

Mjerenje koncentracije radona u zraku tla i izvorskoj vodi u okolini mjesta Križ Hrastovački

Krmek, Blanka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:903055>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Prije diplomski studij geološkog inženjerstva

**MJERENJE KONCENTRACIJE RADONA U ZRAKU TLA I IZVORSKOJ VODI
U OKOLICI MJESTA KRIŽ HRASTOVAČKI**

Završni rad

Blanka Krmek

G2259

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/62
URBROJ: 251-70-15-23-2
U Zagrebu, 14. 9. 2023.

Blanka Krmek, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/62, URBROJ: 251-70-15-23-1 od 22. 5. 2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

MJERENJE KONCENTRACIJE RADONA U ZRAKU TLA I IZVORSKOJ VODI U OKOLICI MJESTA KRIŽ HRASTOVAČKI

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv. prof. dr. sc. Marko Cvetković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Marko Cvetković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i
studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

MJERENJE SMJANJENA KONCENTRACIJE RADONA U ZRAKU TLA I IZVORSKOJ VODI U
OKOLICI MJESTA KRIŽ HRASTOVAČKI

Blanka Krmek

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Cilj rada je mjerenje koncentracije radona u zraku tla i vodi u blizini mjesta Križ Hrastovački. Prikazane su osnovne geološke karakteristike područja, teoretske osnove mjerenja koncentracije radona te njegovog utjecaja na ljudsko zdravlje. Naposljetku, izneseni su rezultati mjerenja koncentracije radona u zraku tla i vodi gdje je razvidno da vrijednosti u tlu imaju vrijednost srednjeg radon indeksa, a one u vodi su u dozvoljenim granicama. Prikazana su opetavan mjerenja radona u vodi s vremenskim odmakom od vremena uzorkovanja kako bi se utvrdio utjecaj njegovog poluraspada na mjerenje od vremena uzorkovanja na terenu.

Ključne riječi: radon, voda, zrak tla, Sisačko-moslavačka županija

Završni rad sadrži: 25 stranice, 1 tablica, 16 slika i 17 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNF

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POJAVA RADONA	2
3. GEOGRAFSKE I GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE PODRUČJA ISTRŽIVANJA	4
3.1. Geografske karakteristike područja istraživanja.....	4
3.2. Geološke karakteristike područja istraživanja	5
4. TEORETSKE OSNOVE MJERENJA KONCENTRACIJE RADONA U ZRAKU TLA	7
4.1. Izvori radona u prirodi i prihvatljive koncentracije u vodi	8
4.2. Karakteristike uređaja za mjerenje	12
4.3. Mjerenje koncentracije radona u zraku tla... ..	14
4.4. Način izvođenja mjerenja radona u vodi.....	18
5. PRORAČUN POVRATNIH KRIVULJA ZA ODREĐIVANJE INICIJALNE KONCENTRACIJE RADONA U UZORKU.....	21
6. ZAKLJUČAK	23
7. LITERATURA.....	24

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Kemijski element radon...	2
Slika 2-2. Uranijev niz...	3
Slika 3-1. Križ Hrastovački i okolica	4
Slika 3.2-1. Isječak OGK	6
Slika 4-1. Pametni detektor radona	7
Slika 4.1-1. Ulazak radona u zatvorene prostore	9
Slika 4.1-2. Radon je štetan po ljudsko zdravlje	11
Slika 4.2-1. Kućište s vidljivom signalnom lampicom	12
Slika 4.2-2. Uređaj za mjerenje koncentracije radona	13
Slika 4.3-1. Mjerenje koncentracije radona u zraku tla	15
Slika 4.3-2. „Lost tip“	15
Slika 4.3-3. Rezultati mjerenja koncentracije radona u zraku tla	16
Slika 4.3-4. Karta RH s prosječnim vrijednostima koncentracija radona po županijama	17
Slika 4.4-1. HDPE boce korištene za uzorkovanje vode na terenu...	19
Slika 4.4-2. Mjerenje koncentracije radona u vodi...	19
Slika 5-1. Raspadanje radona tijekom vremena	21

POPIS TABLICA

Tablica 4.4-1. Rezultati mjerenja koncentracije radona u vodi u okolici Križa Hrastovačkog ...20

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
t	s	vrijeme
Bq		radioaktivnost
	Bq/m ³	koncentracija
	pCi/L	koncentracija
	WL	radna razina
T	°C	temperatura
	ppm	mineralizacija
T		vrijeme poluraspada
λ		konstanta raspada
N		broj neraspadnutih jezgri
N ₀		početni broj jezgri
A		aktivnost uzorka
Darcy	D	propusnost


1. UVOD

Radon je radioaktivan kemijski element iz skupine plemenitih plinova koji nastaje raspadom radija. Bezbojan je plin, bez okusa i mirisa (Hrvatska enciklopedija, 2023). S obzirom na svoja svojstva, vodi se kao drugi vodeći uzročnik raka pluća (EPA, 2023). Cilj ovog rada je, osim obrade mjerenih podataka, prikazati teoretske osnove vezano za radon i njegovu pojavu te sredstva za umanjivanje njegovog utjecaja. Također, provedena su istraživanja na području naselja Križ Hrastovački, Sisačko-moslavačka županija s ciljem utvrđivanja koncentracije radona u vodi u obližnjem izvoru u pretpostavljenoj rasjednoj zoni. S obzirom na specifičnost mjerenje koncentracije radona u vodi koje ne može uvijek biti obavljeno na licu mjesta, pratio se pad koncentracije radona u odnosu na vrijeme proteklo od uzorkovanja.

Rad počinje s pregledom teoretskih osnova pojavnosti radona, njegovim općim obilježjima, karakteristikama istraživanog područja, a nastavlja se opisom uređaja za mjerenje kao i samim načinima mjerenja. Završava s obradom i interpretacijom mjerenih podataka te zaključkom o izmjerenim koncentracijama radona u vodi i promjenama kroz vrijeme u odnosu na poluraspad.

