

Mjerenje koncentracije plinova u zraku tla u svrhu utvrđivanja trasa migracije na području Banovine i na sjeveroistočnim obroncima Krndije

Borko, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:169:171667>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Studij Geologije

Diplomski rad

MJERENJE KONCENTRACIJE PLINOVA U ZRAKU TLA U SVRHU
UTVRĐIVANJA TRASA MIGRACIJE NA PODRUČJU BANOVINE I NA
SJEVEROISTOČNIM OBRONCIMA KRNDIJE

Karlo Borko

G405

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-01/22-01/26
URBROJ: 251-70-15-22-2
U Zagrebu, 7. 2. 2022.

Karlo Borko, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/26, URBROJ: 251-70-15-22-1 od 7. 2. 2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

MJERENJE KONCENTRACIJE PLINOVA U ZRAKU TLA U SVRHU UTVRĐIVANJA TRASA MIGRACIJE NA PODRUČJU BANOVINE I NA SJEVEROISTOČNIM OBRONCIMA KRNDIJE

Za mentora ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Izv. prof. dr. sc. Marko Cvetković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i komentoricu Dr. sc. Josipa Kapuralić.

Mentor:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Marko Cvetković

(titula, ime i prezime)

Komentorica:

(potpis)

Dr. sc. Josipa Kapuralić

(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)

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2019-043846 GEOloška karakterizacija podzemlja istočnog dijela Dravske depresije s ciljem procjene Energetskog Potencijala.

MJERENJE KONCENTRACIJE PLINOVA U ZRAKU TLA U SVRHU UTVRĐIVANJA
TRASA MIGRACIJE NA PODRUČJU BANOVINE I NA SJEVEROISTOČNIM OBRONCIMA
KRNDIJE

KARLO BORKO

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Ovim su se radom istraživali pogodni putevi migracije plinova iz podzemlja terenskim mjerenjima duž profila na području Banovine i sjeveroistočnim obroncima Krndije. Iz mjerenih podataka određivali su se radon indeksi za svaku pojedinu točku, koji su visoki u zonama migracije. Također pretežito visok omjer radona i torona upućuje na to da se izvori ovih plinova nalaze u dubokom podzemlju. Uz mjerenja koncentracija plinova uređajima SARAD RTM 2200 i ECOPROBE 5, mjerila se i prirodna radioaktivnost gama spektrometrom instrumentom Gamma Surveyor Vario te su uzeti uzorci stijena kristalinske podloge za petrografsku analizu.

Ključne riječi: Banovina, Krndija, radon, toron, ugljikov dioksid, migracija

Diplomski rad sadrži: 70 stranica, 31 slika, 16 tablica i 20 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF
Komentor: dr. sc. Josipa Kapuralić, poslijedoktorand RGNF

Ocjenjivači: dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF
dr. sc. Bojan Matoš, docent RGNF
dr. sc. Želimir Veinović, izvanredni profesor

Datum obrane: 11. veljače 2022.

SOIL GAS MEASUREMENTS FOR THE PURPOSE OF DETERMINING MIGRATION
ROUTE IN BANOVINA AND ON THE NORTH-EASTERN SLOPES OF KRNDIJA

KARLO BORKO

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Department of Geology and Geological engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This work identified suitable routes for the migration of gases from underground by field measurements along the profile in the Banovina area and on the north-eastern slopes of Krndija. From the obtained results, radon index was determined for each point, which is high in the migration zones. Also, the predominantly high ratio of radon and thoron indicates that the sources of these gases are located deep underground. In addition to measuring the gas concentration with the devices SARAD RTM 2200 and ECOPROBE 5, the natural radioactivity was also measured by gamma spectrometry with the Gamma Surveyor Vario instrument, and samples of crystalline bedrock were taken for petrographic analysis.

Keywords: Banovina, Krndija, radon, thoron, carbon dioxide, migration

Thesis contains: 70 pages, 31 figures, 16 tables and 20 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Marko Cvetković, PhD

Technical support and assistance: Assistant Professor Josipa Kapuralić, PhD

Reviewers: Associate Professor Marko Cvetković, PhD
Assistant Professor Bojan Matoš, PhD
Associate Professor Želimir Veinović, PhD

Date of defense: February 11th, 2022

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Geografski smještaj istraživanog područja	3
3.	Geološki smještaj istraživanog područja	6
4.	Radon i toron	8
4.1.	Radon indeks	11
5.	Ugljikov dioksid i metan	12
5.1.	Ugljikov dioksid.....	12
5.2.	Metan.....	15
6.	Plinovi u određivanju rasjednih zona i predviđanju potresa	16
7.	Radioaktivnost.....	18
7.1.	Prirodni radioaktivni elementi u tlu i stijenama	19
8.	Metode mjerenja i instrumenti	21
8.1.	Mjerenja radona i torona	21
8.2.	Mjerenja ugljikovog dioksida i metana.....	23
8.3.	Spektrometrija gama zraka.....	25
9.	Petrinja – Rezultati mjerenja i rasprava	27
9.1.	Profil – Radon, toron	27
9.1.1.	Određivanje indeksa radona	32
9.2.	Profil – Radon, CO ₂	35
9.3.	Ukupna koncentracija ugljikovodika (TP) i metan (CH ₄).....	38
10.	Našice – Rezultati mjerenja i rasprava	40
10.1.	Profil 1 – Radon, toron	40
10.2.	Profil 1 – Radon, CO ₂	44
10.3.	Profil 2 – Radon, toron	47
10.4.	Profil 2 – Radon, CO ₂	51
10.5.	Petrografske analize stijena kristalinske podloge	54
10.5.1.	Uzorak 1	55
10.5.2.	Uzorak 2	56
10.6.	Spektrometrija gama zračenja.....	57
10.7.	Određivanje radon indeksa	59
10.7.1.	Profil 1	59
10.7.2.	Profil 2	62
10.8.	Ukupna koncentracija ugljikovodika (TP) i metan (CH ₄).....	65
10.8.1.	Profil 1	65
10.8.2.	Profil 2	67
11.	Zaključak	68

Popis slika

Slika 1. Područje istraživanja na Banovini s točkama mjerenja i orijentacijom profila (Topografska karta 1:25000, Marjanović, 2010)	3
Slika 2. Karta potresnog područja s označenim točkama mjerenja i orijentacijom profila (Markušić et al., 2021)	4
Slika 3. Područje istraživanja na Krndiji s točkama mjerenja, orijentacijom profila i lokacijama mjerenja gama zračenja (Topografska karta 1:25000, Marjanović, 2010)	5
Slika 4. Karta prikaza rasjeda, podloge neogena i neogenske ispune na području Sjevernohrvatskog bazena (Pavelić i Kovačić, 2018)	6
Slika 5. Lanac radioaktivnog raspada uranija (Hanrahan, 2012)	8
Slika 6. Lanac radioaktivnog raspada torija (Tokonami, 2020)	9
Slika 7. Shematska ilustracija prirodnog podrijetla ugljikovog dioksida u geološkim sustavima ... (Baines & Worden, 2004)	15
.....	17
Slika 8. Model prostorne distribucije radona (Chen et al., 2018)	17
Slika 9. Shema mjerenja koncentracija radona i torona instrumentom SARAD RTM 2200 SG (Cvetković et al., 2021)	22
Slika 10. Fotografija mjerenja koncentracija radona i torona instrumentom SARAD RTM 2200 SG	22
Slika 11. Shema mjerenja CO ₂ , CH ₄ i TP instrumentom ECOPROBE 5 (Cvetković et al., 2021)	23
.....	24
Slika 12. Fotografija mjerenja CO ₂ , CH ₄ i TP instrumentom ECOPROBE 5	24
Slika 13. Shema mjerenja Gamma Surveyor Vario-om (Cvetković et al., 2021)	25
Slika 14. Fotografija mjerenja Gamma Surveyor Vario-om	26
Slika 15. Izmjerene koncentracije radona i torona	28
Slika 16. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Sisak (Pikija, 1987) s omjerom radona i torona (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)	30
Slika 17. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Sisak (Pikija, 1987) s indeksom radona (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)	34
Slika 18. Izmjerene koncentracije radona i torona	36
Slika 19. Izmjerene koncentracije radona i torona	41
Slika 20. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s omjerom radona i torona (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)	43
Slika 21. Izmjerene koncentracije radona i CO ₂	45
Slika 22. Izmjerene koncentracije radona i torona	48
Slika 23. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s prikazom omjera radon/toron (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)	50
Slika 24. Izmjerene koncentracije radona i CO ₂	52
Slika 25. Lokacije uzetih uzoraka za petrografsku analizu (Topografska karta 1:25000, Marjanović, 2010)	54
Slika 26. Slika preparata Uzorka 1 bez uključenog polarizatora	55
Slika 27. Slika preparata Uzorka 1 s uključenim polarizatorom	55
Slika 29. Slika preparata Uzorka 2 s uključenim polarizatorom	56
Slika 28. Slika preparata Uzorka 2 bez uključenog polarizatora	56
Slika 30. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s grafičkim prikazom radon indeksa	60
Slika 31. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s grafičkim prikazom radon indeksa	63

Popis tablica

Tablica 1. Tablica određivanja Radon indeksa (Barnet et al., 2008).....	11
Tablica 2. Geološki izvori CO ₂ i njihovi sastavi stabilnih izotopa (Baines & Worden, 2004)	13
Tablica 3. Koncentracije radioelemenata u različitim tipovima stijena (Killeen et al, 2015)	20
Tablica 4. Podaci dobiveni terenskim mjerenjem na području Petrinje	27
Tablica 5. Tablica indeksa radona i propusnosti	33
Tablica 6. Rezultati mjerenja radona i CO ₂	35
Tablica 7. Izmjerene koncentracije TP i CH ₄	38
Tablica 8. Rezultati terenskih mjerenja radona i torona s njihovim omjerom	40
Tablica 9. Rezultati mjerenja radona i CO ₂	44
Tablica 10. Rezultati terenskih mjerenja radona i torona s njihovim omjerom	47
Tablica 11. Rezultati mjerenja radona i CO ₂	51
Tablica 12. Rezultati mjerenja spektrometrije gama zračenja na izdancima stijena.	57
Tablica 13. Koncentracija radona i propusnost na prvom profilu.....	59
Tablica 14. Koncentracija radona i propusnost na drugom profilu.....	62
Tablica 15. Izmjerene koncentracije TP i CH ₄ na prvom profilu.....	65
Tablica 16. Izmjerene koncentracije TP i CH ₄ na drugom profilu	67

1. Uvod

Svaka stijena se odlikuje petrološkim i petrofizikalnim svojstvima. Poroznost, kao jedna od petrofizikalnih značajki, predstavlja volumen pora u odnosu na ukupni volumen stijene. Te pore su uvijek ispunjene fluidima koji mogu biti tekući ili plinoviti. Na većim dubinama plinovi su zbog temperaturnih i tlačnih uvjeta otopljeni u tekućim fazama. Oni se sa smanjenjem dubine, a samim time i smanjenjem temperature i tlaka, oslobađaju iz njih i pojavljuju se u plinovitoj fazi. To kretanje fluida prema površini moguće je ako su pore u stijenama međusobno povezane, što znači da se odlikuju svojstvom propusnosti, ili postoji pukotinski sustav kojim fluid može migrirati.

Najpoznatiji fluidi koji se nalaze u podzemlju su voda i ugljikovodici u vidu nafte i plina. Ipak, oni nisu jedini koji ispunjavaju porni prostor stijena u podzemlju. Za potrebe ovog rada proučavalo se pojavljivanje radona, njegovog izotopa torona, ugljikovog dioksida i metana u zraku tla duž profila.

Radon je plemeniti plin čija se prisutnost povezuje sa stijenama čiji minerali u svom kemijskom sastavu sadrže uranij (kristalinske stijene i stijene nastale njihovim trošenjem). Također radon upućuje na dugotrajnu migraciju iz dubokog podzemlja. S druge strane, toron se također povezuje s kristalinskim stijenama i stijenama nastalim njihovim trošenjem, ali onima koje u svom sastavu sadrže torij, a nalaze se u neposrednoj blizini zbog izrazito kratkog vremena poluraspada.

Iako se često i ljudskim utjecajem utiskuje u podzemlje, ugljikov dioksid je plin koji se iz mnogih razloga prirodno pojavljuje u podzemlju. Za potrebe ovog rada istraživanje je bilo usmjereno na ulogu CO₂ u migraciji radona.

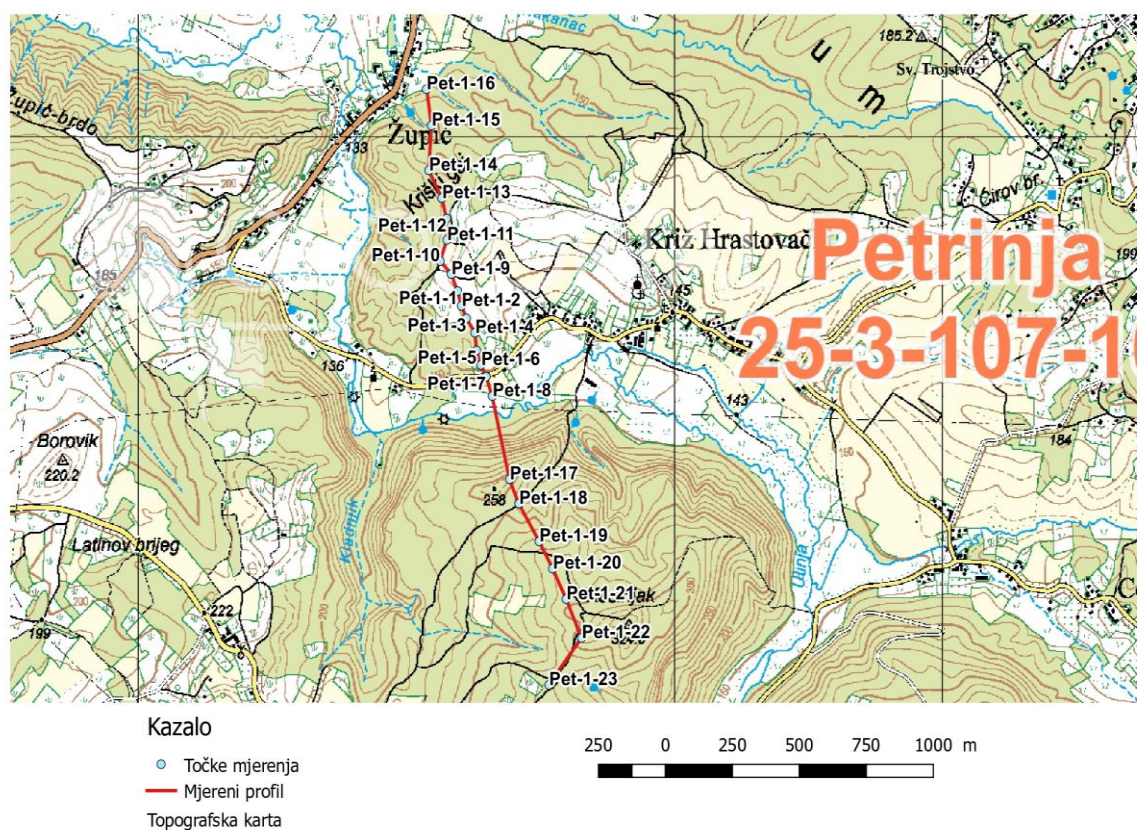
Metan je najjednostavniji ugljikovodik koji nastaje raspadom organske tvari u okolišu bez kisika. Prisustvo metana upućuje na prisustvo organske tvari i anaerobne okoliše. Također, može migrirati iz većih dubina kao rezultat dimigracije nakon termalnog sazrijevanja organske tvari. Ipak, vrlo je nestabilan pri atmosferskim uvjetima te se rijetko može detektirati površinskim mjerenjima.

Uz mjerenje koncentracija samih plinova korisno je mjeriti i prirodnu radioaktivnost gama spektrometrom zračenja kako bi se dobivene koncentracije mogle povezati s eventualnim utjecajem pripovršinskog litološkog sastava.

Mjerenjem koncentracija navedenih plinova moguće je dobiti informacije o geološkoj građi područja na kojem se istražuje, ali i pretpostaviti puteve migracije koji su omogućili pojavljivanje tih plinova na površini.

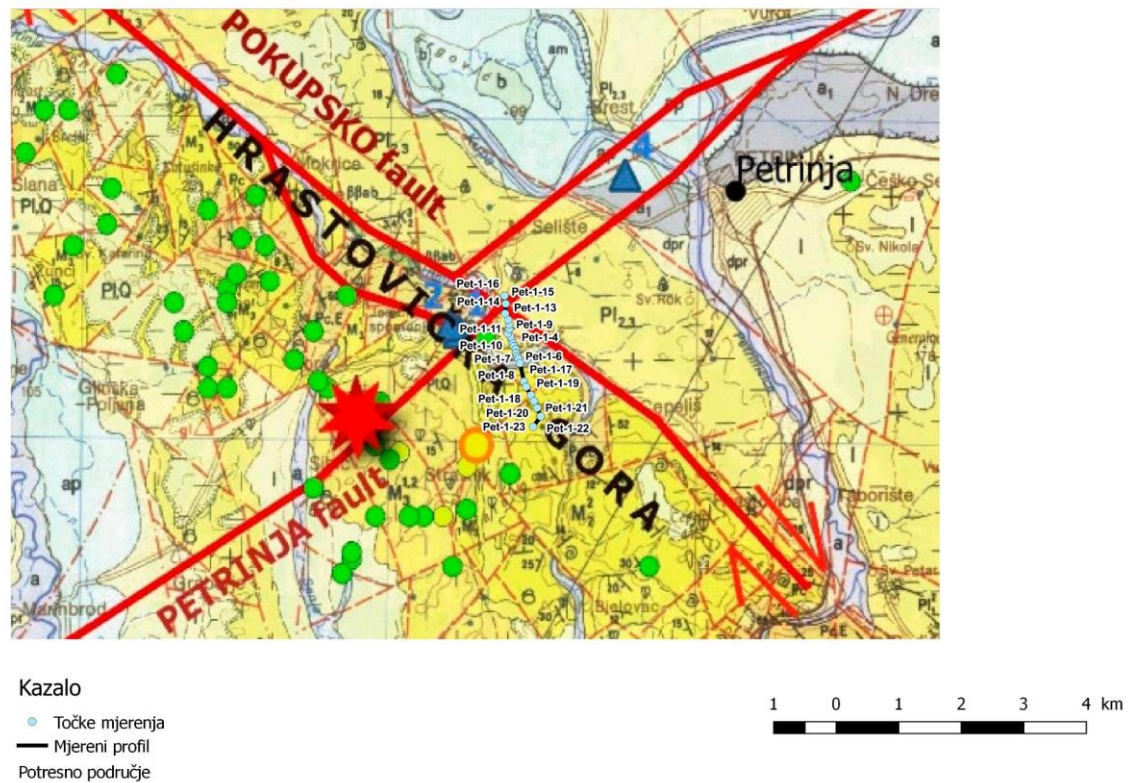
2. Geografski smještaj istraživanog područja

Prvo područje istraživanja nalazi se na Banovini, u okolici Petrinje, točnije u blizini mjesta Križ Hrastovački (Slika 1). Banovina je povijesna pokrajina jugoistočnog dijela središnje Hrvatske, južno od Siska. Nalazi se na JZ rubu panonskog područja, a omeđena je rijekom Kupom na sjeveru i sjeveroistoku, Glinom na zapadu te Unom na jugoistoku. Te rijeke ujedno predstavljaju najznačajnije vodotoke ovog područja. To je pretežito brdovito područje prosječne nadmorske visine od 300 m. Glavno uzvišenje predstavlja Zrinska gora s najvišim vrhom Piramidom (616 m) koja je i izvorište mnogih vodotokova koji svojim dolinama presijecaju okolno područje. Banovina je vrlo velikim dijelom pošumljena, ali naseljena znatno ispod prosjeka Republike Hrvatske. Glavna središta čine gradovi Petrinja, Hrvatska Kostajnica, Dvor i Glina (Vujić, 2005).



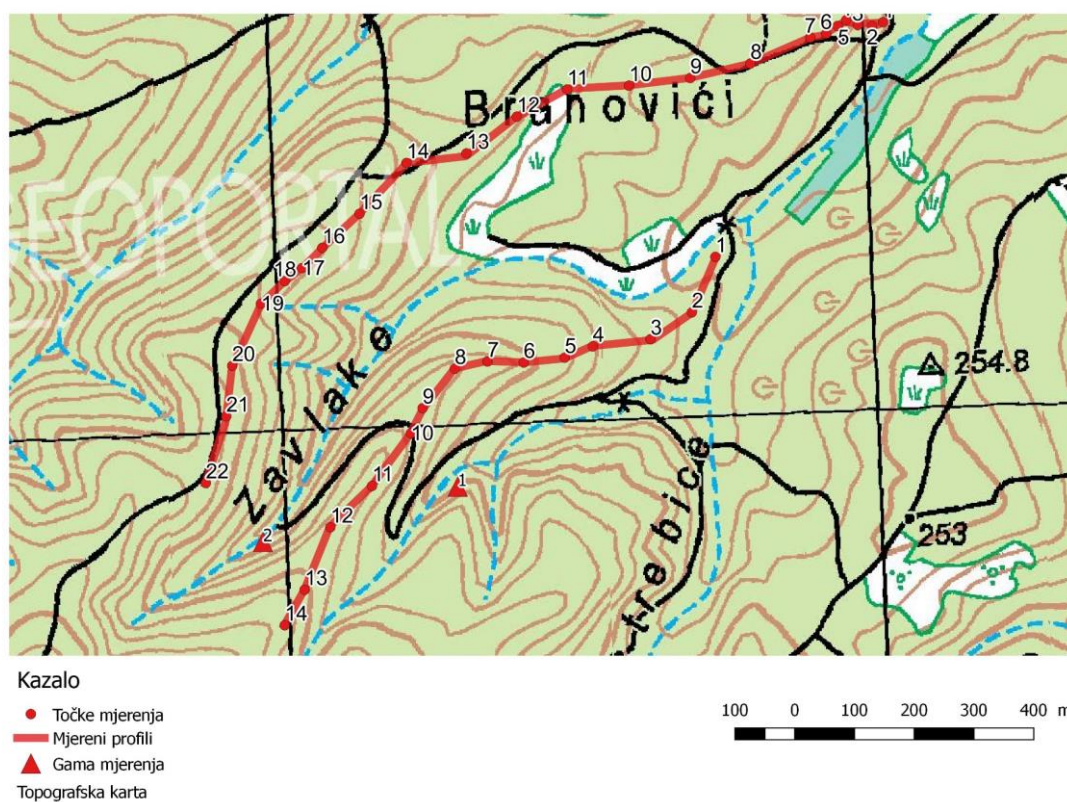
Slika 1. Područje istraživanja na Banovini s točkama mjerenja i orijentacijom profila (Topografska karta 1:25 000, Marjanović, 2010)

Istraživanje se odnosilo na zonu oko Hrastovačkog rasjeda, koji prema **Markušić et al. (2021)** predstavlja zapravo Pokupski rasjed (Slika 2). Za potrebe ovog rada Hrastovačkim rasjedom smatran je JI segment Pokupskog rasjeda koji prati pružanje Hrastovačke gore. Hrastovački rasjed je subvertikalan i pružanja je sjeverozapad-jugoistok.



