šparožnoj pećini (49).

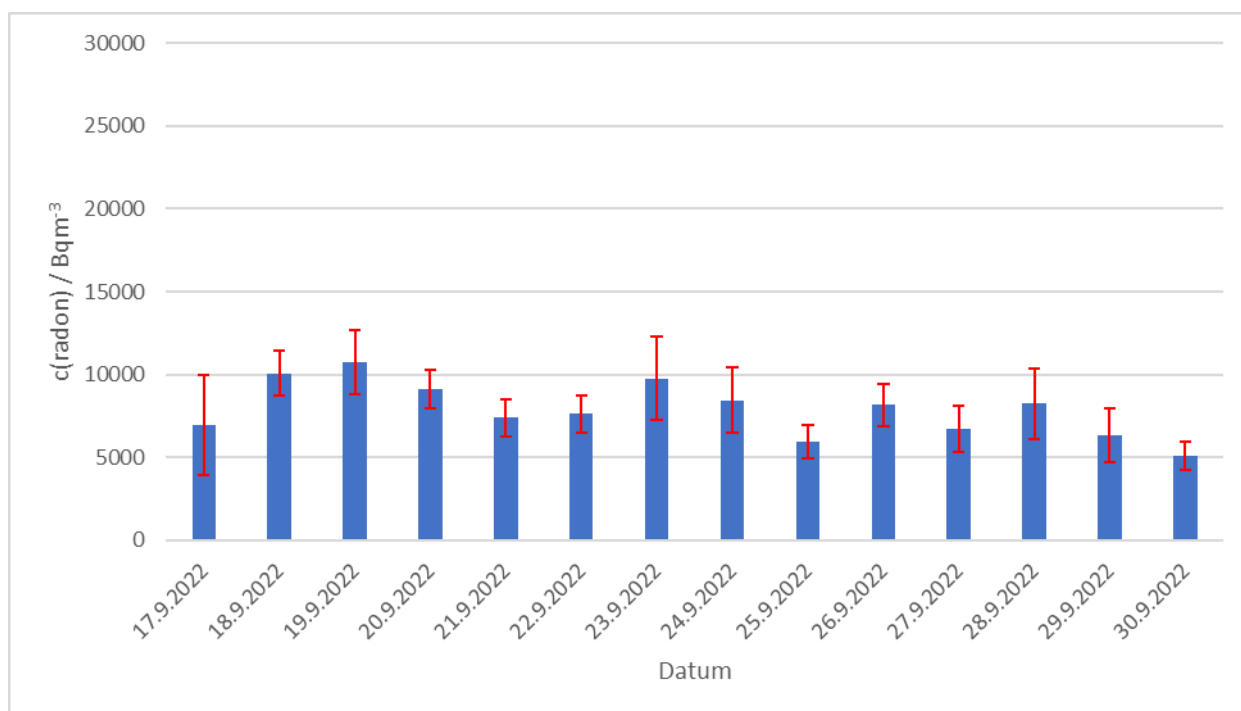
4.1.1. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini od rujna 2022. do siječnja 2023.

Na slici 13. prikazan je nastavak mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini od 16.09.2022. do 29.01.2023. S grafa na slici 13. može se vidjeti da su koncentracije radona do 20.11.2022. bile velike te da s tim datumom započinje intenzivniji pad koncentracije radona do kraja mjerenja, što se potencijalno može povezati s padom vanjske temperature u okolišu špilje. Usljed pada okolišne temperature u zimskim mjesecima, u općini Kastav, ispod vrijednosti temperature u špilji, došlo je do poboljšane cirkulacije zraka iz špilje u okolinu i obratno. Topliji zrak iz špilje dizao se prema gore, a hladniji iz okoliša je ulazio u špilju što je posljedično dovelo do pada koncentracije radona u špilji što je vidljivo na grafičkom prikazu od studenog pa sve do kraja mjerenja. Aritmetička sredina koncentracije radona od 16.09.2022. do 29.01.2023. iznosila je $(16,6 \pm 10,1)$ kBq/m³.



Slika 13. Kretanje koncentracije radona u periodu od 16.09.2022. do 29.01.2023. u Šparožnoj pećini.

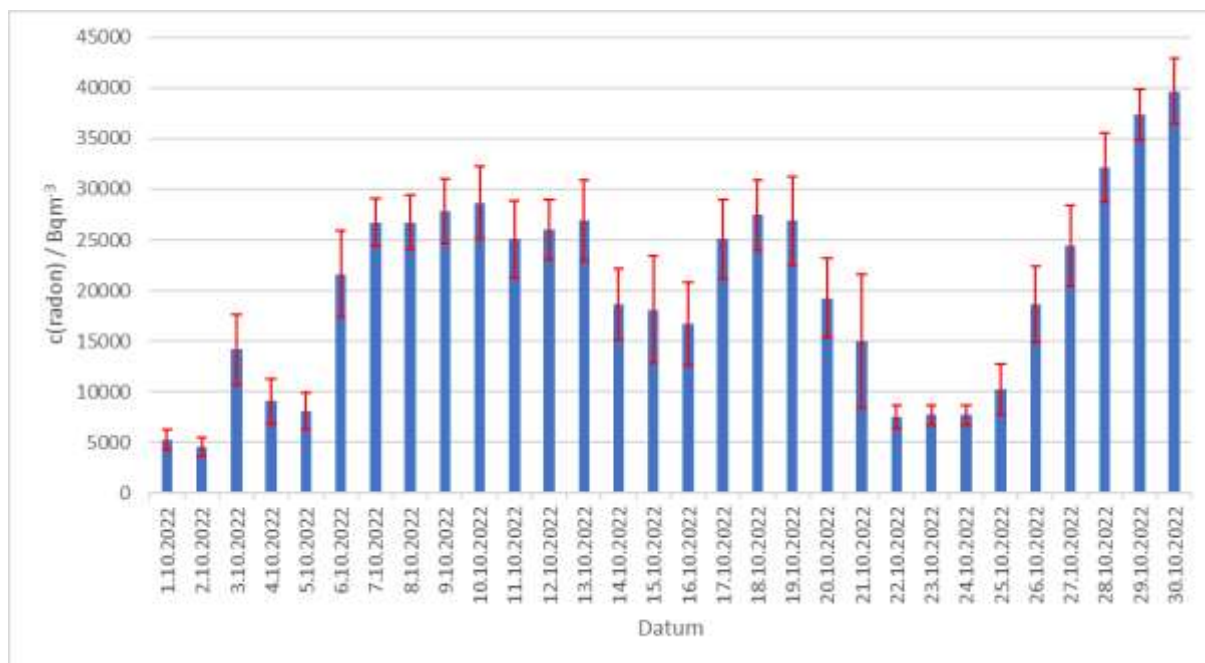
4.1.2. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u rujnu 2022.



Slika 14. Koncentracije radona u Šparožnoj pećini u rujnu 2022. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

U rujnu možemo pratiti dnevno kretanje koncentracije radona od 17.09.2022. do kraja mjeseca, odnosno 30.09.2022. Iz slike 14. vidljivo je da se razina radona kretala između 6000 Bq/m³ i 11 000 Bq/m³. Maksimalne prosječne vrijednosti zabilježene su 19. rujna s iznosom od 10 762 Bq/m³, dok je trenutni maksimum mjerenja od 17 664 Bq/m³ izmjeren 23.09.2022. Iz slike 14. ne mogu se vidjeti veće promjene između dnevnih koncentracija radona u mjesecu rujnu.

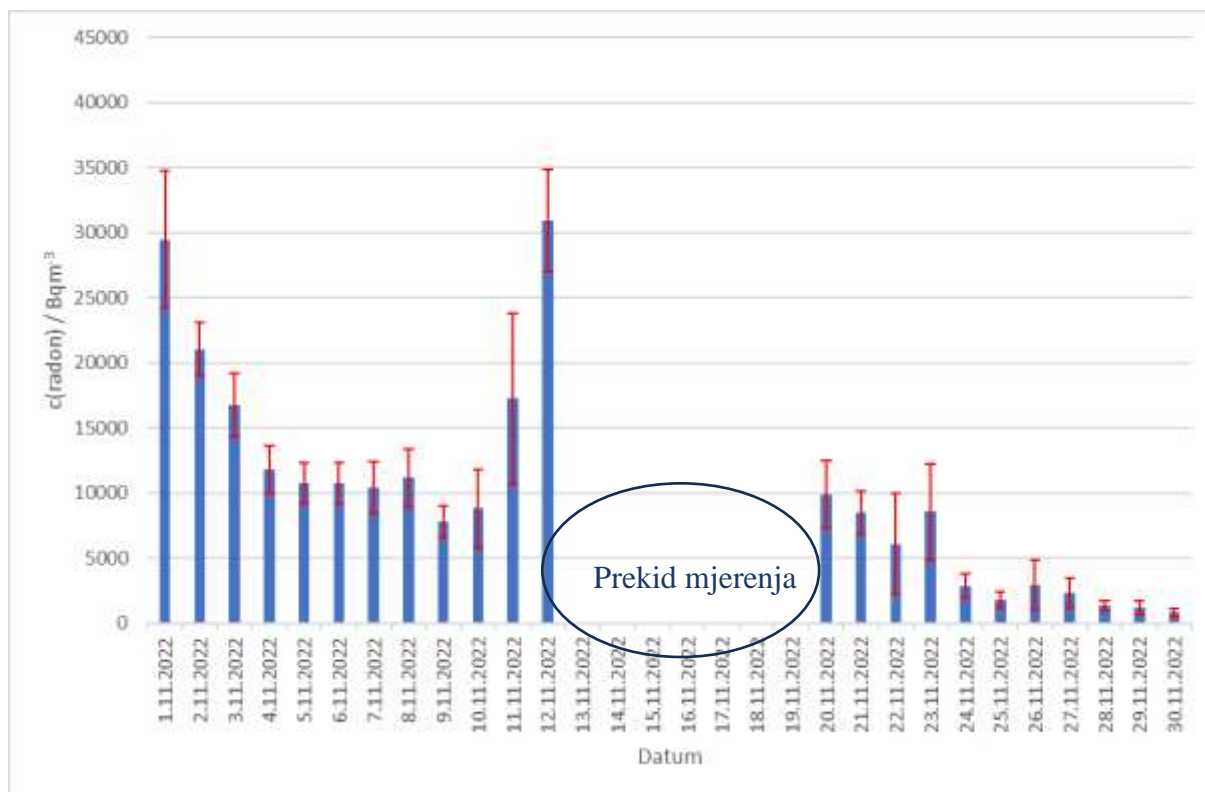
4.1.3. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u listopadu 2022.



Slika 15. Koncentracije radona u Šparožnoj pećini u listopadu 2022. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

Sa slike 15. može se očitati da su se mjerenja u listopadu 2022. provodila kontinuirano kroz cijeli mjesec te da se prosječna koncentracija radona kretala između 5 000 Bq/m³ pa sve do 39 000 Bq/m³. Maksimalne prosječne vrijednosti zabilježene su 30. listopada s iznosom od 39 685 Bq/m³, dok je trenutni maksimum mjerenja od 46 848 Bq/m³ izmjeren 30.10.2022. Iz grafa sa slike 15. može se vidjeti da su koncentracije radona na samom početku mjeseca te u periodu od 22.og do 25.og listopada bile male, nakon čega je došlo do značajnog porasta.

