

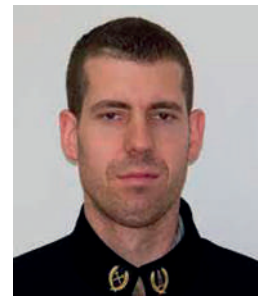
# Preliminarne spoznaje o geoenergetskom potencijalu podzemlja istočnog dijela Dravske depresije

Preliminary insights into the subsurface geoenergy potential in the Eastern part of the Drava depression

**Iva Kolenković Močilac**  
Sveučilište u Zagrebu, RGNF

**Marija Pejić**  
Sveučilište u Zagrebu, RGNF

**Marko Cvetković**  
Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
marko.cvetkovic@rgn.unizg.hr



**Ključne riječi:** nafta, plin, geotermalna energija, skladištenje ugljikovog dioksida, podzemno skladištenje energije, Dravska depresija,

**Key words:** oil, gas, geothermal energy, carbon capture and storage, underground energy storage, Drava depression



## Sažetak

Istočni dio Dravske depresije okvirno obuhvaća površinu od 5200 km<sup>2</sup> čija debljina neogensko-kvartarne ispune lokalno može doseći i više od 6 km. Ležišta nafte i plina unutar neogensko-kvartarnih naslaga potvrđena su tijekom istraživanja koja su se provodila više od 50 godina. Unatoč ovako dugom razdoblju istraživanja i proizvodnje nafte i plina, regionalna bazenska analiza pokazuje da još uvijek postoji potencijal u pronalaženju novih ležišta nafte i plina. Dodatna mogućnost iskorištavanja dubokog podzemlja nastaje kao posljedica trenda prelaska na obnovljive izvore energije i trenda dekarbonizacije gdje ovaj dio Hrvatske ima potencijal u iskorištavanju geotermalnih resursa, geološkom skladištenju ugljičnog dioksida i u podzemnom skladištenju energije. Povišeni geotermalni gradijent, koji lokalno može biti i viši od 5 °C/100 m, omogućuje definiranje objekata prikladnih za iskorištavanje geotermalne energije u različite namjene i to iz neogensko-kvartarnih stijena te iz

stijena podloge neogena sa značajnom sekundarnom poroznošću. Potencijal za uskladištenje ugljikovog dioksida i za podzemno skladištenje energije povećavat će se s vremenom, budući da je većina naftnih i plinskih polja na ovom području pri kraju proizvodnje.

**Zahvale:** Zahvaljujemo Hrvatskoj agenciji za ugljikovodike na ustupljenim seizmičkim i bušotinskim podacima, te tvrtki Schlumberger na donaciji licenci za softver bez kojeg se ovaj posao ne bi mogao izvoditi. Ovaj rad sufinancirala je Hrvatska zaklada za znanost projektom „GEOloška karakterizacija podzemlja istočnog dijela Dravske depresije s ciljem procjene Energetskih Potencijala“ (UIP-2019-04-3846).



## Abstract

Eastern part of the Drava depression roughly covers the area of 5200 km<sup>2</sup> where thickness of Neogene-Quaternary infill can locally reach more than 6 km. Neogene-Quaternary sequence has oil and gas plays confirmed by exploration carried out for more than 50 years. Even after such a long history of exploration and production of oil and gas, regional basin analysis shows that there is still potential for finding new oil and gas prospects. Additionally, with respect to the transition towards green energy and carbon neutral society, it is worth considering that this part of Croatia yields potential for exploitation of geothermal resources, carbon capture and geo-



Slika 1. Područje istraživanja i podjela Sjevernohrvatskog bazena na depresije (Velić, 2007)

gical storage, as well as for underground energy storage. Elevated geothermal gradients in the subsurface which can locally be higher than  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  provide large future potential for various types of utilisations of geothermal energy from Neogene-Quaternary formations as well as from fractured pre-Neogene basement rocks. It is envisaged that carbon storage and underground energy storage operations will develop trough time as majority of oil and gas fields are near the end of their production period.

Acknowledgements: We thank the Croatian hydrocarbon agency for providing the seismic and well data and Schlumberger for providing licenses for software without which this work could not be performed. This work has been supported in part by Croatian Science Foundation under the project „GEOlogical characterization of the Eastern part of the Drava Depression subsurface intended for the evaluation of Energy Potentials“ (UIP-2019-04-3846).

## 1. Uvod

Završetkom uspješnog procesa vrednovanja projektnog prijedloga na natječaju Uspostavni istraživački projekti 2019-04 Hrvatske zaklade za znanost,

odobreno je financiranje projekta pod nazivom „GEOloška karakterizacija podzemlja istočnog dijela Dravske depresije s ciljem procjene Energetskih Potencijala“ (UIP-2019-04-3846). Koncept projekta je zasnovan na evaluaciji geoenergetskog potencijala u vidu procjene mogućnosti pronalaska konvencionalnih ležišta ugljikovodika, utvrđivanja povoljnih lokacija za skladištenje ugljikovog dioksida te procjene geotermalnog potencijala. Samo područje istraživanja obuhvaća istočni dio Dravske depresije te pokriva približno  $5200\text{ km}^2$  (Slika 1.). Geonegetska istraživanja podzemlja redovito provode kompanije koje se bave eksploatacijom ugljikovodika, a ovaj projekt je jedan od rijetkih znanstvenih projekata s takvim ciljem istraživanja, poglavito u vezi istraživanja vezana za konvencionalna ležišta ugljikovodika. Nije nepoznato da se takva istraživanja provode već nekoliko desetljeća od strane INA d.d. konvencionalnim pristupima izvođenjem i interpretacijom geofizičkih istraživanja te izradbom bušotina. Ovaj projekt za svoj cilj ima korištenje manje konvencionalnih metoda, poput površinskih istraživanja i analiza plinova u zraku tla te prirodne radioaktivnosti stijena na izdancima u svrhu poboljšanja dubinsko-geoloških modela.