Slika 2. Karta potresnog područja s označenim točkama mjerenja i orijentacijom profila (Markušić et al., 2021)

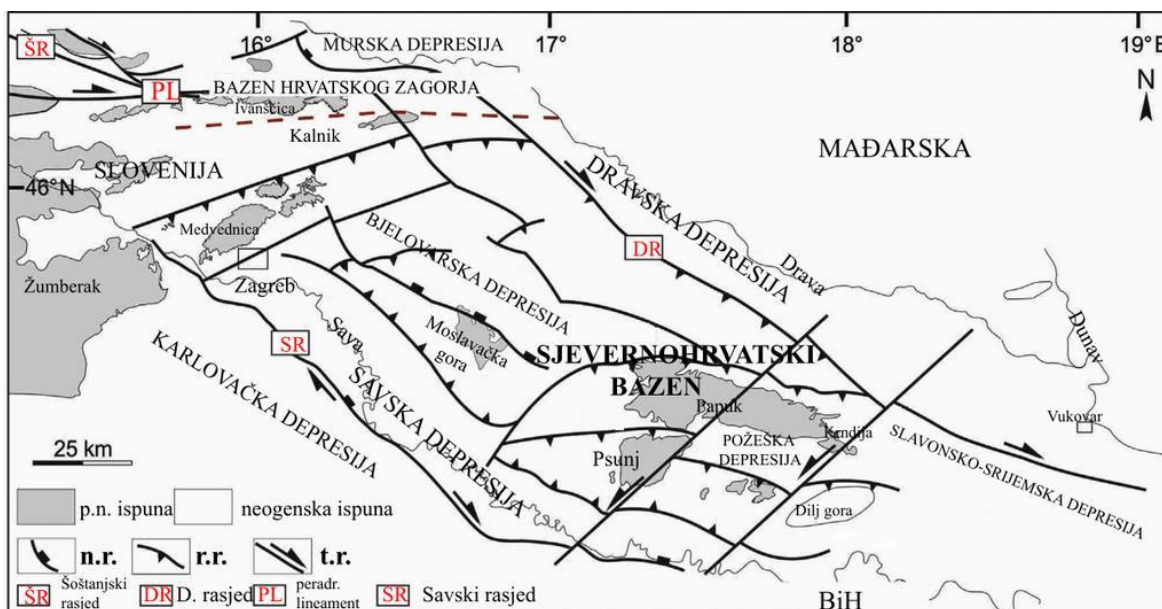
Drugo područje istraživanja je bilo pozicionirano na SI obroncima Krndije, u blizini Gradeca Našičkog (Slika 3). Krndija je dio Slavonskih planina koja obrubljuje Požešku kotlinu s njene sjeveroistočne strane. Najviši vrh je Kapavac (793 m), duga je 30 km, a pruža se u smjeru sjeverozapad-jugoistok. Zapadni dijelovi planine dio su Parka prirode Papuk. Pretežno je prekrivena bukovom i hrastovom šumom, a na južnoj padini, uz grad Kutjevo, nalaze se poznati Kutjevački vinogradi. Veći gradovi i naselja u blizini su Orahovica i Našice sjevernije te Kutjevo i Požega južnije od Krndije (Vujić, 2005).



Slika 3. Područje istraživanja na Krndiji s točkama mjerenja, orijentacijom profila i lokacijama mjerenja gama zračenja (Topografska karta 1:25 000, Marjanović, 2010)

3. Geološki smještaj istraživanog područja

Istraživano područje geološki se nalazi unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava, odnosno u Sjevernohrvatskom bazenu. Panonski bazenski sustav (PBS) okružen je istočnim Alpama na zapadu, Karpatima na sjeveru i istoku te Dinaridima na jugu, a proteže se unutar granica Hrvatske, Mađarske, Rumunjske i Srbije te manjim dijelom Austrije, Slovačke, Ukrajine, Slovenije, Bosne i Hercegovine te Poljske. PBS paleogeografski obuhvaća područje Centralnog Paratethysa, a jugozapadna granica mu se nalazi u sjeverozapadnoj Hrvatskoj i sjevernoj Bosni. Ekstenzija PBS-a u zapadnoj Hrvatskoj uzrokovana je uzdizanjem astenosfere i sudarom Afričke ploče s Europskom pločom tijekom eocena-oligocena što je dovelo do podvlačenja Jadranske mikroploče pod panonski segment Euroazijske ploče (**Pavelić i Kovačić, 2018**).



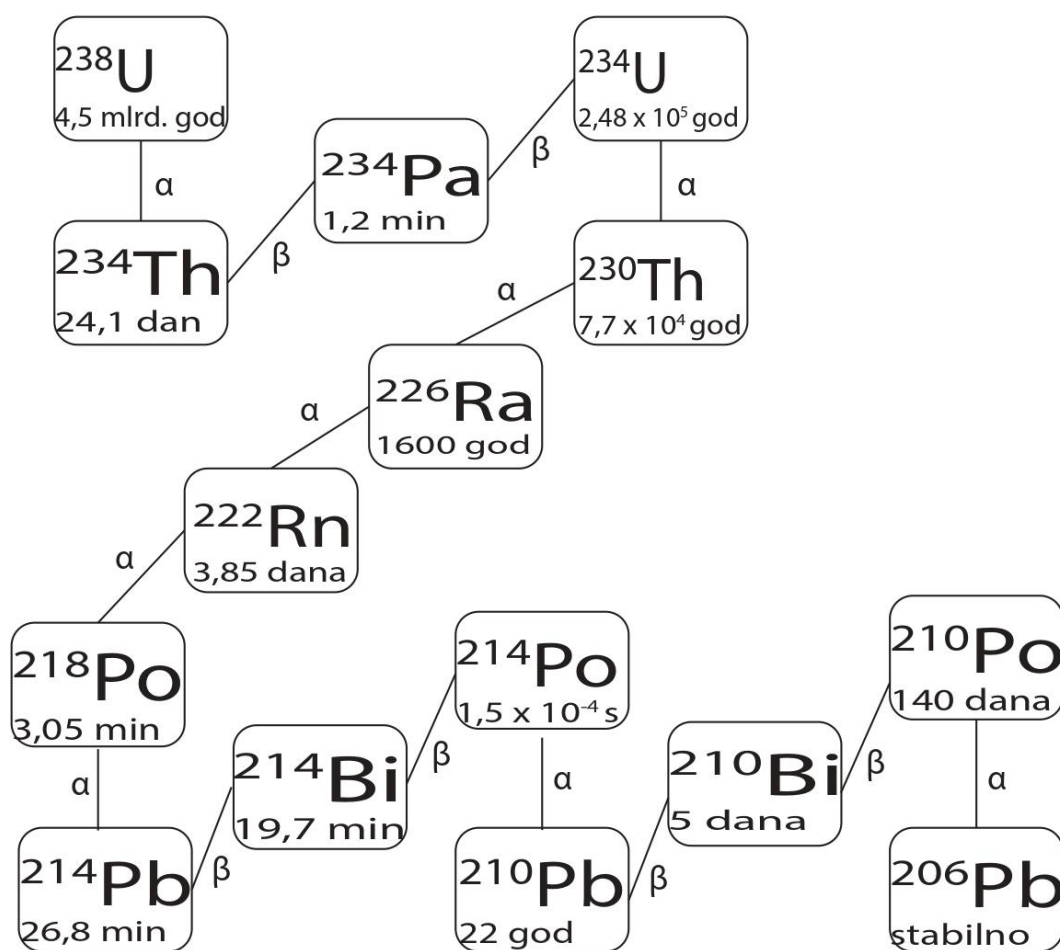
Slika 4. Karta prikaza rasjeda, podloge neogena i neogenske ispune na području Sjevernohrvatskog bazena (**Pavelić i Kovačić, 2018**)

U Sjevernohrvatskom bazenu sedimentacija je započela u donjem-srednjem miocenu, odnosno otnangu, formiranjem kontinentalnih okoliša nakon dugotrajne emerzije. To se promijenilo u srednjem miocenu (točnije srednjem badenu), kad je nastupila marinska sedimentacija. To je izduženi bazen riftnog tipa nastao pasivnim kontinentalnim riftanjem u srednjem badenu. Ekstenzijskom tektonikom unutar sjevernohrvatskog bazena nastale su četiri depresije: Murska, Savska, Dravska i Slavonko-srijemska (Slika 4). U evoluciji bazena možemo izdvojiti dvije glavne faze razvoja koje su stvorile veliki transgresivno-regresivni ciklus. Prva je sinriftna faza koja je trajala od otnanga do srednjeg badena tijekom

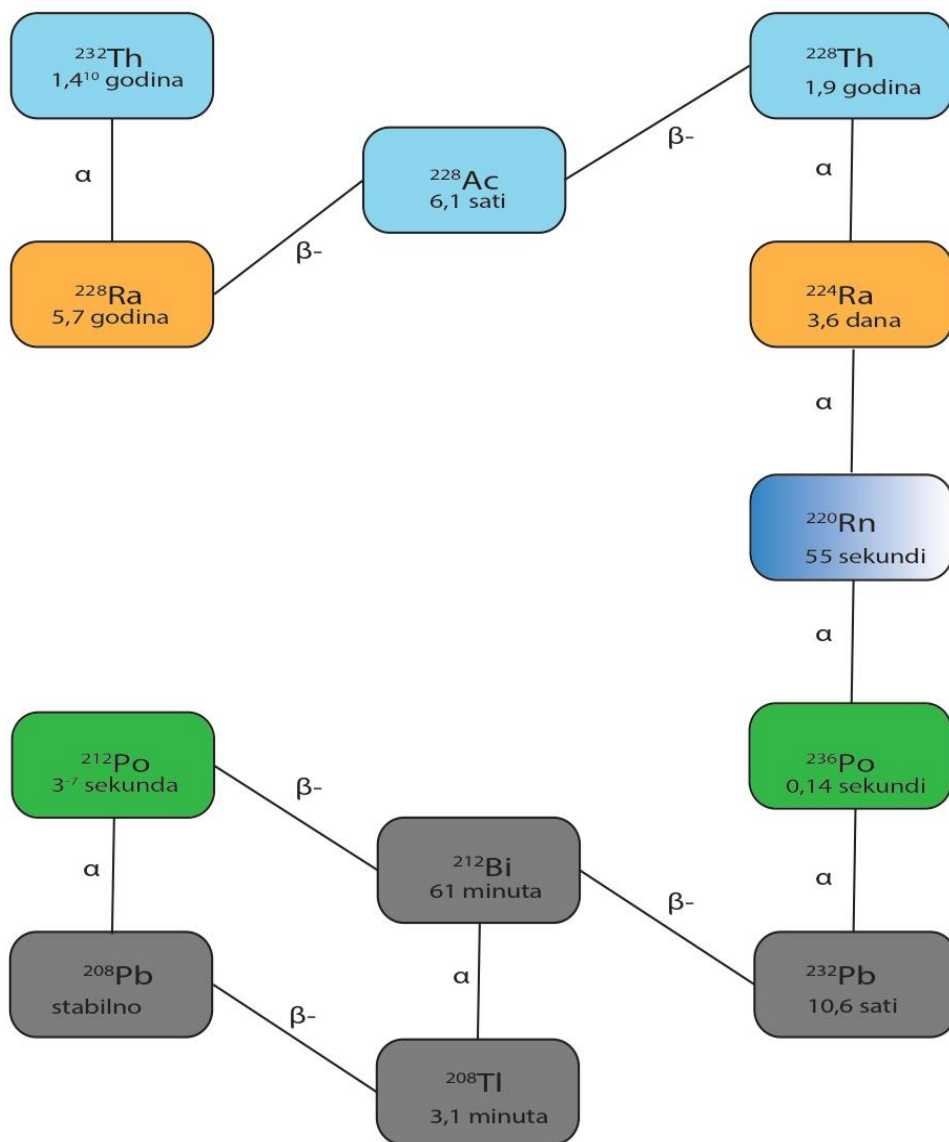
koje kontinentalni taložni okoliši prelaze u marinske. Taložni okoliši kontrolirani su listričkim normalnim rasjedanjem, rotacijom krovinskih krila, promjenom klime iz aridne u vlažnu, vulkanskom aktivnošću te transgresijom i regresijom. Druga, postriftna, faza trajala je od kraja badena do kvartara te je okarakterizirana prijelazom iz marinskih u kontinentalne okoliše, slabljenjem vulkanizma i dvijema kompresijskim fazama koje su dovele do inverzije bazena i uzdizanja strukturnih blokova. Granica sinriftne i postriftne faze može se uočiti u bazi sedimenata gornjeg badena, a definirana je rotacijskim uzdizanjem rasjednih blokova, intenzivnom erozijom sinriftnih sedimenata te ponovnim pojavljivanjem kristalinske predneogenske podine na površini što ima utjecaj na badensku paleogeografiju. Erozijska površina nastala tim događajima odgovara erozijskoj diskordanciji, koja je naknadno poplavljena marinskom transgresijom kasnog badena (**Pavelić i Kovačić, 2018**).

4. Radioaktivni izotopi: radon i toron

Radon ima tri izotopa, od kojih nijedan nije stabilan. Radon (^{222}Rn) je prirodni radioaktivni plin bez boje, okusa i mirisa koji nastaje raspadom radija (^{226}Ra) u sklopu lanca radioaktivnog raspada 238-uranija (^{238}U) (Slika 5), a ^{220}Rn , poznat i kao toron, u sklopu lanca radioaktivnog raspada torija (^{232}Th) (Slika 6). Dok je vrijeme poluživota ^{222}Rn 3,8 dana, ono za ^{220}Rn iznosi svega 55,6 s. Uranij se često pojavljuje u tragovima u mnogim tlima i stijenama te njegovi udjeli uvelike variraju.



Slika 5. Lanac radioaktivnog raspada uranija (Hanrahan, 2012)



Slika 6. Lanac radioaktivnog raspada torija (Tokonami, 2020)

Daljnijim raspadom radona nastaju radioaktivne čestice vrlo kratkog života čije udisanje može dovesti do visokog zdravstvenog rizika, odnosno raka pluća (Kollerud et al., 2013).

Izotopi radona (^{220}Rn i ^{222}Rn) su glavni izvori radioaktivnosti kojima je čovjek izložen, pri čemu ^{222}Rn čini 50% ukupne radijacije prosječne osobe. Koncentracija radona u korelaciji je s geološkom građom podloge i gama zračenja u zraku. Koncentracija uranija može se utvrditi na temelju mjerenja gama zračenja (Kollerud et al., 2013).

Geološka građa predstavlja glavni faktor u kontroli izvora i distribuciji radona u prirodi. Relativno visoke emisije radona zabilježene su u stijenama kao što su graniti, vapnenci, stijene s fosfatima te šejlovi bogati organskom materijom. Stijene koje se odlikuju visokom emisijom radona u svom mineralnom sastavu imaju prisutne minerale koji sadrže uran i/ili radij. U^{4+} ion se koncentrira u kasnijim stadijima diferencijacije magme, kad nastaju minerali poput cirkona i allanita. U idealnim uvjetima kemijski sastav cirkona je $Zr[SiO_4]$, ali prirodni cirkoni sadrže do 20 mas.% torija (Th), itrij, elemente rijetkih zemalja, do 24 mas.% hafnija, do 5 mas.% uranija, namibij i mangan. Alanit sadrži do 10 mas.% Ce_2O_3 i često itrij, lantan, torij, titanij, berilij i mangan (**Slovenec, 2002**). U sedimentnim stijenama fosfati i organski kompleksi mogu sadržavati više uranija nego primarni minerali.

Nakon otpuštanja iz minerala, migracija radona prema površini uvjetovana je petrofizikalnim karakteristikama stijena i tla, tipom i svojstvima fluida nositelja, kao što su ugljikov dioksid i podzemna voda, meteorološkim faktorima u vidu atmosferskog tlaka, vjetra, relativne vlažnosti zraka i kiše te udjelom vlage u tlu. Također, postojanje pukotinskih zona, ili antropogenih struktura povećava propusnost te omogućuje bolje otplinjavanje tla. Prisutnost radona je obrnuto proporcionalna propusnosti tla i stijenama u podini što propusnost čini vrlo važnim faktorom za pojavljivanje radona. Manja propusnost pokazuje manje koncentracije radona čak u glinama u čijoj se podini nalaze stijene koje sadrže uranij (**Kollerud et al., 2013**).

Otpušteni radon se brzo ispušta u atmosferu pa su njegove koncentracije na otvorenom prostoru u pravilu vrlo male, dok u podrumima, špiljama, rudnicima i tunelima može doći do nakupljanja radona.

Radon je kemijski inertan plin, što je izravno povezano s njegovom mobilnošću i kratkim poluživotom te uzrokuje uske/ograničene anomalije na površini. Radon upućuje na prisutnost toka plinovite komponente iz podzemlja u atmosferu procesom advekcije i može poslužiti za opisivanje strukturnog sklopa u podzemlju (**Michel-le pierres et al., 2010**).

Nedifuzivni transport radona uključuje plinove nositelje u kojima radon posluži kao komponenta za praćenje (tracer) transporta plinova iz dubljeg podzemlja do površine i atmosfere. Anomalije prisutnosti radona upućuju na zone povećane emisije, bilo da se radi o glavnim rasjedima ili sekundarnim pukotinama i njihovim sustavima (**Cvetković et al., 2021**).

4.1. Radon indeks

Mjerene koncentracije radona osim o navedenim geološkim, reljefnim, vegetativnim i drugim parametrima ovise i o propusnosti tla. U tlima male propusnosti dolazi do nakupljanja plinova u porama pa se mjerenjem dobivaju veće koncentracije. To ne mora nužno značiti da je puno plina migriralo do površine, već da se on dugo nakupljao na tom mjestu. S druge strane, u tlima veće propusnosti dolazi do ubrzanog otplinjavanja tla te se na tim mjestima uglavnom mjere manje koncentracije plinova.

Problem predstavljaju lokacije gdje su izmjerene relativno velike koncentracije radona uz visoke propusnosti tla. To govori da je izvor radona izrazito bogat uranijem iz kojeg nastaje radon i/ili se nalazi izrazito plitko u podzemlju.

Radon indeks je parametar koji govori o koncentraciji radona u odnosu na propusnost tla. Zbog svoje štetnosti, lokacije s visokim radon indeksom predstavljaju prijetnju za ljudsko zdravlje. Naravno, ukoliko se te lokacije nalaze ispod temelja kuća ili sličnih mjesta gdje se radon može nakupljati.

Za određivanje radon indeksa potrebno je prema **Barnet et al., 2008** odrediti kategorije propusnosti (niska, srednja i visoka) te koncentracije radona rasporediti prema Tablici 1. Niska propusnost je svaka propusnost manja od $4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, srednja je između $4 \cdot 10^{-13}$ i $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, dok je visoka svaka koja iznosi preko $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

Tablica 1. Tablica određivanja Radon indeksa (Barnet et al., 2008)

Radon Indeks	Koncentracija radona kBq/m ³		
Niski	$Rn < 30$	$Rn < 20$	$Rn < 10$
Srednji	$30 \leq Rn < 100$	$20 \leq Rn < 70$	$10 \leq Rn < 30$
Visoki	$Rn \geq 100$	$Rn \geq 70$	$Rn \geq 30$
	<i>Niska</i>	<i>Srednja</i>	<i>Visoka</i>
	Propusnost		

5. Ugljikov dioksid i metan

Ugljikov dioksid i metan smatraju se plinovima nositeljima radona koji često migrira s njima u plinovitoj smjesi. Mjerenja koncentracija ugljikovog dioksida, metana, volatilnih organskih spojeva i ostalih ugljikovodičnih spojeva služi za istraživanje raznih tipova zagađenja tla, kao na primjer zagađenje ugljikovodicima, nadgledanje procesa biološkog raspada koji se odvijaju u aerobnim uvjetima. Na taj način bakterije rastavljaju ugljikovodike procesom oksidacije na metan i ugljikov dioksid pri čemu nastaje i toplina.

Mjerenja ugljikovog dioksida, metana i ukupne koncentracije ugljikovodika (TP) mogu pomoći pri određivanju većih koncentracija uzorkovanih migracijom ugljikovodika u podzemlju (Cvetković et al., 2021).

5.1. Ugljikov dioksid

Ugljikov dioksid (CO_2) prirodni je plin koji nastaje raspadom organske tvari u uvjetima bogatim kisikom, ali nastaje na primjer i gorenjem fosilnih goriva, disanjem i slično. Ugljikov dioksid je najpoznatiji i najkoncentriraniji staklenički plin u Zemljinoj atmosferi te doprinosi njenom značajnom zagrijavanju. Utjecaj CO_2 na okoliš se u posljednje vrijeme nastoji smanjiti podzemnim skladištenjem. CO_2 je plin nositelj radona u rasjednutim bazenima bogatim glinom koja naliježe na sedimentne stijene poput vapnenaca, lapora i pješčenjaka siromašnim uranom.