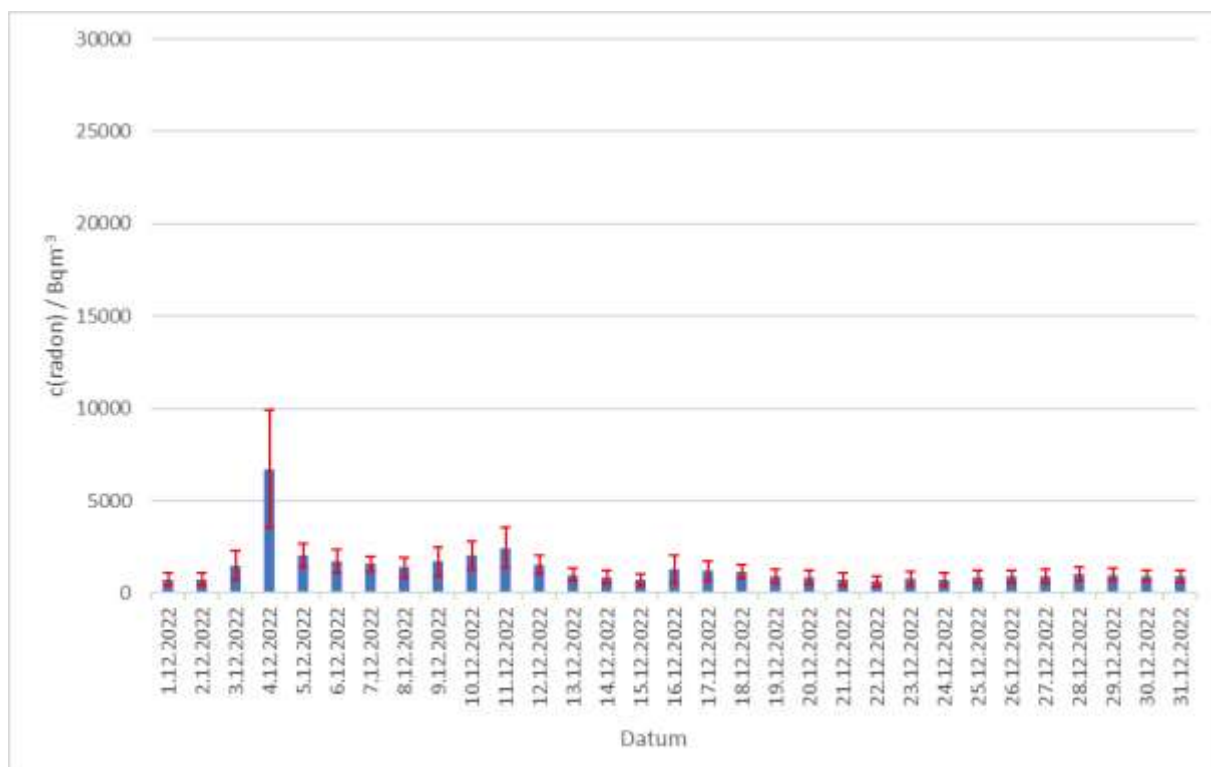
4.1.4. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u studenom 2022.



Slika 16. Koncentracije radona u Šparožnoj pećini u studenom 2022. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

Na slici 16. prikazane su prosječne dnevne vrijednosti koncentracije radona kroz studeni 2022, s prekidom mjerenja od 13.11.2022. do 20.11.2022. Prosječna koncentracija radona kretala se od 830 Bq/m³ do 31 000 Bq/m³. Maksimalne prosječne vrijednosti koncentracije radona zabilježene su 12-og studenog te su iznosile 30 953 Bq/m³, dok je trenutni maksimum mjerenja od 39 552 Bq/m³ izmjeren 01.11.2022. Iz slike 16 vidi se da je u mjesecu studenom došlo do postepenog pada koncentracije radona od početka prema kraju mjeseca, što je najvjerojatnije uzrokovano padom vanjske temperature zraka. Niža temperatura u okolišu u odnosu na špilju omogućila je povoljniji temperaturni gradijent te je dovela do bolje cirkulacije zraka u špilji i posljedično s time i smanjenju koncentracije radona.

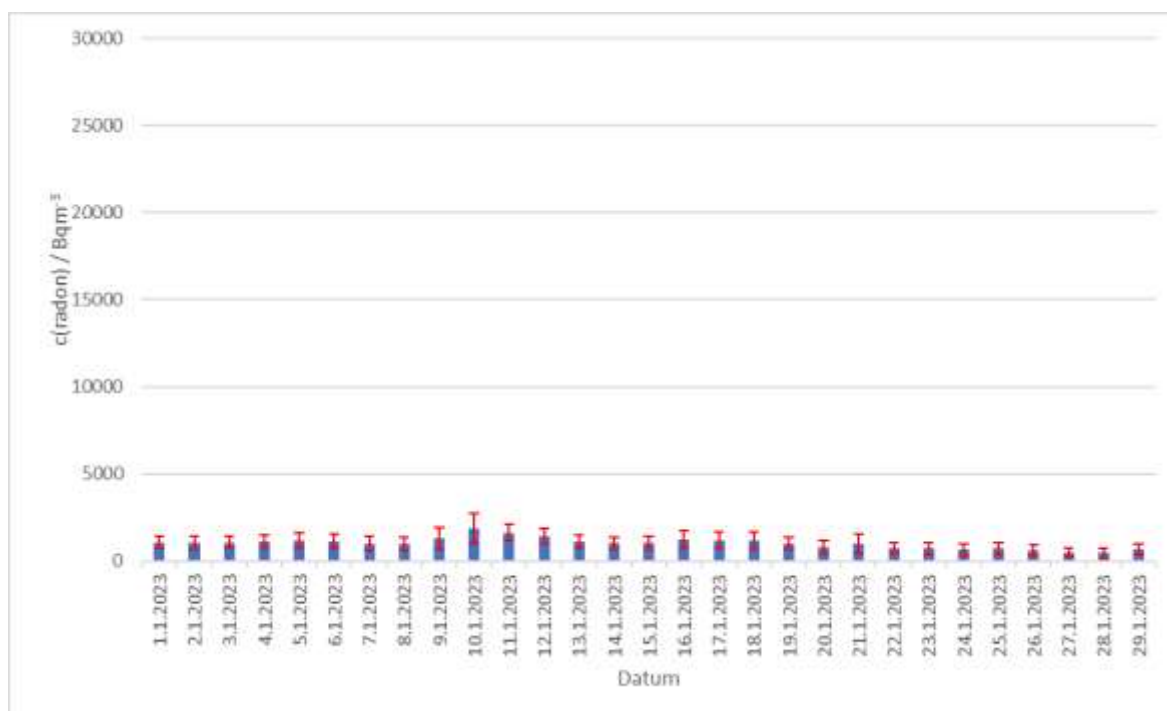
4.1.5. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u prosincu 2022.



Slika 17. Koncentracije radona u Šparožnoj pećini u prosincu 2022. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

Na slici 17. prikazane su prosječne dnevne koncentracije radona kroz prosinac 2022. Iz slike je vidljivo da se prosječna dnevna koncentracija radona u mjesecu prosincu kretala od 600 Bq/m³ do 2 000 Bq/m³, s naglim skokom 4.12.2022. vrijednosti koncentracije radona od 6 716 Bq/m³.

4.1.6. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Šparožnoj pećini u siječnju 2023.

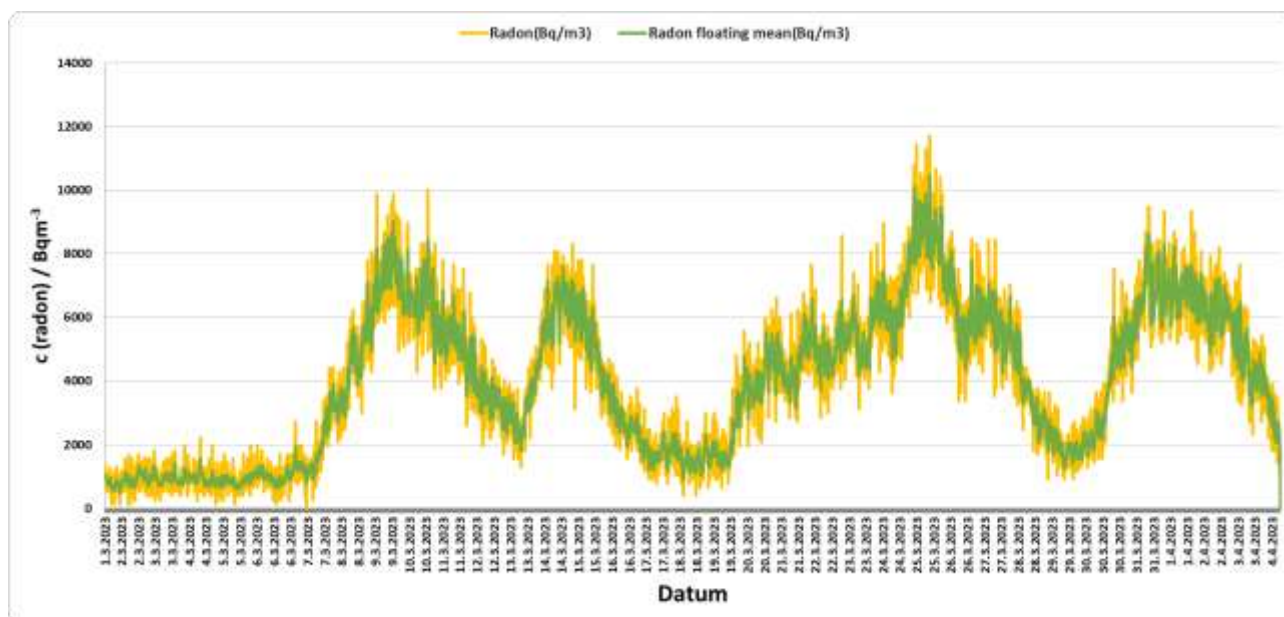


Slika 18. Koncentracije radona u Šparožnoj pećini u siječnju 2023. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

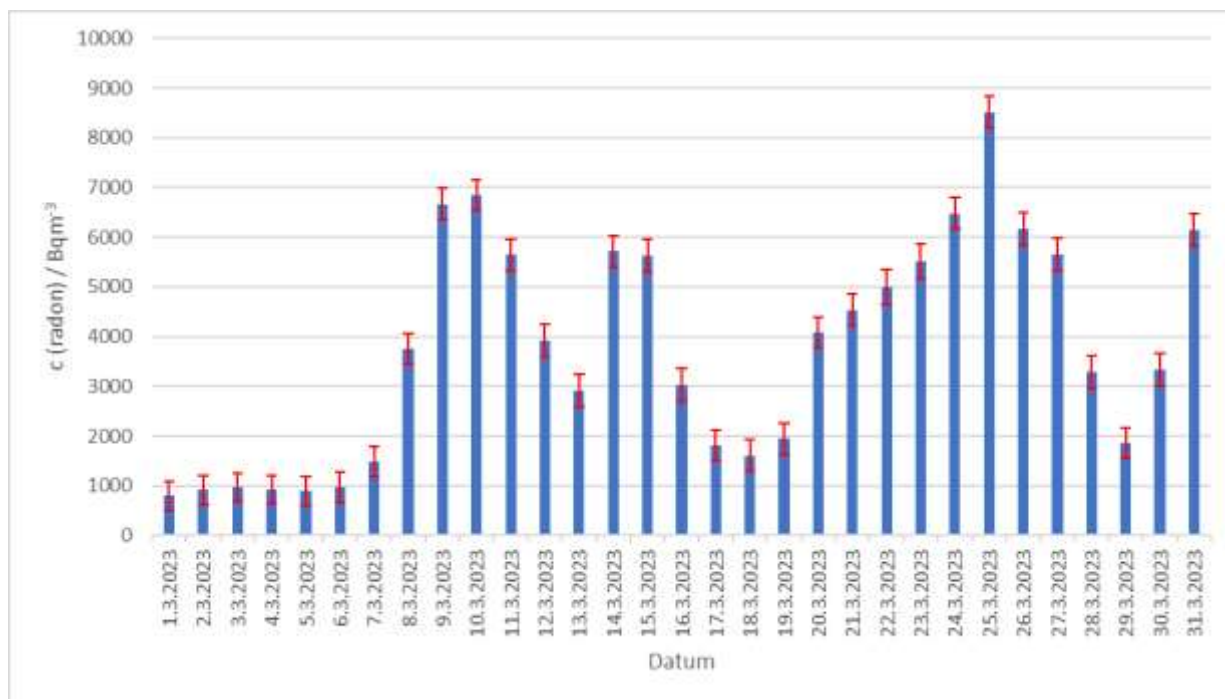
Na slici 18. prikazano je kretanje prosječne dnevne koncentracije radona tijekom siječnja 2023. godine sa završnim danom 29.01.2023. Prosječna dnevna koncentracija radona kretala se u rasponu od 420 Bq/m³ do 1 900 Bq/m³. Maksimalne prosječne dnevne vrijednosti koncentracije radona od 1 863 Bq/m³ zabilježene su 10. siječnja. Trenutni maksimum mjerenja koji je iznosio 5072 Bq/m³ izmjeren je također 10.01.2023. Iz grafa se vidi da su koncentracije radona u siječnju su relativno male i ustaljene, a prema kraju mjeseca može se primijetiti lagani pad koncentracije radona.

4.2. Rezultati mjerenja koncentracije radona u Grgosovoj špilji

Na slici 19. prikazana su mjerenja dnevne koncentracije radona u Grgosovoj špilji koja su se provodila od 01.03.2023. do 04.04.2023. Postavljeni uređaj može uz koncentraciju radona mjeriti i druge parametre kao što je temperatura. Iz slike 19. vidi se da je koncentracija radona na početku mjeseca ožujka bila niska, a do porasta koncentracije dolazi 08.03.2023. te raste postepeno do kraja mjeseca uz povremene oscilacije.



Slika 19. Kretanje koncentracije radona u periodu od 01. 03. 2023. do 04. 04. 2023. u Grgosovoj špilji.