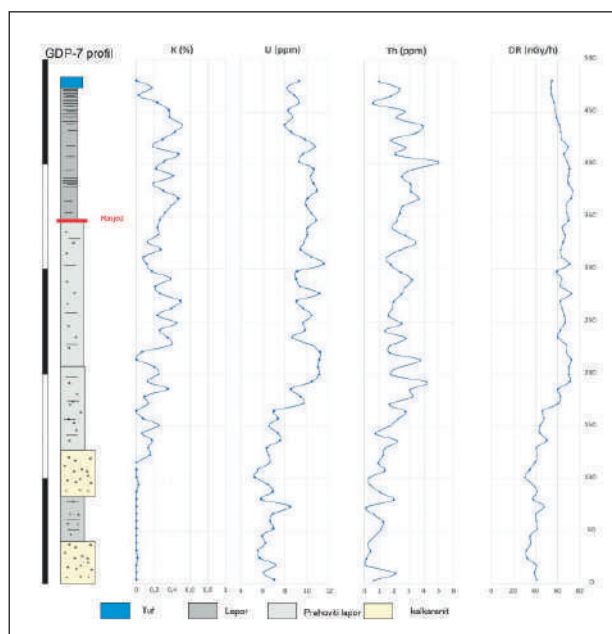


Slika 2. a) snimanje prijenosnim gama spektrometrom na izdancima, b) prikaz sučelja za mjerenje i prikaz rezultata

## 2. Mjerenje prirodne radioaktivnosti stijena

Svaka stijena u prirodi posjeduje barem malu koncentraciju elemenata koji su nestabilni tj. predstavljaju izvor prirodne radioaktivnosti. Najčešći radionuklidi u prirodi su  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  čija se koncentracija proučava u svrhe eksploatacije mineralnih sirovina, zaštite ljudskog zdravlja, ali i u istraživanjima ugljikovodika te geotermalne energije. Unutar projekta GEODEP nabavljen je prijenosni spektrometar gama-zračenja koji se može koristiti za utvrđivanje koncentracije navedenih radionuklida na izdancima te u plitkim bušotinama (do 100 m dubine). Geofizički spektrometar gama-zraka Gamma Surveyor Vario VB6 BGO (Slika 2.) koristi se za određivanje koncentracija K [%], eU [ppm] i eTh [ppm], kao i „brzinu doze“ (eng. *Dose Rate*, kr. DR) [nGy/h ili nSv/h]. K predstavlja ukupnu količinu kalija, u kojem se radionuklid  $^{40}\text{K}$  pojavljuje u udjelu 0,0118 %. U i Th se prijenosnim gama-spektrometrom procjenjuju indirektno, kroz gama-zrake njihovih produkata raspada, zbog čega je dodana skraćenica za ekvivalent „e“ (Cinelli et al., 2019). Mjerenje se odvija prislanjanjem na tlo odnosno sediment/stijenu. Zahvat uređaja iznosi otprilike 0,5 m, ovisno o gustoći stijene.

Sama terenska istraživanja ovim uređajem usmjerena su na dvije različite primjene. Prva je utvrđivanje potencijala generiranja radiogene topline stijena podloge neogenskih naslaga i mlađih kristalina (Abdel Hafeez et al., 2019; Adabanija et al., 2020; Sanjurjo-Sánchez et al., 2022) kako bi se mogla utvrditi detaljnija raspodjela temperatura u podzemlju na temelju bazenskog modeliranja.



Slika 3. Prikaz litološkog stupa s organskim bogatim laporima i rezultatima gama spektrometrije

Druga primjena je utvrđivanje povezanosti sadržaja ugljika organskog podrijetla i koncentracije kalija, uranija i torija te ukupne doze zračenja. Na izdancima na kojima je utvrđena prisutnost matičnih stijena snimani su geološki stupovi i spektrometrija gama-zračenja kako bi se utvrdio odnos koncentracije radionuklida i sadržaja ugljika organskog podrijetla (engl. Total Organic Carbon, kr. TOC). Na nekoliko lokacija snimljeni su sedimentološki stupovi s utvrđenim matičnim stijenama i duž stupova je detaljno snimljena gama spektrometrija (Slika 3.) te su uzeti uzorci za TOC analize kako bi se utvrdilo postoji li pravilnost koja bi se korištenjem karotažnih krivulja



Slika 4. Analytik Jena multi EA 4000 CS analizator korišten za TOC analizu

mogla iskoristiti za bolju definiciju prostorne raspodjele matičnih stijena i TOC vrijednosti. Analize sadržaja ugljika organskog podrijetla napravljene su na Analytik Jena EA 4000 CS analizatoru (Slika 4.).