2. POJAVA RADONA

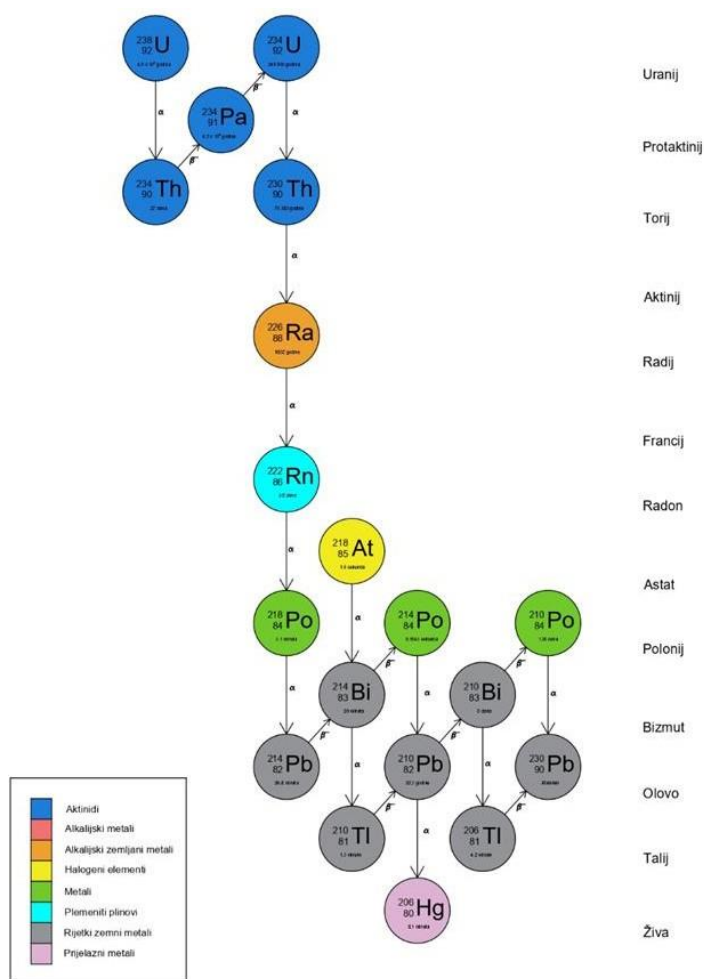
Kemijski element radon, radioaktivni je element atomskog broja 86 (Slika 2-1.), a u periodnom sustavu elemenata označen je simbolom Rn. Radon je plin bez boje i mirisa, oko 75 puta teži od zraka i više od 100 puta teži od vodika. Pripada skupini plemenitih plinova, tj. član je elemenata nulte valencije gledano prema njegovoj sposobnosti spajanja s drugim atomima. Kemijski je inertan, što znači da ne reagira lako s drugim tvarima. Nastaje kao međuproizvod u nizu raspadanja uranija (Slika 2-2.), pri čemu nastaje radioaktivnim raspadom radija-226. Svaki se radioaktivni izotop raspada određenom brzinom, a uobičajeno se ta brzina izražava vremenom poluraspada, što predstavlja vrijeme potrebno da se polovina atoma radioaktivne tvari raspadne. Vrijeme poluraspada radona je 3,82 dana što znači da se polovina koncentracije radona raspala u daljnje elemente kćeri unutar vremena od otprilike 4 dana. Proizvodi raspada radona su izotopi polonija, bizmuta i uglavnom olova. Ti izotopi također su radioaktivni i imaju kratko vrijeme poluraspada (u rasponu od nekoliko sekundi do nekoliko minuta) pri čemu emitiraju alfa zračenje (BFS, 2021).

 Radon	RADON PLEMENITI PLIN
Atomski broj:	86
Skupina:	18
Perioda:	6
Elektronska konfiguracija:	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶
Oksidacijski broj:	0
Elektronegativnost:	-
Atomski radijus / pm:	240
Relativna atomska masa:	-

Slika 2-1. Svojstva radona (Generalić E., PSE, 2023)

S obzirom da je izvor radona rijedak u prirodi, radon čak i nije toliko rijetko zastupljen. Koncentracije radona u prostorijama variraju i ovise o geološkim uvjetima, vrsti tla i stijena u određenim područjima te uvjetima provjetravanja prostorija. S obzirom da nastaje neposredno

raspadom uranija, logično je za očekivati da su područja s visokim sadržajem radona povezana s određenim geološkim formacijama koje sadrže veće koncentracije uranija, ali i torija (CCOHS, 2023). Prisutan je u cijelom svijetu, ali razine variraju s obzirom na lokaciju. Zbog činjenice da je plin, lako se kreće kroz tlo te ulazi u zatvorene prostore kroz pukotine i otvore, ali i temelje zgrada ili kuća. Ne širi se u podjednakim koncentracijama, što ovisi o materijalu kroz koji se širi. Lakše prolazi kroz pijesak i porozne materijale, dok teže prolazi kroz ne tako porozne materijale.

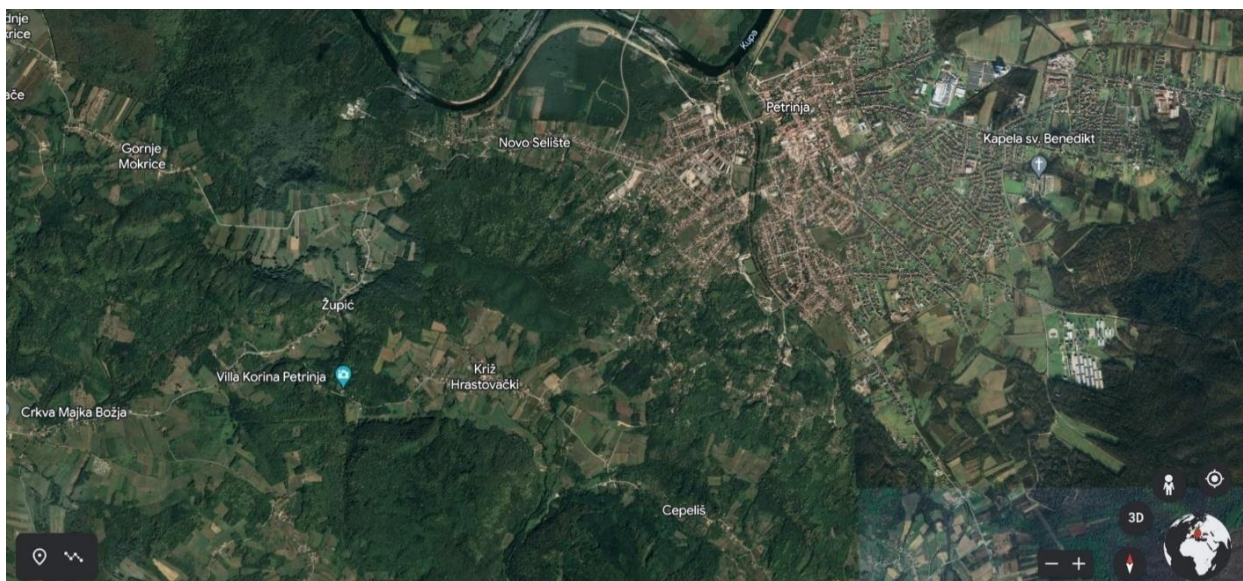


Slika 2-2. Uranijev niz (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023)