Slika 20. Koncentracije radona u Grgosovoj špilji u ožujku 2023. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

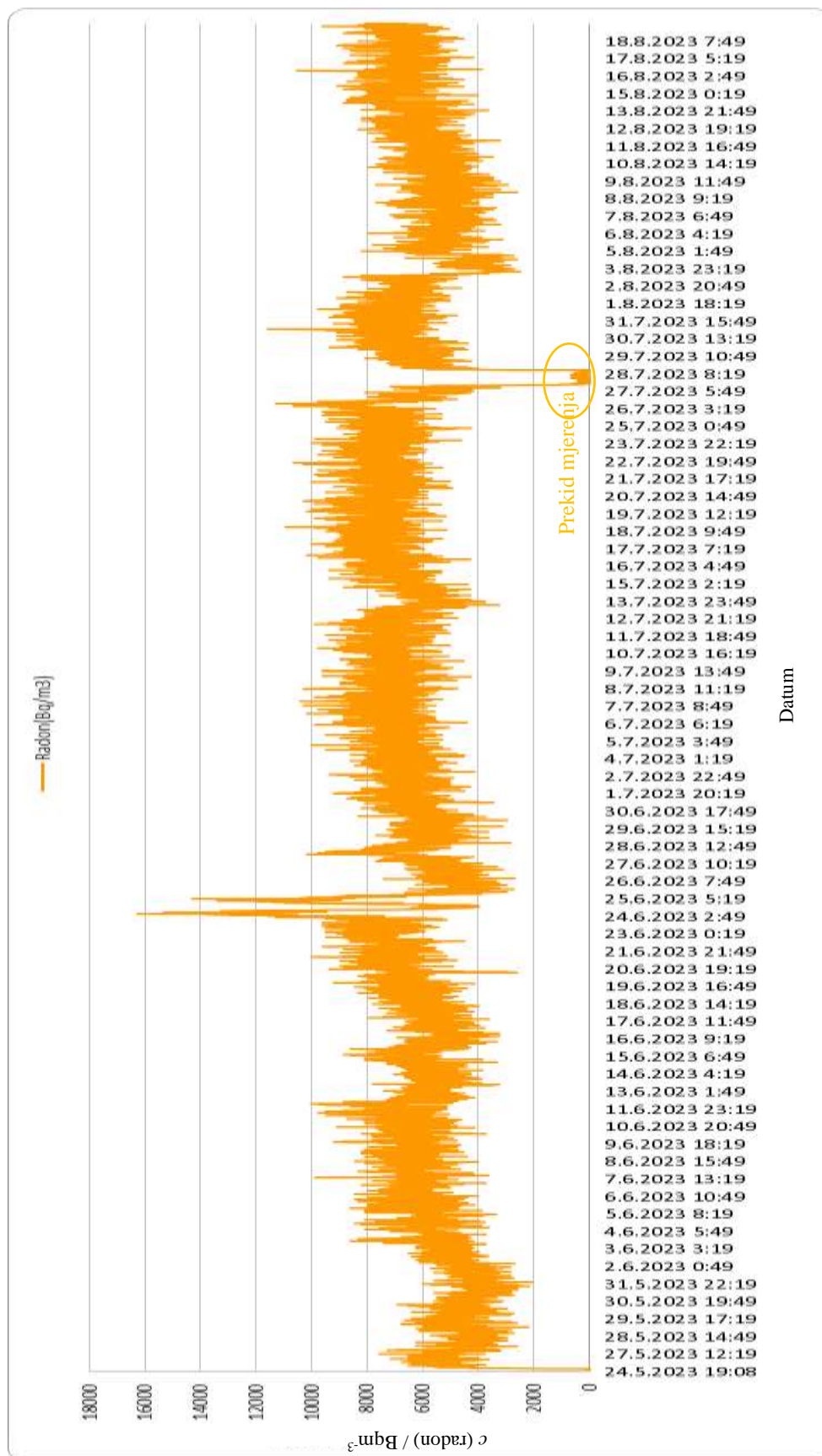
Na slici 20. prikazane su dnevne aritmetičke sredine koncentracije radona s odgovarajućim standardnim devijacijama u Bq/m³, a točne vrijednosti mogu se iščitati iz tablice 4. U obzir su uzete vrijednosti koje su očitane u periodu od 01.03.2023. do 31.03.2023. Najniža vrijednost dnevne aritmetičke sredine koncentracije radona izračunata je za vrijednosti koje su izmjerene 01.03.2023. iznosila je 800 Bq/m³ sa standardnom devijacijom od 294 Bq/m³. Najviša vrijednost izmjerena je 25.03.2023. te je iznosila $(8,5 \pm 1,3)$ kBq/m³. Aritmetička sredina svih koncentracija radona izmjerenih u mjesecu ožujku iznosila je $(3\ 827 \pm 335)$ Bq/m³.

Tablica 4. Prosječne dnevne koncentracije radona (Bq/m^3) izmjerene u Grgosovoj špilji u ožujku 2023.

DATUM	ARITMETIČKA SREDINA c (radon) Bq/m^3	Standardna devijacija Bq/m^3	MINIMUM Bq/m^3	MAKSIMUM Bq/m^3
1.3.2023.	800	290	130	1 428
2.3.2023.	920	390	130	1 688
3.3.2023.	970	360	260	1 952
4.3.2023.	930	380	130	2 208
5.3.2023.	890	340	130	1 952
6.3.2023.	970	360	130	1 952
7.3.2023.	1 490	590	130	3 376
8.3.2023.	3 760	990	1 952	6 240
9.3.2023.	6 670	1 350	2 992	9 888
10.3.2023.	6 840	1 100	4 288	10 016
11.3.2023.	5 650	1 050	3 768	8 320
12.3.2023.	3 920	990	1 952	6 752
13.3.2023.	2 910	730	1 300	4 672
14.3.2023.	5 700	1 200	3 248	8 064
15.3.2023.	5 630	1 180	2 856	8 320
16.3.2023.	3 040	760	1 560	4 672
17.3.2023.	1 810	570	780	3 768
18.3.2023.	1 610	600	390	3 512
19.3.2023.	1 950	800	650	4 800
20.3.2023.	4 080	920	1 952	6 240
21.3.2023.	4 540	990	2 728	6 752
22.3.2023.	5 000	910	2 856	8 576
23.3.2023.	5 510	960	3 120	8 320
24.3.2023.	6 480	1 200	3 640	8 960
25.3.2023.	8 520	1 290	5 856	11 712
26.3.2023.	6 170	1 180	3 376	8 704
27.3.2023.	5 660	980	3 512	8 448
28.3.2023.	3 290	1 000	910	6 496
29.3.2023.	1 860	510	910	3 248
30.3.2023.	3 340	1 340	1 300	7 536
31.3.2023.	6 150	1 250	3 376	9 472

4.3. Rezultati mjerenja koncentracije radona u špilji Biserujka

Mjerenja u špilji Biserujka provodila su se od kraja svibnja do sredine kolovoza odnosno do 19.08.2023. godine. Prilikom obrade podataka u obzir nisu bili uzeti podatci izmjereni u svibnju, zbog kratkog perioda mjerenja od svega 5 dana. Na slici 21. prikazano je kretanje koncentracije radona u periodu od 26. svibnja do 18. kolovoza 2023. Na slici se vidi da je u periodu od 27.07. do 28.07. bio prekid mjerenja zbog punjenja uređaja. U tablici 6. prikazane su aritmetičke sredine koncentracije radona po mjesecima sa standardnom devijacijom tijekom perioda mjerenja. Aritmetička sredina koncentracije radona za cjelokupni period mjerenja iznosila je $(6,4 \pm 1,5)$ kBq/m³. Postavljeni uređaj unutar špilje Biserujka mjerio je i temperaturu u špilji koja je bila gotovo konstantna te je njena vrijednost iznosila $(12,0 \pm 1,4)$ °C.

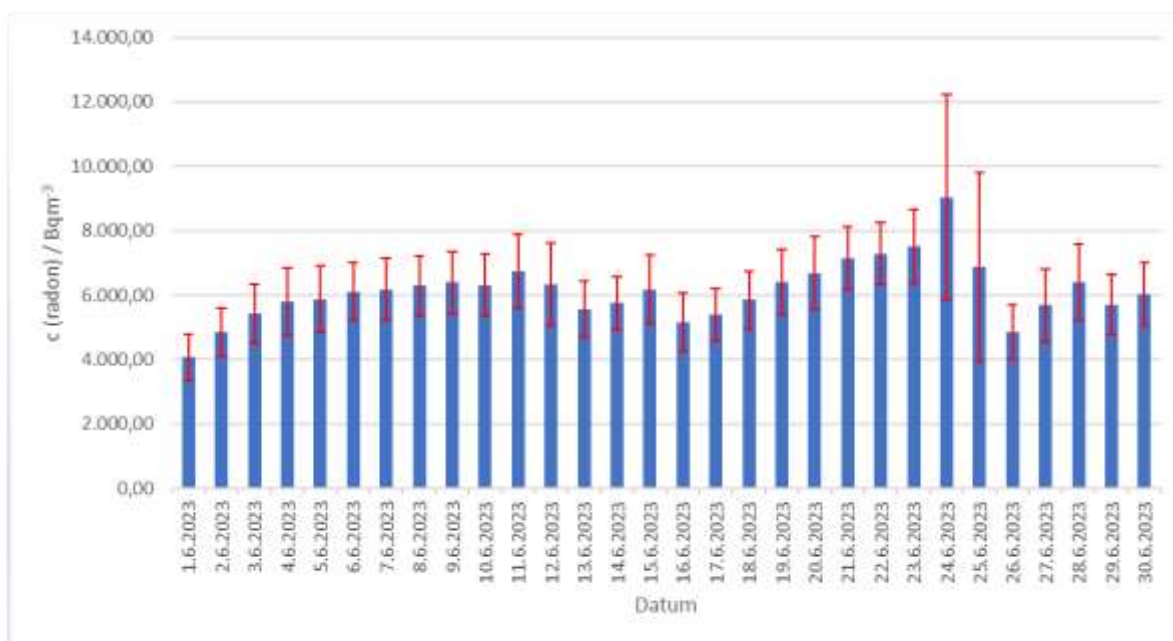


Slika 21. Kretanje koncentracije radona u periodu od 24.05.2023. do 18.08.2023. u špilji Biserujka.

Tablica 6. Prosječne mjesečne koncentracije radona (Bq/m^3) izmjerene u špilji Biserujka u periodu od lipnja 2023. do kolovoza 2023.

Mjeseci	Aritmetička sredina koncentracije radona (Bq/m^3)	Standardna devijacija (Bq/m^3)	Min (Bq/m^3)	Max (Bq/m^3)
Lipanj 2023.	6133	1530	2080	16256
Srpanj 2023.	7060	1150	3248	11552
Kolovoz 2023.	5948*	1260	2472	10528

* Mjerenja su vršena samo tijekom jedne polovice mjeseca



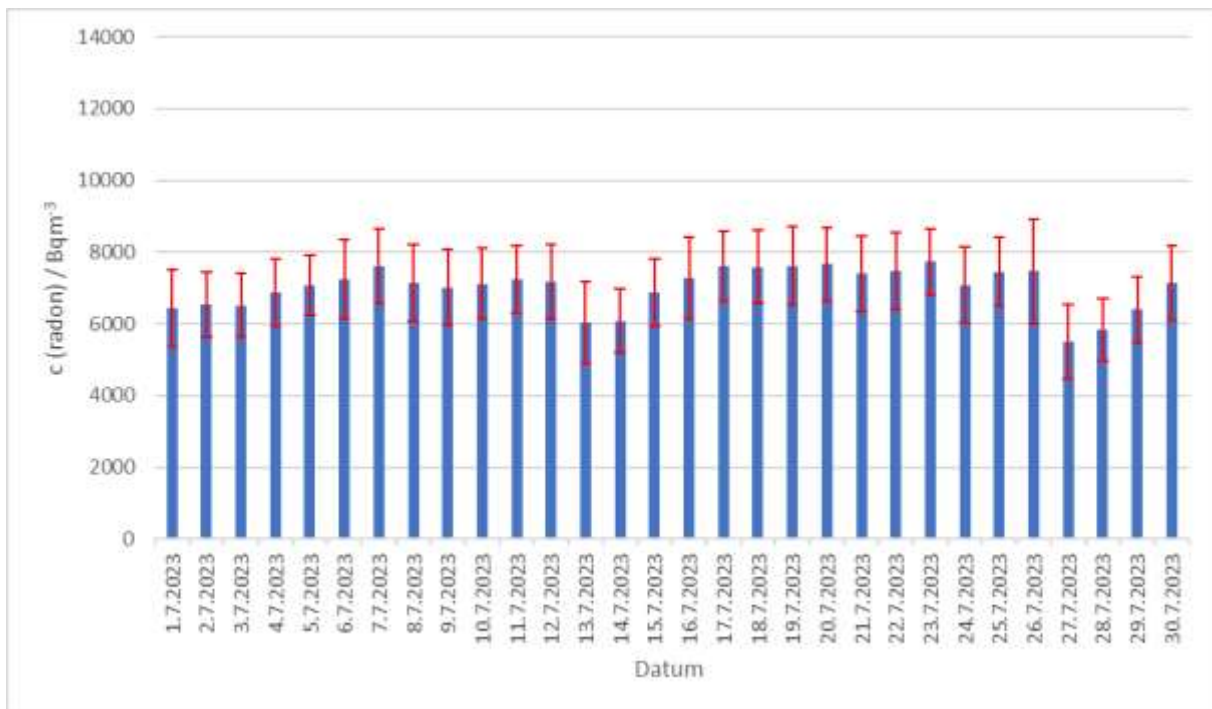
Slika 22. Koncentracije radona u špilji Biserujka u lipnju 2023. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

Na slici 22. prikazane su aritmetičke sredine dnevnih koncentracija radona u špilji Biserujka počevši s 01.06.2023. te završno s 30.06.2023. Iz slike 22. te tablice 7. vidljivo je da su se

prosječne vrijednosti koncentracije radona kretale između 4 i 9 kBq/m³ te nisu bili primijećeni bitni padovi ili porasti koncentracije radona u lipnju. Najniža vrijednost aritmetičke sredine izmjerena je 31.05.2023. godine te je iznosila (3,9 ± 0,8) kBq/m³, dok je najviša vrijednost izmjerena 24. 06. 2023. te je iznosila (9,0 ± 3,2) kBq/m³. Aritmetička sredina svih provedenih mjerenja iznosila je (6,4 ± 1,5) kBq/m³.