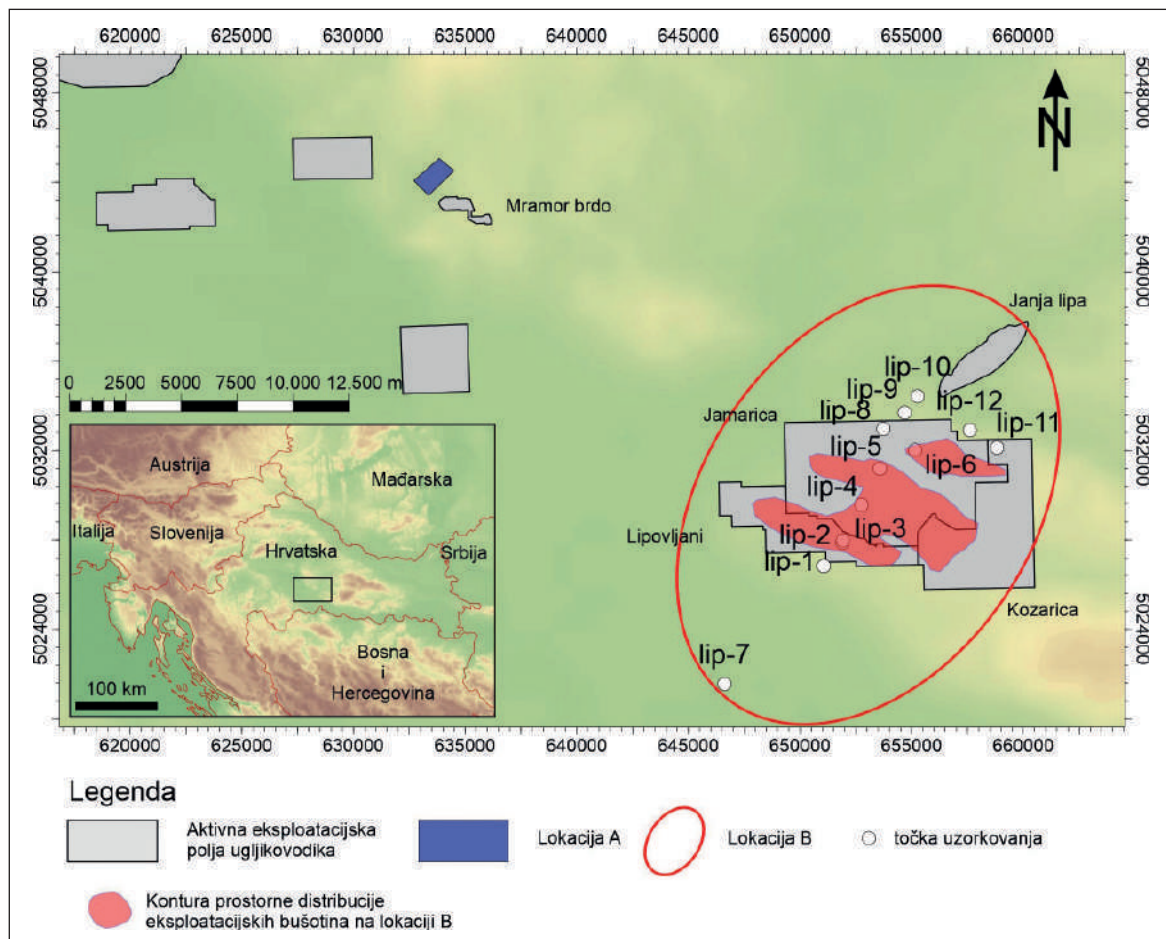
### 3. Analiza koncentracije plinova u zraku tla

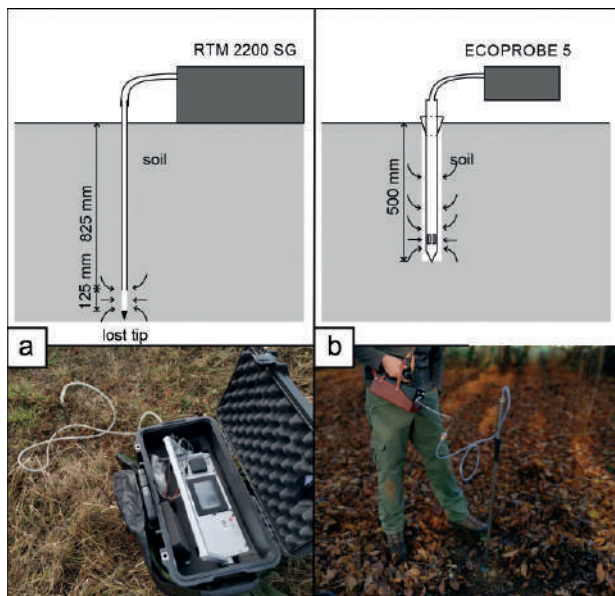
Analiza plinova u zraku tla provodi se za vrlo različite namjene. Od onih koji se izvode za utvrđivanje antropogenih onečišćenja tla (Hendel, 2017), prostorno planiranje s obzirom na rizik od radona (Cinelli et

al., 2015, 2019; Tokonami, 2020) do onih koja se koriste za istraživanje usmjereno na pronalazak rudnih ležišta i ležišta ugljikovodika (Füst & Geiger, 2010; Partington, 1957). U početnoj fazi projekta inicijalna istraživanja provodila su se na pokusnom poligonu u blizini izdanaka ugljikovodika na južnim obroncima Moslavačke gore te u okolici Lipovljana (Slika 5.). Mjerenja koja su bila provođena su snimanje koncentracija aktivnosti radona i torona u zraku tla, koncentracije  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , ukupnih organskih volatilnih komponenata (engl. *Photo ionization detector*, kr. PID) te viših naftnih homologa u zraku tla (engl. *Total Petroleum*, kr. TP). Popratno se je još snimala i spektralna radioaktivnost površine kako bi se mogao utvrditi lokalni utjecaj geološke podloge na koncentraciju radona u zraku tla.

Mjerenje aktivnosti radona i torona izvođeno je na dubini od 85 cm u tlu uređajem Sarad RTM 2200 SG instrumentom (Slika 6a.), a koncentracije  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , PID i TP s ECOPROBE 5 uređajem na otprilike 50 cm dubine (Slika 6b.).