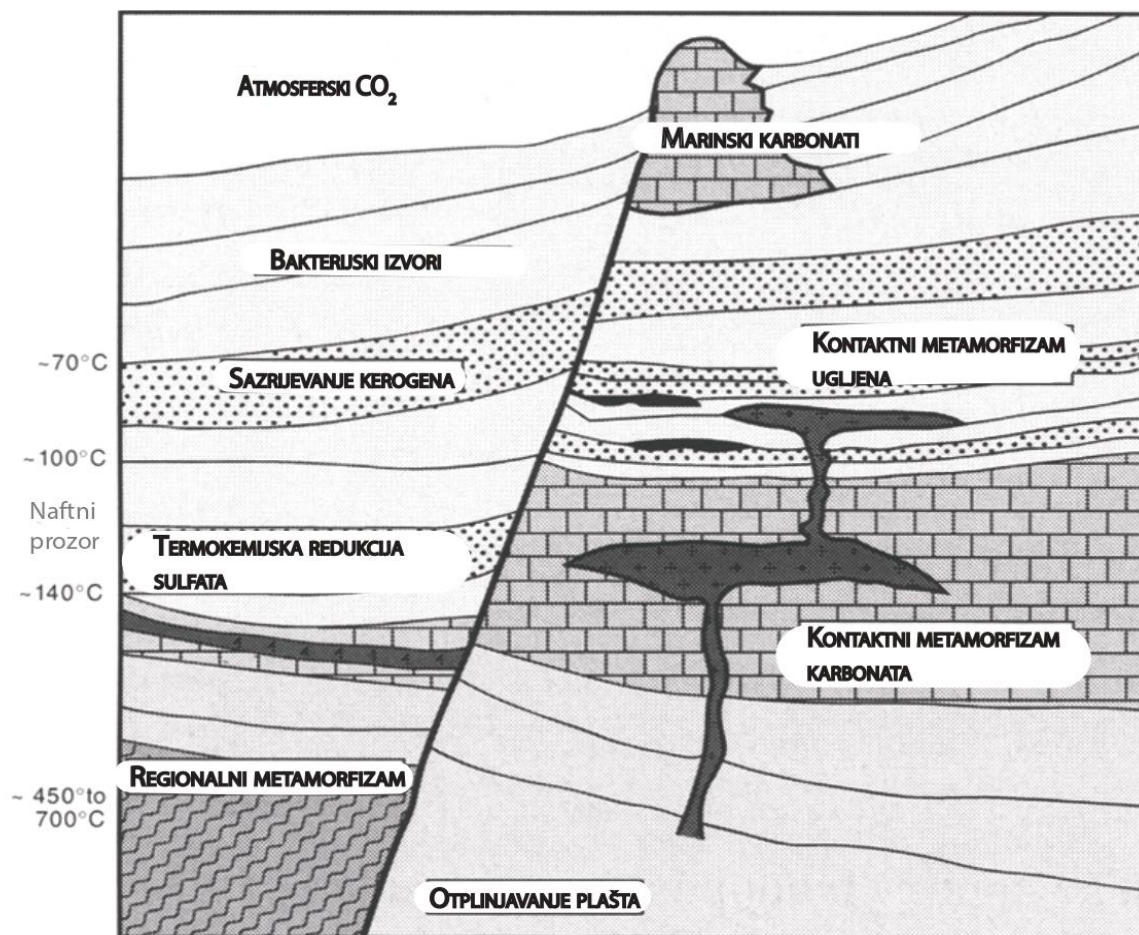
CO_2 je vrlo važan plin u geološkim formacijama te je prisutan u velikom broju prirodnih geokemijskih procesa. Ugljikov dioksid ima veliki utjecaj bilo da sudjeluje u disoluciji minerala ili dijagenezi u određenim formacijama. Nadpritisnuti CO_2 može narušiti kompaktnost izolatora te omogućiti migraciju fluida prema površini. Postoji više tipova CO_2 po postanku, biogeni i geološki, a tip se određuje omjerom stabilnih izotopa ugljika ^{13}C i ^{12}C ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). Taj se omjer uspoređuje sa standardom (Peedee Formation belemnite) te se izražava u promilima ($\delta^{13}\text{C}\text{‰ PDB}$). Pravi izvor CO_2 vrlo je teško odrediti na temelju geološke lokacije i izotopa budući da obje metode daju velike nejasnoće, tj. dvosmislenost (Tablica 2) (Baines & Worden, 2004).

Tablica 2. Geološki izvori CO₂ i njihovi sastavi stabilnih izotopa (Baines & Worden, 2004)

Izvor CO ₂	Doseg stabilnog izotopa ugljika ($\delta^{13}\text{C}\text{‰ PDB}$)	Glavna pojavljivanja
Duboka kora	-6‰	U blizini vrlo dubokih rasjeda
Juvenilni (vulkanski)	-6‰	Asocirano sa subdukcijom i riftanjem
Atmosferski CO ₂ izlučen iz meteorske vode	Ovisno o geološkom vremenu, cca. 6‰	Arteški pješčenjaci i vapnenci, na kraju vodonosnika
Fermentacija organske tvari	-20‰	Plitko zalegnuti sedimenti bogati organskom tvari
Bakterijska oksidacija organske tvari	-23‰	Plitko zalegnuti sedimenti bogati organskom tvari
Dekarboksilacija kerogena i ugljena	-25‰	Matične stijene i slojevi ugljena
Dijageneza vapnenaca	Ovisno o starosti vapnenca, od 2‰ do 3‰	Većina sedimentacijskih bazena, klastični sedimenti
Dijageneza karbotanima cementiranih pješčenjaka	Ovisno o $\delta^{13}\text{C}$ karbonatnog cementa	Većina sedimentacijskih bazena, klastični sedimenti
Termalni metamorfizam vapnenaca	Ovisno o starosti vapnenca, od 2‰ do 3‰	Kontaktni metamorfizam uzrokovan intruzijom
Oksidacija nafte	Od 20‰ do 40‰	Bakterijska- blizu površine Termokemijska - 120°C

Podzemni izvori CO₂ mogu se podijeliti u četiri skupine (Slika 7):

1. Duboki izvori CO₂ koji su česti u tektonski aktivnim područjima u Zemljinoj kori. Termalni metamorfizam i juvenilni izvori CO₂ povezani su s magmatskim procesima u zonama kolizije i riftanja. Pri visokim temperaturama dolazi do devolatilizacije, a samim time i gubitka CO₂ iz minerala.
2. Atmosferski CO₂ se može pronaći samo u aktivnim sustavima podzemne vode s konstantnim dotokom meteorske vode. Takvi se uvjeti mogu pronaći u arteškim bunarima/bazenima. Topljivost CO₂ ovisi o više faktora, kao što su temperatura, tlak i salinitet. Ovaj izvor je volumetrijski značajan samo ako su u sustavu relativno duboki vodonosnici koji se vrlo brzo uzdižu do uspostavljanja ravnoteže. Posljedica toga su mineralizirani izvori i gejziri sa značajnim sadržajem otopljenog CO₂.
3. Organski izvori mogu biti razni, ali podrijetlo im je svima zajedničko. Neke sedimentne stijene, uobičajeno madstoni, gline, šejlovi i lapori, prilikom zalijeganja sadrže organski detritus. Također, ne smije se zaboraviti na ugljen, koji nastaje sedimentacijom organske tvari i njenom karbonizacijom. Većina organske tvari razlaže se unutar prvih stotinjak metara zalijeganja procesima fermentacije, bakterijske oksidacije, bakterijske redukcije sulfata, itd. CO₂ iz ovih izvora može dominirati u lokalnom podzemlju i ima nizak $\delta^{13}\text{C}$ što upućuje na izotopni sastav organske tvari. Organska tvar koja se ne razloži unutar prvih stotinjak metara zalijeganja naziva se kerogen. Kerogen je vrlo brzo podvrgnut procesu zrenja, tj. maturizacije, što je zapravo skup termalnih procesa raspada kerogena predstavljen kao funkcija vremena i temperature. Dekarboksilacijom kerogena, koja nastupa brzo u procesu maturizacije, nastaje CO₂ s niskim $\delta^{13}\text{C}$ vrijednostima. Nafta, koja nastaje maturizacijom kerogena, može oksidirati, čime nastaje CO₂. Ležišta nafte mogu biti naknadno tektonski uzdignuta te cirkulacija meteorske vode može dovesti sulfatno-reduktivne bakterije i otopljeni kisik što dovodi do degradacije nafte, odnosno do nastajanja CO₂.
4. Dijageneza stijena koje sadrže karbonate i minerale glina može dovesti do nastajanja i izdvajanja CO₂. Karbonati i alumosilikati na temperaturama od oko 120°C reagiraju i proizvode CO₂ i visokotemperaturne silikate. Te reakcije nastavljaju se u područja visokotemperaturne dijageneze i niskog metamorfizma te proizvode CO₂ s $\delta^{13}\text{C}$ vrijednostima karakterističnim za autohtone karbonate. (**Baines & Worden, 2004**)



Slika 7. Shematska ilustracija prirodnog podrijetla ugljikovog dioksida u geološkim sustavima

(Baines & Worden, 2004)

5.2. Metan

Metan (CH_4) je najjednostavniji ugljikovodik te se pojavljuje kao prirodni dio okoliša, u atmosferi, vodi i tlu. Nastaje biološkim procesima bez prisustva kisika (O_2), tj. u reduktivnim uvjetima. Iako su prirodni izvori metana brojni, najveći problem predstavljaju antropogeni izvori kao što su masovno stočarstvo, uporaba fosilnih goriva, kompostare i dr. Metan ima veliki utjecaj na okoliš budući da je staklenički plin te doprinosi zagrijavanju atmosfere, a uz to i oštećuje ozonski omotač koji štiti Zemlju od štetnog Sunčevog zračenja. U velikim koncentracijama metan predstavlja opasnost od eksplozije, pogotovo kad se nalazi u smjesi s kisikom. Ekonomska uporaba metana je moguća budući da se može koristiti kao gorivo kao i drugi ugljikovodici (Chylkova et al., 2009).

CH_4 je u najvećem udjelu u zraku tla mikrobnog podrijetla generiran u anaerobnim uvjetima. U blizini površine može doći do oksidacije CH_4 čime nastaje CO_2 .

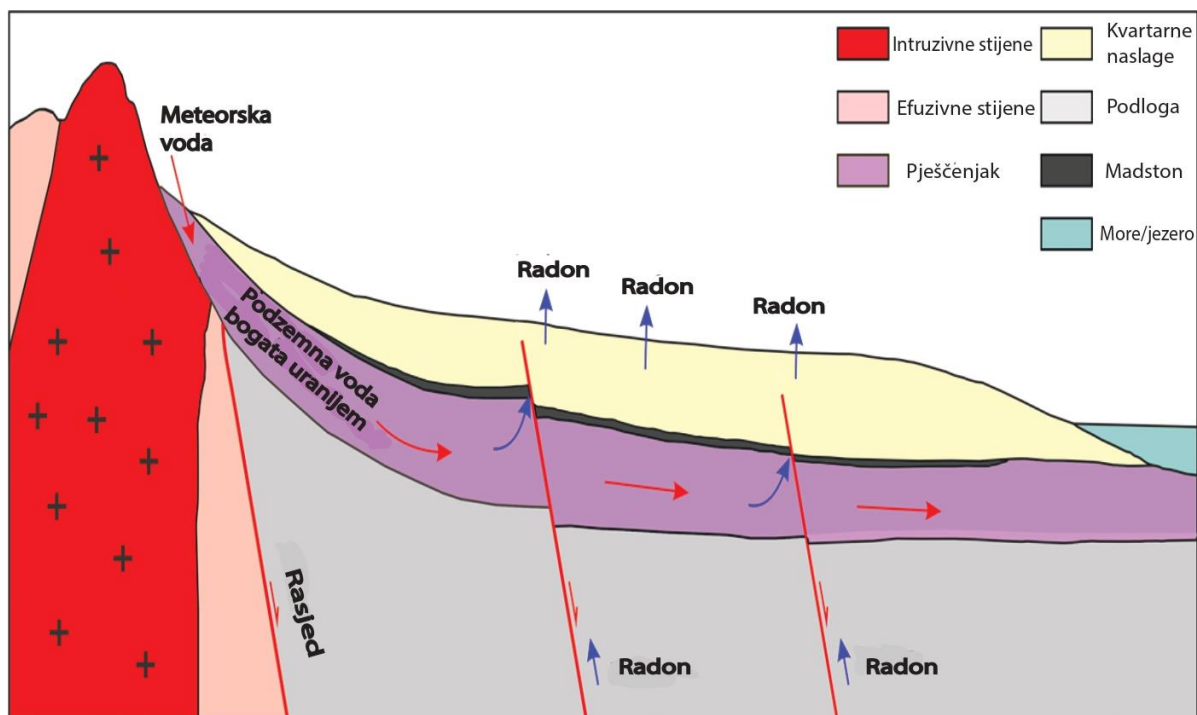
6. Plinovi u određivanju rasjednih zona i predviđanju potresa

Rasjedi i rasjedne pukotine omogućuju migraciju fluida iz podzemlja koji mogu dati važne informacije o svojstvima i kinematici rasjeda, ali i uputiti na lokaciju intenzivne rasjedne aktivnosti (Slika 8) (**Ma et al., 2015**).

Migracija plinova je najlakša duž aktivnih rasjeda na kojima iz informacija o plinovima iz Zemljine unutrašnjosti možemo sugerirati buduću pojavnost potresa, i to temeljem povećanja koncentracije plinova. Ako rasjedi lome tvrde, čvrste, kompaktne stijene, nastaju zone veće propusnosti duž rasjeda, odnosno rasjedne zone, čime nastaju putevi migracije za plinove iz dubljeg podzemlja. Rasjedi i rasjedni sustavi ponekad su povezani s izvorima mineralne vode, u kojima su otopljeni ioni stijena iz podzemlja. Migrirani plinovi iz podzemlja su bitno drugačijeg sastava od atmosferskih plinova (**Sugisaki et al., 1980**).

Radon je najpoznatiji, a vjerojatno i najpouzdaniji plin za praćenje aktivnosti rasjeda. Koncentracije radona uz rasjede, pogotovo aktivne, su vrlo visoke te se njihovim mjerenjem mogu kartirati rasjedi i određivati aktivnost samog rasjeda. Ipak radon se ne pojavljuje na svim rasjedima, a mehanizam samog pojavljivanja nije još u potpunosti jasan. Povećane koncentracije roditeljskih nuklida ne utječu na anomalne koncentracije, već one potječu od plinova velikih brzina koji se kreću pod utjecajem radioaktivne neravnoteže brzo nakon generiranja radona (**Koike et al., 2014**). Što znači da su veće koncentracije radona uglavnom uzorkovane njegovom lakšom i bržom koncentracijom u odnosu na veliku količinu uranija iz kojeg on nastaje.

U većem dijelu svijeta koncentracije radona u zraku tla i podzemnoj vodi rastu prije i/ili tijekom velikih potresa. Promjena koncentracije radona je vrlo osjetljiva te se može registrirati na udaljenosti od nekoliko stotina kilometara od epicentra. Povećanje koncentracije radona može se poistovjetiti s promjenom razine podzemne vode, na što utjecaj imaju potresi, seizmički uvjetovana naprezanja u kori i porni tlak u saturiranim tlima i stijenama (**Koike et al., 2014**).



Slika 8. Model prostorne distribucije radona (Chen et al., 2018)

7. Radioaktivnost

Svi kemijski elementi sastoje se od atoma, a oni od jezgre i elektronskog omotača. U jezgri se nalaze protoni, pozitivno nabijene čestice, i neutroni, čestice bez naboja. Dok je masa protona i neutrona približno jednaka i bitna za masu samog atoma, masa elektrona je potpuno zanemariva. U idealnim uvjetima broj protona i neutrona u jezgri je jednak, ali ukoliko im broj nije jednak i dalje se radi o istom elementu s istim kemijskim svojstvima, ali drugačije mase. Takav element naziva se izotop. Jedan element može imati više stabilnih ili izotopa dužeg života. Nestabilni su oni izotopi koji imaju višak energije u jezgri te se nazivaju radioizotopi. Radioizotopi koji se raspadaju na (obično) stabilnije nuklide nazivaju se roditeljima, a nuklidi nastali radioaktivnim raspadom nazivaju se kćerima. Radioaktivnim raspadom višak energije iz jezgre se smanjuje emisijom radijacije α - i β -čestica te γ -zraka (Killeen et al., 2015).

Alfa-čestica je načelno helijeva jezgra bez elektrona, odnosno dvostruko ionizirani helijev atom s atomskom masom 4 i dvostrukim pozitivnim nabojem. Beta-čestice u načelu su isto što i elektroni, samo drugačijeg podrijetla. α - i β -čestice emitirane su iz jezgre radioaktivnog elementa, dok se s druge strane elektroni nalaze u elektronskom omotaču koji obavlja jezgru. Gama-zrake su fotoni emitirani iz jezgre nakon radioaktivnog raspada bilo α ili β emisijom, kad je jezgra kćeri u pobuđenom stanju. Γ -zračenje predstavlja energiju emitiranu dok jezgra kćeri prelazi iz pobuđenog u nepobuđeno stanje. Budući da nemaju masu i naboj, γ -zrake mogu penetrirati kroz značajnu debljinu materijala, za razliku od α -čestica. Γ -zrake nastale iz prirodnih radioaktivnih izvora u gornjih 50 cm tla ili stijene imaju energije u rasponu od 0 – 3,0 MeV i mogu se detektirati i mjeriti čak iz zraka s visine od 700 m, što čini mjerenje γ -zračenja praktičnom geofizičkom istraživačkom metodom. Detekcija α - i β -čestica uglavnom je svedena na laboratorijska mjerenja ili terenska mjerenja s detektorima u direktnom kontaktu s izvorom (kao u nekim tehnikama mjerenja radona) (Killeen et al., 2015).

7.1. Prirodni radioaktivni elementi u tlu i stijenama

Neki važni radioaktivni elementi mogu se naći u prirodi. Najznačajniju radioaktivnost proizvode produkti radioaktivnog raspada ^{238}U i ^{232}Th . Prosječna prisutnost uranija i torija u svijetu iznosi 2,5 odnosno 10 ppm (**Killeen et al., 2015**). Treći važni radioelement je izotop kalija, ^{40}K . Svi ovi radioelementi mogu se naći u raznim koncentracijama u većini petrogenih minerala. Iako je ^{40}K rijedak, zbog čestog pojavljivanja kalija u stijenama i dalje predstavlja značajniju radijaciju. Kalij se pojavljuje u feldspatima, obilnim i široko rasprostranjenim mineralima u Zemljinoj kori, ali i u petrogenim mineralima kao što su muskovit, biotit i ostali tinjci. Uranij i torij su prisutni u velikom broju minerala, ali u malim koncentracijama te se izražavaju u ppm (**Killeen et al., 2015**). Koncentracije radioelemenata K, U i Th u različitim tipovima stijena prikazana je u Tablici 3.

U početku se distribucija radioelemenata koristila samo za istraživanja ležišta uranija i računanje produkcije radiogene topline. Ipak, ova tri navedena radioelementa mogu indicirati na ekonomične koncentracije još puno metala osim uranija. Mogu biti neizravni indikatori raznih tipova mineralizacije, ovisno pojavljuju li se u tragovima ili je njihovim obogaćenjem, odnosno osiromašenjem zbog geokemijskih alteracija omogućena ekonomična mineralizacija. Recimo, kalijske alteracije asociirane su s nekoliko tipova mineralnih ležišta kao što su porfirna ležišta bakra (Cu-Au-Mo), ležišta vulkanogenih masivnih sulfida (VMS) i ležišta željeznih oksida s bakrom i zlatom (IOCG). Karte koje prikazuju distribuciju radioaktivnih elemenata daju informacije o temeljnim geološkim i geokemijskim svojstvima podinske stijene i površinskih naslaga. One su korisne za geološko kartiranje, istraživanje ležišta mineralnih sirovina, ali i praćenje okolišne radijacije. Danas su radiometrijske metode toliko napredovale da se distribucija radioelemenata može kartirati iz zraka (**Killeen et al., 2015**).

Tablica 3. Koncentracije radioelemenata u različitim tipovima stijena (Killeen et al, 2015)

TIP STIJENE	KALIJ (%)		URANIJ (PPM)		TORIJ (PPM)	
	Srednja vrijednost	Raspon	Srednja vrijednost	Raspon	Srednja vrijednost	Raspon
KISELI ERUPTIVI	3,1	1,0–6,2	4,1	0,8–16,4	11,9	1,1–41,0
KISELI INTRUZIVNI	3,4	0,1–7,6	4,5	0,1–30,0	25,7	0,1–253,1
NEUTRALNI ERUPTIVI	1,1	1,1–2,5	1,1	0,2–2,6	2,4	0,4–6,4
NEUTRALNI INTRUZIVI	2,1	0,1–6,2	3,2	0,1–23,4	12,2	0,4–106,0
BAZIČNI ERUPTIVI	0,7	0,06–2,4	0,8	0,03–3,3	2,2	0,05–8,8
BAZIČNI INTRUZIVI	0,8	0,01–2,6	0,8	0,01–5,7	2,3	0,03–15,0
ULTRAMAFITI	0,3	0–0,8	0,3	0–1,6	1,4	0–7,5
ALKALNI FELDSPATOIDNI NEUTRALNI ERUPTIVI	6,5	2,0–9,0	29,7	1,9–62,0	133,9	9,5–265,0
ALKALNI FELDSPATOIDNI NEUTRALNI INTRUZIVI	4,2	1,0–9,9	55,8	0,3–720,0	132,6	0,4–880,0
ALKALNI FELDSPATOIDNI BAZIČNI ERUPTIVI	1,9	0,2–6,9	2,4	0,5–12,0	8,2	2,1–60,0
ALKALNI FELDSPATOIDNI BAZIČNI INTRUZIVI	1,8	0,3–4,8	2,3	0,4–5,4	8,4	2,8–19,6
KEMIJSKE SEDIMENTNE STIJENE	0,6	0,02–8,4	3,6	0,03–26,7	14,9	0,03–132,0
KARBONATI	0,3	0,01–3,5	2	0,03–18,0	1,3	0,03–10,8
DETRITALNE SEDIMENTNE STIJENE	1,5	0,01–9,7	4,8	0,01–80,0	12,4	0,2–362,0
METAMORFOZIRANE MAGMATSKIE STIJENE	2,5	0,1–6,1	4	0,1–148,5	14,8	0,1–104,2
METAMORFOZIRANE SEDIMENTNE STIJENE	2,1	0,01–5,3	3	0,1–53,4	12	0,1–91,4

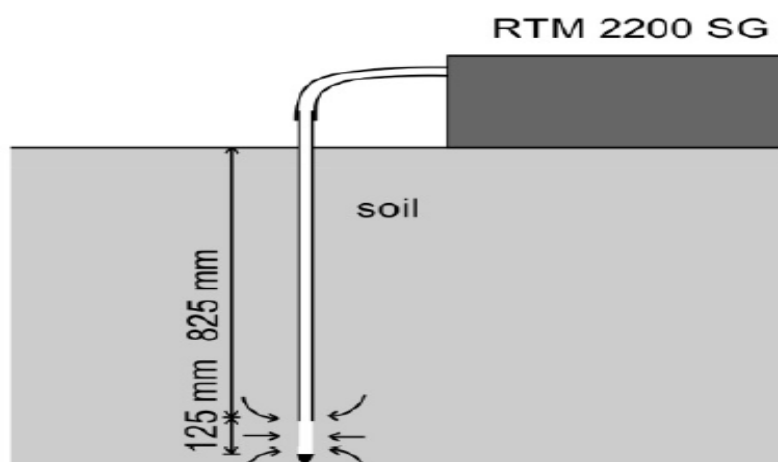
8. Metode mjerenja i instrumenti

Primjenom pripadajuće aparature izvodila su se mjerenja koncentracija opisanih plinova duž profila okomitim na glavne rasjede istraživanih područja.