Tablica 7. Prosječne dnevne koncentracije radona izmjerene u špilji Biserujka u lipnju 2023.

Datum	Aritmetička sredina koncentracije radona (Bq/m ³)	Standardna devijacija (Bq/m ³)	Min (Bq/m ³)	Max (Bq/m ³)
1.6.2023.	4070	720	2080	5712
2.6.2023.	4860	730	2728	6496
3.6.2023.	5430	910	3768	8576
4.6.2023.	5800	1040	3640	8448
5.6.2023.	5880	1030	3376	8576
6.6.2023.	6120	890	4032	8448
7.6.2023.	6180	960	3640	9888
8.6.2023.	6300	920	4032	8448
9.6.2023.	6390	970	4544	9216
10.6.2023.	6310	960	3768	9088
11.6.2023.	6760	1140	4672	9760
12.6.2023.	6340	1290	4160	10016
13.6.2023.	5560	880	3248	7808
14.6.2023.	5760	820	3376	7808
15.6.2023.	6190	1040	3904	8832
16.6.2023.	5150	910	3248	7280
17.6.2023.	5390	810	3640	7936
18.6.2023.	5860	890	4032	7936
19.6.2023.	6410	1000	4160	9216
20.6.2023.	6680	1130	2624	9344
21.6.2023.	7140	970	4800	10016
22.6.2023.	7290	950	4544	9600
23.6.2023.	7520	1140	5200	9600
24.6.2023.	9040	3180	4032	16256
25.6.2023.	6880	2940	2728	14304
26.6.2023.	4860	850	2728	7408
27.6.2023.	5690	1120	3120	10144
28.6.2023.	6410	1190	2856	9760
29.6.2023.	5710	920	3120	7664
30.6.2023.	6030	980	2992	8320

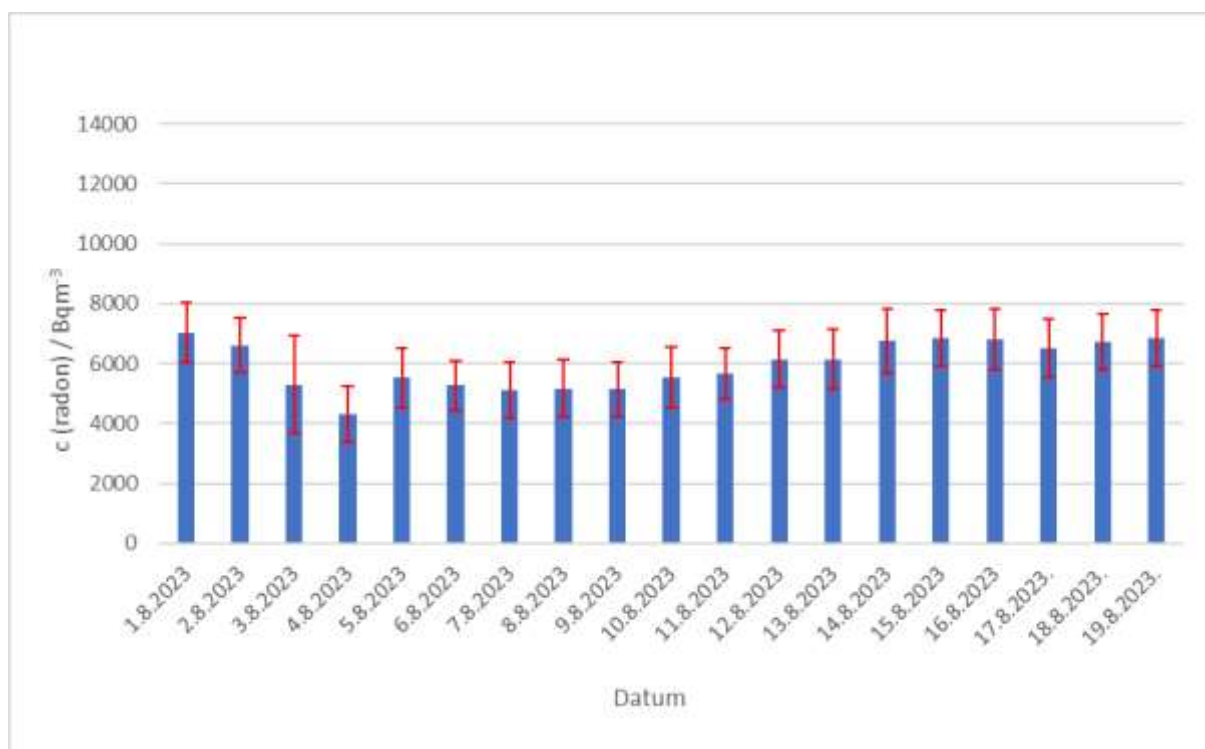


Slika 23. Koncentracije radona u špilji Biserujka u srpnju 2023. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

Na slici 23. prikazane su dnevne aritmetičke sredine izmjerenih razina radona u špilji Biserujka počevši s 01.07.2023. te zaključno s 30.07.2023. Iz slike 23. te tablice 8. vidljivo je da su se vrijednosti koncentracije radona kretale između 5 i 7 kBq/m³. Najniža vrijednost dnevne koncentracije radona izmjerena je 27.07.2023. godine te je iznosila (5,5 ± 1,0) kBq/m³, dok je najviša vrijednost izmjerena 23.07.2023. te je iznosila (7,7 ± 0,9) kBq/m³.

Tablica 8. Prosječne dnevne koncentracije radona (Bq/m^3) izmjerene u špilji Biserujka u srpnju 2023.

Datum	Aritmetička sredina koncentracije radona (Bq/m^3)	Standardna devijacija (Bq/m^3)	Min (Bq/m^3)	Max (Bq/m^3)
1.7.2023.	6436	1060	3512	9216
2.7.2023.	6539	892	4288	9088
3.7.2023.	6508	885	4160	9344
4.7.2023.	6869	929	4544	10016
5.7.2023.	7076	845	5200	9472
6.7.2023.	7232	1105	4416	10144
7.7.2023.	7609	1048	5328	10400
8.7.2023.	7138	1077	4800	10272
9.7.2023.	7020	1064	4288	9600
10.7.2023.	7121	984	4544	9760
11.7.2023.	7245	948	5072	9472
12.7.2023.	7162	1037	4800	9888
13.7.2023.	6046	1141	3248	8320
14.7.2023.	6085	877	4288	8832
15.7.2023.	6881	934	4416	9344
16.7.2023.	7265	1135	4288	10144
17.7.2023.	7597	971	5328	10016
18.7.2023.	7585	1015	5200	10912
19.7.2023.	7615	1085	5200	10144
20.7.2023.	7676	1020	5328	10272
21.7.2023.	7402	1052	4944	10016
22.7.2023.	7465	1068	5328	10656
23.7.2023.	7731	924	5856	10016
24.7.2023.	7079	1056	4288	9888
25.7.2023.	7453	961	5328	9600
26.7.2023.	7469	1453	4800	11296
27.7.2023.	5503	1033	3248	8064
28.7.2023.	5843	864	4032	7280
29.7.2023.	6397	920	4288	9344
30.7.2023.	7133	1037	4416	9088



Slika 24. Koncentracije radona u špilji Biserujka u kolovozu 2023. Na slici su prikazane aritmetičke sredine sa standardnim devijacijama dnevnih koncentracija radona.

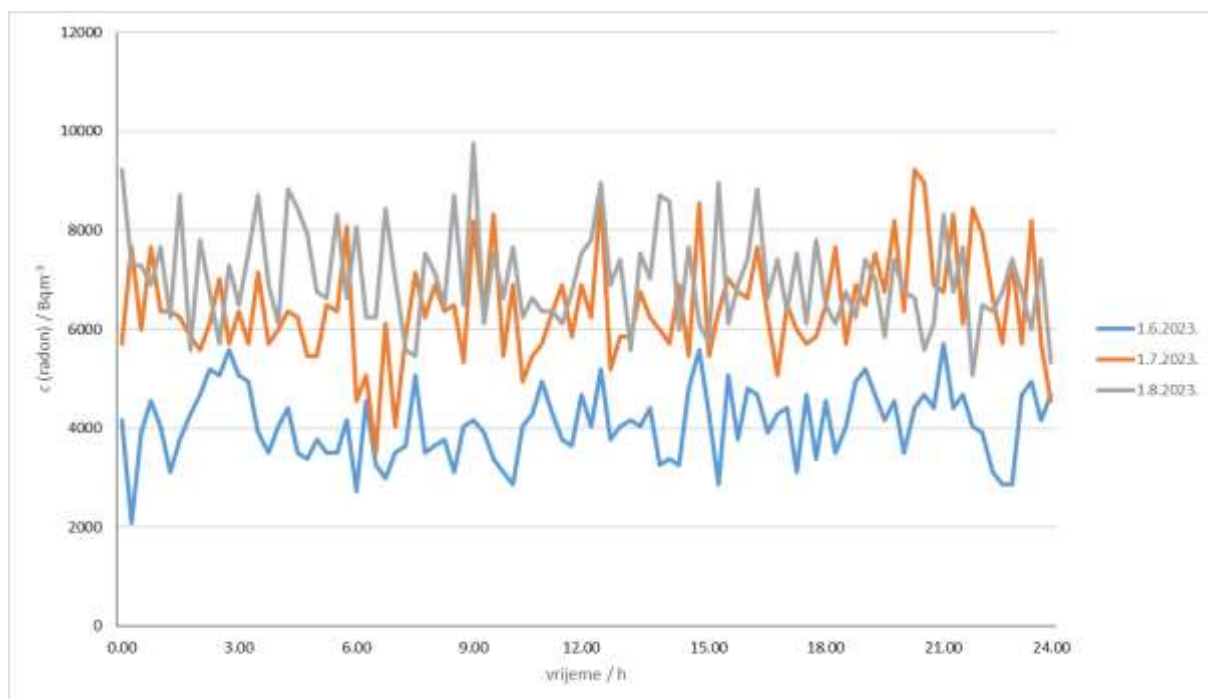
Na slici 24. prikazane su aritmetičke sredine izmjerenih dnevnih razina radona sa standardnim devijacijama u špilji Biserujka u periodu od 01.08.2023. do 19.08.2023. Iz priložene slike 24. te iz tablice 9. može se vidjeti da su se vrijednosti koncentracije radona kretale između (4,3 i 7,0) kBq/m³. Najniža vrijednost aritmetičke sredine koncentracije radona izmjerena 04.08.2023. godine iznosila je (4,3 ± 0,9) kBq/m³, a najviša vrijednost bila je izmjerena 01.08.2023. i iznosila je (7,0 ± 0,9) kBq/m³.

Tablica 9. Prosječne dnevne koncentracije radona (Bq/m^3) izmjerene u špilji Biserujka od 01.08.2023. do 19.08.2023.