Slika 5. Lokacije provedenih istraživanja koncentracija plinova u zraku tla u prvoj fazi projekta (Cvetković et al., 2021)





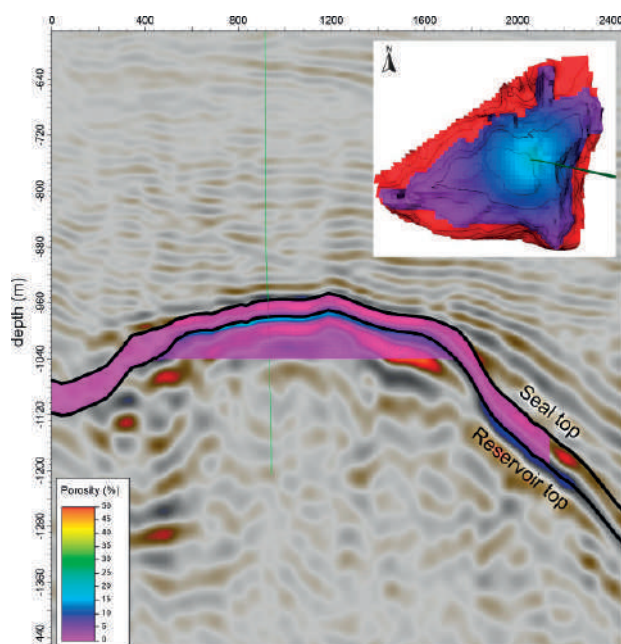
Slika 6. a) Prikaz mjerenja s RTM 2200 SG i b) ECOPROBE 5 uređajem (modificirano iz Cvetković et al., 2021)

#### 4. Utvrđivanje povoljnih lokacija za Uskladištenje ugljikovog dioksida

Istraživanje mogućnosti za uskladištenje CO<sub>2</sub> u području istraživanja važno je iz više razloga. Energetski sektor još uvijek uvelike ovisi o energiji iz fosilnih goriva. Prema Energetskoj strategiji EU (*Energy Roadmap 2050*; EC COM 885/2) jedan od ciljeva EU je smanjenje stakleničkih plinova za 80 – 95 % u odnosu na 1990. do 2050., uz očuvanje energetske sigurnosti. U strategiji se kaptiranje i geološko skladištenje CO<sub>2</sub> navodi kao jedna od mjera, a posebno se naglašava važnost ove tehnologije za smanjenje emisija CO<sub>2</sub> iz teške industrije. Naime, kemijska i petrokemijska industrija te industrije čelika, cementa i papira energetski su vrlo zahtjevne te obuhvaćaju proizvodne procese kojima se oslobađa CO<sub>2</sub>, što rezultira vrlo velikim emisijama ovog stakleničkog plina. Na području istraživanja projekta, južno od Našica, nalazi se tvornica cementa NEXE grupe čije su ukupne emisije CO<sub>2</sub> 2022. godine zabilježene u Registru onečišćavanja okoliša iznosile čak 715.592,63 t i na trećem su mjestu najviših emisija CO<sub>2</sub> iz stacionarnog izvora u 2022. godini. Osim toga, blizu područja istraživanja prisutni su i drugi veliki stacionarni izvori CO<sub>2</sub>, prvenstveno tu je Centralna plinska stanica (CPS) Molve u neposrednoj blizini grada Koprivnice u kojoj procesna postrojenja izdvajaju CO<sub>2</sub> iz prirodnog plina velikih ležišta na poljima u Dravskoj depresiji. Ukupne emisije CO<sub>2</sub> iz CPS Molve su prema Registru onečišćavanja

okoliša 2022. godine iznosile 319.044,75 t. Emisije su značajno smanjene projektom povećanja iscrpka iz naftnih polja Ivanić i Žutica u Savskoj depresiji utiskivanjem CO<sub>2</sub>, jer se u spomenutom projektu koristi upravo CO<sub>2</sub> izdvojen iz prirodnog plina na CPS Molve. Manje, ali također značajne emisije potječu iz termoelektrane Osijek koje su 2022. godine iznosile 76.042,41 t, a značajan izvor CO<sub>2</sub> predstavlja i tvornica papira DS Smith Belišće Croatia iz koje je tijekom 2022. godine ispušteno ukupno 95.742,6 t CO<sub>2</sub>. Iz svega navedenoga, vidljivo je da na istraživanom području postoje stacionarni izvori CO<sub>2</sub> koji su potencijalni kandidati za primjenu tehnologije kaptiranja i geološkog skladištenja CO<sub>2</sub>, te je stoga važno detaljnije istražiti potencijal Dravske depresije za skladištenje CO<sub>2</sub>. Prvi koraci u tom smjeru već su načinjeni u okviru projekta EU Geo Capacity, okontureni su regionalni duboki slani vodonosnici Drava i Osijek kao područja unutar kojih se na povoljnoj dubini nalaze stijene povoljnih petrofizikalnih svojstava pokrivene slabopropusnim pokrovnim stijenama (EU GeoCapacity, 2009; Martínez et al., 2009; Vulin et al., 2023). Ta područja trebala bi se dalje istražiti kako bi se bolje procijenila svojstva ležišnih i pokrovnih stijena koja su važna za geološko skladištenje CO<sub>2</sub>, kao i strukturna građa važna za utvrđivanje mogućih migracijskih putova.

S obzirom na predviđena daljnja istraživanja na ugljikovodike na području istočnog dijela Dravske depresije, realno je očekivati nastavak proizvodnje iz konvencionalnih ležišta. Tu je važno napomenuti da



Slika 7. Prikaz jedne od izdvojenih struktura na istočnom dijelu Dravske depresije (Kolenković Močilac et al., 2024)

je u ležištima svih velikih polja do sada otkrivenih u Dravskoj depresiji sadržaj CO<sub>2</sub> u prirodnom plinu povišen. U plinu proizvedenom iz ležišta polja Molve se 1989. godine sadržaj CO<sub>2</sub> kretao od 19,5 % do čak 23,4 % (Barić, 1996; Barić et al., 1998).