8.1. Mjerenja radona i torona

Za mjerenje koncentracija radona i torona koristio se instrument SARAD RTM 2200m (Slike 9 i 10), koji kvantificira koncentracije radona i torona te daje informacije o propusnosti, temperaturi, vlažnosti i ostalim svojstvima tla. Silicijskim detektorom radijacije odvajaju se različite kćeri radona primjenom alfa spektrometrije. Koncentracija ^{222}Rn dobiva se na temelju mjerenja kratkoživućih kćeri nastalih raspadom radona. Broj iona ^{218}Po prikupljen na poluvodljivom detektoru proporcionalan je koncentraciji Rn u instrumentu. Poluživot ^{218}Po traje 3,05 minuta, što znači da se ravnoteža između raspada ^{222}Rn i aktivnosti detektora ^{218}Po postiže nakon 15-ak minuta (trajanje otpr. pet poluživota). Taj se period klasificira kao minimalno vrijeme za postizanje odziva (Cvetković et al., 2021).

Mjerenje se izvodi zabijanjem čelične cijevi sa jednokratnim odvojivim vrhom u tlo na dubinu od oko 80 cm. Tankom šipkom se vrh izbije iz cijevi čime se omogućuje ulazak zraka tla u cijev, odnosno napravi se filter za uzimanje uzoraka zraka tla. Taj vrh ostaje u tlu nakon mjerenja (engl. *lost tip*). Cijev se zatim spaja gumenom cijevi za instrument. Uz koncentracije radona i torona (Bq/m^3), mjeri se propusnost tla (m^2) i koncentracija metana (ppm). Propusnost se određuje na temelju pada tlaka u tlu i toka zraka kroz tlo te se računa direktno na instrumentu tijekom mjerenja (Cvetković et al., 2021).



Slika 9. Shema mjerenja koncentracija radona i torona instrumentom SARAD RTM 2200 SG (Cvetković et al., 2021)

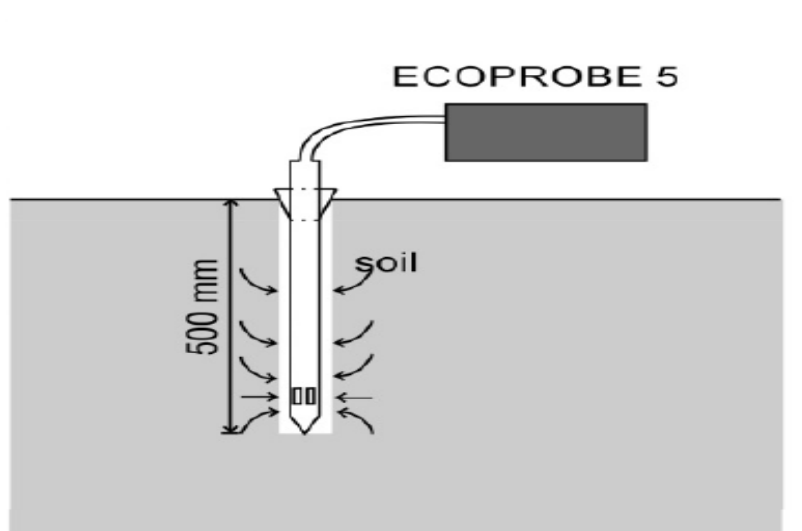


Slika 10. Fotografija mjerenja koncentracija radona i torona instrumentom SARAD RTM 2200 SG

8.2. Mjerenja ugljikovog dioksida i metana

Mjerenja CO₂, CH₄, plinovitih organskih spojeva i drugih plinovitih ugljikovodičnih spojeva izvode se instrumentom naziva ECOPROBE 5 (Slike 11 i 12). Njegova osnovna namjena je mjerenje koncentracija plinovitih zagađivača u podzemnim okolišima. ECOPROBE 5 se sastoji od dva samostalna analizatora, foto-ionizatorskog detektora (PID) koji mjeri ukupne koncentracije plinovitih organskih spojeva i infracrvenog analizatora kojim se pojedinačno mjere koncentracije CH₄, TP i CO₂. Osim navedenih parametara, uređaj mjeri i temperaturu, atmosferski tlak i koncentraciju kisika u zraku tla (Cvetković et al., 2021).

Mjerenje započinje bušenjem rupe duboke otprilike 50 cm. Zatim se u rupu postavlja sonda i rupa se brtvi gumenim stošcem na sondi. Zbog prirode mjerenja potreban je period čekanja između zatvaranja rupe i početka mjerenja pri čemu taj period mora biti jednak za svaku točku mjerenja. Manja propusnost tla uzrokuje nagli pad vrijednosti koncentracije CO₂ u odnosu na početak mjerenja. Osjetljivost PID analizatora iznosi 0,1-2000 ppm, a donja granica osjetljivosti IR analizatora je 50 ppm dok je gornja 500 000 ppm za CH₄ i TP (Cvetković et al., 2021).



Slika 11. Shema mjerenja CO₂, CH₄ i TP instrumentom ECOPROBE 5 (Cvetković et al., 2021)

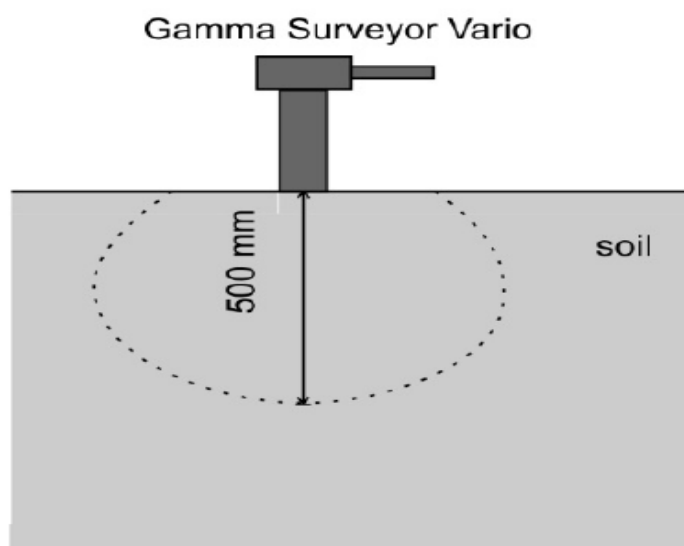


Slika 12. Fotografija mjerenja CO₂, CH₄ i TP instrumentom ECOPROBE 5

8.3. Spektrometrija gama zraka

Spektrometrijska mjerenja gama zraka izvode se Gamma Surveyor Vario uređajem s VB6 BGO (bizmut germanij oksid) sondom (Slike 13 i 14). Taj uređaj je geofizički spektrometar gama zraka koji mjeri koncentracije kalija (K) u postocima [%] te uranija (U) i torija (Th) u ppm-ovima, ali i količinu prirodne (gama) radioaktivnosti u nGy/h ili nSv/h. Mjerenja su u pravilu vrlo precizna, pogreške se uglavnom pojavljuju u slučaju kraćeg vremena trajanja mjerenja. Trajanje mjerenja nije propisano, a ovisi o radioaktivnosti izvora i željenoj preciznosti rezultata. (Cvetković et al, 2021)

Mjerenje se izvodi tako da se sonda za spektrometriju položi na površinu tla, u iskopanu rupu, ili se prisloni na izdanak stijene. Kad je detektor položen na površini tla dubina zahvata je radijusa od oko 50 cm. Pri mjerenju radila se uronjena metoda, tj. sonda se postavlja u iskopanu rupu dubine 60-ak cm.



Slika 13. Shema mjerenja Gamma Surveyor Vario-om (Cvetković et al., 2021)



Slika 14. Fotografija mjerenja Gamma Surveyor Vario-om

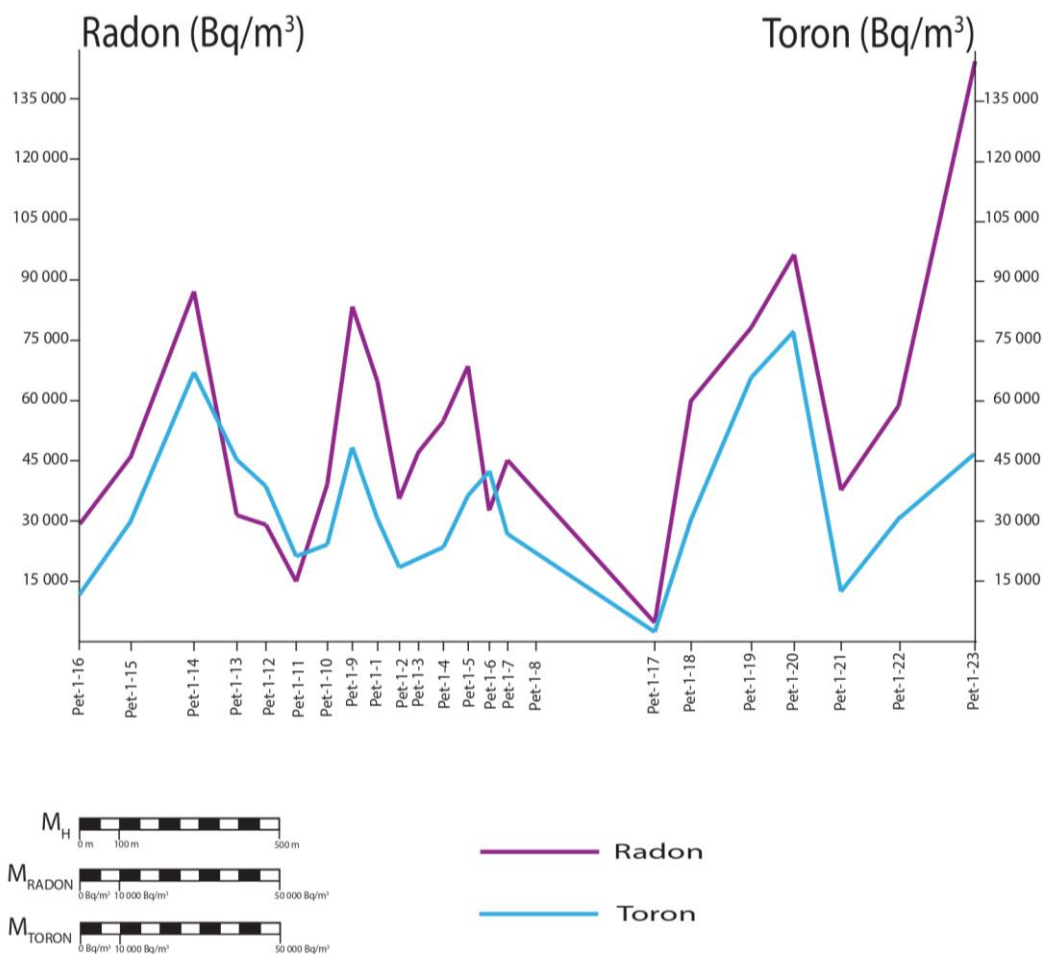
9. Petrinja – Rezultati mjerenja i rasprava

Mjerenje koncentracija plinova u zraku tla zahtijeva toplo i suho vrijeme budući da voda ispunjava pore u tlu i stijenama blizu površine te na taj način smanjuje poroznost, a i neki plinovi imaju tendenciju otapanja u vodi. Terenska mjerenja koncentracija radona, torona i CO₂ na području Petrinje izvršena su krajem lipnja 2021. godine. Temperatura zraka bila je oko 30 °C i vrijeme je bilo suho, kao i danima prije mjerenja. Dobiveni rezultati prikazani su tablično (Tablica 4) i grafički (Slika 15 i 16).

9.1. Profil – Radon, toron

Tablica 4. Podaci dobiveni terenskim mjerenjem na području Petrinje

Broj mjerenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	Toron (Bq/m ³)	Radon/toron
1	Pet-1-16	29685	11868	2,501
2	Pet-1-15	46972	30619	1,534
3	Pet-1-14	88831	68372	1,299
4	Pet-1-13	32052	46099	0,695
5	Pet-1-12	29492	39517	0,746
6	Pet-1-11	15238	21800	0,699
7	Pet-1-10	39863	24593	1,621
8	Pet-1-9	84886	49253	1,723
9	Pet-1-1	65917	31513	2,092
10	Pet-1-2	36087	18922	1,907
11	Pet-1-3	48016	14232	3,374
12	Pet-1-4	56084	24065	2,331
13	Pet-1-5	69821	37024	1,886
14	Pet-1-6	33452	43421	0,770
15	Pet-1-7	45882	27101	1,693
16	Pet-1-8	Visoko vodno lice, neizvedivo mjerenje		
17	Pet-1-17	4813	2462	1,955
18	Pet-1-18	61120	30982	1,973
19	Pet-1-19	79455	66821	1,189
20	Pet-1-20	98257	78854	1,145
21	Pet-1-21	38476	13172	2,921
22	Pet-1-22	59904	31658	1,892
23	Pet-1-23	147029	47743	3,080



Slika 15. Izmjerene koncentracije radona i torona

Uspoređujući izmjerene koncentracije radona i torona može se uočiti kako se radon pojavljuje u većim koncentracijama u odnosu na toron duž cijelog profila s iznimkom na točkama Pet-1-13, 12, 11 i 6. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti kako je izvor ovih plinova dublje u podzemlju pa toron, zbog brzog raspada, ne stigne migrirati do površine.

Sjeverni dio profila prelazi preko pliocenskih naslaga koje čine gline, pijesci, šljunci, pješčenjaci i ugljen (slika 16). Gline zbog male propusnosti omogućavaju nakupljanje plinova u ovim naslagama te one mogu biti uzrok povećanih koncentracija prvenstveno radona (Točka 14; vidi Tablicu 5)). Također moguće je i da su te pliocenske naslage nastale trošenjem stijena koje su sadržavale minerale koji u svom kemijskom sastavu imaju uranij.

Na Točki 9 zabilježena je relativno visoka koncentracija radona za ovaj dio profila, ali i visoka propusnost. Ta se točka nalazi između pretpostavljenog vertikalnog rasjeda i transgresivne granice te vrlo vjerojatno postoji pogodni pukotinski sustav kojim prvenstveno radon migrira prema površini. Točka 3 je također okarakterizirana visokom propusnošću koja je najvjerojatnije posljedica transgresivne granice između pliocenskih i miocenskih naslaga koja se na tom mjestu pojavljuje na površini. Transgresivna granica nije kompaktna i ona predstavlja prijelaz iz krupnozrnatih u sitnozrnate naslage te može biti pogodan put migracije za plinove iz podzemlja.

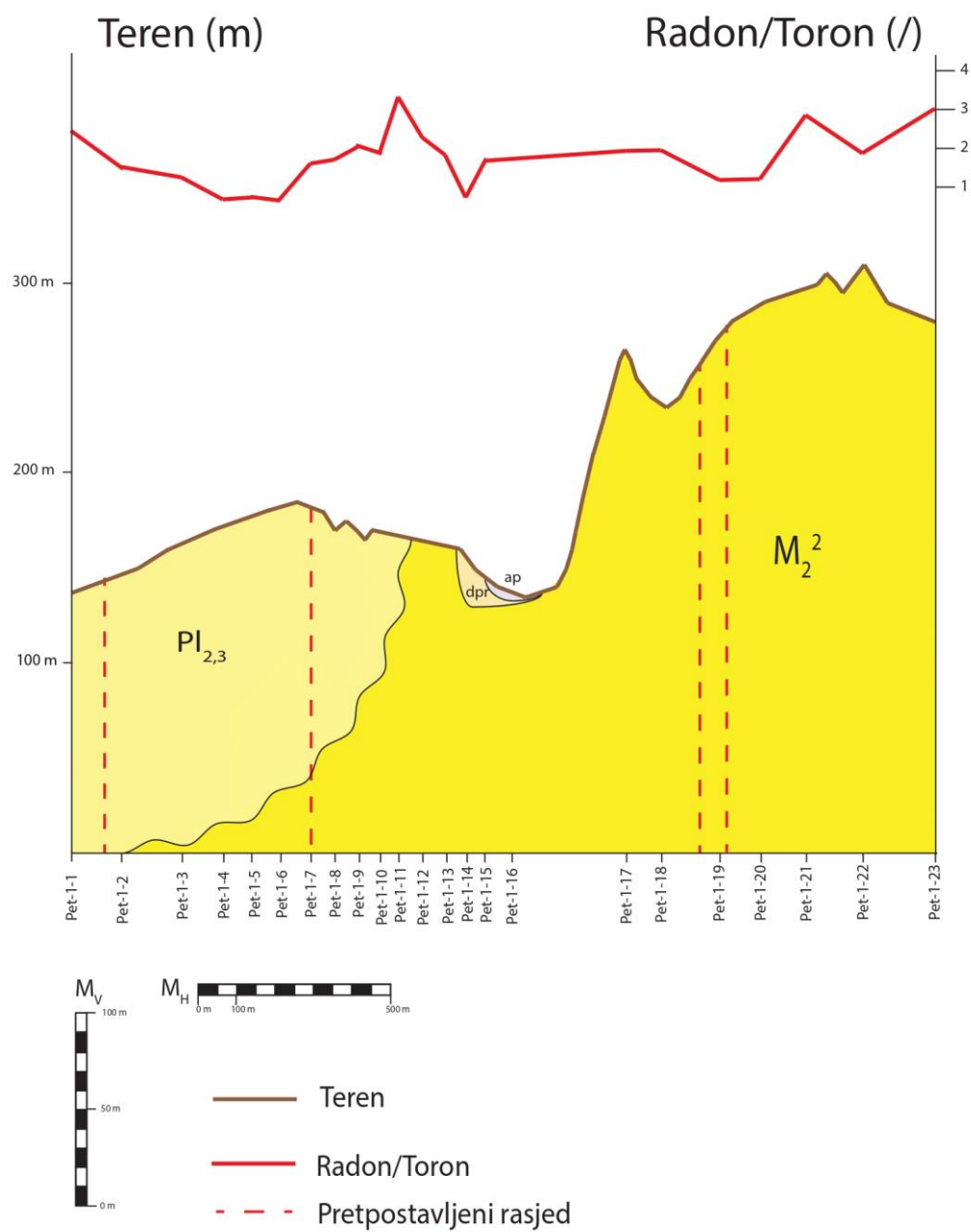
Najmanje vrijednosti koncentracija radona i torona zabilježene su na točki Pet-1-17. Razlog ovako niskih vrijednosti može biti reljef. Budući da se ova točka nalazi na vrhu uzvišenja, moguće je da su plinovi migrirali bočno prije nego su uspjeli doći do tjemena uzvišenja.

Južni dio profila prelazi preko badenskih naslaga koje čine biogeni, pjeskoviti i laporoviti vapnenci, pješčenjaci i vapnenačke breče (Slika 16). Izvori radona i torona u ovim naslagama mogu biti minerali koji se nalaze u sastavu pješčenjaka te pjeskovitih i laporovitih komponenti navedenih vapnenaca.

Najznačajnija koncentracija radona u ovom dijelu profila izmjerena je tik uz pretpostavljeni subvertikalni rasjed koji nalazimo na listu OGK Sisak (točka Pet-1-20). To upućuje na postojanje pogodnog puta migracije za kretanje plinova iz podzemlja. No propusnost tla je na toj točki okarakterizirana kao niska, pa je povećana koncentracija i posljedica nakupljanja radona u sloju tla.

Na zadnjoj točki profila izmjerena je najveća koncentracija radona na ovom profilu. Budući da se u blizini te točke nalazi izvor vode, moguće je da voda „nosi“ radon iz podzemlja prema površini. Koncentraciju koja je tim načinom već visoka sama po sebi dodatno povisuje niska propusnost tla na toj točki.

Naravno najznačajniji izvori radona nalaze se u podini navedenih naslaga u vidu magmatskih ili metamorfnih stijena. Navedeni plinovi uglavnom samo migriraju kroz navedene naslage.



Slika 16. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Sisak (Pikija, 1987) s omjerom radona i torona (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)

Vrlo važan parametar koji treba obratiti pažnju je omjer radona i torona. Iz tog omjera mogu se dobiti informacije o podrijetlu plinova. Zbog brzog raspada torona, ne možemo očekivati da je on migrirao iz velike dubine tako blizu površine, nego da mu je izvor lokalni i blizak površini (u usporedbi s klasičnim izvorima radona). Što je omjer radona i torona manji, to je veća koncentracija torona zabilježena na točki mjerenja. Na primjer, na točkama Pet-1-13, 12, 11 i 6 koncentracija torona je nešto veća u odnosu na koncentraciju radona. Pojave tih plinova, dakle, ne pripisujemo njihovoj migraciji iz velikih dubina već lokalnoj pojavi (Slika 16).