Datum	Aritmetička sredina koncentracije radona (Bq/m^3)	Standardna devijacija (Bq/m^3)	Min (Bq/m^3)	Max (Bq/m^3)
1.8.2023.	7037	997	5072	9760
2.8.2023.	6617	916	4672	9088
3.8.2023.	5299	1629	2472	8832
4.8.2023.	4307	920	2600	6624
5.8.2023.	5524	978	3120	8192
6.8.2023.	5277	828	3248	7936
7.8.2023.	5132	925	3376	7280
8.8.2023.	5177	965	2600	7664
9.8.2023.	5142	914	2992	7664
10.8.2023.	5556	1012	3512	7936
11.8.2023.	5661	847	3768	7808
12.8.2023.	6154	946	3248	8320
13.8.2023.	6153	1004	3640	8192
14.8.2023.	6754	1066	4032	8832
15.8.2023.	6850	946	4544	9088
16.8.2023.	6806	1011	3904	10528
17.8.2023.	6519	987	4160	8832
18.8.2023.	6708	932	4544	9088
19.8.2023.	6855	922	5072	9600

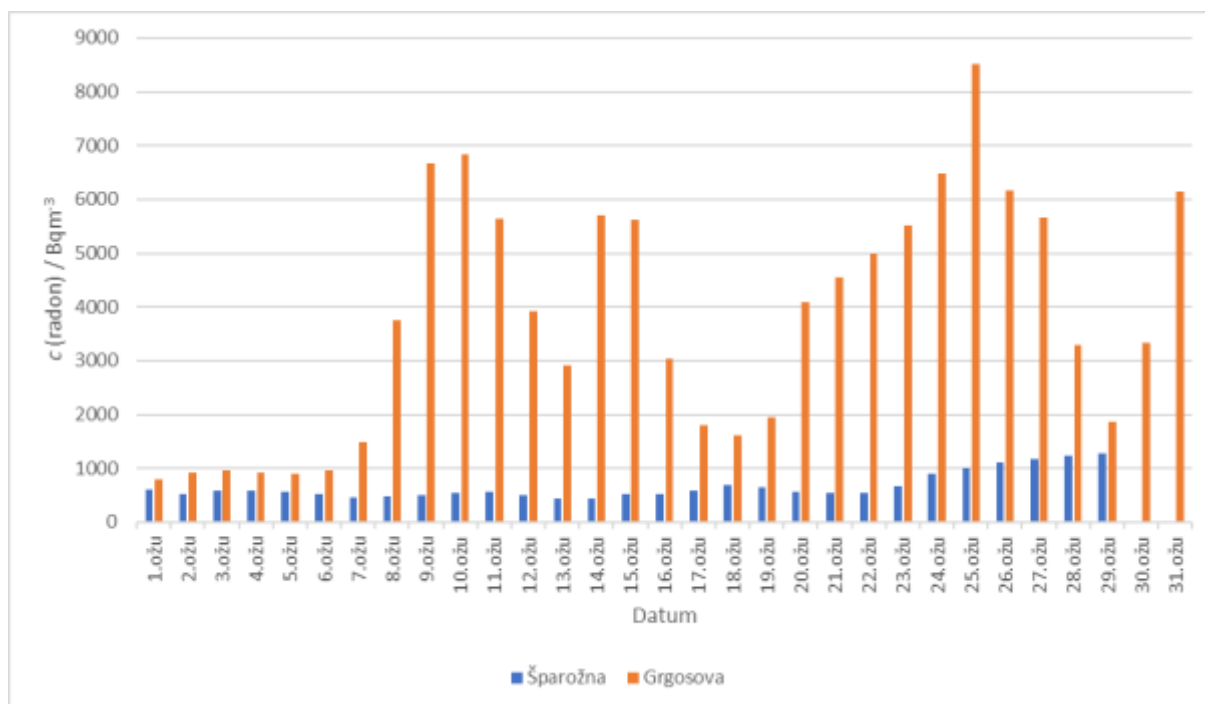
4.4. Kretanje koncentracije radona tijekom dana

Kako bi se pratile dnevna kretanja koncentracije radona nasumično su odabrana tri dana u mjenom periodu u špilji Biserujka. Odabrani su dani 01.06.2023., 01.07.2023. te 01.08.2023. Sa slike 25. vidi se da ne postoje periodična ponavljanja koncentracije radona kroz dan. Nadalje sa slike nije vidljivo da unutar radnog vremena špilje u periodu od 9 do 18 sati, ulazak posjetitelja u špilju bitno utječe na promjenu koncentracije radona u špilji. Također se može primijetiti da je koncentracija radona u špilji 1. lipnja bila znatno niža nego li 1. srpnja i 1. kolovoza, što je najvjerojatnije posljedica viših vanjskih temperatura, te slabije ventilacije zraka iz špilje u vanjski prostor.



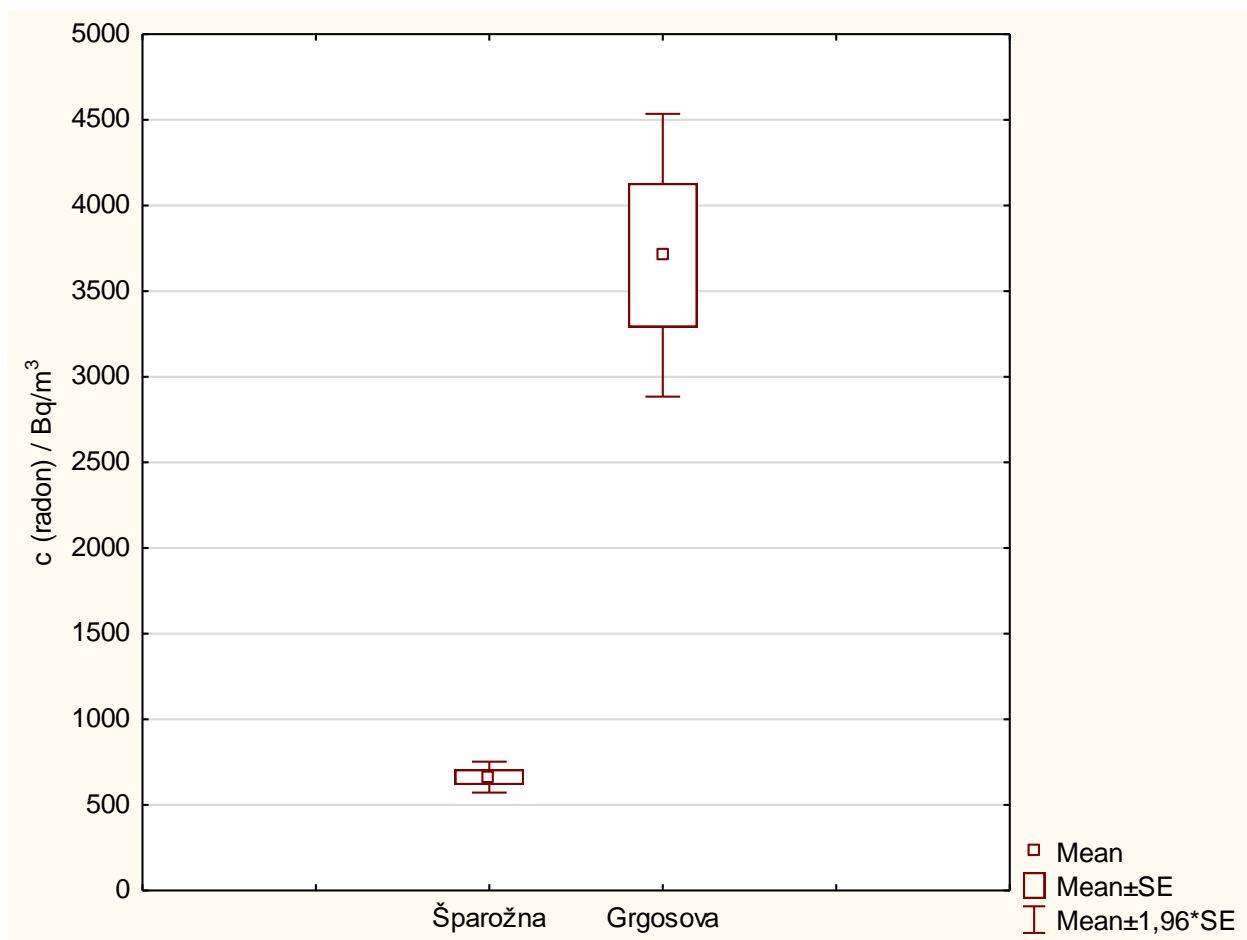
Slika 25. Dnevno kretanje koncentracije radona (Bq/m^3) u špilji Biserujka.

4.5. Usporedba koncentracija radona u Šparožnoj i Grgosovoj špilji



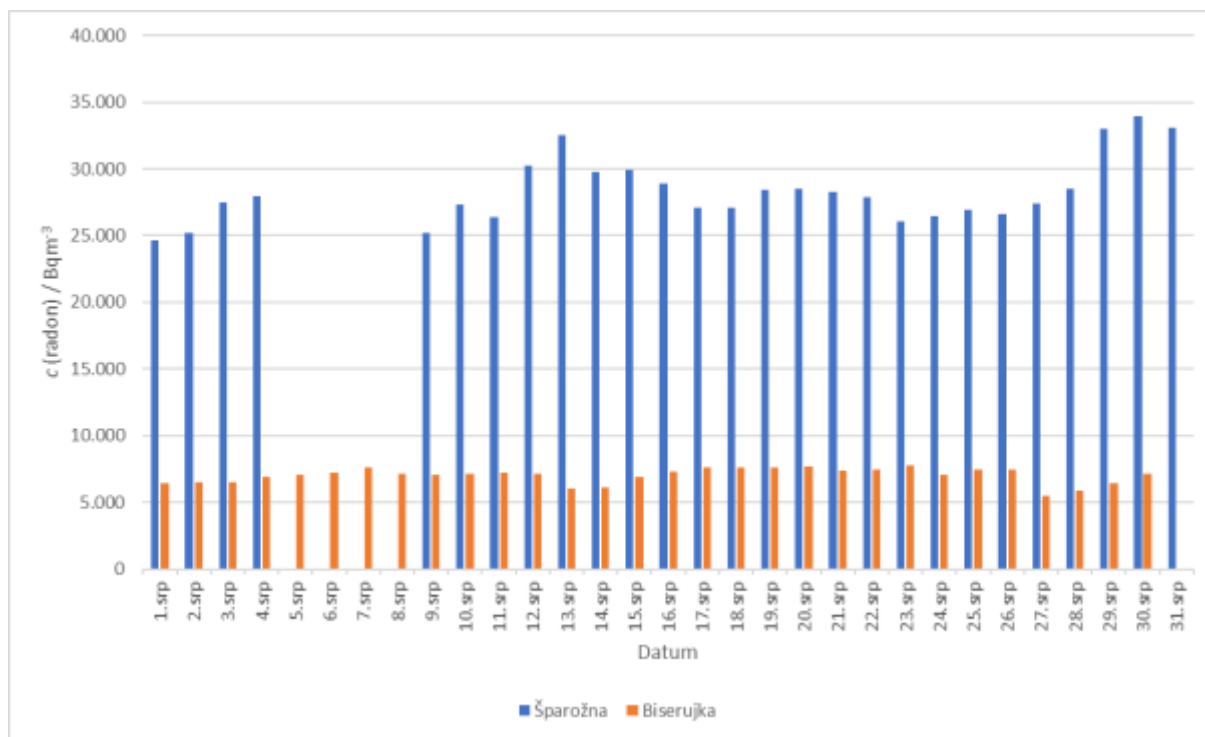
Slika 26. Usporedba koncentracija radona u Šparožnoj i Grgosovoj špilji mjerenih u mjesecu ožujku. Plavi stupići prikazuju vrijednosti aritmetičkih sredina dnevne koncentracije radona u Šparožnoj, a narančasti u Grgosovoj špilji.

Usporedba koncentracije radona u Šparožnoj i Grgosovoj špilji rađena je na temelju podataka izmjerenih u ožujku 2022. u Šparožnoj pećini te u ožujku 2023. godine u Grgosovoj špilji. Slika 26. prikazuje usporedno kretanje dnevnih koncentracija radona (Bq/m^3) u ožujku za obje špilje. Koncentracije radona u Grgosovoj špilji veće su nego koncentracije iz Šparožne pećine, što je već vidljivo iz grafičkog prikaza na slici 26. U usporedbu sa Studentovim t-testom bilo je uzeto 29 uzoraka. U Šparožnoj pećini aritmetička sredina koncentracije radona po danima u mjesecu ožujku 2022. godine iznosila je 622 Bq/m^3 , a u Grgosovoj špilji u mjesecu ožujku 2023. iznosila je 3709 Bq/m^3 . Usporedbom sa Studentovim t-testom za nezavisne uzorke utvrđeno je da se aritmetičke sredine koncentracije radona u ove dvije špilje statistički značajno razlikuju ($t = 7,190$; $p \ll 0,05$) što se vidi iz slike 27.



Slika 27. Usporedba koncentracija radona u Šparožnoj i Grgosovoj špilji u mjesecu ožujku.