3. GEOGRAFSKE I GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

3.1. Geografske karakteristike područja istraživanja

Područje istraživanja ovog rada nalazi na Banovini, u blizini grada Petrinje, točnije u naselju Križ Hrastovački i njegovoj bližoj okolini (Slika 3-1.) Banska krajina, Banija ili Banovina povijesna je pokrajina u središnjoj Hrvatskoj, u sklopu Sisačko-moslavačke županije (jugozapadno od Siska). Pokrajina se nalazi na rubnom prostoru Panonske nizine, odnosno Posavine. Omeđena je rijekama koje istovremeno predstavljaju najznačajnije vodotoke te pokrajine. Sava i Kupa na sjeveru, sjeveroistoku, Una na jugoistoku te Glina na zapadu. S južne strane pokrajine nalazi se granica prema Bosni i Hercegovini, tj. Bosanskoj krajini. Krajolik je brežuljkasti do brdski, s prosječnom nadmorskom visinom od 300 m. Najviši vrh nazvan je Piramida (616 m) te pripada Zrinskoj gori koja je glavno uzvišenje pokrajine. Dok je Zrinska gora smještena na jugu, nizina Save i njene pritoke nalaze se na sjeveru, pa je tako to područje obilježeno mnogim manjim vodenim tokovima. Većinski dio površine nalazi se pod šumom. Područje Banovine je seizmički aktivno područje, čemu svjedoči takozvani Petrinjski potres magnitude 6,4 prema Richteru koji se dogodio u prosincu 2020.godine. Stanovništvo s područja Banovine je uglavnom emigracijsko, dok je cjelokupno područje naseljeno ispod prosjeka naseljenosti Republike Hrvatske. Veća mjesta, odnosno glavna središta su: Petrinja, Zrin, Glina, Dvor, Hrvatska Kostajnica i Veliki Gradac (Hrvatska enciklopedija, 2023).

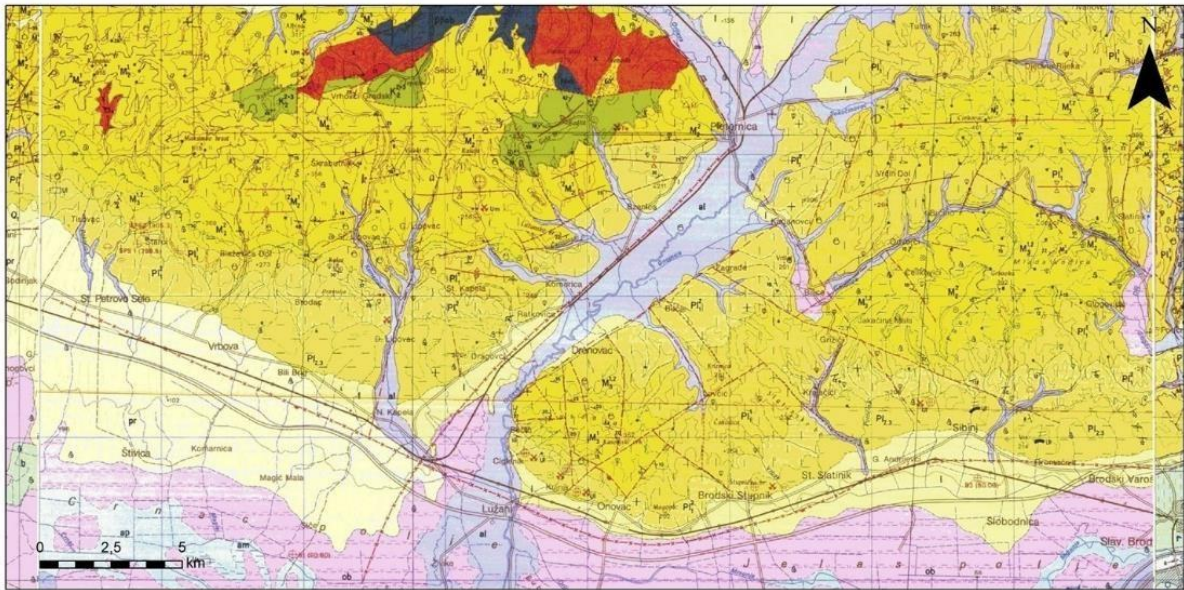


Slika 3-1. Križ Hrastovački i okolica. (Google Earth, snimak zaslona, 2023)

3.2. Geološke karakteristike područja istraživanja

Geološki gledano, istraživano područje se nalazi unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava. Uvidom u Osnovnu geološku kartu M 1:100.000 (Pikija i dr., 1975) utvrđeno je da okolicu područja većinski prekrivaju kvartarne paleogenske naslage lapora, vapnenaca, šljunaka, glina i pijesaka, miocenske naslage lapora i laporovitih vapnenaca te gornjokredne naslage vapnenaca, kalkarenita i šejlova. Paleogenske naslage glina, pješčenjaka i pijesaka okružuju sjeverni dio istraživanog područja te je područje također bogato ugljenom. One transgversivno naliježu na gornjokredne naslage. Južnim dijelom istraživanog područja teče rijeka Utinja te su oko nje prisutne aluvijalne naslage pijesaka, šljunaka i siltova. Najstarije naslage na istraživanom području i njegovoj okolini su kredne starosti dok je većina područja prekrivena kvartarnim naslagama.

Istraživano područje i njegova okolica tektonski je vrlo poremećeno što se očituje u velikom broju reversnih i normalnih rasjeda. Najbliži značajni rasjed nalazi se jugoistočno od istraživanog područja, kod mjesta Cepeliš. Po karakteru je normalan te dovodi u kontakt gornjopaleogenske naslage pijesaka, pješčenjaka i glina i gornjomiocenske naslage vapnenaca i lapora. Na slici 3.2-1. prikazan je isječak OGK karte s legendama oznaka i kartiranih jedinica područja istraživanja.



LEGENDA STANDARDNIH OZNAKA

<p>Normativne granice utjecaja i područja ispravilne izobila</p> <p>Podloga šumskih površinskih i površina ispravilne izobila</p> <p>Određene ili teško određene granice utjecaja (na površini i podzemju)</p> <p>Granice izravnanog i neraspoloživog terena, poljoprivreda</p> <p>Granice lijevnog područja, poljoprivreda</p> <p>Granice izravnanog terena, poljoprivreda</p> <p>Granice izravnanog terena, poljoprivreda</p> <p>Granice izravnanog terena, poljoprivreda</p> <p>Granice izravnanog terena, poljoprivreda</p> <p>Granice izravnanog terena, poljoprivreda</p>	<p>Stanišna granica</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Mušarica, stanišna i stanišna</p> <p>Stanišna zona, stanišna i stanišna</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p>	<p>Stanišna granica</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p> <p>Stanišna zona</p>
---	--	--