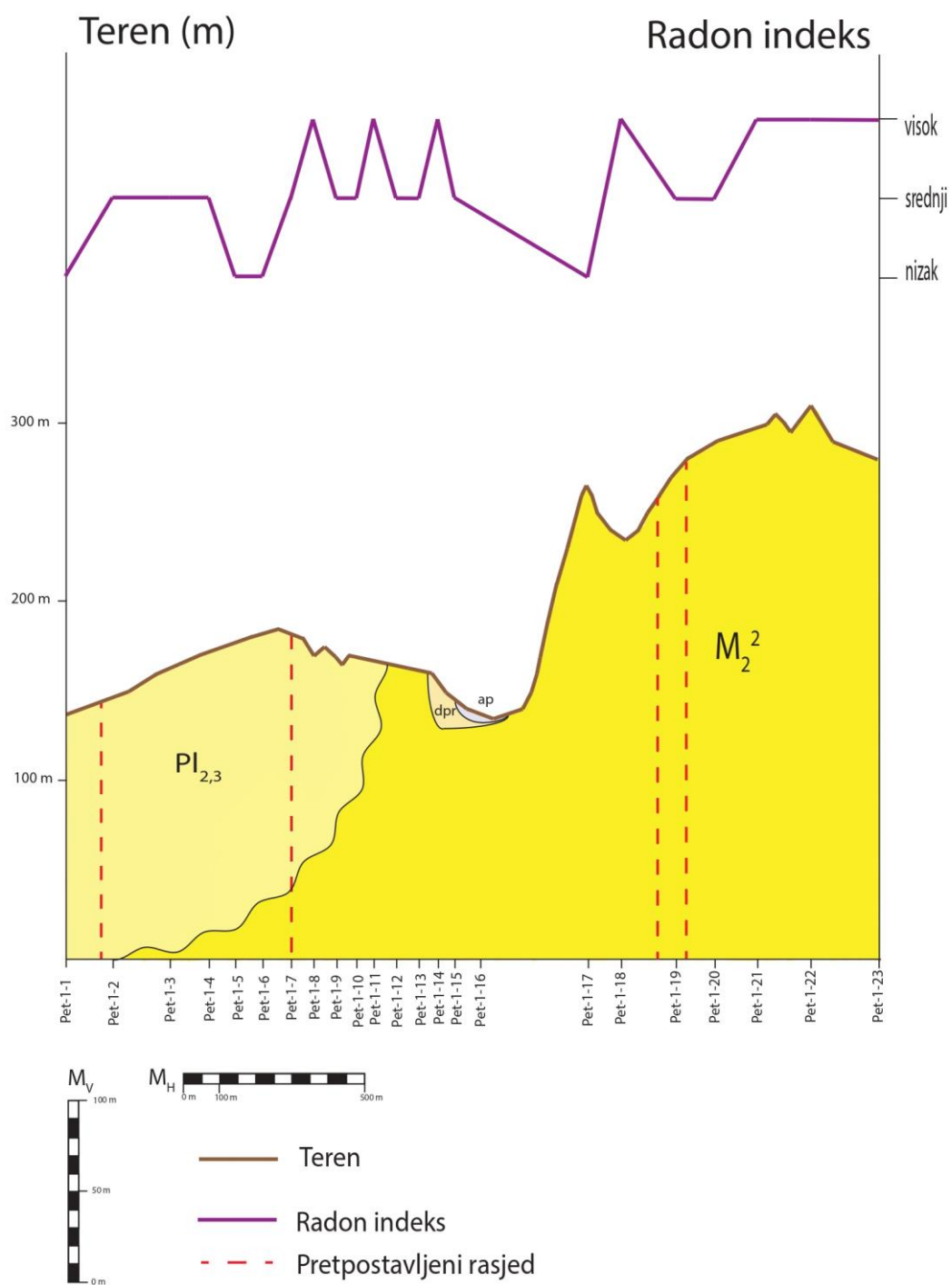
9.1.1. Određivanje indeksa radona

Tijekom mjerenja koncentracija radona i torona instrument SARAD RTM 2200 mjeri još nekoliko parametara. To su npr. vlažnost tla, propusnost tla, protok, temperatura i drugi. Za određivanje indeksa radona ne uzima se sama veličina propusnosti, već se ona svrstava u kategoriju prema kriteriju da je niska propusnost manja od $4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, visoka je veća od $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ te srednja ako iznosi između te dvije vrijednosti. Na temelju određenih kategorija propusnosti i izmjerenih koncentracija radona određeni su indeksi radona za svaku mjerenu točku prema Tablici 1. Dobiveni indeksi radona prikazani su tablično i grafički iznad geoloških profila. Rezultati su prikazani Tablicama 5 i 6 te Slikama 17 i 18.

Tablica 5. Tablica indeksa radona i propusnosti

Broj mjerjenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	Propusnost (m ²)	Kategorija propusnosti	Radon indeks
1	Pet-1-16	29685	$7,02 \cdot 10^{-14}$	Niska	Niski
2	Pet-1-15	46972	$4,71 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
3	Pet-1-14	88831	$8,05 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
4	Pet-1-13	32052	$1,06 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
5	Pet-1-12	29492	$7,74 \cdot 10^{-14}$	Niska	Niski
6	Pet-1-11	15238	$4,77 \cdot 10^{-14}$	Niska	Niski
7	Pet-1-10	39863	$2,18 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji
8	Pet-1-9	84886	$6,84 \cdot 10^{-12}$	Visoka	Visoki
9	Pet-1-1	65917	$3,46 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
10	Pet-1-2	36087	$1,34 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji
11	Pet-1-3	48016	$6,50 \cdot 10^{-12}$	Visoka	Visoki
12	Pet-1-4	56084	$6,02 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
13	Pet-1-5	69821	$4,96 \cdot 10^{-13}$	Srednja	Srednji
14	Pet-1-6	33452	$4,94 \cdot 10^{-12}$	Visoka	Visoki
15	Pet-1-7	45882	$3,78 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji
16	Pet-1-8	Visoko vodno lice, neizvedivo mjerenje			
17	Pet-1-17	4813	$1,13 \cdot 10^{-10}$	Visoka	Niski
18	Pet-1-18	61120	$2,00 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Visoki
19	Pet-1-19	79455	$5,80 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
20	Pet-1-20	98257	$6,06 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
21	Pet-1-21	38476	$5,85 \cdot 10^{-12}$	Visoka	Visoki
22	Pet-1-22	59904	$3,30 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Visoki
23	Pet-1-23	147029	$5,34 \cdot 10^{-14}$	Niska	Visoki

Na prvom profilu prevladavaju lokacije sa srednjim (jedanaest pojavljivanja), a zatim s visokim radon indeksom (sedam pojavljivanja). Nizak radon indeks određen je tek za četiri lokacije.



Slika 17. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Sisak (Pikija, 1987) s indeksom radona (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)

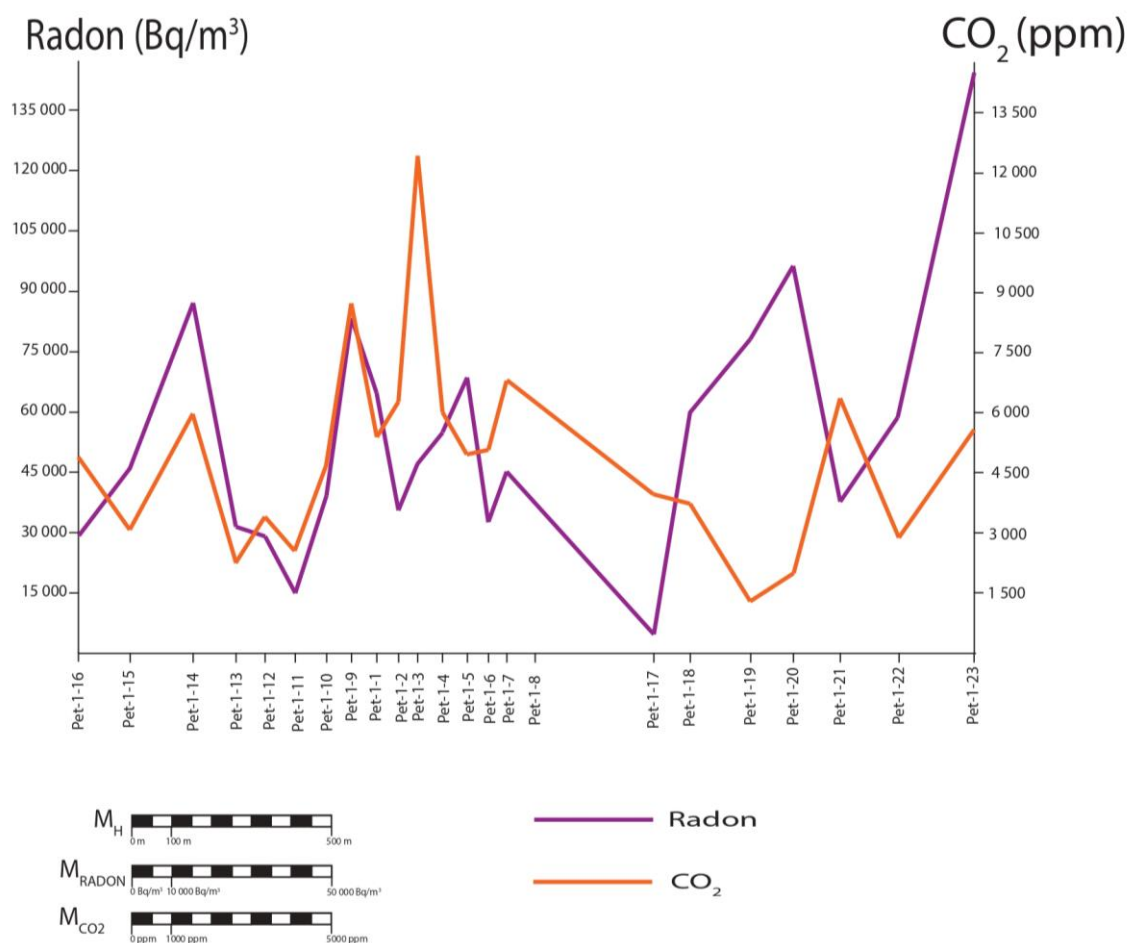
Uočljivo je kako se radon indeks značajnije mijenja između točaka 10 i 7 (Slika 17). To je područje između pretpostavljenog subvertikalnog rasjeda, transgresivne granice i holocenskih naslaga. Promatrajući izmjerene vrijednosti koncentracija radona na mjestima s visokim radon indeksom može se zaključiti kako pri određivanju karaktera indeksa radona veći utjecaj ima propusnost, budući da koncentracije ne variraju toliko u iznosu.

Na južnom dijelu profila je situacija drugačija, budući da je na tom dijelu izmjerena najveća koncentracija radona uz nisku propusnost te određen visoki indeks radona.

9.2. Profil – Radon, CO₂

Tablica 6. Rezultati mjerenja radona i CO₂

Broj mjerenja	Oznaka_točke	CO ₂ (ppm)	Radon (Bq/m ³)
1	Pet-1-16	4966	29685
2	Pet-1-15	3164	46972
3	Pet-1-14	6076	88831
4	Pet-1-13	2297	32052
5	Pet-1-12	3487	29492
6	Pet-1-11	2647	15238
7	Pet-1-10	4834	39863
8	Pet-1-9	8891	84886
9	Pet-1-1	5522	65917
10	Pet-1-2	6391	36087
11	Pet-1-3	12629	48016
12	Pet-1-4	6113	56084
13	Pet-1-5	5061	69821
14	Pet-1-6	5186	33452
15	Pet-1-7	6924	45882
16	Pet-1-8	Visoko vodno lice, neizvedivo mjerenje	
17	Pet-1-17	4054	4813
18	Pet-1-18	3821	61120
19	Pet-1-19	1356	79455
20	Pet-1-20	2061	90257
21	Pet-1-21	6475	38476
22	Pet-1-22	2955	59904
23	Pet-1-23	5655	147029



Slika 18. Izmjerene koncentracije radona i torona

Rezultati mjerenja izraženi su u ppm za CO_2 i u Bq/m^3 za radon. Budući da koncentracije plinova nisu mjerene u istim mjernim jedinicama, mogu se pravilno uspoređivati jedino relativne promjene koncentracija jednog plina u odnosu na drugi (Slika 18).

Na nekoliko lokacija može se uočiti porast koncentracija oba plina kao i pad. Na tim lokacijama CO_2 i radon vjerojatno koriste isti put migracije na putu do površine pri čemu CO_2 ima ulogu nositelja radona.

Ipak usklađenost promjena koncentracija ovih dvaju plinova je vrlo rijetka te se može uočiti kako se koncentracije jednog plina povećavaju dok se koncentracije drugog smanjuju. Uzroci tih neusklađenosti mogu biti mnogi. Recimo na točki Pet-1-2 uočljiv je pad

koncentracije radona, dok je vidljiv i izrazit porast vrijednosti CO₂. Kako radon migrira iz vrlo dubokog podzemlja (500 m i dublje), može se zaključiti da na toj lokaciji ne postoji put migracije koji bi radon koristio na putu do površine. Prema tome veliku koncentraciju CO₂ možemo pripisati nekom bitno plićem izvoru koji ne zahtjeva rasjedne sustave za migraciju.

Na točkama Pet-1-18, 19 i 20 vidi se rast koncentracija radona, a pad CO₂. Na ovu promjenu koncentracija vjerojatno utječe reljef, budući da se ove točke nalaze na uzvišenju. Ukoliko je to uzvišenje nastalo boranjem i rasjedanjem, moguće je da su tim procesima stijene iz većih dubina dovedene bliže površini. Rasjedanjem mogu nastati pogodni putevi migracije za radon, a površinskim trošenjem tjemena uzvišenja nastaju pukotine i pukotinski sustavi koji su također dobri putevi migracije.

Također treba obratiti pažnju na vegetaciju na lokacijama mjerenja. Točke mjerenja koje se nalaze u šumama imaju zabilježene veće vrijednosti koncentracija radona i CO₂. Razlog tome je najvjerojatnije pokrivenost šumskog tla otpalim lišćem koje sprječava otplinjavanje tla.

Na točki Pet-1-8 nije bilo moguće izmjeriti koncentracije plinova zbog visokog vodnog lica (manje od 1m dubine) te je instrument za mjerenje radona uvlačio vodu. Pokušalo se postavljenjem filtera, odnosno cijevi na dubini od 40 cm, ali ni na toj dubini nije bilo moguće mjeriti. Iz tog razloga nisu se mjerili ni ostali parametri.

9.3. Ukupna koncentracija ugljikovodika (TP) i metan (CH₄)

Instrument ECOPROBE 5 ima opciju da uz CO₂ i CH₄ mjeri i ukupnu koncentraciju plinovitih ugljikovodika koji migriraju iz podzemlja prema površini. Ti ugljikovodici su kompleksniji od metana koji se zasebno mjeri. Rezultati su prikazani Tablicom 7.

Tablica 7. Izmjerene koncentracije TP i CH₄

Broj mjerjenja	Oznaka mjerjenja	TP (ppm)	CH ₄ (ppm)
1	Pet-1-16	0	0
2	Pet-1-15	0	0
3	Pet-1-14	0	0
4	Pet-1-13	0	0
5	Pet-1-12	0	0
6	Pet-1-11	0	0
7	Pet-1-10	0	0
8	Pet-1-9	265	704
9	Pet-1-1	0	0
10	Pet-1-2	0	0
11	Pet-1-3	0	0
12	Pet-1-4	0	0
13	Pet-1-5	0	0
14	Pet-1-6	0	0
15	Pet-1-7	0	0
16	Pet-1-8	Visoko vodno lice, neizvedivo mjerenje	
17	Pet-1-17	0	529
18	Pet-1-18	0	490
19	Pet-1-19	0	356
20	Pet-1-20	0	442
21	Pet-1-21	0	0
22	Pet-1-22	0	0
24	Pet-1-23	0	0

Mjerenjem uređajem ECOPROBE 5 utvrđena je vrlo mala koncentracija ugljikovodika tek na jednoj točki mjerenja (Pet-1-9). Očito na tom području ne postoje matične stijene ili putevi migracije kojima bi ugljikovodici migrirali prema površini.

Metan je detektiran na pet točaka, ali te koncentracije su vrlo niske, pogotovo kad se usporede s koncentracijama CO₂. Metan jako lako migrira iz tla i stijena zbog vrlo male molekule, a i vrlo brzo ga prerade bakterije u pripovršinskim slojevima tla.

10. Našice – Rezultati mjerenja i rasprava

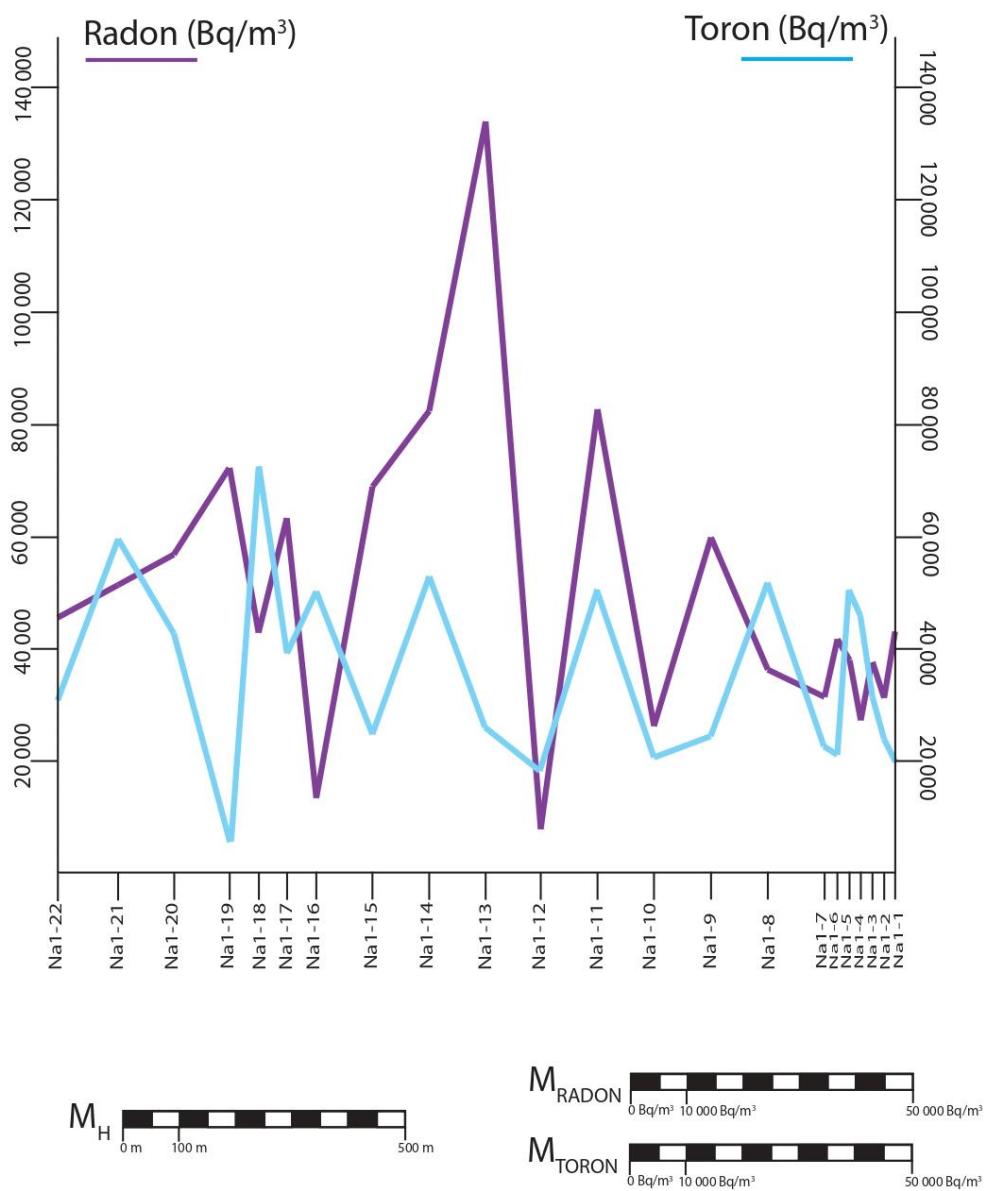
Terenska mjerenja u blizini Našica izvedena su krajem listopada 2021. Vrijeme je bilo toplo za to doba godine, 10-ak °C, i vedro. Kao i na prvom istraživanom području mjerile su se koncentracije radona, torona i CO₂ u zraku tla na dvama profilima. Uz mjerenja koncentracija plinova na točkama mjerenja mjerila se i spektrometrija gama zraka. Dobiveni rezultati prikazani su tablično (tablice 8-11) i grafički (slike 19-24).

10.1. Profil 1 – Radon, toron

Prvi profil, dužine 1500m smješten je sjevernije u odnosu na drugi i pruža se otprilike u smjeru jugozapad-sjeveroistok uz blago zakretanje budući da se mjerilo duž tjemene osi uzvišenja.

Tablica 8. Rezultati terenskih mjerenja radona i torona s njihovim omjerom

Broj mjerenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	Toron (Bq/m ³)	Radon/toron
1	Na1-1	43285	19967	2,17
2	Na1-2	31341	24277	1,29
3	Na1-3	37861	22823	1,66
4	Na1-4	27395	31672	0,86
5	Na1-5	38178	52233	0,73
6	Na1-6	42008	24623	1,71
7	Na1-7	31649	46456	0,68
8	Na1-8	36561	50934	0,72
9	Na1-9	60284	21002	2,87
10	Na1-10	26392	21172	1,25
11	Na1-11	83255	50897	1,64
12	Na1-12	7963	5843	1,36
13	Na1-13	134853	18520	7,28
14	Na1-14	82998	53223	1,56
15	Na1-15	69388	26298	2,64
16	Na1-16	13308	25055	0,53
17	Na1-17	63736	50504	1,26
18	Na1-18	43087	39346	1,10
19	Na1-19	72645	31007	2,34
20	Na1-20	57214	59849	0,96
21	Na1-21	51625	72941	0,71
22	Na1-22	45778	52409	0,87

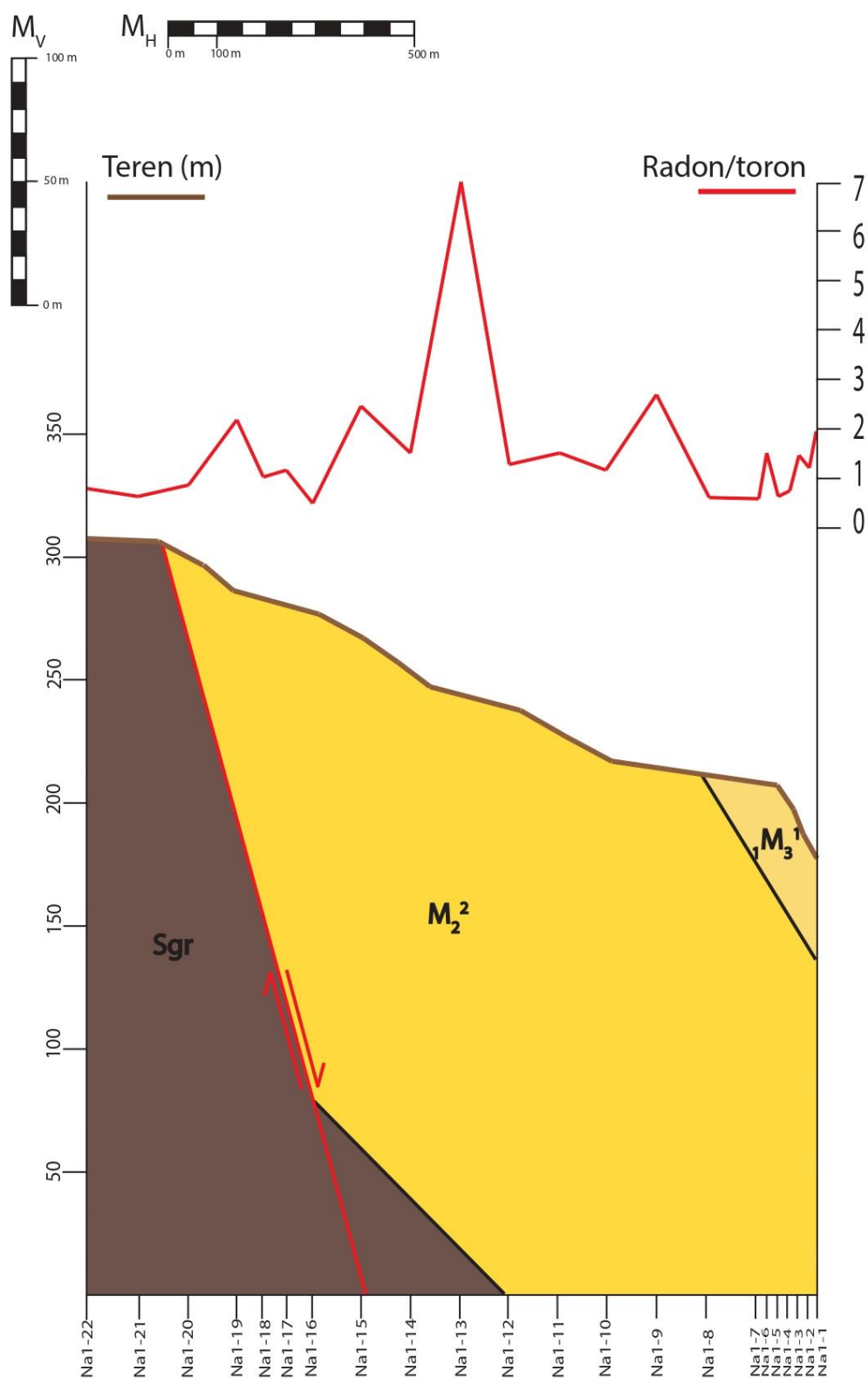


Slika 19. Izmjerene koncentracije radona i torona

Koncentracije radona i torona mjerene su istim mjernim jedinicama, pa je moguće izravno uspoređivati promjene u njihovim koncentracijama. Iz dobivenih podataka može se primijetiti kako su koncentracije radona najčešće puno više u odnosu na toron, uz iznimku na sedam lokacija (Točke 5, 6, 8, 12, 16, 18 i 21). Na ostatku istraživanog područja možemo utvrditi kako je izvor plinova smješten na većim dubinama zbog toga što se radon, koji ima dulje vrijeme poluživota u odnosu na toron, nije raspao (Slika 19). Na mjestima gdje je omjer radona i torona manji od 1, gdje su koncentracije torona veće od koncentracija radona, izvor plinova je puno plići.

Uspoređujući geološku građu profila po kojem su mjereni dobiveni podaci i omjere radona i torona može se uočiti kako koncentracija radona u odnosu na toron raste na mjestima gdje se iznad grafitnih škriljavaca nalazi debeli paket litotamnijskih i bioklastičnih vapnenaca, vapnovitih pješčenjaka te badenskih konglomerata, čija se prisutnost pretpostavlja ispod navedenih vapnenaca i pješčenjaka. Migracija plinova kroz te naslage ne traje dovoljno dugo da se toron raspadne na svoje kćeri. Grafitni škriljavci se pak s druge strane sadrže kvarc, muskovit i biotit te grafit kao tipomorni mineral. Upravo bi protolit, koji je bio organski bogat, iz kojeg je nastao grafit trebao predstavljati jedan od izvora radona, budući da nastaje metamorfozom organske tvari u kojoj se često pojavljuje uranij, ili neki od produkata njegovog raspada.

Najveću vrijednost radon ima na točki Na1-13. U blizine te točke ne postoje značajniji rasjedi ili neke reljefne karakteristike koje bi upućivale na povećanu koncentraciju radona (Slika 20). Ipak, budući da je koncentracija torona puno manja u odnosu na radon može se zaključiti kako on migrira kroz bioklastične vapnence dovoljno dugo da se toron većinom raspadne prije dolaske u blizinu površine. Pogodan put migracije i mala propusnost tla na toj lokaciji omogućuje nakupljanje većih koncentracija radona u odnosu na ostatak profila.

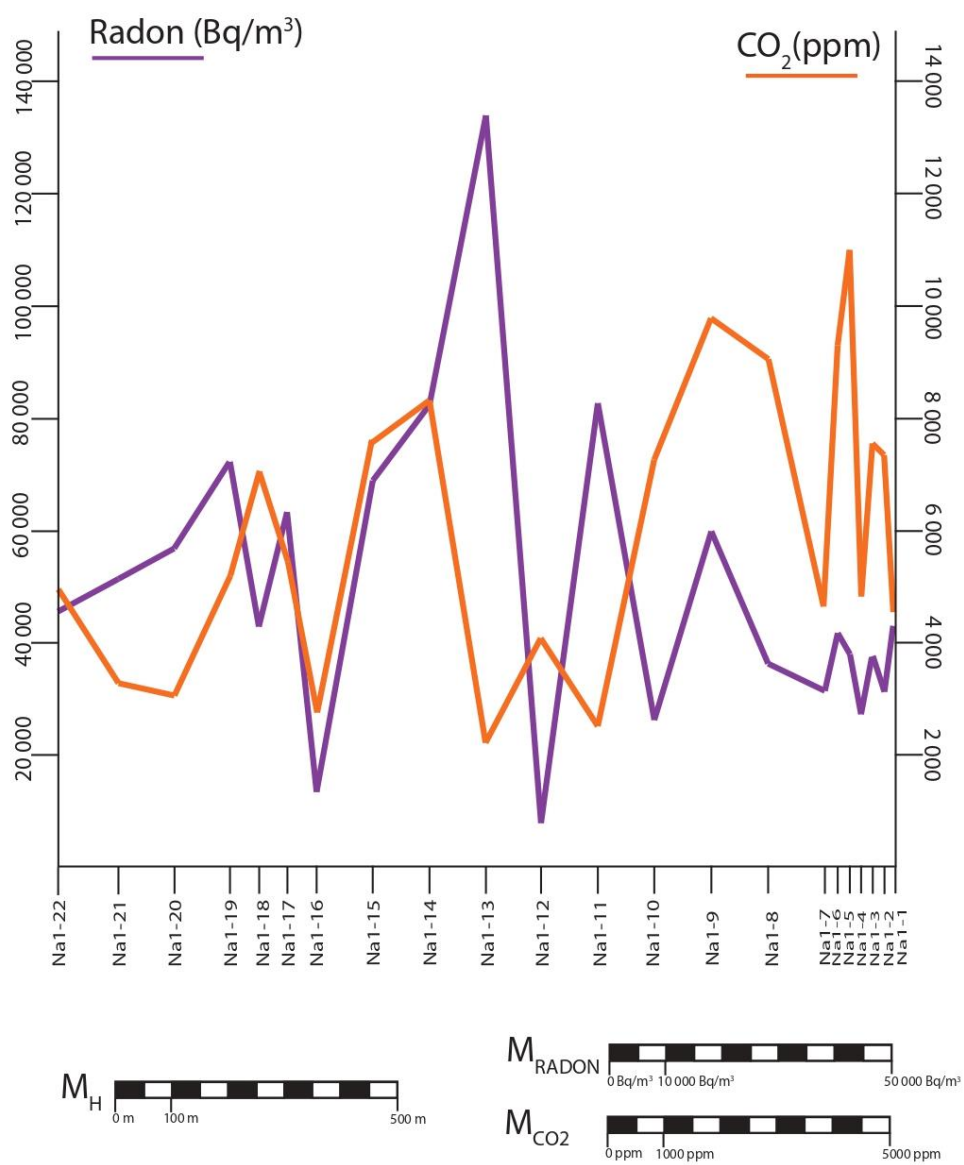


Slika 20. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s omjerom radona i torona (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)

10.2. Profil 1 – Radon, CO₂

Tablica 9. Rezultati mjerenja radona i CO₂

Broj mjerenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	CO ₂ (ppm)
1	Na1-1	43285	4582,5
2	Na1-2	31341	7593,6
3	Na1-3	37861	7411,3
4	Na1-4	27395	4866,9
5	Na1-5	38178	9361
6	Na1-6	42008	4698,7
7	Na1-7	31649	9144
8	Na1-8	36561	9845
9	Na1-9	60284	7302
10	Na1-10	26392	2528,7
11	Na1-11	83255	4111,7
12	Na1-12	7963	11106
13	Na1-13	134853	2235,5
14	Na1-14	82998	7664,4
15	Na1-15	69388	5488,1
16	Na1-16	13308	8365,9
17	Na1-17	63736	2780
18	Na1-18	43087	7112,8
19	Na1-19	72645	5222,1
20	Na1-20	57214	3076,1
21	Na1-21	51625	3326,2
22	Na1-22	45778	4980,3



Slika 21. Izmjerene koncentracije radona i CO₂

Iz tabličnog, ali i grafičkog prikaza može se vidjeti kako koncentracije plinova variraju s obzirom na točku mjerenja (Slika 21). Na istočnom dijelu profila (točke 1 – 10) mogu se uočiti relativno visoke koncentracije CO₂, dok su vrijednosti radona na tom dijelu profila manje u odnosu na ostatak profila. Istočni dio profila se u plićem podzemlju sastoji od litotamnijskih, bioklastičnih vapnenaca, konglomerata te vapnenačkih pješčenjaka (baden) te pjeskovitih lapora i laporovitih vapnenaca (sarmat). Na tom dijelu profila očekivano je imati povećanu koncentraciju CO₂ budući da se taj plin oslobađa otapanjem karbonata. Također je uočljivo kako su koncentracije CO₂ na preostalom dijelu profila manje, što može biti uvjetovano manjom debljinom, ili izostankom miocenskih vapnenačkih naslaga.

Također CO₂ može nastati dijagenезom gdje karbonati i alumosilikati podvrgnuti metamorfizmu oslobađaju CO₂.

Izrazito niske vrijednosti CO₂ na točki mjerenja gdje su izmjerene najveće vrijednosti radona može biti uzorkovano postojanjem povoljnog puta migracije, u koji lako ulazi voda s površine u kojoj se CO₂ otapa.

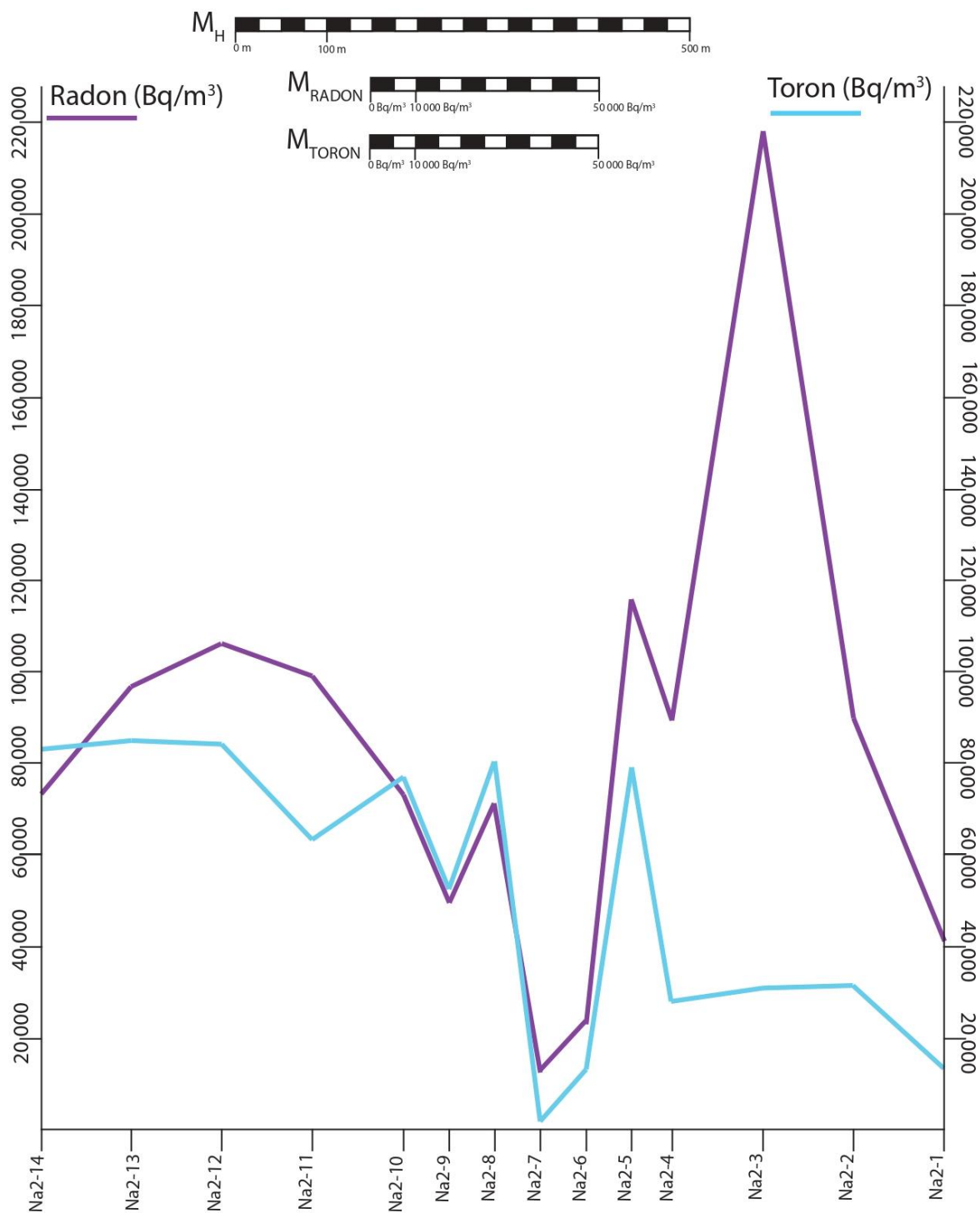
Na mjestima većih koncentracija CO₂ može se pretpostaviti kako je sav radon migriran uz njegovu pomoć, odnosno da je CO₂ nositelj radona. Budući da radon dolazi iz dubljeg podzemlja, moguće je na mjestima gdje se njegove koncentracije smanjuju, a koncentracije CO₂ rastu, ne postoji put migracije koji bi radon iskoristio dok migracija CO₂ ne treba sličan put budući da je izvor smješten puno pliće.

Tamo gdje su koncentracije oba plina u porastu može se pretpostaviti da koriste isti put migracije te da plinovi zajedno migriraju pri čemu CO₂ nosi radon.

10.3. Profil 2 – Radon, toron

Tablica 10. Rezultati terenskih mjerenja radona i torona s njihovim omjerom

Broj mjerenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	Toron (Bq/m ³)	Radon/Toron
1	Na2-1	42168	13552	3,11
2	Na2-2	91182	32195	2,83
3	Na2-3	221057	31286	7,07
4	Na2-4	90968	28571	3,18
5	Na2-5	117664	80107	1,47
6	Na2-6	23434	13286	1,76
7	Na2-7	12955	1822	7,11
8	Na2-8	72657	81507	0,89
9	Na2-9	50387	53385	0,94
10	Na2-10	74368	78002	0,95
11	Na2-11	100669	64182	1,57
12	Na2-12	107717	85360	1,26
13	Na2-13	98310	86198	1,14
14	Na2-14	74553	84207	0,89



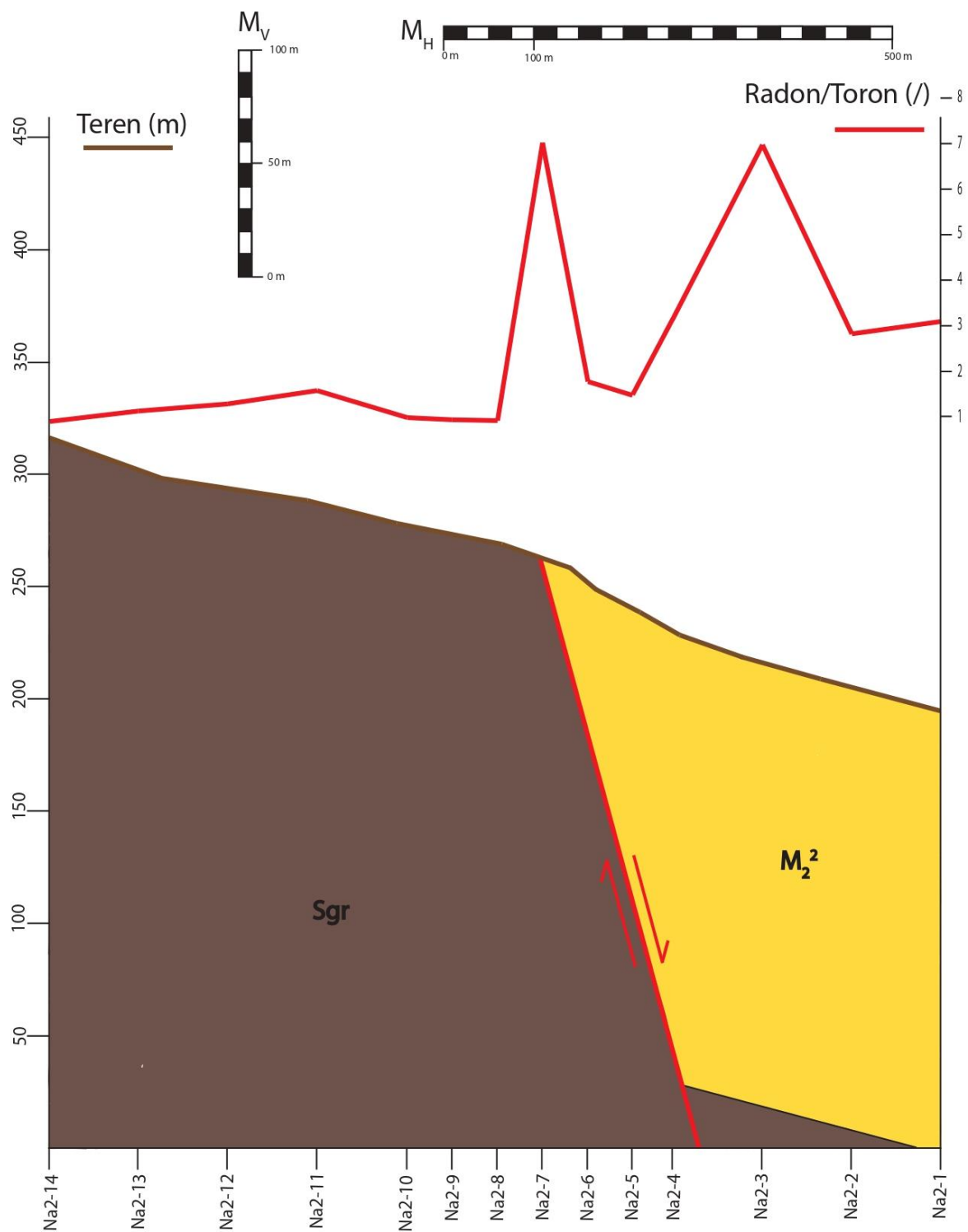
Slika 22. Izmjerene koncentracije radona i torona

Na drugom profilu (Slika 22) uočljivo je da su koncentracije torona veće u odnosu na koncentraciju radona samo na četiri točke mjerenja (Slika 23) (Točke 8 – 10 i 14). Na te četiri lokacije može se pretpostaviti da je izvor plinova smješten pliće u odnosu na ostale točke, ili su putevi migracije direktniji prema površini. U svakom slučaju migracija torona prema površini je dovoljno brza (ili kratka) da ne dođe do raspada na neke od njegovih produkata radioaktivnog raspada.

Na istočnom dijelu profila, od Točke 7 do 1 je očito migracija kroz miocenske naslage preduga da toron dođe do površine prije nego se raspadne. To je vidljivo i iz grafičkog prikaza (Slika 23) omjera radona i torona koji je dakle najveći na točkama mjerenja 7 i 3.

Na zapadnom dijelu profila koncentracije torona su više u odnosu na ostatak profila. To može biti zato što su grafitni škriljavci, koji su potencijalni izvori torona, smješteni na, ili blizu, površine te je migracija puno brža, odnosno kraća. Kratka, tj. brza migracija omogućuje dolazak torona do površine prije nego dođe do njegovog radioaktivnog raspada.

Ne smije se zanemariti ni to da su koncentracije torija u prisutnim stijenama manje u odnosu na koncentracije uranija. To može biti razlog općenite manje zastupljenosti torona u odnosu na radon.

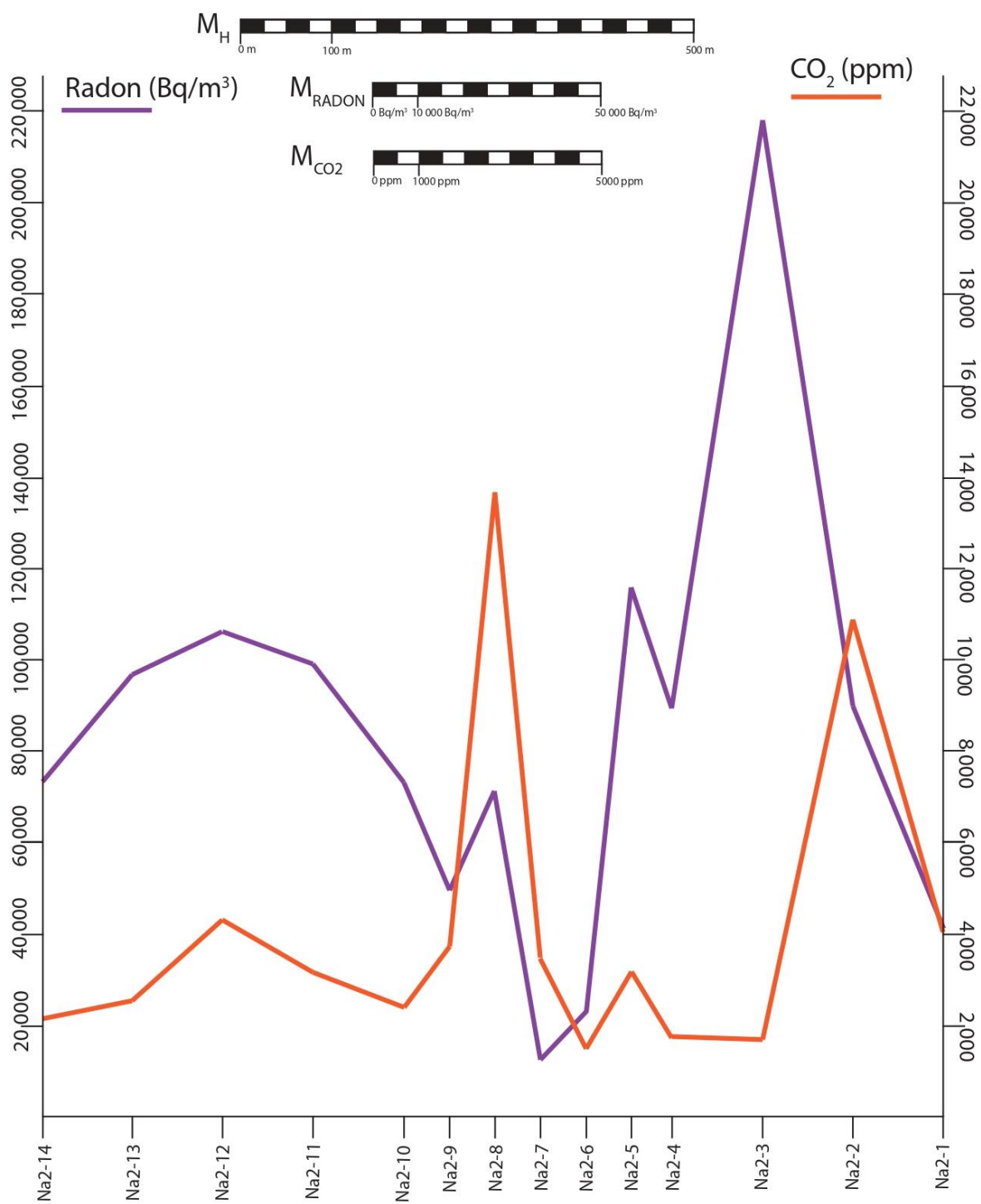


Slika 23. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s prikazom omjera radon/toron (odnos horizontalnog i vertikalnog mjerila je 5:1)

10.4. Profil 2 – Radon, CO₂

Tablica 11. Rezultati mjerenja radona i CO₂

Broj mjerenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	CO ₂ (ppm)
1	Na2-1	42168	4089,9
2	Na2-2	91182	11022
3	Na2-3	221057	1707,1
4	Na2-4	90968	1779,5
5	Na2-5	117664	3211,1
6	Na2-6	23434	1502,3
7	Na2-7	12955	3527,8
8	Na2-8	72657	13843
9	Na2-9	50387	3785,1
10	Na2-10	74368	2423,2
11	Na2-11	100669	3197,8
12	Na2-12	107717	4367,8
13	Na2-13	98310	2567,8
14	Na2-14	74553	2181,6

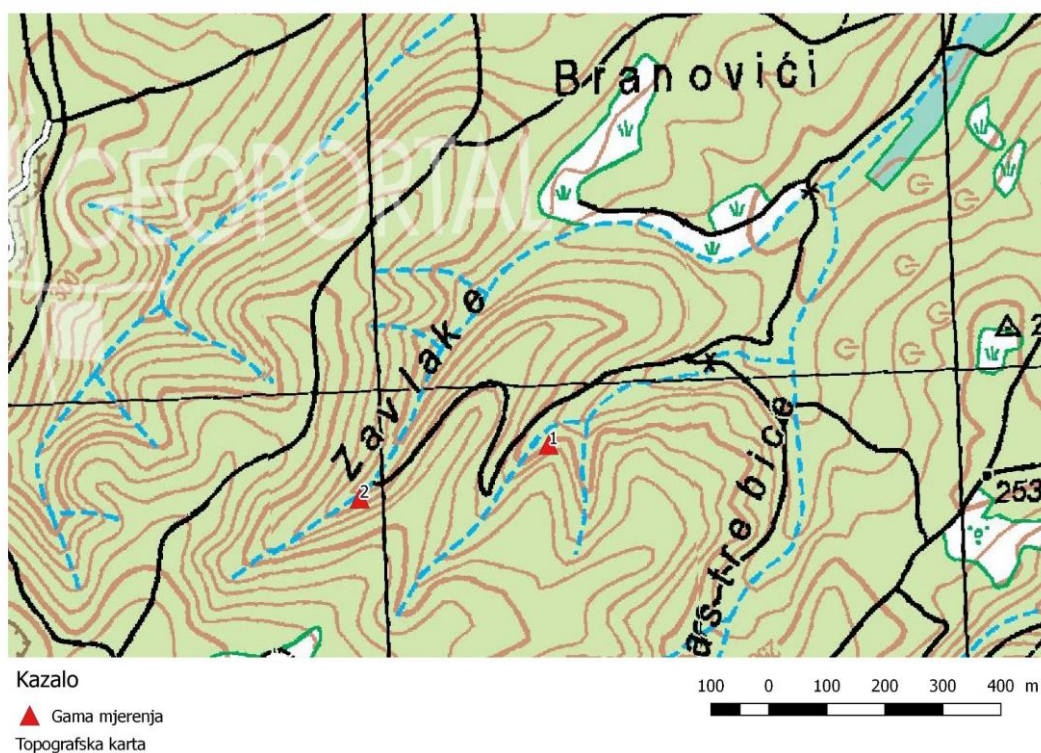


Slika 24. Izmjerene koncentracije radona i CO₂

Na drugom profilu je uglavnom vidljiva korelacija u rastu koncentracija radona i ugljikovog dioksida (Slika 24). Koncentracija CO_2 veća u značajnijem je porastu u odnosu na koncentraciju radona na samo tri točke mjerenja. Na točki Na2-2 povećana koncentracija CO_2 je vjerojatno prisutna zbog otapanja karbonata. Na lokacijama veće koncentracije CO_2 može se pretpostaviti kako CO_2 značajno pridonosi migraciji radona iz podzemlja do površine.

10.5. Petrografske analize stijena kristalinske podloge

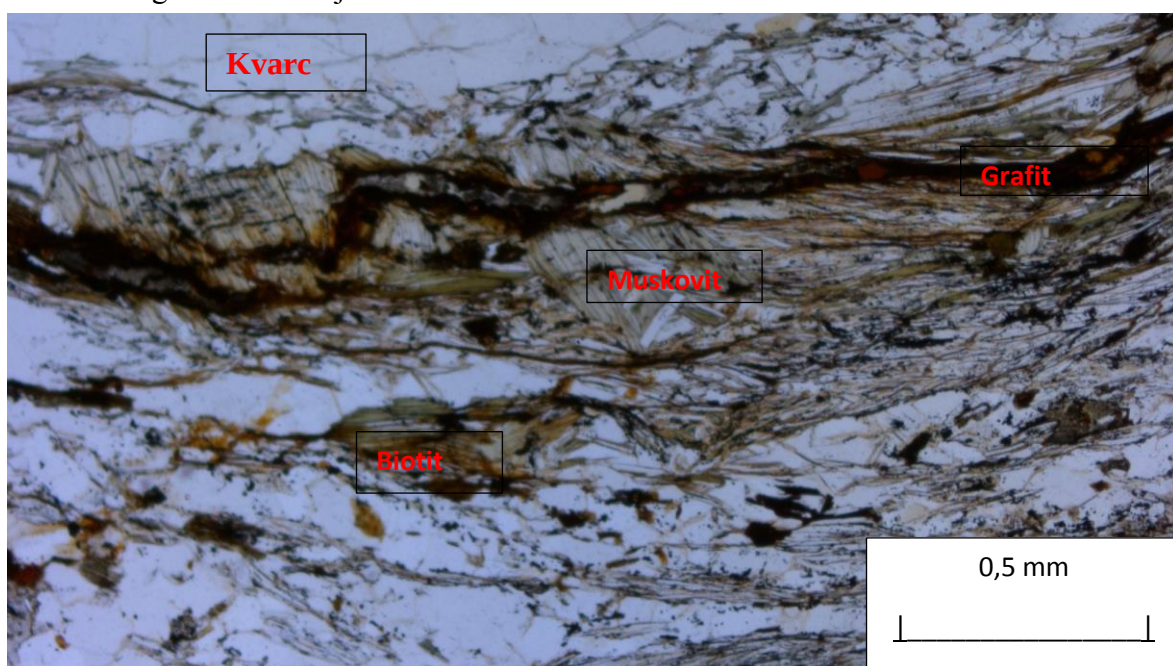
Tijekom terenskih mjerenja uzeta su dva uzorka grafitnih škriljavaca s dviju lokacija na kojima su i mjerene prirodne radioaktivnosti gama spektrometrom (Slika 25). Od tih su se uzoraka napravili mikroskopski preparati kako bi se mogao preciznije utvrditi njihov mineralni sastav, ali i ostale petrološke karakteristike.



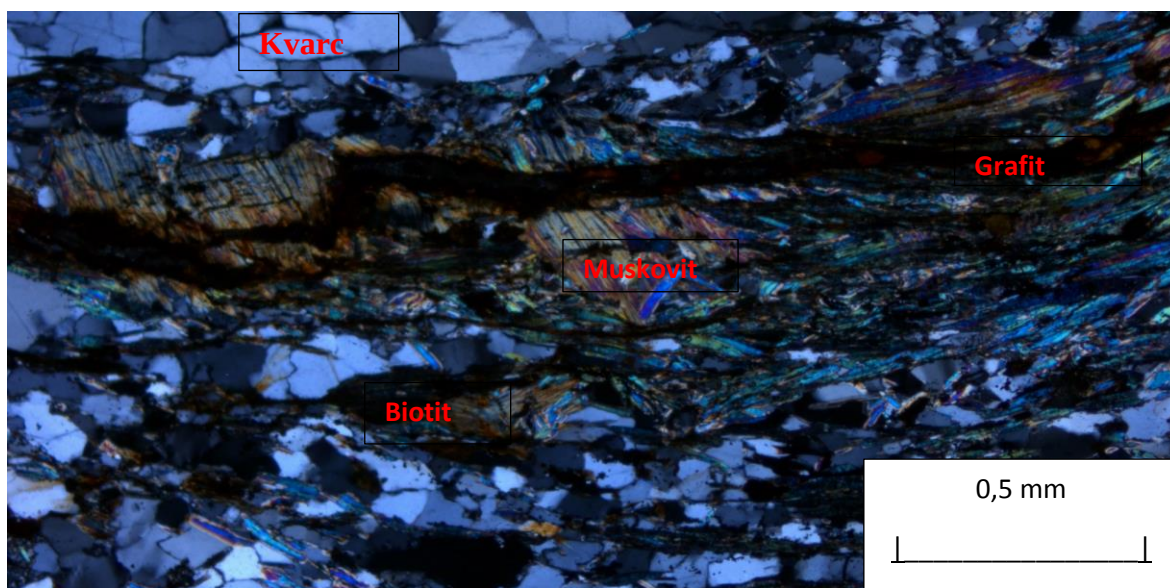
Slika 25. Lokacije uzetih uzoraka za petrografsku analizu (Topografska karta 1:25 000, *Marjanović, 2010*)

10.5.1. Uzorak 1

Uzorak broj 1 uzet je istočnije u odnosu na profil na kojem su se mjerile koncentracije plinova. Makroskopski se može utvrditi da se radi o metamorfnoj stijeni, točnije škriljavcu. Mikroskopski (Slike 26 i 27) je utvrđeno da se stijena sastoji pretežito od kvarca, zatim muskovita i biotita, koji se pojavljuje uz žilice grafita (C), koji je tipomorfni mineral. Stijena je izrazite škriljave teksture i granolepidoblastične strukture, što upućuje na to da se radi o škriljavcu. Na temelju mineralnog sastava možemo zaključiti da je stijena pripada mineralnoj paragenezi tinjčevih škriljavaca, a zbog tipomornog minerala grafita je nazivamo grafitnim škriljavcem.



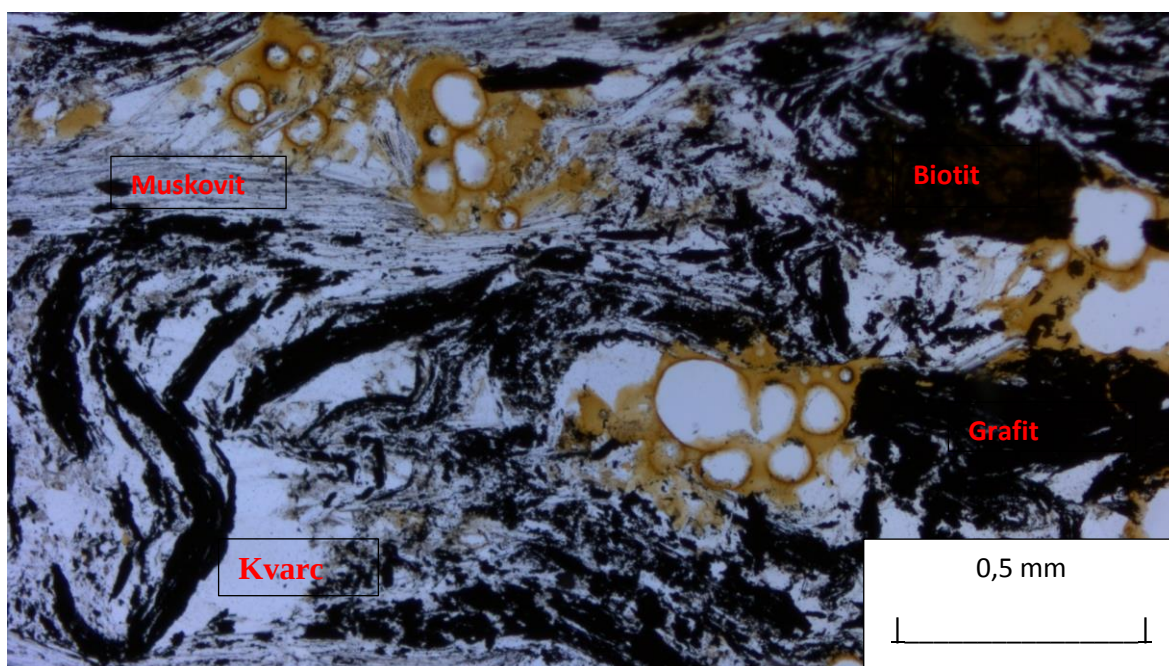
Slika 26. Slika preparata Uzorka 1 bez uključenog polarizatora



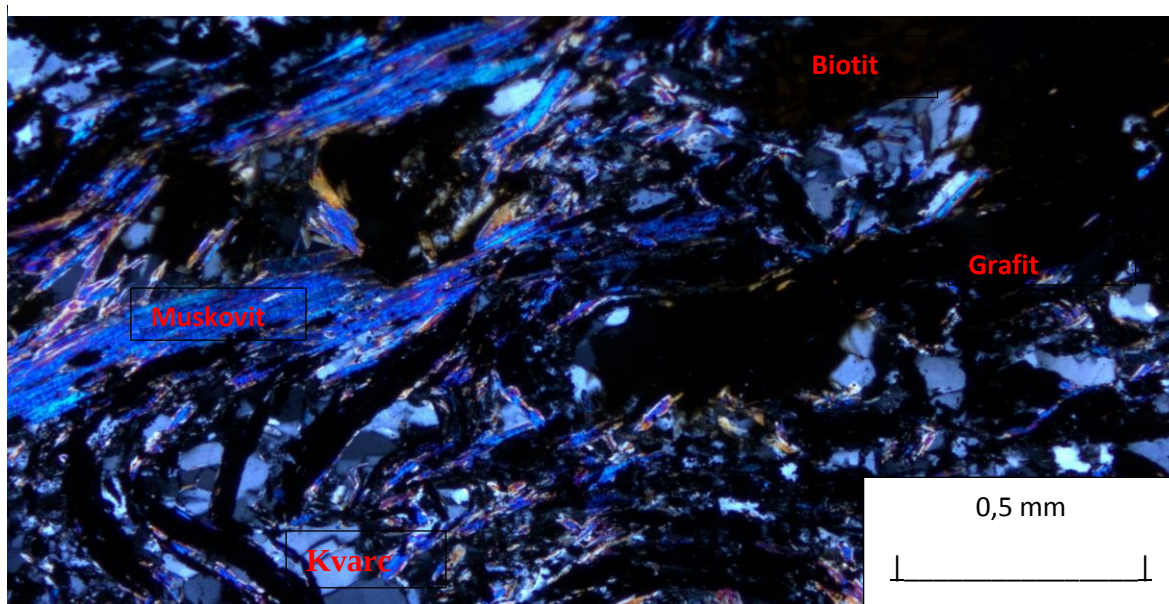
Slika 27. Slika preparata Uzorka 1 s uključenim polarizatorom

10.5.2. Uzorak 2

Uzorak 2 uzet je s druge, zapadne strane profila po kojem su se mjerile koncentracije plinova. Makroskopski se može utvrditi da je ta stijena također metamorfna. Mikroskopski je utvrđen isti mineralni sastav kao i u prvom uzorku (Slike 28 i 29). Razlika je samo u tom što je u ovom uzorku prisutno puno više grafitu oko kojeg nije prisutan biotit u obliku ovoja. Tekstura je također izrazito škrljava, a i struktura je granolepidoblastična. Dakle Uzorak 2 je također grafitni škrljavac, kao i Uzorak 1.



Slika 28. Slika preparata Uzorka 2 bez uključenog polarizatora



Slika 29. Slika preparata Uzorka 2 s uključenim polarizatorom

10.6. Spektrometrija gama zračenja

Prirodna radioaktivnost gama spektrometrom mjerila se istovremeno s koncentracijama plinova na točkama mjerenja na oba područja istraživanja i na svim profilima. Mjerilo se s postavkama za karotažnu metodu, odnosno sonda se postavljala u iskopanu rupu od 60-ak cm. Ipak, provedena se mjerenja nisu pokazala dovoljno pouzdanima. Najvjerojatnije je uzrok nepouzdatih rezultata preveliki utjecaj pokrova, koji „maskira“ i iskrivljuje pravo zračenje stijena u podzemlju. To se da uočiti usporedbom rezultata spektrometrije mjerene po profilu i onih mjerenih na izdancima stijena. Mjerenja su se načinila na izdancima na lokacijama s kojih su uzeti uzorci za petrografsku analizu i dobiveni su sljedeći rezultati (Tablica 12).

Tablica 12. Rezultati mjerenja spektrometrije gama zračenja na izdancima stijena.

Točka mjerenja	Kalij (%)	Uraniј (ppm)	Torij (ppm)	Ukupna radioaktivnost (nGy/h)
Nas-tem-1	3,13	5,8	9,5	97,3
	2,9	5,9	9,9	96,4
	2,37	4,8	9,5	82,2
Prosječne vrijednosti	2,8	5,5	9,63	91,97
Nas-tem-2	2,99	14,4	10,6	147,5
	3,71	16,2	11,5	169,3
	3,02	14,6	10,1	147,8
Prosječne vrijednosti	3,24	15,07	10,73	154,87

Uzimajući Tablicu 2 kao orijentir, može se uočiti kako su koncentracije radioaktivnih izotopa u stijenama na izdancima iznadprosječne, s izuzetkom torija, kojem je koncentracija malo ispod prosjeka na obje lokacije. Uzorci stijena uzeti s tih lokacija mikroskopirani su, i petrološki determinirani kao grafitni škriljavci, kao što je i navedeno na Osnovnoj geološkoj karti (OGK).

Budući da radon nastaje radioaktivnim raspadom uranija, a toron torija, na temelju dobivenih podataka spektrometrijom gama zračenja može se utvrditi kako su grafitni škriljavci izvor pojave navedenih plinova, no ne i jedini jer su povišene koncentracije radona zabilježene dominantno u potencijalnoj rasjednoj zoni ili u zoni propusnih badenskih litotipova. Također možemo povezati koncentracije urana i torija u stijenama s pojavljivanjem grafita u stijenama. Drugi uzorak uzet s točke mjerenja Nas-tem-2 ima puno više grafita u odnosu na prvi uzorak te pokazuje veće koncentracije uranija i torija. To je očekivano, budući da grafit nastaje metamorfozom sedimenata bogatih organskom tvari koja sadrži uranij i torij.

Iznadprosječne koncentracije kalija uzrokovane su prisutnošću tinjaca (muskovit i biotit) koji po svom kemijskom sastavu sadrže kation K^+ (muskovit – $KAl_2[(OH)_2AlSi_3O_{10}]$, biotit – $K(Mg,Fe)_3[(OH,F)_2AlSi_3O_{10}]$).

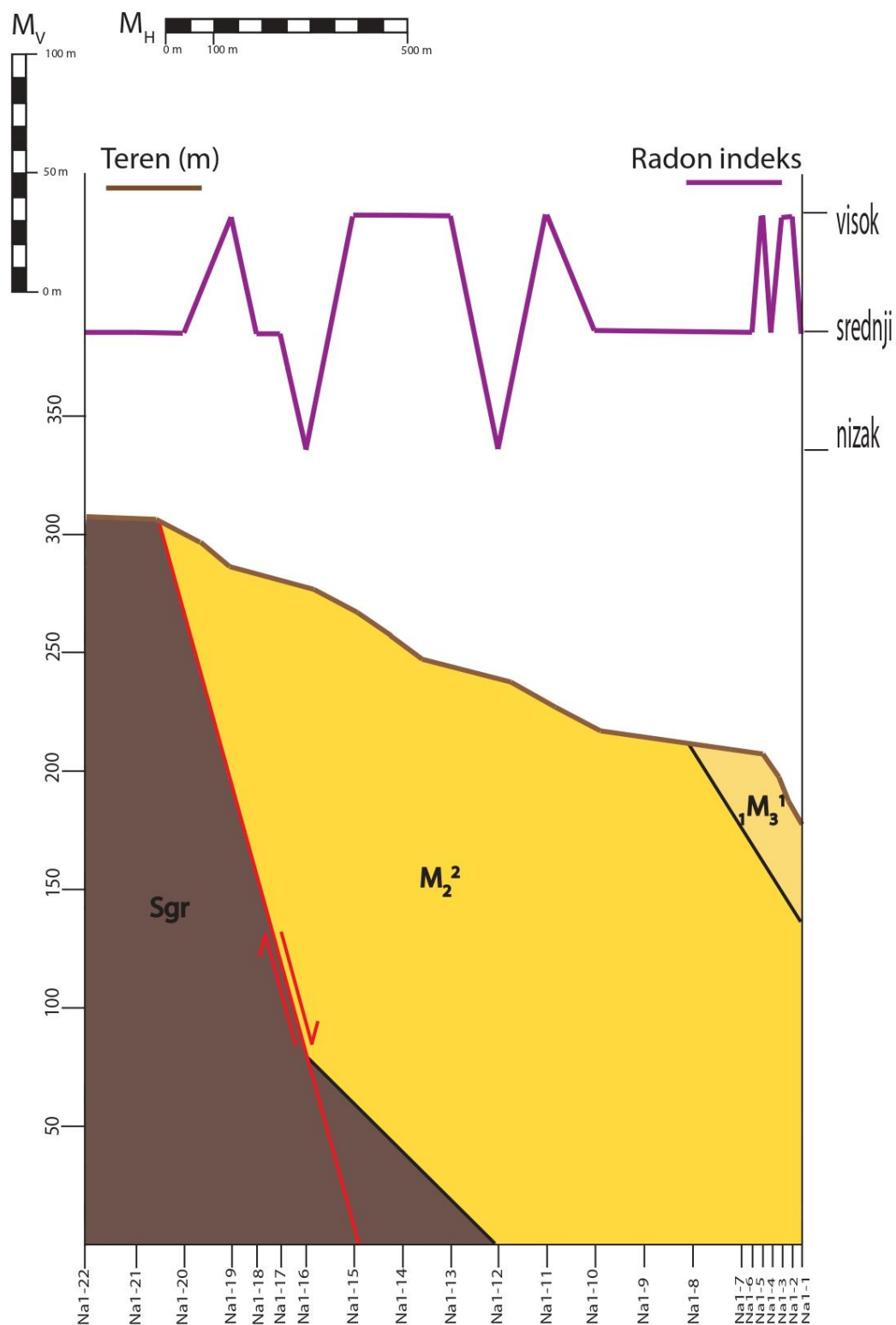
10.7. Određivanje radon indeksa

10.7.1. Profil 1

Tablica 13. Koncentracija radona i propusnost na prvom profilu

Broj Mjerenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	Propusnost (m ²)	Kategorija propusnosti	Radon indeks
1	Na1-1	43285	$5,30 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
2	Na1-2	31341	$1,17 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Visok
3	Na1-3	37861	$2,50 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Visok
4	Na1-4	27395	$1,51 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Srednji
5	Na1-5	38178	$2,31 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Visok
6	Na1-6	42008	$9,08 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji
7	Na1-7	31649	$6,26 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji
8	Na1-8	36561	$5,10 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
9	Na1-9	60284	$3,98 \cdot 10^{-13}$	Srednja	Srednji
10	Na1-10	26392	$1,60 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
11	Na1-11	83255	$3,87 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Visok
12	Na1-12	7963	$4,73 \cdot 10^{-12}$	Visoka	Nizak
13	Na1-13	134853	$2,15 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Visok
14	Na1-14	82998	$1,10 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Visok
15	Na1-15	69388	$1,22 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Visok
16	Na1-16	13308	$2,71 \cdot 10^{-13}$	Srednja	Nizak
17	Na1-17	63736	$2,47 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
18	Na1-18	43087	$2,40 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
19	Na1-19	72645	$1,62 \cdot 10^{-08}$	Visoka	Visok
20	Na1-20	57214	$2,99 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
21	Na1-21	51625	$2,50 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
22	Na1-22	45778	$7,83 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji

Na prvom profilu prevladavaju lokacije sa srednjim, a zatim s visokim radon indeksom. Nizak radon indeks određen je tek za dvije lokacije (Tablica 13).



Slika 30. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s grafičkim prikazom radon indeksa

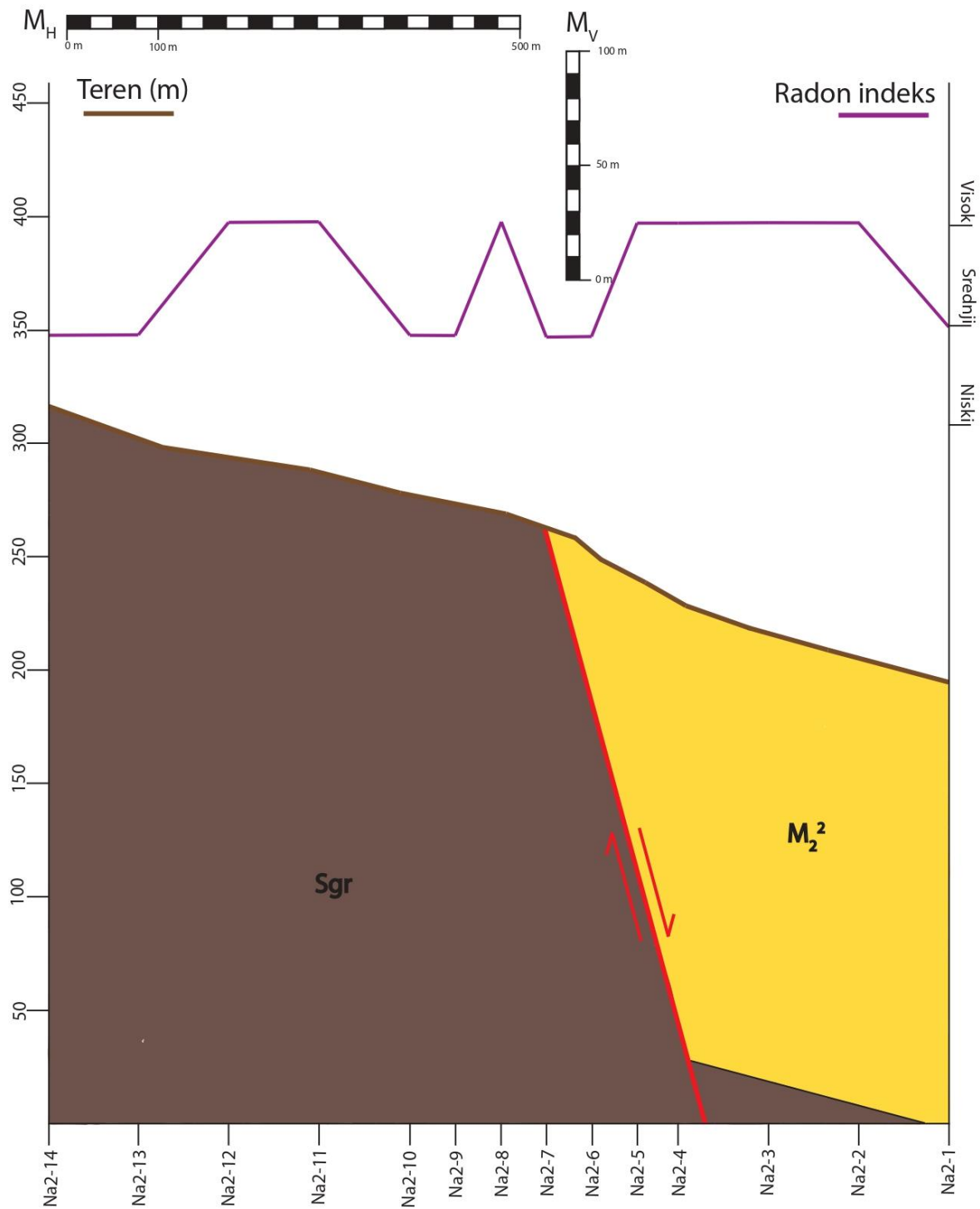
Promatrajući promjene indeksa radona u odnosu na geološki profil ispitivanog područja može se utvrditi kako se njegova kategorizacija značajnije mijenja približavanjem prema rasjedu. Također su česte oscilacije indeksa iznad sarmatskih naslaga (Slika 30). Te oscilacije više su uvjetovane promjenom poroznosti na točkama mjerenja nego samom promjenom koncentracija radona. Iznad badenskih naslaga uočljiv je izravan prijelaz iz niskih indeksa u visoki. Tu pak veću ulogu ima sama mjerena koncentracija radona budući da je propusnost na točkama niskog indeksa radona okarakterizirana kao visoka, odnosno srednja. To može značiti da postoji rasjedna zona, ali da na određenim mjestima na profilu izostaju putevi migracije plinova kojim bi oni došli do površine. Dio profila iznad metamorfnih stijena je vrlo mali (kratak) pa na njemu nije uočena promjena kategorije indeksa radona.

10.7.2. Profil 2

Tablica 14. Koncentracija radona i propusnost na drugom profilu

Broj mjerenja	Oznaka točke	Radon (Bq/m ³)	Propusnost (m ²)	Kategorija propusnosti	Radon indeks
1	Na2-1	42168	$1,4229 \cdot 10^{-11}$	Visoka	Srednji
2	Na2-2	91182	$2,2 \cdot 10^{-13}$	Srednja	Visok
3	Na2-3	221057	$1,41 \cdot 10^{-13}$	Srednja	Visok
4	Na2-4	90968	$1,963 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Visok
5	Na2-5	117664	$5,637 \cdot 10^{-12}$	Visoka	Visok
6	Na2-6	23434	$1,882 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
7	Na2-7	12955	Izrazito visoka propusnost	Visoka	Srednji
8	Na2-8	72657	$1,87 \cdot 10^{-13}$	Srednja	Visok
9	Na2-9	50387	$2,469 \cdot 10^{-12}$	Srednja	Srednji
10	Na2-10	74368	$5,3 \cdot 10^{-14}$	Niska	Srednji
11	Na2-11	100669	$6,44 \cdot 10^{-10}$	Visoka	Visok
12	Na2-12	107717	$1,12 \cdot 10^{-13}$	Srednja	Visok
13	Na2-13	98310	$4,51 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji
14	Na2-14	74553	$5,59 \cdot 10^{-13}$	Niska	Srednji

Na drugom profilu u jednakom udjelu određeni su srednji i visoki radon indeksi sa po sedam pojavljivanja (Tablica 14).



Slika 31. Geološki profil na temelju OGK 1:100 000, list Našice (Korolija, B. & Jamičić, D., 1989) s grafičkim prikazom radon indeksa

Na drugom profilu određene su srednje i visoke kategorije indeksa radona (Slika 31). One se intenzivnije mijenjaju u blizini normalnog rasjeda u središtu profila. Vjerojatno postojanje rasjedne zone uzrokuje visoku kategoriju indeksa radona. Pošto su izmjerene koncentracije radona prilično visoke, kategorizacija je određena propusnošću tla. Visoke koncentracije radona upućuju na postojanje povoljnih puteva migracije plina iz podzemlja do površine.

10.8. Ukupna koncentracija ugljikovodika (TP) i metan (CH₄)

Instrument ECOPROBE 5 ima opciju da uz CO₂ i CH₄ mjeri i ukupnu koncentraciju plinovitih ugljikovodika koji migriraju iz podzemlja prema površini. Ti ugljikovodici su kompleksniji od metana koji se zasebno mjeri.

10.8.1. Profil 1

Tablica 15. Izmjerene koncentracije TP i CH₄ na prvom profilu

Broj mjerjenja	Oznaka točke	TP (ppm)	CH ₄ (ppm)
1	Na1-1	0	0
2	Na1-2	0	0
3	Na1-3	87,9	0
4	Na1-4	0	0
5	Na1-5	0	0
6	Na1-6	50,3	0
7	Na1-7	0	0
8	Na1-8	0	0
9	Na1-9	0	0
10	Na1-10	0	0
11	Na1-11	15,8	107,9
12	Na1-12	0	0
13	Na1-13	0	0
14	Na1-14	0	0
15	Na1-15	0	0
16	Na1-16	0	0
17	Na1-17	2,8	0
18	Na1-18	4,7	0
19	Na1-19	10	0
20	Na1-20	0	0
21	Na1-21	0	0
22	Na1-22	39,9	0

Mjerenjem ukupne koncentracije ugljikovodika na prvom profilu utvrđeno je pojavljivanje istih na svega nekoliko (sedam) točaka mjerenja (Tablica 15). Uspoređujući te koncentracije s koncentracijama dobivenim na drugom profilu može se zaključiti kako se radi o vrlo malim koncentracijama. TP se uz jednu iznimku (Na1-19) pojavljuju na točkama kategorija propusnosti koje odgovaraju srednjim i niskim propusnostima. To može značiti da je došlo do nakupljanja ugljikovodika na tim lokacija te da bi oni migrirali dalje u atmosferu da je propusnost veća. Pretpostavka je da ti ugljikovodici potječu iz badenskih lapora smještenih u depresiji te migriraju duž rasjeda i izlaze na površinu na području istraživanja.

Metan se pojavljuje tek na jednoj točki mjerenja (Na1-11). Izostanak pojave metana može se objasniti dvama pretpostavkama. Da je metan prerađen od strane bakterija u površinskim ili pripovršinskim slojevima tla i stijena. Druga pretpostavka je da metan vrlo lako migrira i otplinjava se iz tla zbog svoje izrazito male molekule. Zbog toga on ne ostaje sačuvan u tlu kao ostali plinovi koji se mjere.

10.8.2. Profil 2

Tablica 16. Izmjerene koncentracije TP i CH₄ na drugom profilu

Broj mjerenja	Oznaka točke	TP (ppm)	CH ₄ (ppm)
1	Na2-1	77,3	0
2	Na2-2	0	0
3	Na2-3	101,6	0
4	Na2-4	117,9	0
5	Na2-5	87,7	0
6	Na2-6	136,5	0
7	Na2-7	142,4	0
8	Na2-8	180,8	0
9	Na2-9	91,3	0
10	Na2-10	204	0
11	Na2-11	0	0
12	Na2-12	0	0
13	Na2-13	0	0
14	Na2-14	0	0

Na drugom profilu TP se pojavljuje na više točaka (devet) nego na prvom profilu (Tablica 16). Također koncentracije TP-a na drugom profilu značajno su veće u odnosu na koncentracije izmjerene na prvom profilu. Ipak, ovdje nije vidljiva korelacija propusnosti tla i pojavljivanja ugljikovodika budući da su jedne od većih koncentracija izmjerene pri visokim kategorijama propusnosti.

Na drugom profilu nisu zabilježena pojavljivanja metana koji je ili migrirao u atmosferu ili su ga preradile bakterije.

11. Zaključak

Na temelju dobivenih rezultata mjerenja koncentracija radona, torona, ugljikovog dioksida i metana mogu se pretpostaviti zone migracije navedenih plinova iz podzemlja prema površini. Iznosi omjera radon/toron u većini slučajeva upućuju na put migracije iz dubljeg podzemlja. Zbog većih koncentracija radona u odnosu na toron koji ima puno kraće trajanje poluživota. Porast tog omjera uočljiv je na mjestima gdje bi potencijalno rasjed izdanjivao na površini te gdje vrlo vjerojatno postoji povoljan put migracije plina u vidu pukotinskih sustava ili propusnih naslaga.

Visoki i srednji indeks radona određen je na velikom broju točaka mjerenja. To je za područje Krndije manje opasno, budući da u blizini nema naseljenih mjesta. Ipak, profil na Banovini prolazi vrlo blizu naselja Križ Hrastovački te je veći broj točaka mjerenja s određenim visokim indeksom radona u njegovoj velikoj blizini. Samim time postoji mogućnost nakupljanja većih koncentracija radona u podrumima i kućama s nekvalitetno napravljenim temeljima. Te pojave predstavljaju potencijalnu opasnost po zdravlje ljudi.

Izmjerene koncentracije ugljikovog dioksida nije moguće izravno uspoređivati s koncentracijama radona zbog drugačije jedinice mjerenja. Ipak ugljikov dioksid se pojavljuje kao važni, a u ovom slučaju i jedini, plinoviti nositelj radona prema površini. Razlozi nastajanja, odnosno pojavljivanja, ugljikovog dioksida su razni, duboki izvori CO₂, atmosferski CO₂, organski izvori ili dijageneza stijena. Metan također spada u kategoriju nositelja radona, ali detektiran je tek na jednoj točki mjerenja na Krndiji i pet točaka na Banovini uz vrlo male koncentracije.

Spektrometrijom gama zračenja na izdancima stijena na Krndiji je određen glavni plići izvor radona i torona u vidu grafitnih škriljavaca. Mjerenje gama zračenja po profilima na Banovini i na Krndiji nisu dala zadovoljavajuće rezultate zbog prevelikog utjecaja trošnog pokrova.

12. Literatura

Baines, S. J. & Worden, R. H. (2004): Geological Storage of Carbon Dioxide, Geological Society, London, Special Publications, 233, 59-85., The Geological Society of London 2004.

Barnet, I., Pacharová, P., Neznal, M., Neznal, M., 2008, Special Papers No. 19. Czech Geological Survey. Praha. ISBN 978-80-7075-707-9.

Chen, Z., Li, Y., Liu, Z., Wang, J., Zhou, X., Du, J. (2018): Radon emission from soil gases in the active fault zones in the Capital of China and its environmental effects, Scientific Reports, 8, 16772.

Cvetković, M., Kapuralić, J., Pejić, M., Močilac, I.K., Rukavina, D., Smirčić, D., Kamenski, A., Matoš, B., Špelić, M. (2021): Soil Gas Measurements of Radon, CO₂ and Hydrocarbon Concentrations as Indicators of Subsurface Hydrocarbon Accumulation and Hydrocarbon Seepage. Sustainability 2021, 13, 3840.

Hanrahan, G. *Key Concepts in Environmental Chemistry*; Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands, 2012.

Killeen, P.G., Mwenifumbo, C.J., Ford, K.L. (2015): Tools and Techniques: Radiometric Methods, Volume 11, 2015, Pages 447-524.

Koike, K., Yoshinaga, T., Ueyama, T., Asaue, H. (2014): Increased radon-222 in soil gas because of cumulative seismicity at active faults, Planets and Space, 66:57.

Kollerud, R., Blaasaas, K., Ganerød, G., Daviknes, H. K., Aune, E.; Claussen, B. (2013): Prediction of indoor radon concentrations in dwellings in the Oslo region – a model based on geographical information systems, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1, 3045–3071.

Korolija, B. & Jamičić, D. (1989): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Našice L34–85. – Geološki zavod, Zagreb; OOUR za geologiju, (1988); Savezni geološki institut, Beograd.

Ma, X., Zheng, G., Liang, S., Xu, W. (2015): Geochemical characteristics of absorbed gases in fault gouge from the Daliushu dam area, NW China, *Geochemical Journal*, 49, 413-419.

Marjanović, M. (2010): Topografska karta u mjerilu 1:25000, Geoportal DGU

Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., Sarhosis, V. (2021): Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020—Preliminary Multidisciplinary Research. *Remote Sens.* 13, 1095.

Michel-le Pierres, K., Gal, F., Brach, M., Guignat, S. (2010): Radon, helium and CO₂ measurements in soils overlying a former exploited oilfield, Pechelbronn district, Bas-Rhin, France, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 835-846.

Pavelić, D., Kovačić, M. (2018): Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia): A review, *Marine and Petroleum Geology* 91 (2018) 455–469.

Pikija, M. (1987): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Sisak L33–93. – Geološki zavod, Zagreb (1975–1986); Savezni geološki institut, Beograd.

Scheib, C., Appleton J. D., Miles J. C. H., Green, B. M. R., Barlow, T. S. i D. G. Jones (2009): Geological controls on radon potential in Scotland, *Scottish Journal of Geology*.

Slovenec, Dragutin (2002): Sistematska mineralogija, Skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Sugisaki, R., Anno, H., Adachi, M., Ui, H. (1980): Geochemical features of gases and rocks along active faults, *Geochemical Journal*, 14, 101-112.

Tokonami, S. (2020): Characteristics of Thoron (²²⁰Rn) and Its Progeny in the Indoor Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 8769.

Vujić, A., ur. (2005): Enciklopedija, opća i nacionalna u 20 knjiga, Zagreb, Večernji list, 165.

Zahvaljujem se Izv. prof. dr. sc. Marku Cvetkoviću na konstruktivnim kritikama i pomoći pri pisanju ovog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem Hrvatskoj zakladi za znanost što mi je omogućila sudjelovanje na GEODEP projektu i sufinancirala ovaj rad.