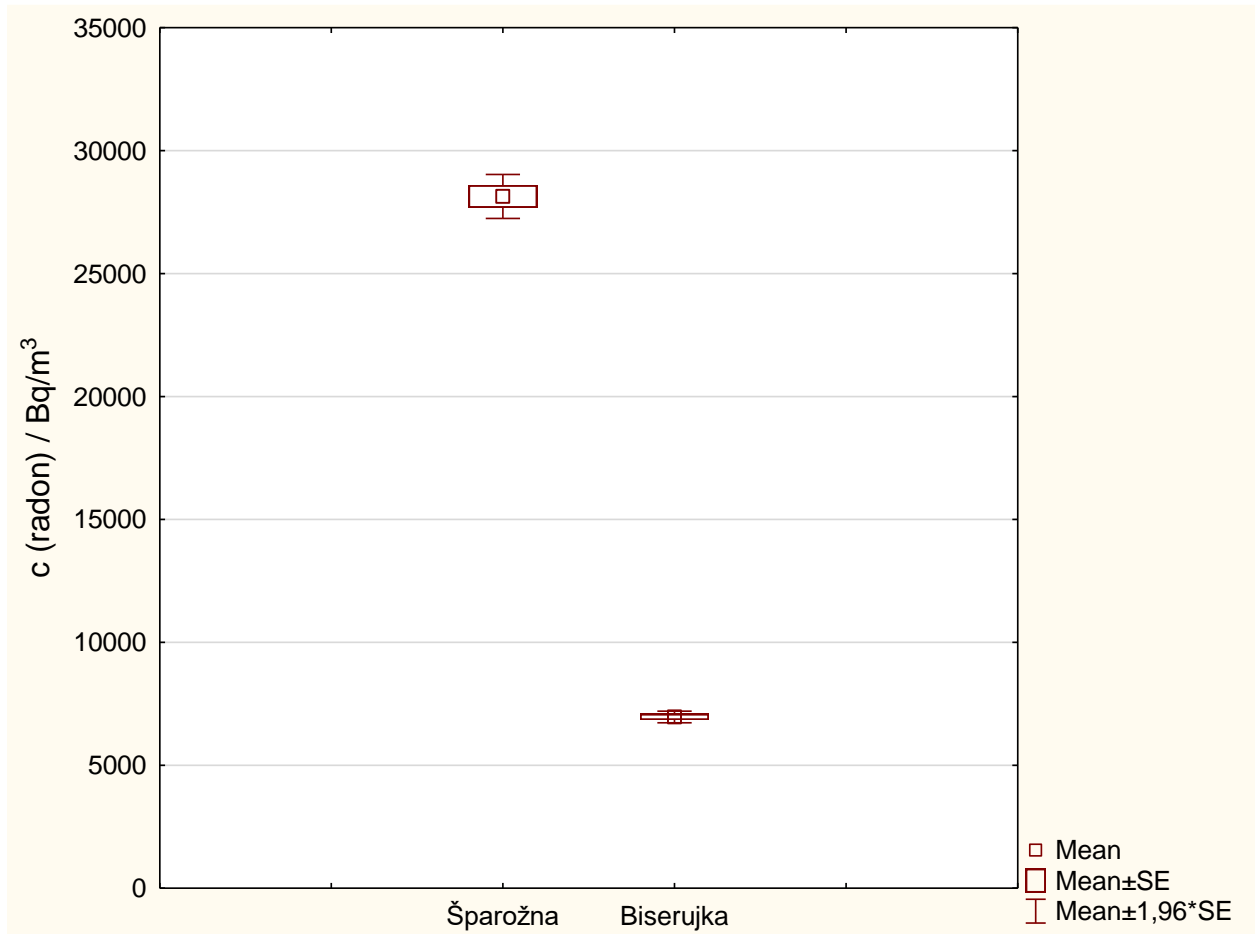
4.6. Usporedba koncentracije radona u špilji Biserujka i Šparožnoj pećini



Slika 28. Usporedba koncentracija radona u Šparožnoj i špilji Biserujka u mjesecu lipnju. Plavi stupići prikazuju vrijednosti dnevne koncentracije radona u Šparožnoj, a narančasti u špilji Biserujka.

Usporedba koncentracija radona u špilji Biserujka i Šparožnoj pećini rađena je na temelju podataka izmjerenih u lipnju 2022. u Šparožnoj pećini te također u lipnju ali 2023. godine u špilji Biserujka. Slika 28. prikazuje usporedno dnevno kretanje koncentracije radona (Bq/m^3) u lipnju. Koncentracije radona u Šparožnoj pećini značajno su veće od onih u špilji Biserujka. Već iz grafičkog prikaza sa slike 28. uviđa se da je koncentracija radona u Šparožnoj pećini puno veća nego u špilji Biserujka. Za dane 05., 06., 07. te 08. lipnja u Šparožnoj pećini bio je prekid mjerenja stoga ti podatci nisu uzeti u obzir prilikom usporedbe. Studentovim t-testom za nezavisne uzorke uspoređene su aritmetičke sredine dnevne koncentracije radona u mjesecu lipnju ove dvije špilje. Aritmetička sredina dnevne koncentracije radona u mjesecu lipnju 2022. iznosila je $28\,135 \text{ Bq/m}^3$ u Šparožnoj pećini dok je u Biserujki aritmetička sredina dnevne koncentracije radona u mjesecu lipnju 2023. iznosila 6966 Bq/m^3 . Studentovim t-testom za

nezavisne uzorke uspoređene su aritmetičke sredine koncentracije radona te je utvrđeno da se statistički značajno razlikuju ($t = 44,75$; $p \ll 0,05$) što se vidi i na slici 29.



Slika 29. Usporedba koncentracija radona u Šparožnoj pećini i špilji Biserujka u mjesecu lipnju.

4.7. Procjena efektivne doze koju prime posjetitelji i turistički vodiči u špiljama

Godišnja efektivna doza prema preporuci Međunarodne komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) ne bi smjela prelaziti vrijednosti od 3 mSv godišnje za posjetitelje te 20 mSv godišnje (usrednjeno u petogodišnjem razdoblju) za zaposlenike u špiljama, no brojni zaposlenici špilja izloženi su višim koncentracijama radona u špiljama od onih koje su zakonski preporučene. Stoga je najprihvatljiviji način za smanjenje primljene efektivne doze ograničavanje broja radnih sati koje zaposlenici špilja smiju provesti u istoj.

U ovom odlomku izračunat je maksimalni dopušteni broj sati koliko osobe mogu boraviti unutar špilja kako njihova efektivna doza ne bi prekoračila dopuštene vrijednosti. Izračun se vršio prema jednadžbi koja je navedena u ICRP Publikaciji 137 (24) za preporučene doze radona u speleološkim objektima za umjerenu fizičku aktivnost. Efektivna doza koju primaju posjetitelji od radona i njegovih potomaka izračunata je kao umnožak prosječne koncentracije radona i vremena izloženosti uz korištenje faktora pretvorbe za špilje, koji po preporuci ICRP Publikacije 137., iznosi $1,5 \times 10^{-5}$ mSv/Bqh/m³ (58). U izračunu se pretpostavlja da je prosječna brzina udisanja 1,2 m³/h i da ravnotežni faktor između radona i njegovih potomaka iznosi 0,4. Prema tome, u Šparožnoj pećini boravak unutar mjesec dana ne bi trebao biti dulji od 92 h ako prosječna vrijednost koncentracije radona u ljetnom periodu iznosi 15,5 kBq/m³, dok su u zimskom razdoblju koncentracije radona znatno manje pa boravak može biti znatno duži. U Grgosovoj špilji aritmetička sredina izmjerenih koncentracije radona iznosila je 3835 Bq/m³, pa bi sukladno tome bilo poželjno da boravak unutar špilje u periodu od mjesec dana ne prelazi 347 sati. U špilji Biserujka na temelju vrijednosti aritmetičke sredine za ljetni period (odnosno period od lipnja do sredine kolovoza) koja iznosi 6367 Bq/m³, izračunato je da boravak u špilji Biserujka ne bi trebao biti duži od 209 sati u mjesec dana.

Biserujka je turistički uređena špilje te je zato izračunata vrijednost efektivne doze koju prime posjetitelji u 30 minutnom razgledavanju špilje. Izračun je izvršen prema formuli (1.3) iz ICRP Publikacije 65 (21).

$$E [\text{mSv}] = 7,923 \times 10^{-6} \times F \times c [\text{Bq/m}^3] \times t [\text{h}] \quad (1.3)$$

Dobivena vrijednost efektivne doze koju prime posjetitelji iznosila je $(10,1 \pm 2,4)$ μSv. To je vrijednost koja je višestruko manja od vrijednosti koja je zakonski dozvoljena i koja ne bi smjela prelaziti vrijednosti od 3 mSv godišnje za posjetitelje.

U špilji Biserujka zaposleni su turistički vodiči te su prema informacijama o njihovom radnom vremenu, izračunate su vrijednosti efektivne doze koju prime u godišnjem periodu. Špilja je otvorena za posjetitelje u periodu od 01.04. do 31.10., vodiči rade 6 dana tjedno te tijekom dana prosječno provedu dva i pol sata unutar same špilje, što znači da tijekom godine u špilji prosječno provedu 398 sati. Izračunom prema formuli (1.3) dobivena je vrijednost efektivne doze od 8,03 mSv godišnje, koja je prihvatljiva jer se nalazi ispod maksimalne dopuštene efektivne doze za zaposlene koja iznosi 20 mSv godišnje.

5. Rasprava

Radon (^{222}Rn) najveći je uzročnik prirodnog zračenja na Zemlji. Najveći problem predstavlja kada se oslobađa u zatvorenim prostorima koji nemaju kvalitetan protok zraka ili ventilaciju te se koncentracija radona ne može razrijediti što može utjecati na zdravlje pojedinaca te dovesti do razvoja bolesti. Upravo zbog njegove ključne uloge u prirodnoj radioaktivnosti na Zemlji te povećanoj opasnosti izlaganju u zatvorenim prostorima, kao što su špilje, velik broj istraživanja bavio se tom tematikom (25-33, 35-50, 56).

U ovome radu prikazani su rezultati mjerenja koncentracija radona u Šparožnoj pećini od rujna 2022. do siječnja 2023. Naša mjerenja nadovezuju se na mjerenja izvršena od prosinca 2021. do kolovoza 2022. godine, a prikazana u radu Šumonja i sur. (50). Podatci iz toga rada (50) također su uključeni i unutar ovog rada. Minimalna prosječna mjesečna razina koncentracije radona u Šparožnoj jami iznosila je 634 Bq/m^3 , a izmjerena je u veljači 2022., dok je maksimalna vrijednost prosječne mjesečne koncentracije radona izmjerena u srpnju 2022. te je iznosila $28\,460 \text{ Bq/m}^3$. Aritmetičke sredine mjesečnih koncentracija radona od svibnja do studenog kretale su se između 15 kBq/m^3 i 28 kBq/m^3 , dok su u ostatku godine prosječne koncentracije radona bile značajno manje od $0,63 \text{ kBq/m}^3$ do $1,4 \text{ kBq/m}^3$. Izmjerene vrijednosti pokazuju da su koncentracije radona u ljetnim mjesecima puno veće nego one izmjerene u zimskim mjesecima. Uređaj za mjerenje radona u Šparožnoj pećini bio postavljen u slijepom ogranku špilje, te na temelju sličnih istraživanja koja su provedena u špiljama sa slijepim ograncima u Europi (56) možemo pretpostaviti da na porast koncentracije radona u špiljama ljeti utječe smanjenje prirodne cirkulacije, koja postoji kao rezultat unutarnje-vanjske temperaturne razlike i uzgona. Zbog vanjske temperature koja je ljeti puno veća od stalnih temperatura u špiljama, oslobođeni radon iz tla zarobljen je s hladnijim, gušćim zrakom unutar špilje, što rezultira znatno višim koncentracijama radona u špiljama, pa time i u Šparožnoj pećini. Mikroklimatski uvjeti unutar špilja, kao što je temperatura, su ustaljeni. Temperatura u Šparožnoj pećini iznosila je oko $7,6 \text{ }^\circ\text{C}$, dok temperature u Kastavu u ljetnim mjesecima rastu preko 35°C čime se stvara nepovoljan temperaturni gradijent te se smanjuje mogućnost dobrog protoka zraka unutar špilje. Na koncentraciju radona u špiljama utječe i dubina same špilje, a radon je teži od ostalih molekula u zraku i zato se taloži pri tlu (46), što je špilja dublja radon se više koncentrira u dubljim dijelovima špilje te se teže može razrijediti. Morfologija same špilje također utječe na koncentracije radona koje su izmjerene unutar špilje. Ukoliko se špilja sastoji od velikih dvorana te ima više ulaza, dolazi do bolje ventilacije i smanjenja koncentracije radona što nije bio slučaj u Šparožnoj pećini, gdje su izmjerene velike koncentracije radona.

Koncentracija radona izmjerena u špiljama uvelike ovisi o količini uranija koji se nalazi u tlu, u čijem radioaktivnom raspadnom lancu nastaje i radon.