Na području hrvatskog dijela Panonskog bazena duga povijest istraživanja ležišta ugljikovodika rezultirala je izgradnjom infrastrukture koju je moguće prenamijeniti za spajanje na izvore i potencijalna podzemna skladišta CO<sub>2</sub>. Dugogodišnje istraživanje omogućilo je i opsežan set bušotinskih i seizmičkih podataka, s preko 800 istražnih i više od 4000 proizvodnih bušotina te preko 30000 km seizmičkih profila i 3D seizmičkih volumena koji pokrivaju većinu područja perspektivnih za utiskivanje CO<sub>2</sub>. Takvi potencijalni objekti za utiskivanje CO<sub>2</sub> osim iscrpljenih naftnih i plinskih ležišta uključuju i naftna ležišta koja su pogodna za metode povećanja iscrpka (engl. *Enhanced Oil Recovery*, kr. EOR) te slane vodonosnike.

Do kraja projekta planira se izdvojiti minimalno dva potencijalna objekta za skladištenje CO<sub>2</sub>, uzimajući u obzir set bušotinskih podataka koji je ustupljen za korištenje. Prvenstveno se mora utvrditi postojanje izolatorskih stijena iznad odabranog objekta i utvrditi geometrija zamke, a zatim se procjenjuju petrofizikalne značajke kolektorskih stijena. Prikaz jedne od izdvojenih struktura se može vidjeti na Slici 7.

## 5. Procjena potencijala za iskorištavanje geotermalne energije

Karte geotermalnog gradijenta imaju višestruku primjenu u području istraživanja i iskorištavanja energetskog potencijala podzemlja. Kada se koristi za inicijalnu procjenu geotermalnog potencijala, karte geotermalnih gradijenata pružaju inicijalni uvid u potencijalnu distribuciju temperature u podzemlju koja je načelno regionalnog karaktera (Jelić et al., 1995), a koristi se za procjenu povoljnih područja za iskorištavanje geotermalne energije. U prirodnom okruženju, raspodjela temperature u podzemlju ipak nije linearna te je aproksimaciju distribucije temperature u podzemlju moguće napraviti na temelju velikog broja podataka i njihove statističke obrade kao što je prikazano u (Macenić et al., 2020). Međutim, ni aproksimacija iz takvih modela, iako pouzdanija u odnosu na generalnu aproksimaciju geotermalnog gradijenta, nije najpouzdaniji pristup jer ne uzima u obzir litološki sastav uz toplinsku vodljivost ka-

rakterističnih stijena koje sačinjavaju podzemlje ili moguće zone dismigracije fluida iz dubljih zona putem diskontinuiteta (većinom rasjednih zona) u pliće intervale kao što je opisano u (Siler et al., 2019). Također, raspored temperatura u podzemlju velikim dijelom utječe na raspone dubina naftnog i plinskog prozora (Tissot & Welte, 1984) koji je iznimno važan prilikom utvrđivanja ugljikovodičnog potencijala područja istraživanja.

Kako bi se procijenio geotermalni potencijal jedan od ciljeva projekta bio je konstruirati kartu geotermalnog gradijenta na području istočnog dijela Dravske depresije. Za potrebe projekta dobiveni su podatci iz 77 bušotina na području istraživanja od strane Hrvatske agencije za ugljikovodike. Prihvatljivi podatci koji se mogu koristiti za utvrđivanje geotermalnog gradijenta u podzemlju mogu se preuzeti iz DST (Drill Stem test) mjerenja kojom se može utvrditi realna temperatura fluida u sloju te na temelju ope- tovanih mjerenja temperature sa zabilježenim vremenom od završetka cirkulacije isplake i primijenjenom Hornerovom korekcijom (Peters & Nelson, 2012). Geotermalni gradijent računa se prema formuli:

$$Gg = ((Temp - T_{\text{annual}}) \div d) \times 100$$

Gdje je:

Gg – geotermalni gradijent

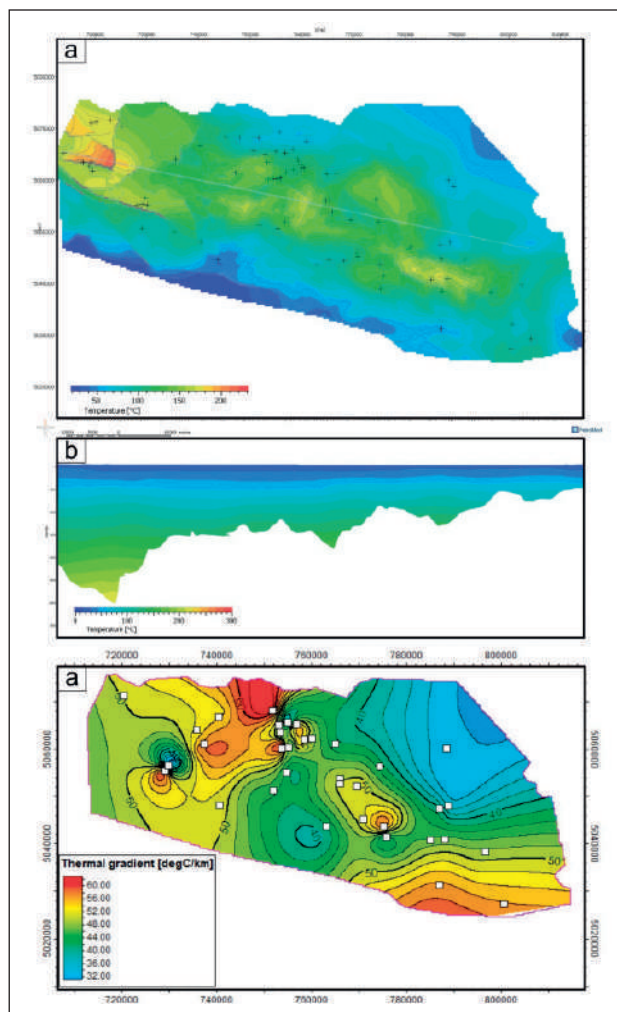
Temp – temperatura izmjerena u bušotini

Tannual – srednja godišnja temperatura na području opažanja

d – srednja dubina intervala opažanja

Povišene vrijednosti geotermalnog gradijenta (iz konstruirane detaljne karte geotermalnih gradijenata istraživanoga područja te modeliranja distribucije temperature u podzemlju, Slika 8.) ukazuju da se na dubini većoj od 1500 m vrijednosti temperature nalaze u srednjem temperaturnom području (>80 °C), odnosno temperatura odgovara resursima niske do srednje entalpije (prema Muffler & Cataldi, 1978), koje je općenito povoljno za korištenje geotermalne energije za dobivanje električne energije u elektranima s binarnim ciklusom (Hernández Ochoa et al., 2021). Sljedeći korak je identifikacija potencijalnih geotermalnih ležišta, pri čemu su utvrđena četiri tipa potencijalnih ležišta:

- Ležišta unutar pješčenjaka s primarnom poroznošću
- Ležišta unutar karbonatnih breča i brečokonglomerata s dualnom poroznošću



Slika 8. Prikaz distribucije temperature po plohi podloge Neogena (a); profila s modeliranim temperaturama (b) (trasa profila označena je na karti a); te karte geotermalnog gradijenta (c) na istočnom dijelu Dravske depresije

- Ležišta unutar kataklaziranih efuziva karakteriziranih sekundarnom poroznošću
- Ležišta unutar breča i konglomerata heterogenog sastava karakteriziranih dualnom poroznošću
- Ležišta unutar stijena podloge karakteriziranih sekundarnom poroznošću

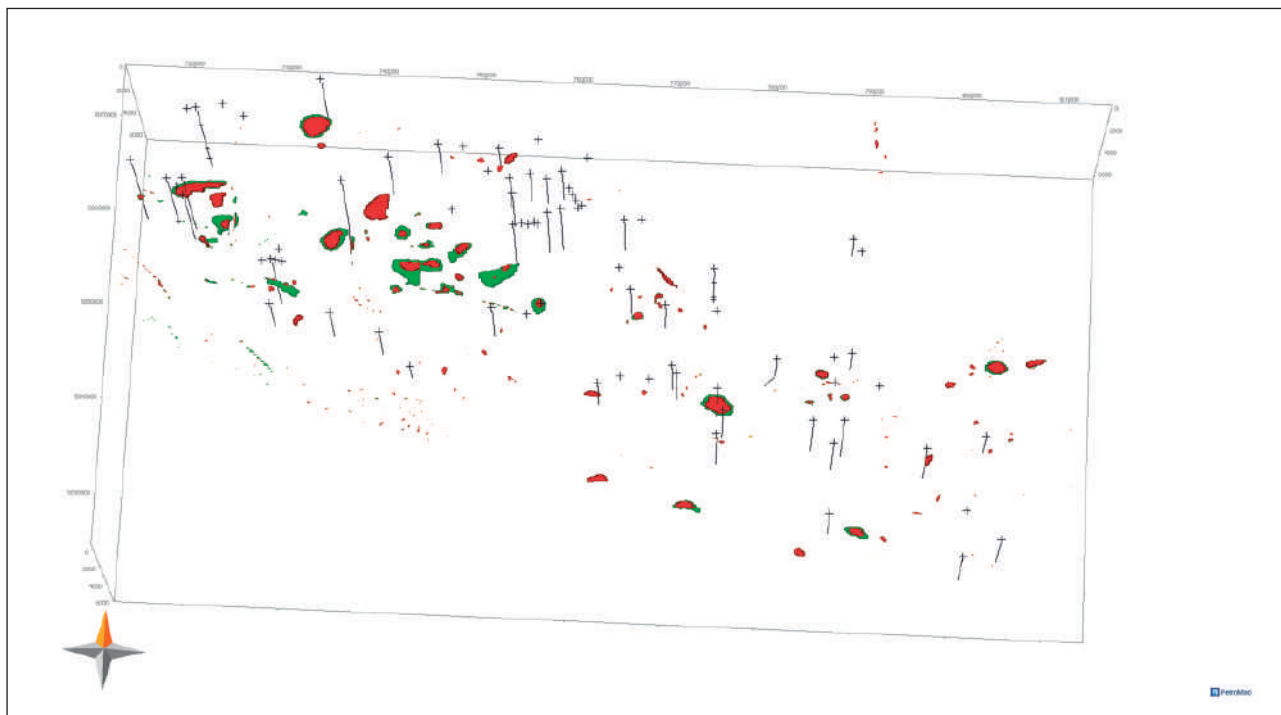
Za utvrđene tipove ležišta definiraju se petrofizikalna svojstva (poroznost i propusnost) iz bušotinskih podataka, pri čemu su poroznosti procijenjene interpretacijom geofizičkih mjerenja u bušotinama korištenjem softvera *Interactive Petrophysics*, dok su za propusnosti korišteni rezultati laboratorijskih ispitivanja uzoraka jezgri, kao i rezultati DST (Drill Stem Test) ispitivanja u bušotinama. Objedinjeni rezultati koristit će se za karakterizaciju ležišnih intervala u geološkom modelu.