LEGENDA KARTIRANIH JEDINICA

<p>al Aluvijalni nanos</p> <p>ep Povodnjački facijes</p> <p>am Sedimenti mrtvaja</p> <p>ob Organogeno-barski sedimenti</p> <p>pr Proklivij</p> <p>l Les</p> <p>Pl_{1,2} Glina, pijesak, šljunak i ugljen</p> <p>Pr₁ Pijesci s proslojima šljunka i lapori (gornji pont)</p> <p>Pr₁ Lapori s proslojima pješčenjaka (donji pont)</p>	<p>M₂² Lapori, vapnoviti lapori i vapnenci (panon)</p> <p>M₃¹ Pješčenjaci, lapori i pijesci (donji sarmat)</p> <p>M₃² Vapnenci i lapori (bodon)</p> <p>M₃³ Šljunak, pijesak, pjeskaviti lapori, glina i leća ugljena (karpat)</p> <p>M₃⁴ Konglomerati, breče i pješčenjaci (helvet)</p> <p>n Granofiri</p> <p>op Piroklastične breče</p> <p>pp(h) Spliliti i dijabazi</p>	<p>x Albitporfiri</p> <p>K₂₋₃²⁻³ Vapnenci, lapori i pješčenjaci (turon i senon)</p>
--	---	---

Slika 3.2-1. Isječak OGK (OGK, list Sisak, originalno mjerilo 1: 100 000, Pikija i dr., 1975)

4. TEORETSKE OSNOVE MJERENJA KONCENTRACIJE RADONA U ZRAKU TLA

Koncentracija radona u zraku mjeri se u jedinicama pikokurija po litri (pCi/L) ili bekerelima po kubnom metru (Bq/m^3), pri čemu 1 pCi/L odgovara vrijednosti $37 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Jedan Bq jednak je jednoj dezintegraciji, tj. raspadu u sekundi. Jedinica radne razine (WL) izražava koncentraciju potomaka radona, odnosno to je mjera potencijalne energije alfa čestica po litri zraka. 1 WL = 200 pCi/L vrijedi u uobičajenom okruženju, dok je u ekstremnim slučajevima 1 WL = 100 pCi/L, što predstavlja situaciju potpune ravnoteže koja je vrlo rijetka (CCOHS, 2023).

Mjerna jedinica bekerel uvedena je u SI sustav mjernih jedinica 1967./1968. godine. Uvedena je kao izvedena jedinica u početku pod nazivom recipročna sekunda (s^{-1}), a naziv bekerel uveden je 1974. godine (Kušan, 2023).

Postoje dvije vrste uređaja za mjerenje radona, pasivni (oni koji ne trebaju električnu energiju za mjerenje) i elektronički (oni koji koriste električnu energiju). Pasivni uređaji su jeftini, mali, jednokratni te daju prosječnu vrijednost nakon dugotrajnog mjerenja, dok su elektronički prikladni za brze snimke, mogu se koristiti nekoliko puta te odmah pokažu rezultate mjerenja (BFS, 2023). Za razliku od uređaja koji se koriste u svrhu istraživanja koncentracije radona u određenim područjima, stanovništvu su lako dostupni uređaji koji se mogu postaviti u domove te detektirati radon.



Slika 4-1. Pametni detektor radona.(MERAD, 2023)

Na slici (4-1.) prikazan je uređaj za detektiranje radona u domovima, koji se također može povezati na mobilne uređaje te u svakom trenutku pružati korisniku informaciju o prisutnosti radona.

4.1. Izvori radona u prirodi i prihvatljive koncentracije u zraku i vodi

Da bi nastanak, oblik i ponašanje radona bilo razumljivo, prvo moramo početi s njegovim izvorom uranijem. Izotop radona ^{222}Rn nastaje alfa raspadom ^{226}Ra , ali raspadni niz počinje s uranijem. Određene stijene sadrže određenu količinu uranija, najčešća količina je od 1 do 3 ppm. S obzirom da se stijene troše fizički i kemijski te tako tvore tlo, ta tla također sadrže različite količine uranija. Kako je uranij prisutan u stijenama i tlima, radij i radon kao produkti kćeri radioaktivnog raspada također su prisutni. Nakon nastajanja radona, veći dio ostaje zarobljen u kristalnim rešetkama minerala i raspada se unutar njih sve do stabilnog olova. Manji dio izlazi iz kristalne rešetke i uspijeva prijeći put od stijena i tla do površine Zemlje. Njegovo vrijeme poluraspada od 3,82 dana je dovoljno dugo da se dogodi migracija radona iz podzemlja do atmosfere. Iz stijenskih masa prvo kreće u okolne medije, podzemnu vodu i / ili pore između čestica, odakle dalje ide u atmosferu. Budući da je radon plin, mnogo više je mobilniji nego uranij i radij. Lakoća i učinkovitost kretanja radona utječu na velike udaljenosti koje radon može prijeći prije nego se raspadne (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023). Atomi radona kreću se u tlu pomoću vode ili plina koji se nalazi u tlu, a sustav prijenosa kroz tlo ovisi o koncentraciji, temperaturi ili tlaku zraka, što znači da radon iz pornih prostora prema atmosferi putuje ovisno o razlikama u tlaku i meteorološkim uvjetima. Također, način, brzinu i lakoću kretanja radona u tlu određuje postotak pora u tlu, odnosno poroznost, i međusobna povezanost pornih prostora koja omogućuje tlu da propušta vodu i zrak, odnosno propusnost. Radon se lakše kreće kroz propusne stijene (pijesak i šljunak) nego kroz nepropusna tla. Pukotine u bilo kojem dijelu stijenske mase omogućavaju brže kretanje. Sporije se kreće u vodi nego u zraku, prelazi manje udaljenosti u vlažnim tlima nego u suhim. Zbog toga objekti izgrađeni na sušnijim, visoko propusnim tlima imaju veće razine radona u zatvorenim prostorima (Otton, 1992). Pri koncentraciji radona u tlu od 1 Bq/kg, prosječna brzina oslobađanja radona iz zemljine površine je 0,001 Bq/m² u sekundi. Nadalje, u atmosferi se raspršuje raspadajući se preko kratkoživućih potomaka olova. Raspadima radona u atmosferi prisutni su radionuklidi te se prikupljaju na tlu padanjem kiše ili snijega. Oborinama se brzina koncentracije radona u kratkom vremenskom

periodu od desetak minuta može udvostručiti u odnosu na prethodnu vrijednost da bi se nakon prestanka oborina tijekom narednih sati sadržaj radona vratio na početnu vrijednost. Uzrok svemu tome su kratka vremena poluraspada radonovih potomaka koje oborine isperu iz atmosfere. S obzirom da je radon plin koji je inertan te je sklon migraciji, često se nakuplja u zatvorenim prostorima u kojima nema ventilacije ili je ona slaba. Obično su to zatvorene, prizemne, hladne prostorije poput podruma, špilja, rudnika i slično. U zatvorene prostore uspijeva doći kroz sustave pukotina iz tla i stijenskog materijala, a također može doći iz građevinskog materijala u objektima te kroz temelje samih objekata i cijevi u njima (Slika 4.1-1.). Koncentracija radona u prizemnim slojevima atmosfere varira između 5 i 15 Bq/m³, a koncentracije su veće ako nema vjetra.