Nadalje, mjerenja su vršena u Grgosovoj špilji koja se nalazi na Žumberku. U njoj je mjerenje provedeno samo tijekom mjeseca ožujka 2023. godine te je izmjerena prosječna koncentracija radona koja je iznosila $3\,827\text{ Bq/m}^3$. Prilikom usporedbe koncentracije radona između ožujka 2022. u Šparožnoj i ožujka 2023. u Grgosovoj špilji dokazano je Studentovim t-testom da postoji statistički značajna razlika između aritmetičkih sredina koncentracije radona za ove dvije špilje. Koncentracija radona bila je značajno veća u Grgosovoj špilji, što je moguća posljedica različite strukture tla. Istraživanje koje je proveo Dalibor Paar (46) na temelju rezultata mjerenja u špiljama na Žumberku (44) i na Velebitu (45), pokazuje da postoji značajna razlika u koncentracijama radona između špilja na Žumberku te na krškom tlu u Velebitu, što se može povezati s mjerenjima provedenima u ovome radu. Na temelju tog istraživanja (46), pretpostavlja se da izvor povišene razine koncentracije radona u području Žumberka može biti i voda. Voda otapa radon te ga može prenositi na mjesta udaljena od mjesta nastanka plina. Vrijeme kontakta vode s vapnencem te mineralizacija uranija faktori su koji utječu na razinu radona u vodi. Na nastanak Grgosove špilje najviše je utjecao erozijsko korozijski rad vode u podzemlju (57), te se u zaleđu špilje skupljala voda koja je dalje ponirala. Te dvije stavke možemo povezati s povećanom koncentracijom radona u Grgosovoj špilji. Također iz istraživanja (46) zaključuje se da je krško tlo pogodnije za bolje cirkuliranje zraka, pogotovo u gornjim predjelima, zbog brojnih pukotina, što utječe na smanjenje koncentracije radona ako postoji dobar temperaturni gradijent što je bio slučaj u ožujku 2022. u Šparožnoj pećini.

U zadnjem dijelu istraživanja mjerena je koncentracija radona u krškoj špilji Biserujka na otoku Krku. U dva i pol mjeseca provedenih mjerenja najviša vrijednost aritmetičke sredine mjesečne koncentracije radona iznosila je 7060 Bq/m^3 a izmjerena je u srpnju 2023. godine. Prilikom usporedbe koncentracije radona u Šparožnoj Pećini i špilji Biserujka, Studentovim t-testom dokazano je da se koncentracije radona za mjesec lipanj statistički značajno razlikuju. Vrijednosti izmjerene u Šparožnoj pećini puno su veće od vrijednosti izmjerenih u špilji Biserujka. Pretpostavlja se da je ta razlika posljedica činjenice da je špilja Biserujka puno manja i bolje ventilirana od Šparožne pećine. Nadalje, Šparožna pećina je puno dublja i veća pa je izmjena zraka između unutrašnjosti špilje i okoline puno lošija. Pored toga uređaj je u Šparožnoj pećini bio postavljen u jedan slijepi kanal koji se nalazi u odjeljku špilje koji je loše ventiliran. Dubina Šparožne pećine iznosi 112 m, dok je najveća dubina špilje Biserujka 14 m. Utjecaj morfologije špilje na koncentraciju radona očituje se kroz razlike u veličini dvorana i njihovom

rasporedu, zatim različite dubine špilja povezane su s promjenama tlaka koji također utječe na koncentraciju radona. Kroz špilju Biserujka svakodnevno prolazi velik broj ljudi u turističkim posjetima te i oni mogu utjecati na cirkulaciju zraka unutar špilje čime se smanjuje razina radona. U usporedbi dnevnih kretanja koncentracije radona tijekom tri različita dana odabrana u periodu mjerenja unutar špilje Biserujka, nisu primijećena periodička ponavljanja. Slične rezultate pokazala su i mjerenja u Manitoj peći (49) koja se nalazi u nacionalnom parku Paklenica.

Nadalje izračunato je maksimalno dopušteno vrijeme boravka za speleologe, turističke vodiče i posjetitelje po formuli iz ICRP publikacije (24). Maksimalni dopušteni boravak unutar Šparožne pećine u ljetnim mjesecima iznosi 92 sata mjesečno (aritmetička sredina koncentracije radona iznosila je $15,5 \text{ kBq/m}^3$). U Grgosovoj špilji u ožujku dopušteno je boraviti 347 sati mjesečno (prosječna koncentracija radona iznosila je $3,8 \text{ kBq/m}^3$), a boravak u špilji Biserujka treba u ljetnim mjesecima (lipanj, srpanj, kolovoz) ograničiti na 209 sati (prosječna koncentracija radona iznosila je $6,4 \text{ kBq/m}^3$). Dobiveni rezultati mogu se usporediti s istraživanjem Radolić i sur. 2011. (48) u kojem je izračunato maksimalno dopušteno vrijeme boravka od 454 sati unutar Đurovića špilje gdje je bila izmjerena prosječna koncentracija radona od 17 kBq/m^3 . Prilikom usporedbe izračunate efektivne doze za zaposlenike s istraživanjem koje su provodili Radolić i sur. 2011. (48) primijećeno je da je u krškoj špilji Manita peć efektivna doza koju prime turistički vodiči manja nego ona koju prime turistički vodiči u špilji Biserujka. Efektivna doza koju prime turistički djelatnici u ljetnom periodu u špilji Manita peć iznosi $0,42 \text{ mSv}$, a u špilji Biserujka ona iznosi $8,03 \text{ mSv}$. Veća efektivna doza povezuje se s većom izmjerenom koncentracijom radona koja u špilji Biserujka iznosi $6,3 \text{ kBq/m}^3$, dok je maksimalna vrijednost koncentracije radona u špilji Manita peć iznosila $1,1 \text{ kBq/m}^3$. Nadalje efektivnu dozu zaposlenika možemo usporediti i s istraživanjem provedenim u Modrič špilji (59), u kojoj su turistički vodiči tijekom 120 godišnjih dvosatnih posjeta špilji primili efektivnu dozu koja je iznosila $15,2 \text{ mSv}$ 2022. godine u periodu od travnja do listopada. Efektivna doza koju su primili zaposlenici u Modričevoj špilji gotovo je duplo veća od doze koju su primili vodiči u Biserujki, iako je broj sati provedenih u Modričevoj špilji puno manji (204 h) nego u špilji Biserujka (389 h) te je promatran duži vremenski period. Zbog utjecaja radona na zdravlje ljudi koji borave u speleološkim objektima te rudnicima potrebno je provoditi daljnja istraživanja te spriječiti izlaganje prevelikoj efektivnoj dozi ograničenjem maksimalno dopuštenog vremena boravka unutar tih objekata.

Na temelju izmjerenih vrijednosti koncentracije radona tijekom ljenih mjeseci izračunata je približno efektivna doza koju prime posjetioци špilje Biserujka u svome 30 minutnom posjetu špilji te ona iznosi 10,1 μSv . Efektivnu dozu koju prime posjetioци također su mjerili Radolić i sur. (48) te Lončarić i sur. 2023. (59). U Đurovića špilji procijenjeno je da efektivna doza za posjetitelje iznosi 30,6 μSv za polusatni obilazak špilje, dok je u Modrič špilji izračunata efektivna doza za posjetitelje od 91 μSv ali za dvosatni obilazak špilje (22,8 μSv za pola sata obilaska). Efektivna doza koju prime posjetitelji u špilji Biserujka bila je manja od ostalih efektivnih doza koje su izračunate u ostalim istraživanjima zbog niže izmjerene prosječne koncentracije radona ljeti (6,4 kBq/m^3) u odnosu na Modričevu špilju (13,6 kBq/m^3) i Đurovića špilju (25,0 kBq/m^3).

Ovo istraživanje bilo je ograničeno u određenim segmentima. Neka od ograničenja koja su bila prisutna u ovome istraživanju su to što su se mjerenja provodila u kratkom vremenskom razdoblju, koja ne mogu pružiti dovoljnu količinu informacija za potpune analize i zaključke. Upravo zbog toga potrebno je u budućnosti nastaviti mjerenja i proširiti istraživanje. Monitoring se u špilji Biserujka provodio u periodu od dva i pol mjeseca, a u Grgosovoj špilji samo mjesec dana što ne pruža dovoljno podataka za opširno istraživanje. Nadalje, nije bilo moguće vršiti monitoring istovremeno u sva tri speleološka objekta zato što je na raspolaganju bio samo jedan uređaj, te su koncentracije radona morale biti mjerene u različitom vremenskom periodu što ne pruža dobru osnovu za kvalitetnu usporedbu. Ograničenje mjerenja predstavljao je i relativno kratak vijek baterije na uređaju za mjerenje radona, zbog čega se uređaj nakon određenog vremena trebao izvaditi iz špilje kako bi se napunio te je zbog toga mjerenje bilo prekinuto.

U budućnosti se planira provesti nastavak mjerenja u sve tri špilje. Također željelo bi se usporediti podatke o koncentracijama radona s podacima o seizmičkoj aktivnosti na tom području. Novija istraživanja (46) smatraju da je koncentracija radona povezana s seizmičkom aktivnošću te da će se pomoću tog parametra u budućnosti moći predviđati potresi.

6. Zaključci

Mjerenja koncentracije radioaktivnog plina radona u speleološkim objektima (Šparožna pećina, Grgosova špilja i Biserujka) pokazala su da postoje velike razlike u vrijednostima koncentracije. Najveće koncentracije izmjerene su u Šparožnoj pećini i iznosile su preko 30 kBq/m³ u ljetnim mjesecima. Mjerenja u Šparožnoj pećini također su pokazala sezonske razlike u koncentraciji radona koje su posljedice različitog protoka zraka u ljetnim i zimskim mjesecima. Vanjska temperatura zraka utječe na vrijednosti izmjerene koncentracije radona u špiljama. Kada je vani temperatura veća nego u unutrašnjosti špilje smanjuje se protok zraka te raste koncentracija radona u špilji, što se moglo primijetiti prateći kretanje koncentracije radona u Šparožnoj pećini kroz period od godinu i mjesec dana. Najviše koncentracije radona izmjerene su u ljetnim mjesecima, upravo zbog velikog negativnog temperaturnog gradijenta.

Mjerenja su pokazala da je u Šparožnoj pećini koja se nalazi u Kastvu razina radona u mjesecu ožujku bila je značajno niža uspoređujući je s Grgosovom špiljom koja je smještena u Samoborskom gorju – Žumberku. Zaključeno je da je to posljedica različite vrste tla i položaja mjernog uređaja. Nadalje, na povišenje koncentracije radona utječe i voda jer je prijenosnik radona, koji je lako topiv u njoj, što se može primijetiti iz slučaja Grgosove špilje u Žumberku, koja je nastala erozivno – korozivnim utjecajem vode. Na koncentraciju radona u špilji utječe i veličina špilje te dio špilje u kojem je mjerena koncentracija. U slijepim ograncima špilje protok zraka je smanjen što posljedično dovodi do povećanja koncentracije radona.

Izmjerena koncentracija radona u špilji Biserujka u ljetnim mjesecima bila je značajno manja od koncentracije radona u Šparožnoj pećini.

U radu je procijenjena efektivna doza koje primaju posjetitelji špilje Biserujka, tijekom 30 minutnog posjeta, te ona iznosi $(10,1 \pm 2,4)$ μ Sv što je puno manje od zakonski određene maksimalne dozvoljene doze, koja iznosi 3 mSv godišnje. Na temelju izmjerenih koncentracija radona u špilji Biserujka procijenjena je efektivna doza koju prime turistički vodiči u špilji tijekom jedne godine te ona iznosi 8,03 mSv, što je znatno manje od maksimalne godišnje dopuštene doze koja za radnike iznosi 20 mSv.

U speleološkim objektima u kojima su zabilježene povećane koncentracije radona valja kontrolirati vrijeme boravka speleologa i zaposlenika u njima, kako bi se spriječilo prekomjerno ozračivanje.

Rezultati rada ukazuju da je bitno pratiti razine koncentracije radona unutar speleoloških objekata gdje ljudi borave i rade, kako bi se spriječila prevelika izloženost radonu i time smanjila mogućnost razvoja karcinoma pluća. Potrebno je mjeriti koncentracije radona te na temelju njih ograničiti vrijeme boravka u speleološkim objektima da efektivna doza zaposlenika i posjetitelja ne bi premašila maksimalnu dopuštenu efektivnu dozu zračenja.