## 6. Izrada regionalnog geološkog modela postupkom bazenskog modeliranja

Bazensko modeliranje odnosi se na postupak modeliranja procesa kao što su generiranje, ekspulzija, migracija, akumulacija i očuvanje ugljikovodika jednog ili više sustava ugljikovodika. Osnovu modela čine dostupni ulazni podaci kao što su lokacije bušotina, definiranje horizonata koji opisuju geološku građu podzemlja s približnom stratigrafskom i litološkom karakterizacijom. Kalibracija bazenskog modela sastoji se od podešavanja parametara dubine vodenog stupca u pojedinim geološkim razdobljima i geografskim lokacijama, podešavanja recentnog i paleotoplinskog toka, korekcije SWIT (Sediment-Water Interference Temperature) vrijednosti te unosa eventualnih erozijskih događaja.

Dubina vodenog stupca (engl. Paleo Water Depth, PWD) inicijalno je preuzeta iz rada Pavelić & Kovačić (2018). Prvi korak detaljnije kalibracije bio je korištenje interpretacije dubine šelfa iz rada Špelić et al., (2023).

Od geokemijskih analiza ističu se vitrinitna refleksija koja služi određivanju zrelosti matičnih stijena, kao i rezultati Rock Eval pirolize (prvenstveno vodikov indeks) te analize sadržaja ugljika organskog podrijetla koje daju podatke o kvaliteti i kvantiteti organske tvari. Vitrinitna refleksija daje uvid u paleotoplinski tok na području bazena. A o recentnom toplinskom toku može se zaključivati iz bušotina koje sadrže podatke o statičkoj vrijednosti temperature (obično iz drill stem testa, DST). Toplinski tok ovisi o konvekcijskom strujanju topline kroz podzemlje te je izrazito ovisan o debljini Zemljine kore. Na području hrvatskog dijela Pannonskog super bazena toplinski tok je povišen zbog stanjivanja kore za vrijeme mlađeg miocena (Lučić et al., 2001) te su inicijalne vrijednosti toplinskog toka za kreiranje karte distribucije preuzete iz prethodno publiciranih radova (Cvetković et al., 2018, 2019; Lenkey et al., 2002) Naknadno, za svaku bušotinu je prilagođavan toplinski tok, ukoliko su imale mjerene vrijednosti temperatura (obično iz drill stem testa, DST) i/ili mjerenja vitrinitne refleksije. S obzirom na to da su podaci o vitrinitnoj refleksiji ograničeni, detaljnije je kalibriran recentni toplinski tok nego paleotoplinski. Vrijeme ekspulzije i zrelost matičnih stijena nakon kalibracije odgovara onom utvrđenom prethodnim radovima (Baric et al., 1998)



Slika 9. Prikaz potencijalnih akumulacija ugljikovodika na području istočnog dijela Dravske depresije

## 7. Zaključak

Očekivani rezultat projekta je geološki model spreman za procjene tri ključna aspekta energetskog potencijala podzemlja na području istočnog dijela Dravske depresije. Prvi dio odnosi se na procjenu preostalog naftnogeološkog potencijala prilikom čega bi se trebala kvantificirati količina ugljikovodika koju su mogle generirati matične stijene i količina koja se mogla nakupiti u akumulacijama konvencionalnog tipa te usporediti dobivene rezultate s utvrđenim rezervama ugljikovodika na istraživanom području. Drugi dio odnosi se na pouzdaniju procjenu potencijala za uskladištenje CO<sub>2</sub>,

zasnovanu na usporednoj analizi probušenih zamki u istraživanome području, kao i daljnjoj karakterizaciji regionalnih dubokih slanah vodonosnika. Treći dio odnosi se na regionalnu procjenu geotermalnog potencijala, gdje se planiraju izdvojiti perspektivnija područja.

## 8. Zahvala

Ovaj rad je djelomično financiran od strane Hrvatske zaklade za znanost, projekt GEODEP (UIP 2019-04-3846) te prezentirani rad ne bi bilo moguće izvesti bez podataka ustupljenih od Agencije za ugljikovodike te programa tvrtke Schlumberger.