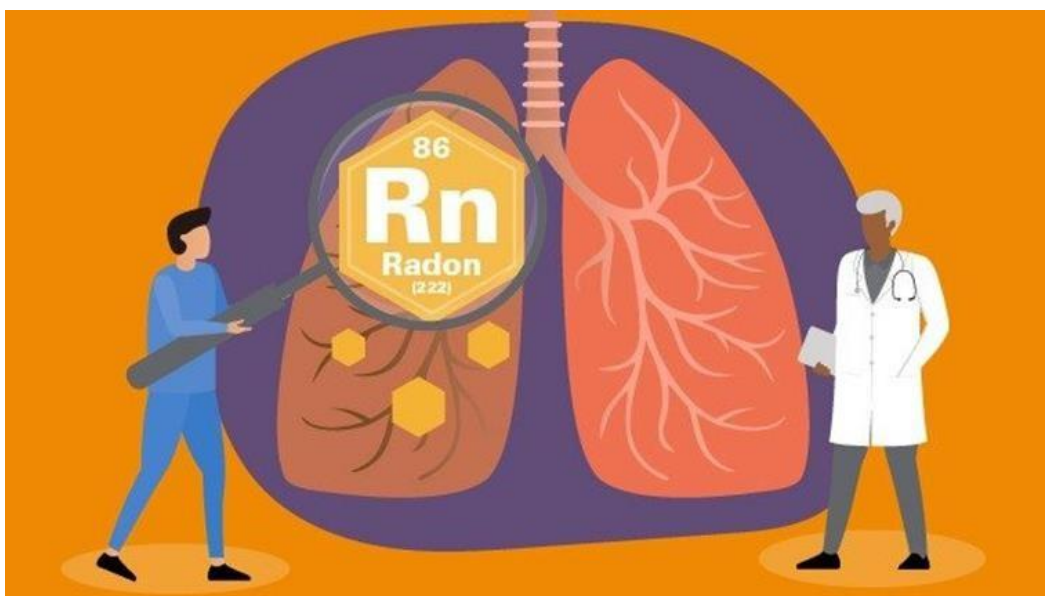
Slika 4.1-1. Ulazak radona u zatvorene objekte. (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023)

Povišene koncentracije radona su u unutar zgrada, tj. zatvorenih prostora i znatno variraju (od manje od 10 do preko 10 000 Bq/m³), dok u nekim rudnicima i špiljama zna prijeći

vrijednost preko 150 000 Bq/m³. Zbog činjenice da je radon opasan po ljudsko zdravlje, u zatvorenim prostorima njegova koncentracija ne bi trebala prelaziti propisanu vrijednost od 300 Bq/m³. Za smanjivanje koncentracije radona u zatvorenim prostorima najlakše i brže rješenje je redovito provjetravanje prostorija (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023). Kao što je već spomenuto, radon može ući u domove kroz sustav cijevi, pa tako može ući uz pomoć vode, jako dobro se otapa u njoj. Voda u rijekama i jezerima sadrži jako male koncentracije radona, pa domaćinstva koja upotrebljavaju takvu vodu (površinsku vodu) za bilo koje svrhe nemaju problema s nakupljanjem radona, jer se radon otpušta u zrak prije nego dođe do dodira s takvom vodom. Problem s ulaskom radona uz pomoć vode u domove su mala domaćinstva koja imaju privatne bunare i male javne vodovode te se radon u takvim sustavima pojavljuje pri bilo kojoj upotrebi takve vode (tuširanje, kuhanje, voda za piće, perilice rublja i posuđa). Međutim, na razinu radona u vodi može se utjecati na više načina, a jedni od načina su miješanje vode koja sadrži radon s vodom koja sadrži njegovu manju koncentraciju, ili „prozračivanje“ vode kisikom, odnosno upuhivanjem velike količine zraka u vodene bazene s njihove donje strane prilikom čega radon napušta vodom prilikom njena 'mjehurenja'. Kako navodi Njemačka komisija za zaštitu od zračenja, voda za piće na području Njemačke nalazi se unutar dozvoljenih granica, pri čemu koncentracija radona ne prelazi vrijednost od 100 Bq/L. U zemljama s općenitim visokim razinama radona u vodi, velika vodoopskrbna poduzeća dužna su provoditi ispitivanja te reagirati smanjivanjem koncentracije i provoditi kontrolna mjerenja za pitku vodu (BFS, 2021).

Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost navodi (2018) : „Dosadašnja provedena mjerenja (u posljednje 3 godine) u zonama opskrbe koje u Republici Hrvatskoj opskrbljuju najmanje 10 000 ljudi, pokazuju da su koncentracije aktivnosti radona niske i da su uglavnom red veličine ispod vrijednosti parametarske vrijednosti koja je 100 Bq l-1. Akcijska razina za smanjenje radona u vodi iznosi 1000 Bq l-1.“ Prethodno navodi u sklopu Akcijskog plana za radon za razdoblje 2019. – 2024. Prema navedenom, može se zaključiti da su pitke vode u Republici Hrvatskoj sigurne što se tiče koncentracija radona te da se reagira u slučaju povišenih koncentracija. Udisanje radona koji se nalazi u zraku u zatvorenom prostoru može prouzrokovati rak pluća. Raspada se u radioaktivne čestice koje ostaju u plućima nakon udisanja te njihovom daljnjom razgradnjom oštećuju plućno tkivo i povećavaju vjerojatnost za razvoj raka. Naravno, veći rizik imaju ljudi koji su pušači. Međutim, svi koji su izloženi visokim razinama radona

neće razviti rak, ali važno je za napomenuti da je radon u zraku zatvorenih prostorija drugi po redu uzročnik raka pluća, nakon konzumiranja cigareta (Slika 4.1-2.). Mali udio radona u zraku, oko 1 do 2 %, dolazi iz vode za piće. Dio radona ostaje u vodi te pije vode koja sadrži radon, također kao onaj radon iz zraka, predstavlja rizik od razvoja raka unutarnjih organa, prvenstveno želuca. Ali s obzirom na manje količine radona u pitkoj vodi, taj rizik manji je od rizika koji uzrokuje radon iz zraka zatvorenih prostorija. Kako navodi EPA u svojim izvješćima, radon u pitkoj vodi uzrokuje oko 168 smrtnih slučajeva od raka godišnje; jedan dio (89 %) od raka pluća koji uzrokuje udisanje radona i drugi dio (11 %) od raka želuca koji uzrokuje konzumiranje vode koja sadrži radon (EPA, 2014).



Slika 4.1-2. Radon je štetan po ljudsko zdravlje. (Demarco, 2023)

4.2. Karakteristike uređaja za mjerenje

Kao što je već spomenuto, uređaj koji je korišten prilikom mjerenja koncentracije radona u tlu na terenu je RTM 2200 Soil Gas (Slika 4.2-2.). To je uređaj za brzo, točno i sigurno mjerenje radona/torona u zraku tla, zraku prostorija i vodi. Koristi se lagano, ovisno o pripremi za različite vrste mjerenja (postavljanje sonde u tlo ili priprema uzorke vode u komoru za ekshalaciju), uređaj se pokreće i integracijom primljenih signala na detektoru kroz određeni vremenski interval prikazuje rezultate mjerenja. Također, obavlja određivanje propusnosti tla i ispuhivanje mjerne komore svježim zrakom nakon završetka mjerenja. Ako slučajno dođe do ulaska vode, isključuje se pumpa zaštitom od prodora. Princip mjerenja temelji se na alfa spektroskopiji. Za kraj mjerenja i nedovoljnu propusnost tla signal daje signalna lampica na kućištu (Slika 4.2-1.). Softver 'dVISION' omogućuje upravljanje i prikaz prikupljenih podataka i izvoz u CSV i KML datoteke. Za točnu procjenu koncentracije radona, uređaj istovremeno mjeri i vlažnost tla kao jedan od važnih parametara. Također, uređaj ima i funkcije potrebne za druge primjene, za mjerenje koncentracije radona i torona u vodi i zraku;, GPS za lakši prikaz lokacija mjerenja, itd. (SARAD, 2020).



Slika 4.2-1. Kućište instrumenta s vidljivom signalnom lampicom. (SARAD, 2020)



Slika 4.2-2. Uređaj za mjerenje koncentracije radona. (SARAD, 2020)

4.3. Mjerenje koncentracije radona u zraku tla

Mjerenje koncentracije radona u tlu, odnosno u zraku tla, uglavnom se bazira na otkrivanju učinaka radioaktivnog raspada radona i produktima njegovog raspada. Postoje tri skupine tehnika mjerenja, ovisno o parametrima rezultata koji su potrebni, a to su: trenutačno mjerenje u trenutnoj vrijednosti koncentracije radona u tlu (uzimanje uzoraka), integralno mjerenje koje za rezultat ima tlo prosječnih koncentracija radona povezano s određenim mjerenjem u određenom intervalu, te kontinuirano mjerenje koje daje rezultate u nizu prosječnih koncentracija radona u tlu. Radon u tlu obično se mjeri specijaliziranim instrumentima, kao što su detektori radona. Uobičajeni tipovi detektora radona koji se koriste za mjerenje koncentracija u tlu uključuju scintilacijske detektore, detektore alfa zraka i slično. Ovisno o ciljevima mjerenja, variraju dubine u tlu na kojima se postavljaju detektori. Ostavljaju se u tlu određeno vremensko razdoblje koje varira s obzirom o vrsti uređaja i ciljevima istraživanja. Nakon određenog vremena izlaganja, detektori radona se vade iz tla. U slučaju korištenja aktivnih detektora, dobivaju se podaci u stvarnom vremenu koji se mogu očitati izravno s instrumenta. (Barnet i dr., 2008).

Za potrebe ovog završnog rada, mjerene su koncentracije radona u tlu na već spomenutoj lokaciji Križ Hrastovački (Slika 4.3-1.). Terenska istraživanja izvodila su se dana 30. ožujka 2022. Područje istraživanja nalazi se u blizini rasjedne zone čije su manifestacije na površini zabilježene nakon Petrinjskog potresa u ožujku 2020. godine. Prilikom mjerenja korišten je RTM 2200 Soil Gas instrument; to je uređaj za mjerenje koncentracije radona i torona u zraku tla, zraku prostorija te vodi. Mjerenje koncentracije radona u tlu započinje stavljanjem šipki u tlo. Čelična šipka postavlja se u čeličnu cijev te se zabiju u tlo. Na vrh šipke stavlja se jednokratni "lost tip" (Slika 4.3-2.), to je vrh koji štiti cijev od ulaska zemlje unutar nje te se svaki 'tip' gubi prilikom svakog mjerenja, jer ostane u tlu. Poslije se izbija kako bi se napravio filter. Sonda i uređaj za mjerenje povežu se silikonskim crijevom. Mjerenje se odvija u ciklusima, od kojih svaki traje 20 minuta, a na terenu prilikom istraživanja ponavljali smo ih 3 do 4 puta. Na završetku mjerenja dobiveni rezultat je $67\ 434\ \text{Bq/m}^3$ (Slika 4.3-3.) te propusnost $0,67 \times 10^{-13}$ D (Darcy), što predstavlja koncentraciju radona u zraku tla koja spada u srednju kategoriju rizika prema radon indeksu.



Slika 4.3-1. Mjerenje koncentracije radona u zraku tla.

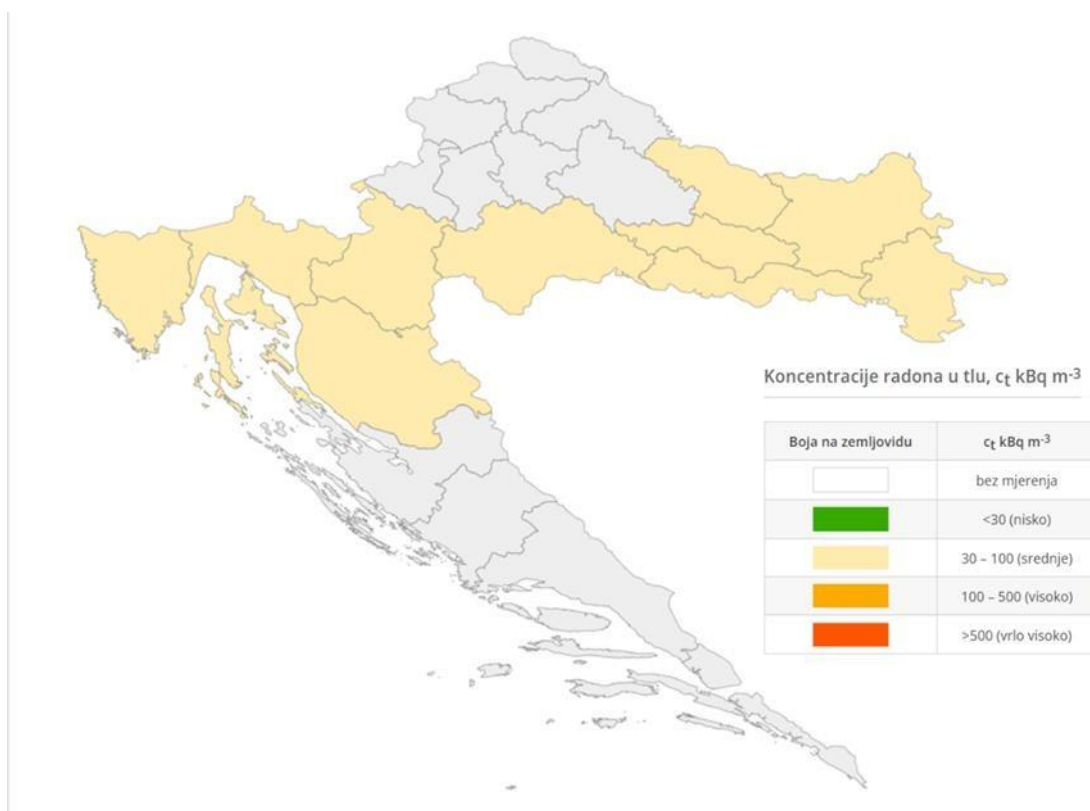


Slika 4.3-2. „Lost tip“.



Slika 4.3-3. Rezultati mjerenja koncentracije radona u zraku tla.

Na slici 4.3-4 je prikazana karta koncentracije radona u tlu u Republici Hrvatskoj, pri čemu se uočava da su mjerenja u nadležnosti županijskih institucija, jer su na karti područja deset županija obojena žutom bojom koja, prema pratećoj legendi, označava prosječne koncentracije radona u rasponu od 30-100 kBq/m³. Uočava se i izostanak mjerenja u osam županija na sjeveru i četiri južne županije (Ravnateljstvo civilne zaštite, 2020).



Slika 4.3-4. Karta RH s prosječnim vrijednostima koncentracija radona po županijama (Ravnateljstvo civilne zaštite, 2020)

4.4. Način izvođenja mjerenja radona u vodi

Mjerenje koncentracije radona u vodi instrumentom RTM 2200 temelji se na ostvarivanju ravnotežnog stanja između aktivnosti radona u zraku i u vodi koje se odvija unutar zatvorenog sustava u određenom vremenskom periodu. Omjer između spomenutih aktivnosti ovisi o temperaturi vode uzetog uzorka, a ta ovisnost izražava se Oswaldovim koeficijentom. Taj koeficijent pokazuje da se topljivost radona smanjuje, ako se temperatura vode poveća, što znači da vode koje imaju više temperature rezultiraju višim koncentracijama radona u vodi (SARAD, 2020).

U sklopu spomenutih terenskih istraživanja na području mjesta Križ Hrastovački, u sklopu mjerenja koncentracija radona u tlu, izvedena su i mjerenja radona u vodi. Mjerenja su izvedena na izvoru, gdje lokalno stanovništvo slobodno dolazi po svoje zalihe pitke vode, što znači da je inicijalno mjerenje izvođeno na samom mjestu uzorkovanja. Dodatni uzorci su uzimani na mjestu izvora kako bi se pratilo opadanje aktivnosti radona u vodi kroz vremenski period nakon uzorkovanja. Uzorci vode su homogenizirani i uzeti u četiri HDPE (*High-density polyethylene*) sterilne boce jednake zapremnine (Slika 4.4-1.) koje su bile kompletno napunjene kako ne bi došlo do izdvajanja radona u volumen zraka u boci. Svako mjerenje se provodi u četiri ciklusa po 15 minuta, s tim da se prvo mjerenje odbacuje, a od preostala tri uzorka uzima se srednja vrijednost mjerenih podataka. Iznos mineralizacije uzorka iznosio je 321 ppm, a temperatura uzorkovane vode bila je 11 °C. Na kraju mjerenja, podaci se prikazuju na zaslonu instrumenta (Slika 4.4-2.). Sama koncentracija radona u vodi unutar je dozvoljenih vrijednosti za upotrebu. Mjerenje na ostalim uzorcima provedeno je u laboratoriju s različitim vremenskim odmakom od vremena uzorkovanja. Vrijednosti su prikazane u Tablici 4.4-1.



Slika 4.4-1. HDPE boce korištene za uzorkovanje vode na terenu.



Slika 4.4-2. Mjerenje koncentracije radona u vodi.

Tablica 4.4-1. Rezultati mjerenja koncentracije radona u vodi u okolici Križa Hrastovačkog

Vrijeme proteklo od uzorkovanja (sati)	Temperatura (°C)	mineralizacija (ppm)	1. mjerenje (Bq/m3)	2. mjerenje (Bq/m3)	3. mjerenje (Bq/m3)	prosječna vrijednost (Bq/m3)	Bq/l
0,83	11	321	2174	2386	2337	2299	3,505
9,58	15	237	6545	6047	5618	6070	7,738
24,88	21	237	6766	6888	6074	6576	8,041
31,75	21	237	3638	4659	3860	4052	4,954
47,33	23	234	3731	3768	3187	3562	4,305
59,83	21	237	3259	3676	3316	3417	4,178
70,42	21	237	2075	2287	2123	2161	2,642

5. PRORAČUN POVRANTIH KRIVULJA ZA ODREĐIVANJE INICIJALNE KONCENTRACIJE RADONA U UZORKU

Radon je prirodni plin koji nastaje alfa raspadom radija, a daljnjim raspadom radona nastaju jezgre kćeri koje su i same radioaktivne. Sam proces radioaktivnog raspada statističke je prirode pa je tako moguće izračunati kako se vremenski mijenja količina radioaktivne stvari u uzorku. Početni broj jezgri, broj neraspadnutih jezgri i vrijeme poluraspada povezuje jednostavan zakon koji se zove zakon radioaktivnog raspada (Galović i Tuškan, 2023.).

Vrijeme poluraspada (T) definira se kao vrijeme potrebno da se raspadne pola početnih jezgara, a svaka atomska jezgra ima vrijeme poluraspada i konstantu poluraspada (λ) te je njihov odnos opisan jednadžbom:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (5-1)$$

Pri radioaktivnom raspadu određene jezgre također se promatra i broj jezgri koje su ostale ne raspadnute (N) u odnosu na početni broj jezgri (N_0) nakon nekog vremena t :

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{-\frac{t}{T}} \quad (5-2)$$

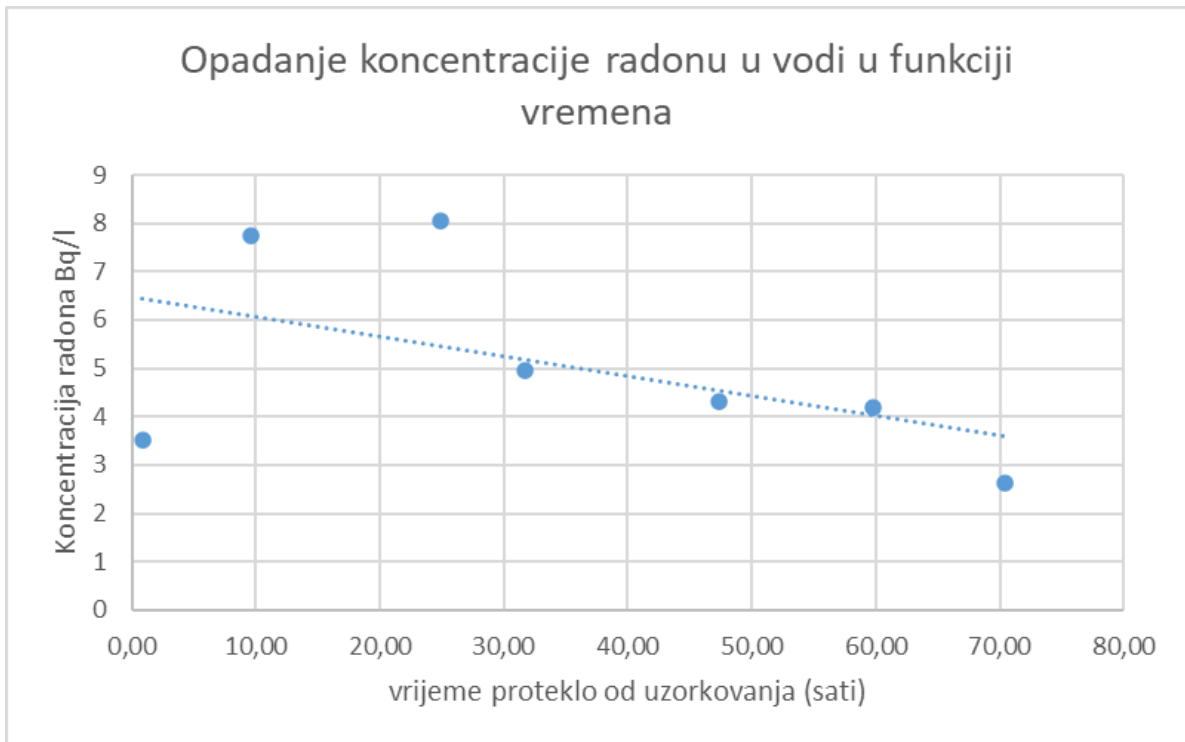
Također, postoji i aktivnost nekog uzorka (A), što predstavlja broj raspada u jedinici vremena, a opisuje se izrazom:

$$A = \lambda N \quad (5-3)$$

Aktivnost se u funkciji vremena smanjuje po istom zakonu kao i broj jezgara pa tako imamo sljedeći izraz (Gradivo.hr. 2023):

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-\frac{t}{T}} \quad (5-4)$$

Cilj izvedenih mjerenja i završnog rada je prikazati raspadanje radona tijekom vremena (Slika 5-1.). Izmjerene vrijednosti ne pokazuju linearno opadanje koncentracije radona u vodi. Štoviše, postoji velika razlika između rezultata mjerenja neposredno nakon uzorkovanja i laboratorijskih gdje je došlo do povećanja koncentracije radona. Važno je napomenuti da je jedina razlika u mjerenjima bilo u ambijentalnim uvjetima (temperatura uzorka).



Slika 5-1. Raspadanje radona tijekom vremena

6. ZAKLJUČAK

Radon je radioaktivni kemijski element koji se nalazi u plinovitom stanju. Nalazi se svugdje u našoj okolini te nema boje, mirisa niti okusa. Jako štetno djeluje na ljudsko zdravlje. Iako kratkoročno izlaganje radonovom utjecaju ne bi trebalo predstavljati veliku zabrinutost, dugoročno izlaganje može prouzročiti veliku štetu pa stoga postoje okvirne vrijednosti koje se toleriraju i one vrijednosti na koje je potrebno reagirati. Ta vrijednost za vodu je 100 Bq/L, a za zatvorene prostore je 200 Bq/m³.

Mjerenja koja su provedena za potrebe ovog rada na području grada Petrinje i naselja Križ Hrastovači te njihove okolice, izvođena su RTM 2200 Soil Gas monitorom za mjerenje radona/torona u tlu i vodi. Iz tih mjerenja dobiveni su rezultati od 67 434 Bq/m³ što spada u srednju razinu rizika prema radon indeksu (Barnet i dr., 2008). Podaci koji su dobiveni iz mjerenja u vodi također spadaju u granice prihvatljivosti. Potrebno je obaviti dodatna istraživanja kako bi se ustanovio utjecaj temperature na topivosti radona. Također, dobivene su niže vrijednosti dosta brže što ukazuje na potencijalnu difuziju kroz HDPE plastičnu bocu.

7. LITERATURA

BARNET, I., PACHEROVA, P., NEZNAL, M., 2008. *Radon in geological environment-Czech experience*. Prague; Czech Geological Survey; ISBN 978-80-7075-707-9. (21.8.2023.)

DŽAVNI ZAVOD ZA RADIOLOŠKU I NUKLEARNU SIGURNOST, 2018. *Akcijski plan za radon za razdoblje 2019. – 2024*. Zagreb. (28.8.2023.)

PIKIJA, M., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A., ŠIKIĆ, K., MARINČIĆ, S., MARKOVIĆ, S., HEĆIMOVIĆ, I., BENČEK, Đ., JURIŠA, M., GALOVIĆ, I., KOROLIJA, B., OŠTRIĆ, N., AVANIĆ, R., 1975. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. List Sisak L 33-93*. Savezni geološki zavod Beograd.

OTTON K. J., 1992. *The geology of radon*. University of Michigan Library. (23.8.2023.)

Web izvori:

BFS, 2021. *What is radon ?* URL: https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/radon/introduction/introduction_node.html

(23.8.2023.)

CCOHS, 2023. *Radon in buildings*. URL: https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/radon.html (24.8.2023.)

CCOHS, 2023. *What are the units of measuring radon levels?* URL: https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/radon.html (24.8.2023.)

EPA, 2014. *Basic information about radon in drinking water*. URL: <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/basicinformation-2.html> (26.8.2023.)

EPA, 2023. *Health Risk of Radon*. URL: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon#head> (30.8.2023.)

GALOVIĆ, S., TUŠKAN, T., 2023. *Zakon radioaktivnog raspada*. URL: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/zakon-radioaktivnog-raspada.html> (30.8.2023.)

GRADIVO.HR, 2023. *Zakon radioaktivnog raspada*. URL: <https://gradivo.hr/pages/zakon-radioaktivnog-raspada> (30.8.2023.)

- HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA, MREŽNO IZDANJE, 2023. *Banovina*. URL: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=5742> (20.8.2023.)
- HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA, MREŽNO IZDANJE, 2023. *Radon*. URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51552> (14.9.2023.)
- KUŠAN, Z., 2023. *Mjerna jedinica bekerel*. URL: https://issuu.com/zoran1002/docs/web_abc_661/s/18383687 (25.8.2023.)
- RAVNATELJSTVO CIVILNE ZAŠTITE, 2020. *Radon u tlu – Republika Hrvatska po županijama*. URL: <http://radon.civilna-zastita.hr/radonski-zemljovid/radon-u-tlu/rh-po-zupanijama/> (26.8.2023.)
- SARAD, 2020. *RTM 2200 Soil Gas*. URL: https://www.sarad.de/product-detail.php?lang=en_US&cat_ID=1&p_ID=106 (21.8.2023.)
- ZBRINJAVANJE RADIOATKIVNOG OTPADA, 2021. *Radon*. URL: https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/radon_60/ (27.8.2023.)