Literatura:

- (1) Blumentritt S., Periodensystem der Elemente. 6. izd., Münster (Savezna Republika Njemačka), 2012., 1-5.
- (2) Hrvatska enciklopedija [Internet]. Radon - Leksikografski zavod Miroslav Krleža [ažurirano 2021; pristupljeno 20. 06. 2023.]. Dostupno na : <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51552>
- (3) Britannica [Internet] Radioactivity – 2023. [ažurirano 21.06.2023.; citirano 15.07.2023.]. Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/radioactivity/Occurrence-of-radioactivity>
- (4) Hrvatska enciklopedija [Internet,], Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Radioaktivnost [ažurirano 2021.; citirano 10.07.2023.]. Dostupno na: <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474>
- (5) Petrucci, Ralph H. General chemistry: principles and modern applications. 11th ed New Jersey: Prentice Hall Inc, 2016. Printed Book, 1171-1174.
- (6) Radioaktivni otpad [Internet], Radioaktivnost. [citirano 15.06.2023.] Dostupno na: [Zbrinjavanje radioaktivnog otpada Radioaktivnost \(radioaktivniotpad.org\)](http://radioaktivniotpad.org).
- (7) Hrvatska enciklopedija [Internet], Leksikografski zavod Miroslav Krleža. Bekerel [ažurirano 2021.; citirano 15. 08. 2023.] Dostupno na : [bekerel | Hrvatska enciklopedija](http://enciklopedija.hr/bekerel)
- (8) Pajin D.; Polak V.; Simonović S.; Stefanović M.: Radijacija: Doze, posledice, rizici. Beograd: Nolit; 1985.
- (9) Šolić F., Žauhar G. Fizika za medicinare. 2. izd. Rijeka: Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; 2013.
- (10) Iowa State University, Environmental Health and Safety [Internet], Environmental Radiation [ažurirano 2023.; citirano 20. 06. 2023.], Dostupno na: <https://www.ehs.iastate.edu/research/radiation/environmental-radiation>
- (11) Steiner A., Lean G., Crick M., Shannoun F., Cohen-Unger S., Evrensel A., Diesner-Kuepfer A. [Internet] RADIATION EFFECTS and SOURCES, UNEP, 28-29, 43-44, Dostupno na: <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/radiation-effects-and-sources.html>
- (12) Bundesamt für Strahlenschutz [Internet], Radioactivity in the environment [ažurirano 2023.; citirano 15. 08. 2023.]. Dostupno na: https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/environment_node.html

- (13) Laughlin R.B., Department of Physics, **Stanford University** SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, New York
- (14) DCD – Centar for Disease Control and Prevention [Internet]. Radon and Your Health [ažurirano: 04. 01. 2023.; citirano 13. 07. 2023.]. Dostupno na: <https://www.cdc.gov/nceh/features/protect-home-radon/index.html>
- (15) Ravnateljstvo civilne zaštite – sektor za radiološku i nuklearnu sigurnost [Internet], O radonu ^{222}Rn [ažurirano: 2019; citirano 15. 07. 2023.]. Dostupno na: <http://radon.civilna-zastita.hr/o-radonu/>
- (16) Wikipedia [Internet], Ionizirajuće zračenje [ažurirano: 13. 06. 2022.; citirano: 15. 06.2023.]. Dostupno na: [Ionizirajuće zračenje – Wikipedija \(wikipedia.org\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ionizirajuće_zračenje)
- (17) World health organization [Internet], Radon and health [ažurirano: 25. 01. 2023; citirano 18. 07. 2023.] Dostupno na: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- (18) World health organization [Internet], WHO launches project to minimize risks of radon [ažurirano 21. 06. 2005; citirano 18. 07. 2023.]. Dostupno na: <https://www.who.int/news/item/21-06-2005-who-launches-project-to-minimize-risks-of-radon>
- (19) ICRP, Summary of ICRP Recommendations on Radon. ICRP ref 4836-9756-8598, January 26, 2018
- (20) ICRP, 1997. Radiation Protection in Uranium and Other Mines. ICRP Publication 24, Ann. ICRP 1
- (21) ICRP, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23
- (22) ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny & Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40
- (23) ICRP, 2014. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126, Ann. ICRP 43
- (24) ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137, Ann. ICRP 46(3-4). UNEP, 2016. Radiation: Effects and Sources. United Nations Environment Programme
- (25) Papastefanou C., Manolopoulou M., Savvides E., Charalambous S. Natural radiation dose in Petralona Cave. Health Physics 1986;50:281-286.

- (26) Pinza-Molina C., Alcaide J.M., Rodriguez-Bethencourt R., Hernandez-Armas J. Radon exposure in the caves of Tenerife (Canary Islands). *Radiat Protect Dosim* 1999;82:219-224.
- (27) Jovanovič P. Radon measurements in karst caves in Slovenia. *Environment International* 1996;22 (Supl.1): S429-S432.
- (28) Narodne novine, službeni list Republike Hrvatske, NN 38/2018 [Internet]. Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja [ažurirano 25. 04. 2018.; citirano 15. 07. 2023.]. Dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_38_739.html
- (29) Narodne novine, službeni list Republike Hrvatske, NN 188/2018 Akcijski plan za radon za razdoblje 2019. – 2024.
- (30) Radolić V., Vuković B., Stanić D., Katić M., Faj Z., Šuveljak B., Lukačević I., Faj D., Lukić M., Planinić J. National survey of indoor radon levels in Croatia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2006. 269
- (31) Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013
- (32) Surić M., Lončarić R., Kulišić M., Sršen L. Spatio-temporal variations of cave-air CO₂ concentrations in two Croatian show caves: natural vs. anthropogenic controls. *Geologia Croatica*. 2021, 74/3, 273–286.
- (33) Mostečak A., Perković D., Kapor F., Veinović Ž. Radon mapping in Croatia and its relation to geology. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*. 2018. pp. 1-11, DOI: 10.1177/rgn.2018.3.1
- (34) Ravnateljstvo civilne zaštite – sektor za radiološku i nuklearnu sigurnost [Internet], Radon [ažurirano: ; citirano 15. 07. 2023.]. Dostupno na: <http://radon.civilnazastita.hr/radonski-zemljovid/radon-u-tlu/rh-po-zupanijama/>
- (35) Wilkening MH., Watkins DE., 1976. Air exchange and ²²²Rn concentrations in the Carlsbad Caverns. *Health Physics*, 31, 139-145.
- (36) Kobal I., Ančik M., Škofljanec M., 1988. Variation of ²²²Rn air concentration in Postojna Cave. *Radiation Protection Dosimetry*, 25, 207-211.
- (37) Vaupotič J., Csige I., Radolić V., Hunyadi I., Planinić J., Kobal I., 2001. Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave, Slovenia. *Health Physics*, 80(2), 142-147.
- (38) Vaupotič J., 2008. Nanosize radon short-lived decay products in the air of the Postojna Cave. *Science of the Total Environment*, 393, 27-38.

- (39) Šebela S., Vaupotič J., Košťák B., Stemberk J., 2010. Direct measurement of present-day tectonic movement and associated radon flux in Postojna Cave, Slovenia. *Journal of Cave and Karst Studies*, 72(1), 21-34.
- (40) Gregorič A., Vaupotič J., 2011. Diurnal Variation of Radon Concentration in the Postojna Cave. *Proceedings of 8th Symposium of the Croatian Radiation Protection Association, Croatia*, 238-242.
- (41) Gregorič A., Zidanšek A., Vaupotič J., 2011. Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature, *Natural Hazards and Earth System Science*, 11, 1523-1528.
- (42) Gregorič A., Vaupotič J., Gabrovšek F., 2013. Reasons for large fluctuation of radon and CO₂ levels in a dead-end passage of a karst cave (Postojna Cave, Slovenia). *Natural Hazards and Earth System Science*, 13, 287- 297. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-287-2013>
- (43) Gregorič A., Vaupotič J., Šebela S., 2014. The role of cave ventilation in governing cave air temperature and radon levels (Postojna Cave, Slovenia). *International Journal of Climatology*, 34, 1488-1500.
- (44) Paar D., Radolić V., Buzjak N., 2005. Measurements of the concentration of the radioactive gas radon in the Žumberak caves (in Croatian). In: Buzjak, N. (ed.): *Znanstveno-stručni skup istraživača krša Žumberačke gore, Bregana, 2005*.
- (45) 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. <https://doi.org/10.3986/ac.v37i2-3.151>
- (46) Paar D., 2009. Measurement of the concentration of radioactive gas radon in Croatian caves (in Croatian). *Subterranea Croatica*, 11, 17-20.
- (47) Radolić V., Miklavčić I., Poje M., Varga M., Vuković B., 2009. Radon concentration in Đurovića cave (Čilipi, Croatia). In: Mazur, J., Kozak, K., Kobal, I. (Eds.), *Radon in environment*, Krakow: The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, 32-32.
- (48) Radolić V., Miklavčić I., Poje M., Stanić D., Vuković B., Paar D., 2011. Radon concentrations in caves of Croatia - assessing effective radon doses for occupational workers and visitors (in Croatian). In: Krajcar Bronić, I., Kopjar, N., Milić, M., Branica, G. (Eds.), *Zbornik radova VIII. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja*.
- (49) Radolić V., Miklavčić I., Poje M., Stanić D., Vuković B., 2012. Radon levels in Manita Peć Cave (Croatian NP Paklenica) and assessment of effective dose received by visitors

- and tourist guides, IRPA13 Full Paper - 13th International Congress of the International Radiation Protection Association/IRPA (Ed.), Glasgow: IRPA, 1056, 1-10
- (50) Šumonja B., Čargonja, M., Mekterović, D., Mance, D., Žauhar, G., Trinajstić, N., Kukuljan, L., Brčić, V., 2022. Radon monitoring in Šparožna cave (in Croatian). In: Kuharić, N., Motočić, K., Paar, D. (Eds.), Zbornik sažetaka, Skup speleologa Hrvatske, Samobor 2022.
- (51) Wolf Högel (2016.), DataVIEW for AlphaE / MiniTRACE / RadTRACE / AlphaGUARD /GammaTRACER Version 15.00.00_161220, SAPHYMO [ažurirano: 21. 12. 2016.; citirano: 20. 07. 2023.]
- (52) Reš D., Šparožna pećina, Subterranea Croatica, 2010., 15-19.
- (53) Zeleni prsten Zagrebačke županije [Internet]. Špilja, spomenik prirode od 1973. [citirano 13. 07. 2023.]. Dostupno na: <https://zeleni-prsten.hr/portal/zasticena-podrucja/grgosova-spilja/>
- (54) Stewart J. (2006). Croatia. Cadogan Guides. p. 183. ISBN 1-86011-3192.
- (55) Jonathan Bousfield, The Rough Guide to Croatia, p. 225, Rough Guides (2003), ISBN 1-84353-084-8
- (56) Briestenský M., Ambrosino F., Smetanová I., Thinová L., Šebela S., Stemberk J., Pristašová L., Pla C., Benavente D. Radon in dead-end caves in Europe. Journal of Cave and Karst Studies, v. 84, no. 2, p. 41-50. DOI:10.4311/2021ES0101
- (57) Posarić J. Grgosove špilje Otruševac – Samobor; speleolog 56, 2008 ; 5-16.
- (58) Harrison JD, Marsh JW. ICRP recommendations on radon. 2020, Sage Journals ; 49 (1): 68-76. <https://doi.org/10.1177/0146645320931974>
- (59) Lončarić R., Radolić V., Surić M., Miklavčić I., Šatalić M., Paar D., Obšivač L., 2023. Preliminary data of potentially hazardous radon concentrations in Modrič Cave (Croatia). International Journal of Speleology, 52 (1) 65-74. Dostupno na: scholarcommons.usf.edu/ijs

ŽIVOTOPIS

Petra Valić je rođena dana 03.11.1999. u Rijeci. Državljanica je Republike Hrvatske te prema narodnosti Hrvatica. Osnovnoškolsko obrazovanje završila je 2014. godine u Osnovnoj školi Eugen Kumičić u Rijeci. Od 2014. do 2018. pohađala je Prvu Riječku hrvatsku gimnaziju u Rijeci te 2018. godine upisuje Sveučilišni prijediplomski studij Sanitarno inženjerstvo na Medicinskom fakultetu u Rijeci. Nakon završetka preddiplomskog studija s završnim radom „Mjerenje buke u okolišu“ u području fizike i biofizike, stječe akademsko zvanje sveučilišne prvostupnice sanitarnog inženjerstva, univ. bacc. sanit. ing. Godine 2021, upisuje Sveučilišni diplomski studij Sanitarno inženjerstvo. Tijekom studija bila je aktivna i sudjelovala je na studentskom kongresu Sanitas, koji je održan 8. i 9. travnja 2022. godine na Medicinskom fakultetu u Rijeci s usmenom prezentacijom. Godinu dana kasnije bila je članica organizacijskog odbora na Studentskom kongresu zaštite zdravlja Sanitas 2023.

Tijekom studija radila je kao prodavačica, asistentica u prodaji u S. Oliveru u periodu od 20.06.2018. do 25.09.2019. Zatim se u lipnju 2020. zaposlila kao konobarica, što radi i dalje. U periodu od 25. 06. 2020. do 31. 07. 2021. radila je kao trenerica u Plivačkom klubu Primorje.