## Reference

1. Abdel Hafeez, T., Abdelwahhab, M., & Elmahdy, M. (2019). Geothermal application of spectral gamma ray logging in the South Kansas Subsurface, USA. *Applied Radiation and Isotopes*, 154, 108904. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108904>
2. Adabanija, M. A., Anie, O. N., & Oladunjoye, M. A. (2020). Radioactivity and gamma ray spectrometry of basement rocks in Okene area, southwestern Nigeria. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 9(1), 71–84. <https://doi.org/10.1080/20909977.2020.1711695>
3. Barić, G. (1996). Organic Geochemistry in the Rationalization of Oil and Gas Exploration and Production. *Geologia Croatica*, 49(2), 191–195.
4. Barić, G., Mesić, I., & Jungwirth, M. (1998). Petroleum geochemistry of the deep part of the Drava Depression, Croatia. *Organic Geochemistry*, 29(1–3), 571–582. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(98\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(98)00096-5)
5. Baric, G., Mesic, I., & Jungwirth, M. (1998). Petroleum geochemistry of the deep part of the Drava Depression, Croatia. *Organic Geochemistry*, 29(1–3), 571–582. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(98\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(98)00096-5)
6. Cinelli, G., Tollefsen, T., Bossew, P., Gruber, V., Bogucarskis, K., De Felice, L., & De Cort, M. (2019). Digital version of the European Atlas of natural radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 196, 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.008>
7. Cinelli, G., Tositti, L., Capaccioni, B., Brattich, E., & Mostacci, D. (2015). Soil gas radon assessment and development of a radon risk map in Bolsena, Central Italy. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(2), 305–319. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9649-9>
8. Cvetković, M., Emanović, I., Stopar, A., & Slavinić, P. (2018). Petroleum system modeling and assessment of the remaining hydrocarbon potential in the eastern part of Drava Depression. *Interpretation*, 6(1). <https://doi.org/10.1190/INT-2017-0078.1>
9. Cvetković, M., Kapuralić, J., Pejić, M., Kolenković Močilac, I., Rukavina, D., Smirčić, D., Kamenski, A., Matoš, B., & Špelić, M. (2021). Soil Gas Measurements of Radon, CO<sub>2</sub> and Hydrocarbon Concentrations as Indicators of Subsurface Hydrocarbon Accumulation and Hydrocarbon Seepage. *Sustainability*, 13(7), 3840. <https://doi.org/10.3390/su13073840>
10. Cvetković, M., Matoš, B., Rukavina, D., Kolenković Močilac, I., Saftić, B., Baketarić, T., Baketarić, M., Vuić, I., Stopar, A., Jarić, A., & Paškov, T. (2019). Geoenergy potential of the Croatian part of Pannonian Basin: insights from the reconstruction of the pre-Neogene basement unconformity. *Journal of Maps*, 15(2). <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1645052>
11. EU GeoCapacity. (2009). *Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide, Technical reports, FP-518318: EU GeoCapacity. Storage Capacities. WP2.3 D17.*
12. Füst, A., & Geiger, J. (2010). Monitoring planning and evaluation using geostatistics, I. Geostatistical support for verification sampling based on professional opinion. *Földtani Közlöny*, 140, 303–312.
13. Hendel, J. (2017). Occurrence of microbial and thermogenic gases in post-mining areas. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 17(11), 393–398. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/11/S01.050>
14. Hernández Ochoa, A. F., Aragón Aguilar, A., & Franco Nava, J. M. (2021). An up-to-date perspective of geothermal power technology. *Sustainable Fuel Technologies Handbook*, 201–238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00008-1>
15. Jelić, K., Kevrić, I., & Krasić, O. (1995). Temperatura i toplinski tok u tlu Hrvatske [Temperature and heat flow in the soil of Croatia]. In I. Vlahović, I. Velić, & M. Šparica (Eds.), *Proceedings of the First Croatian Geological Congress* (pp. 245–249).
16. Kolenković Močilac, I., Cvetković, M., Pejić, M., & Saftić, B. (2024). Selection of a prospect for CO<sub>2</sub> storage – possibilities and pitfalls in the case of screening in the Eastern part of Drava Basin, Croatia. *17<sup>th</sup> CO<sub>2</sub>GeoNet Open Forum*, 1–1.
17. Lenkey, L., Dövényi, P., Horváth, F., & Cloetingh, S. A. P. L. (2002). Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics. In *EGU Stephan Mueller Special Publication Series* (Vol. 3).
18. Lučić, D., Saftić, B., Krizmanić, K., Prelogović, E., Britvić, V., Mesić, I., & Tadej, J. (2001). The Neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia. *Marine and Petroleum Geology*, 18(1), 133–147. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(00\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(00)00038-6)
19. Macenić, M., Kurevija, T., & Medved, I. (2020). Novel geothermal gradient map of the Croatian part of the Pannonian Basin System based on data interpretation from 154 deep exploration wells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110069. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110069>

20. Martínez, R., Suárez, I., Zapatero, M. A., Saftic, B., Kolenkovic, I., Car, M., Persoglia, S., & Donda, F. (2009). The EU GeoCapacity Project—Saline aquifers storage capacity in Group South countries. *Energy Procedia*, 1(1), 2733–2740. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.043>
21. Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7(2–4), 53–89. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(78\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(78)90002-0)
22. Partington, J. R. (1957). Discovery of Radon. *Nature*, 179(4566), 912–912. <https://doi.org/10.1038/179912a0>
23. 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, 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.01.026>
24. Peters, K. E., & Nelson, P. H. (2012). Criteria to Determine Borehole Formation Temperatures for Calibration of Basin and Petroleum System Models. In *Analyzing the Thermal History of Sedimentary Basins: Methods and Case Studies* (pp. 5–15). SEPM (Society for Sedimentary Geology). <https://doi.org/10.2110/sepmsp.103.005>
25. Sanjurjo-Sánchez, J., Barrientos Rodríguez, V., Arce Chamorro, C., & Alves, C. (2022). Estimating the Radioactive Heat Production of a Granitic Rock in the University of A Coruña (Galicia, Northwest Spain) by Gamma-ray Spectrometry. *Applied Sciences*, 12(23), 11965. <https://doi.org/10.3390/app122311965>
26. Siler, D. L., Faulds, J. E., Hinz, N. H., Dering, G. M., Edwards, J. H., & Mayhew, B. (2019). Three-dimensional geologic mapping to assess geothermal potential: examples from Nevada and Oregon. *Geothermal Energy*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0117-0>
27. Špelić, M., Kovács, Á., Saftić, B., & Sztanó, O. (2023). Competition of deltaic feeder systems reflected by slope progradation: a high-resolution example from the Late Miocene-Pliocene, Drava Basin, Croatia. *International Journal of Earth Sciences*, 112(3), 1023–1041. <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02290-w>
28. Tissot, B. P. (Bernard P.), & Welte, D. H. (Dietrich H.). (1984). *Petroleum formation and occurrence*. 699. [https://books.google.com/books/about/Petroleum\\_Formation\\_and\\_Occurrence.html?id=wMsZAQAIAAJ](https://books.google.com/books/about/Petroleum_Formation_and_Occurrence.html?id=wMsZAQAIAAJ)
29. Tokonami, S. (2020). Characteristics of Thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) and Its Progeny in the Indoor Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 8769. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238769>
30. Velić, J. (2007). *Geologija nafte [Petroleum Geology]*. University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering.