

Procjena geoenergetskog potencijala Varaždinske županije s aspekta geotermalnih voda, ugljikovodika i podzemnog skladištenja plina i trajnog zbrinjavanja ugljikovog dioksida u geološkim strukturama

Assessment of geoenergy potential of the Varaždin County considering geothermal water, hydrocarbons and underground gas storage and carbon capture and storage

dr. sc. Nikola Gizdavec
Znanstveni suradnik u Zavodu za
mineralne sirovine i marinsku geologiju, HGI
ngizdavec@hgi-cgs.hr

izv. prof. dr. sc. Darko Pavlović
Savjetnik predsjednika Uprave
Plinacro d.o.o., Zagreb
darko.pavlovic@plinacro.hr

dr. sc. Melita Srpak
Stručna savjetnica za okoliš, resurse i krajobraz
Zavod za prostorno uređenje Varaždinske županije
melita.srpak@gmail.com



Ključne riječi: geoenergetski potencijal; geotermalne vode; ugljikovodici; podzemno skladištenje plina; CCS; Varaždinska županija; Murski bazen

Keywords: geo-energy potential; geothermal waters; hydrocarbons; underground gas storage; CCS; Varaždin County; Mura Basin



Sažetak

Istraživanje i eksploatacija mineralnih sirovina kontinuirano se provodi na području cijele Varaždinske županije jer se na temelju njenih rezultata oblikuju ključne politike i investicijski planovi važni za budući ekonomski rast županije. Cilj ovog istraživanja je procijeniti geoenergetski potencijal Varaždinske županije s naglaskom na geotermalne vode, ugljikovodike te mogućnosti podzemnog skladištenja prirodnog plina i trajnog zbrinjavanja ugljikova dioksida (CCS). Svrha istraživanja je pružiti znanstvenu osnovu za održivo

korištenje ovih resursa, potaknuti daljnja istraživanja i investicije, te unaprijediti energetska sigurnost i smanjenje emisija stakleničkih plinova. Metode istraživanja uključuju integriranu analizu geoloških, geofizičkih, bušotinskih i hidrogeoloških podataka, interpretaciju seizmičkih snimanja za identifikaciju rasjeda i struktura pogodnih za akumulaciju ugljikovodika i geotermalnih voda, geokemijsku analizu matičnih stijena i fluida radi procjene potencijala generiranja i migracije ugljikovodika, strukturno-stratigrafske procjene ležišnih i pokrovnih stijena za CCS, te 3D geološko-geofizičko modeliranje dijelova Murskog bazena, Ormož-selničke antiklinale i zapadnih obronaka Kalnika. Rezultati pokazuju da Varaždinska županija posjeduje značajan geoenergetski potencijal. Dokazano je postojanje plinskih i naftnih akumulacija (Veliki Otok, Cvetkovec, Strmec Podravski, Legrad), pri čemu migracija ugljikovodika prati rasjedne sustave, a pješčenjaci, karbonati, breče

i dolomiti predstavljaju potencijalne ležišne stijene. Predkenozojski karbonatni kompleks s trijaskim dolomitima pokazuje visoke temperature i sekundarnu poroznost, što ga čini pogodnim za geotermalne sustave, kogeneraciju i industrijsku uporabu, s eksploatacijskim poljem Lunjkovec–Kutnjak kao prioritetnim lokalitetom. Trijaski karbonati s razvijenom sekundarnom poroznošću mogu imati povoljne karakteristike za trajno zbrinjavanje ugljikovog dioksida u slučaju kada su prekriveni s kenozojskim klastičnim nizovima i iscrpljeno naftno polje Cvetkovec identificirani su kao tehnički i geološki prihvatljivi spremnici za trajno zbrinjavanje CO₂, uz potrebu dodatnih 3D seizmičkih istraživanja i procjene integriteta pokrovnih stijena. Zaključno, Varaždinska županija ima raznolik geoenergetski potencijal koji može značajno pridonijeti energetske tranziciji, pružajući temelje za razvoj geotermalne energije, eksploataciju ugljikovodika i implementaciju CCS tehnologija.



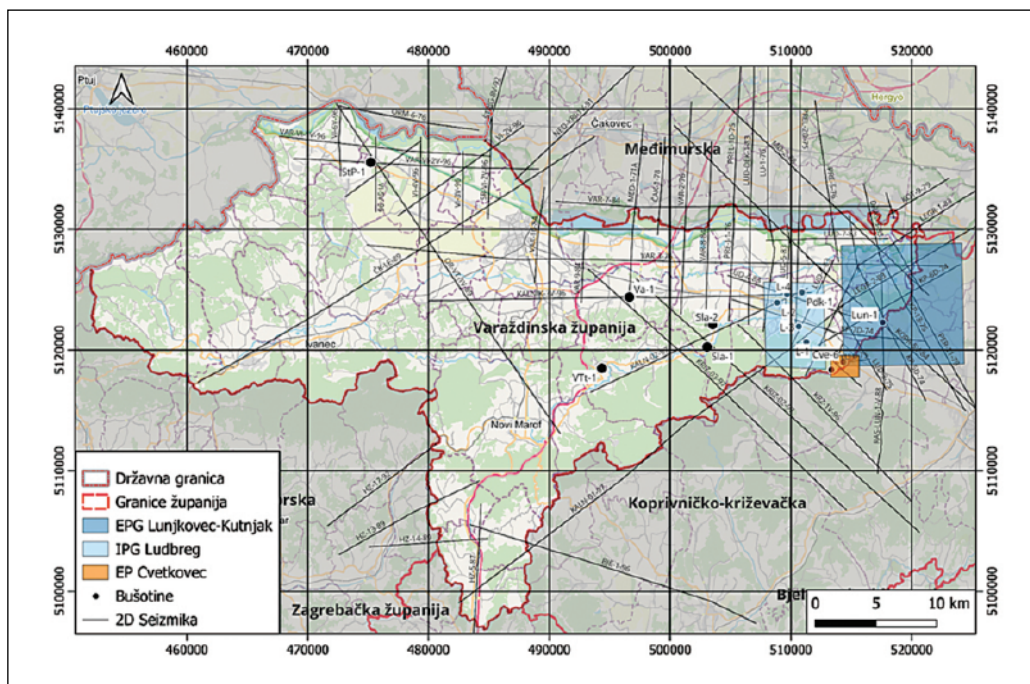
Abstract

Exploration and exploitation of mineral resources have been continuously conducted across Varaždin County, as their results form the basis for shaping key development policies and investment plans essential for the future economic growth of the region. The aim of this study is to assess the geo-energy potential of Varaždin County, with particular emphasis on geothermal waters, hydrocarbons, and the possibilities of underground natural gas storage and permanent carbon dioxide sequestration (CCS). The purpose of the research is to provide a scientific basis for the sustainable use of these resources, to stimulate further research and investment, and to enhance energy security and reduce greenhouse gas emissions. The applied methods include an integrated analysis of geological, geophysical, borehole and hydrogeological data, interpretation of seismic surveys to identify faults and structures favourable for hydrocarbon and geothermal accumulation, geochemical analysis of source rocks and fluids to assess hydrocarbon generation and migration potential, structural–stratigraphic evaluation of reservoir and cap rocks for CCS, and 3D geological–geophysical modelling of parts of the Mura Basin, the Ormož–Selnica Anticline and the western slopes of Mt. Kalnik. The results indicate that Varaždin County possesses significant geo-energy potential. The presence of gas and oil accumulations (Veliki Otok, Cvetkovec, Strmec Podravski, Legrad) has been confirmed, with hydrocarbon migration controlled by

fault systems and sandstones, carbonates, breccias and dolomites acting as potential reservoir rocks. The pre-Cenozoic carbonate complex with Triassic dolomites exhibits elevated temperatures and well-developed secondary porosity, making it suitable for geothermal systems, cogeneration and industrial use, with the Lunjkovec–Kutnjak exploitation field identified as a priority site. Triassic carbonates overlain by Cenozoic clastic sequences and the depleted Cvetkovec oil field have been identified as technically and geologically suitable reservoirs for permanent CO₂ storage, subject to additional 3D seismic investigations and cap-rock integrity assessment. In conclusion, Varaždin County has a diverse geo-energy potential that can significantly contribute to the energy transition by supporting the development of geothermal energy, limited hydrocarbon exploitation and the implementation of CCS technologies.

1. Uvod

Istraživanje i eksploatacija svih vrsta mineralnih sirovina – bilo da je riječ o čvrstim mineralnim sirovinama, ugljikovodicima ili geotermalnim vodama za energetske svrhe – provode se u skladu sa zakonskim i podzakonskim propisima koji proizlaze iz temeljne ustavne odredbe, kojom je propisano da su „more, morska obala i otoci, vode, zračni prostori, rudno blago (i druga prirodna bogatstva ...), od interesa za Republiku Hrvatsku, imaju njezinu osobitu zaštitu (Srpak i dr. 2025, Pavlović i dr. 2018). Osnovni akt planiranja kojim se utvrđuje gospodarenje ugljikovodicima i geotermalnim vodama, podzemno skladištenje plina i trajno zbrinjavanje ugljikova dioksida i planiranje naftno-rudarske gospodarske djelatnosti na državnoj razini je Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske koju donosi Hrvatski sabor u skladu s propisima kojima se uređuje energija. Gospodarenje ugljikovodicima provodi se sukladno Okvirnom planu i programu istraživanja i eksploatacije ugljikovodika na kopnu i Jadranu, dok se geotermalni potencijal razvija prema Planu razvoja geotermalnog potencijala Republike Hrvatske. Jedinice lokalne i regionalne samouprave dužne su u svojim razvojno-planerskim aktima osigurati implementaciju ovih strateških ciljeva (Srpak i Pavlović, 2020). Posebnu pažnju u zakonodavnom okviru ima trajno geološko zbrinjavanje ugljikova dioksida (CCS). Direktiva 2009/31/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o geološkom skladištenju ugljikova dioksida uspostavlja pravni okvir za trajnu i ekološki sigurnu pohranu CO₂ u podzemnim geološkim formacijama, s



Slika 1. Geofizički podaci, duboke bušotine, istražni prostori i eksploatacijska polja energetske mineralne sirovine (Izvor: Soba s podacima AZU-a; Data Room).

ciljem smanjenja emisija stakleničkih plinova u atmosferu. Republika Hrvatska ovu je direktivu prenijela u nacionalno zakonodavstvo Pravilnikom o trajnom zbrinjavanju ugljikova dioksida u geološkim strukturama (NN 95/18, 87/22). Ovaj okvir propisuje uvjete karakterizacije, odabira i nadzora skladišnih lokacija, izdavanja dozvola te prijenosa odgovornosti na državu nakon zatvaranja skladišta, čime se doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova i održivom razvoju energetskega sektora (Pavlović i Banovac, 2020). S obzirom na strateški značaj mineralnih sirovina i geoneergetskih resursa za energetske sigurnost Hrvatske, znanstveno istraživanje Varaždinske županije ima za cilj procjenu dostupnog geoneergetskog potencijala i identificiranje potencijalnih lokacija za eksploataciju i trajno skladištenje, uz očuvanje okoliša i poštivanje nacionalnog i europskog zakonodavstva.

2. Razvoj istraživanja energetske mineralne sirovine-ugljikovodika na području Varaždinske županije

Energetske mineralne sirovine na području Varaždinske županije istraživane su od prve polovine 20. stoljeća, iako njihovo korištenje seže znatno dalje, u Rimsko doba, kada se geotermalna voda koristila za grijanje prostorija u Varaždinskim Toplicama (Miko i dr. 2007). Istraživanje ugljikovodika započelo je početkom 20. stoljeća, što je omogućilo prikupljanje podataka o geološkim strukturama pogodnim za akumulaciju nafte

i plina te osnivanje prvih istražnih bušotina. Potencijal područja temelji se na prisutnosti kvalitetnih matičnih stijena bogatih organskom tvari, povoljnih uvjeta za generaciju i migraciju ugljikovodika te razvijenih migracijskih puteva koji omogućuju premještanje ugljikovodika u propusne ležišne stijene (Loke & Barker, 1995., 1996). U kombinaciji sa strukturnim i stratigrafskim zamkama te dobro razvijenim pokrovnim naslagama koje sprječavaju daljnji odlazak fluida, formiraju se povoljni uvjeti za akumulaciju i očuvanje ugljikovodika. Na području Varaždinske županije izvedeno je ukupno 13 bušotina, od kojih je 11 probušeno radi pronalaska nafte i plina, dok su dvije namijenjene istraživanju geotermalne vode (Slika 1).

Osnovni podaci o bušotinama koje se ne nalaze unutar istražnih prostora ili eksploatacijskih polja prikazani su u Tablici 1.

U dolini rijeke Bednje zabilježeno je više povijesnih izdanaka nafte, kao i naznaka prisutnosti plina na površini. Tijekom kasnijih istražnih kampanja u bušotinama su zabilježene pojave ugljikovodika u obliku tragova nafte i plina, ispitanih ugljikovodika ili plinova, dok su nafte otkrivene u slojevima pjesčenjaka u istražnim bušotinama. Posljednja istražna bušotina na ovom području, Strmec Podravski-1, izvedena je 2001. godine¹ (Tablica 1).

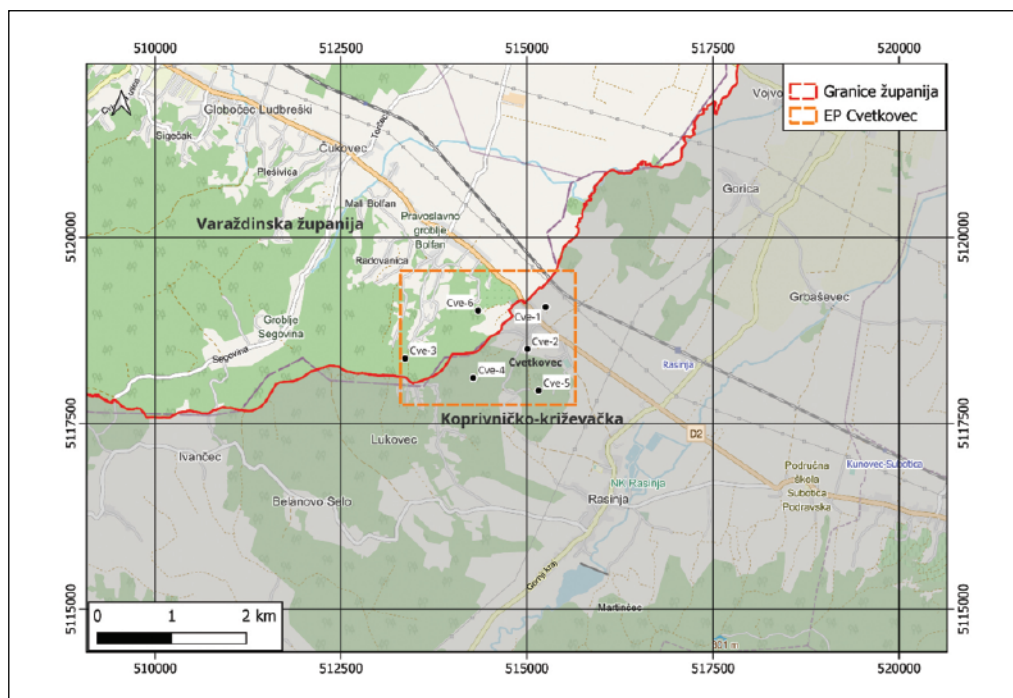
¹ Bušotina je otkrila plin s visokim udjelom dušika i testirana je u četiri intervala zasićenja, pri čemu je u svim intervalima izmjerena ista količina plina, 15 000 m³. Zbog problema s cementacijom, samo je jedan interval doveden u probnu proizvodnju, dok je bušotina kasnije napuštena.

Tablica 1. Osnovni podaci dubokih istražnih bušotina (Izvor: Soba s podacima AZU-a; Data Room).

Red. br.	Naziv bušotine	Geografske koordinate (HTRS96/TM)		Godina bušenja	Dubina bušenja (m)	Eksploatacijsko polje/Istražni prostor	Naziv jedinice lokalne samouprave
		E	N				
1	Cvetkovec-3 (Cve-3)	513358, 71	5118373, 68	1977.	2909	ugljkovodici / EP Cvetkovec	LUDBREG
2	Cvetkovec-6 (Cve-6)	514344, 49	5119015, 67	1980.	1603	ugljkovodici / EP Cvetkovec	LUDBREG
3	Ludbreg-1 (L-1)	511273, 21	5120663, 67	1941.	1336	IPG Ludbreg	LUDBREG
4	Ludbreg-2 (L-2)	508862, 68	5123928, 49	1942.	1552	IPG Ludbreg	LUDBREG
5	Ludbreg-3 (L-3)	510657, 60	5121949, 30	1960.	1531,5	IPG Ludbreg	LUDBREG
6	Ludbreg-4 (L-4)	509688, 42	5124613, 97	1985.	2921	IPG Ludbreg	LUDBREG
7	Lunjkovec-1 (Lun-1)	517595, 79	5122299, 52	1976.	2203	EPG Lunjkovec-Kutnjak	MALI BUKOVEC
8	Podravka-1 (PdK-1)	510906, 51	5124779, 32	1982.	2547	IPG Ludbreg	LUDBREG
9	Slanje-1 (Sla-1)	503055, 97	5120264, 03	1962.	631,5		MARTIJANEC
10	Slanje-2 (Sla-2)	503521, 26	5122111, 07	1962.	951		MARTIJANEC
11	Strmec Podravski-1 (StP-1)	475215, 90	5135557, 40	2001.	1955		PETRIJANEC
12	Varaždin-1 (Va-1)	496640, 93	5124389, 43	1963.	2697		JALŽABET
13	Varaždinske Toplice-1 (VTt-1)	494342, 75	5118503, 90	1988.	605		VARAŽDINSKE TOPLICE

Tablica 2. Pojave ugljikovodika u dubokim istražnim bušotinama (Izvor: Soba s podacima AZU-a; Data Room)

Bušotina	Konačna dubina bušotina (m)	Pojave nafte i plina	Litologija
Strmec Podravski-1	1955	Plin dobiven testnom proizvodnjom, 15000 m ³ , visok udio N ₂ nestabilan kanal bušotine	sarmat, baden, karpat, stariji miocen, breča, trijaski dolomiti.
Varaždin-1	2702	Elektrokarotaž analize s pozitivnim indikacijama ugljikovodika, bez detekcije tijekom bušenja	Dobro razvijena serija pješčenjaka, pliocen, pont, panon, srednji miocen, lapor, pjeskoviti vapnenci.
Slanje-2	951	Totalni gubici u litotamnijskim vapnencima, slana voda kao indikator ležišta ugljikovodika s neznatnim tragovima plina	Pont, pjeskoviti lapor, silt, pješčenjak, propusnost od 2 – 192 mD, tortonski litotamnijski vapnenci s pješčenjacima, pješčenjaci, propusnost 5 – 700 mD, poroznost 13,5 – 30,1.



Slika 2. Lokacija eksploatacijskog polja ugljikovodika EPU Cvetkovec, s naznačenim točkama bušotina.

Ugljikovodici su na području Varaždinske županije utvrđeni na eksploatacijskom polju EP Cvetkovec. Površina eksploatacijskog polja iznosi 423 ha (Slika 2). Prva istražna bušotina, Cvetkovec-1, izvedena je 1975. godine, čime je na strukturi Cvetkovec otkriveno naftno polje u sedimentnim stijenama panonske starosti². Tijekom istražne faze izvedeno je ukupno šest dubokih bušotina (CVE-1 do CVE-6). Bušotine CVE-2 i CVE-6 su napuštene i sanirane, što znači da više ne predstavljaju opasnost za ljude, imovinu, prirodu i okoliš. Na površini nisu prisutni rudarski objekti, a kanali bušotina nalaze se 1,5–2,0 m ispod zemlje. Na polju se predviđa proizvodnja bušotine Cve-1 koja je smještena na području Koprivničko-križevačke županije³.

Godine 2014. godine, aktivirani su istražni prostori ugljikovodika na prostoru Varaždinske županije: Drava-2 (DR-2), Sjeverozapadna Hrvatska – 1 (SZH-1) i prijedlog Sjeverozapadna Hrvatska – 5 (SZH-5). Iste godine je raspisano javno nadmetanje za istraživanje i eksploataciju ugljikovodika na kopnu u Panonskom bazenu, temeljeno na geološkim i geofizičkim analizama koje ukazuju na ugljikovodični potencijal, pokrivajući šest područja u istočnoj i sre-

dišnjoj Hrvatskoj uz Dravu, istočnu Slavoniju i Savu. U srpnju 2014. godine raspisano je javno nadmetanje za istraživanje i eksploataciju ugljikovodika na kopnu, u dijelu kontinentalnog područja Panonskog bazena, koji obuhvaća istočnu i središnju Hrvatsku, uključujući Varaždinsku županiju. Temeljem nadmetanja, 2016. godine potpisan je ugovor na istražnom prostoru Drava – 02 (DR-2) ukupne površine 2.481 km² koji je obuhvatio i istočni dio područja Varaždinske županije. Na temelju raspisanog natječaja 2016. godine potpisan je ugovor na istražnom prostoru DR-2, ukupne površine 2.481 km², od čega je dio pokrивao istočni dio županije. Dozvolu za istraživanje dobila je kompanija INA d.d., koja je tijekom 2024. godine napustila dio istražnog prostora koji obuhvaća Varaždinsku županiju. Krajem 2018. godine raspisano je novo nadmetanje za sedam istražnih polja za područje središnje i sjeverozapadne Hrvatske od kojih se istražni prostori Sjeverozapadna Hrvatska 1 (SZH-1) i Sjeverozapadna Hrvatska-5 (SZH-5) nalaze na području Varaždinske županije. Godine 2020. potpisan je ugovor s INA-Industrija nafte d.d. za istraživanje na istražnom prostoru SZH-1, koji obuhvaća centralni i sjeverni dio županije. Prema podacima Agencije za ugljikovodike (AZU), tijekom istraživanja na prostoru SZH-1 nisu identificirane komercijalne akumulacije ugljikovodika. Na temelju Zakona o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika, Vlada Republike Hrvatske donijela je 2024. godine, Odluku o ukidanju dozvole za istraživanje i eksploataciju ugljikovodika na kopnu u navedenom istražnom prostoru. Istražni prostori

2 Rješenje kojim se odobrava eksploatacija ugljikovodika na eksploatacijskom polju ishođeno je 1985. godine, ali polje zbog nerentabilnosti crpljenja otkrivenih rezervi nije nikada pušteno u proizvodnju.

3 Bušotina Cve-1 dubine 2398 m raskrila je naftni sloj u pješčenjacima donjeg panona, litostratigrafski određenim kao ekvivalent Iva pješčenjaka Ivanić Grad formacije.

nisu brisani, a u slučaju interesa naftno-rudarskog pravnog subjekta za daljnja istraživanja postupak se provodi sukladno članku 20. istog Zakona. Postupak se inicira na zahtjev investitora, a nadležno Ministarstvo objavljuje obavijest u Službenom listu EU. Ponude se podnose prema Dokumentaciji za nadmetanje koju izrađuje AZU dva puta godišnje, do 31. ožujka i do 30. rujna.

3. Geotermalni resursi Varaždinske županije

Na području Varaždinske županije postoje izvori geotermalnih voda i podaci dubokih istražnih bušotina kojima su raskriveni geotermalni vodonosnici, prikazani na Slici 3.

Poděvčevó

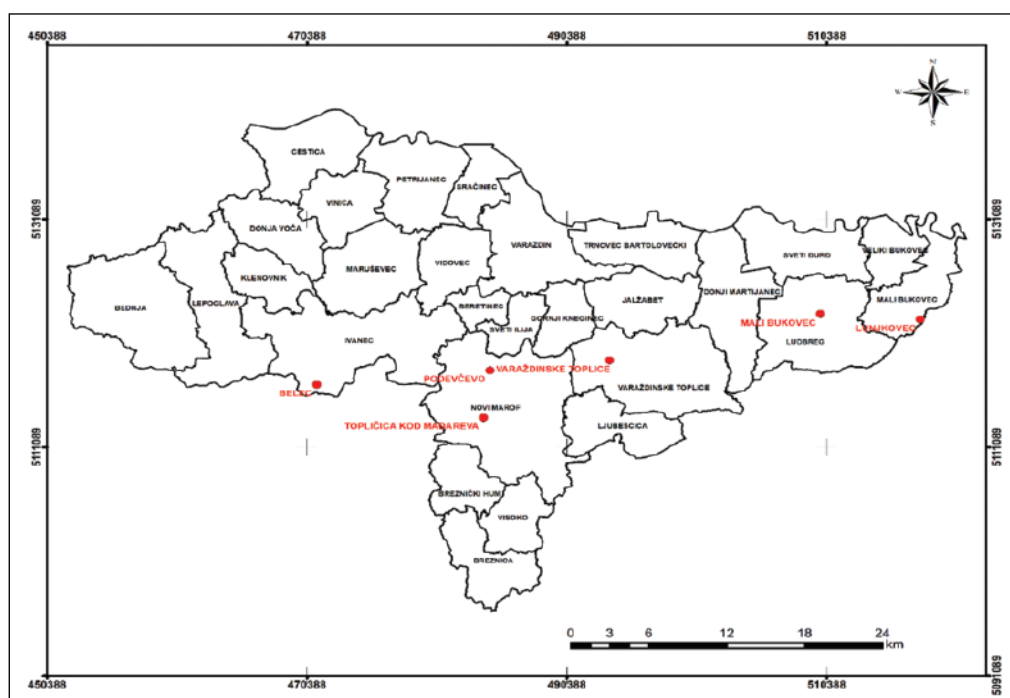
U Podevčevu voda izvire na sjecištu antiklinalnog prodora i poprečnog rasjeda, što je tipično za termalne izvore Hrvatskog zagorja (Šimunić i Hećimović, 1999). Nakupljanje vode odvija se u zdrobljenim gornjotrijaskim dolomitima navlake Lubenjak, a voda se spušta u srednjotrijaske dolomite sinklinale, iz koje može izvirati samo na tjemenu antiklinalnog prodora. Kemijska analiza pokazuje da voda iz Podevčeva po sastavu više nalikuje vodi Topličice kod Gotalovca nego vodi iz Varaždinskih Toplica (Lindal, 1973., Šimunić, 2008).

Topličica kod Mađareva

Subtermalna vrela u Topličici kod Mađareva, s temperaturom od 18–22,5 °C, nalaze se na rasjednoj granici između trijaskih dolomita i panonskih lapora, oko 2 km jugozapadno od Mađareva, neposredno sjeverno od ceste. Voda je kemijskog tipa Ca-Mg-HCO₃, s ukupnom mineralizacijom od 507 mg/l i temperaturom 22 °C. Okolica izvora izgrađena je od trijaskih dolomita, titon-berijaskih vapnenaca, krednih klastita s vulkanitima, egerskih klastita te miocenskih klastično-karbonatnih sedimenata. Voda je izbijala iz četiri veća i više manjih izvora te se koristi u turističko-rekreacijske svrhe, za kupanje i uzgoj ribe, pri čemu je korištenje ograničeno na ljetne mjesece.

Varaždinske Toplice

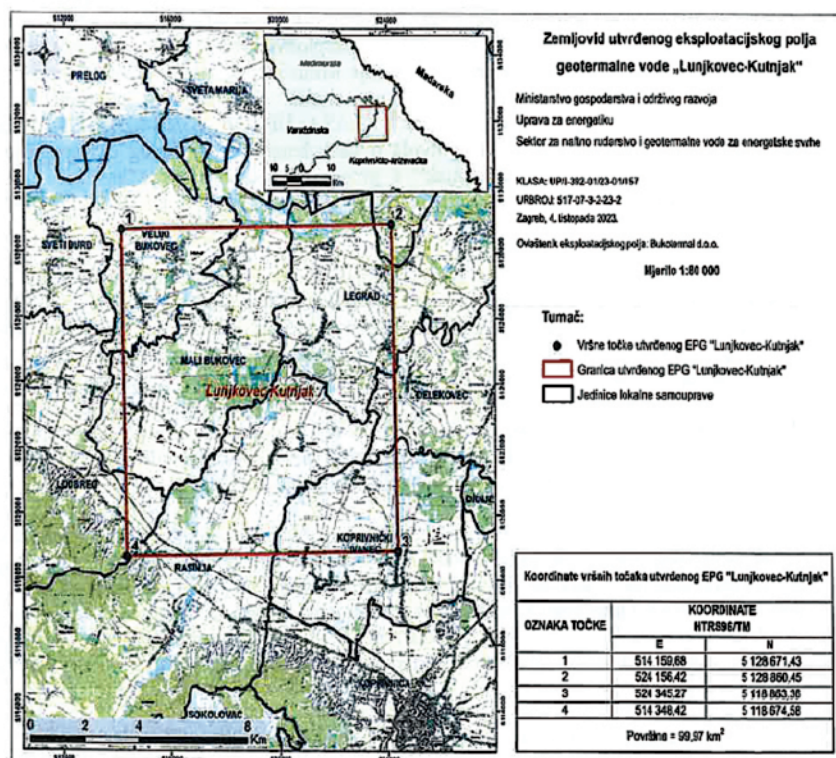
Varaždinske Toplice predstavljaju jedno od najpoznatijih i najduže korištenih termomineralnih nalazišta u Hrvatskoj, smješteno oko 12 km jugoistočno od Varaždina. Termomineralni izvor nalazi se u naslagama donjeg miocena koje leže transgresivno na trijaskim dolomitima u tjemenu antiklinale. Sabirno područje izvora obuhvaća Ivanščicu, odakle voda podzemnim putevima dolazi do toplica. Temperatura vode iznosi oko 56 °C, a kemijski je tipa Ca-Mg-HCO₃SO₄ s ukupnom mineralizacijom od 1017 mg/l, što je čini hipertermalnom i termomineralnom. Kapacitet izvora procijenjen je na 35 l/s, dok je u bušotini izdašnost bila 100 l/s. Starost vode procjenjuje se na više od



Slika 3. Pregledna karta ležišta i pojava geotermalnih voda na području Varaždinske županije (crvene točke) (Izvor KMS, HGI), EPSG: 3765.

Tablica 3. Bušotine eksploatacijskog polja geotermalne vode „Lunjkovec-Kutnjak“

Bušotina	Koordinate		Nadmorska visina	Godina bušenja	Konačna dubina (m)
	X	Y			
Lun-1	517 596,51	5 122 299,58	141,3	1975. – 1976.	2201
Kt-1	520 684,21	5 125 241,23	135,0	1968. – 1969.	2430



Slika 4. Zemljovid utvrđenog EP „Lunjkovec – Kutnjak“ (izvor: Projekt razrade EP „Lunjkovec – Kutnjak“)

40 000 godina, a njen upoj vjerojatno je vezan uz posljednji virmaski interglacij (Šumanovac, 2007., 2012). Voda je bogata sumporom, koji se u obliku sitnih druža luči na stijenama dovodnih kanala, te se koristi u terapiji reume, dermatosa, bolesti krvotoka, astmatičnih tegoba i u postoperativnoj rehabilitaciji. Arheološki nalazi potvrđuju korištenje termalne vode još u doba Rimljana, a izvori su vjerojatno korišteni kontinuirano od gornjeg pleistocena do danas.

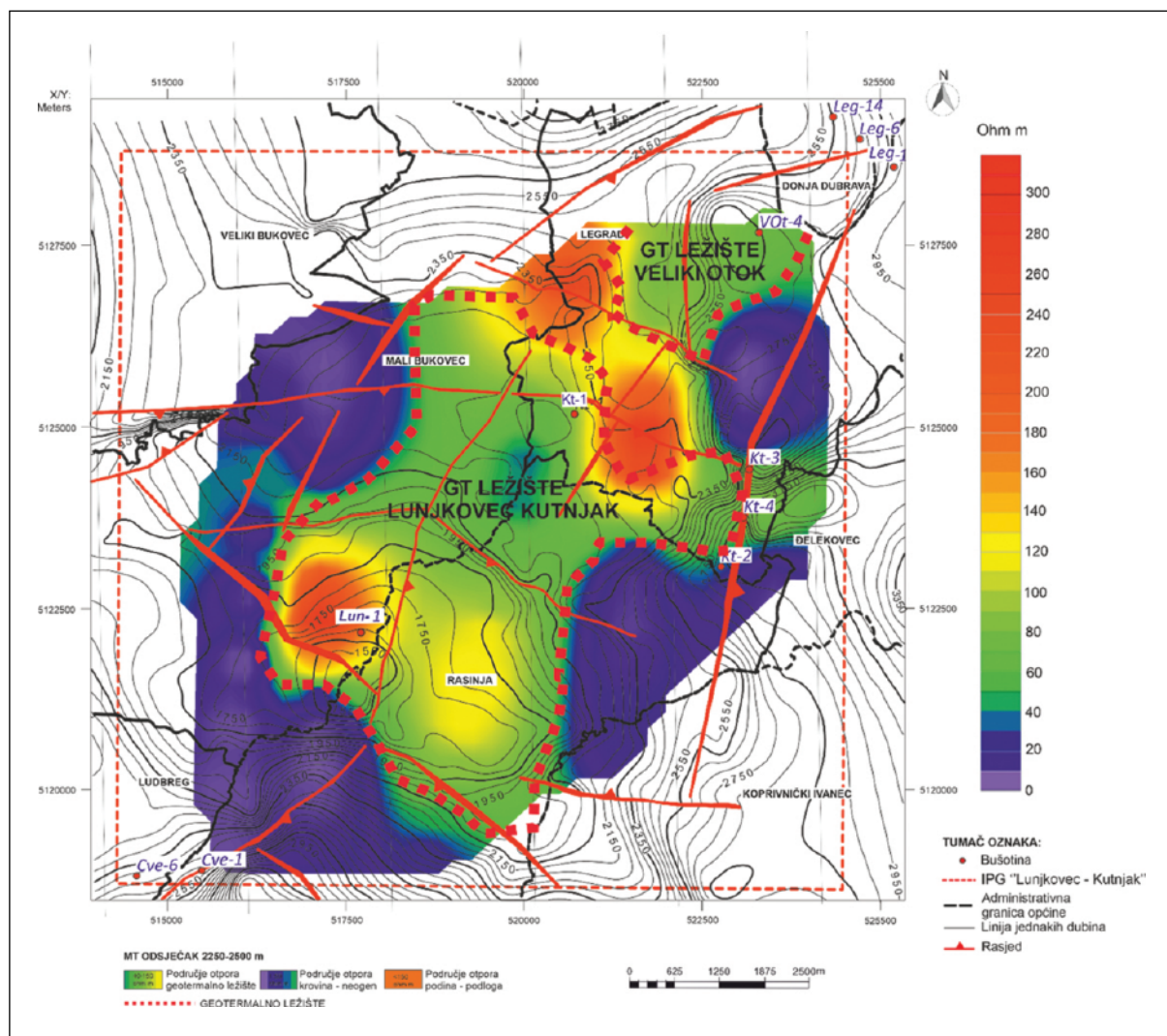
EPG Lunjkovec-Kutnjak

Povijest istraživanja na širem području istražnog prostora „Lunjkovec-Kutnjak“, započelo je četrdesetih godina s ciljem pronalaženja nafte i plina te je tijekom dugog vremenskog razdoblja izbušen niz bušotina, izvršena su karotazna mjerenja i testiranja tijekom bušenja, snimljeni su geofizički podaci (Šumanovac, 2015). U proteklih 10 godina uspješno istraživanje je provedeno na IPG Lunjkovec-Kutnjak te je sukladno

navedenoj zakonskoj proceduri formirano eksploatacijsko polje geotermalne vode EPG „Lunjkovec-Kutnjak“⁴. Na području eksploatacijskog polja „Lunjkovec-Kutnjak“ izbušene su dvije bušotine koje su zahvatile geotermalno ležište: Kt-1 i Lun-1 (Tablica 3).

Eksploatacijski prostor geotermalne vode „Lunjkovec-Kutnjak“ nalazi se na području Grada Ludbrega te općina Mali Bukovec i Veliki Bukovec u Varaždinskoj županiji, općina Legrad, Đelekovec, Koprivnički Ivanec i Rasinja u Koprivničko-križevačkoj županiji

⁴ Ministarstvo gospodarstva dodijelilo je društvu Bukotermal Dozvolu za pridobivanje geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode Lunjkovec-Kutnjak“ (KLASA: UP/I-392-01/24-01/121, URBROJ: 526-06-04-02-25-2, od 15. siječnja 2025., Izmjena Dozvole za pridobivanje geotermalne vode na eksploatacijskom polju geotermalne vode „Lunjkovec-Kutnjak“ (KLASA: UP/I-392-01/24-01/121 URBROJ: 526-06-04-02-25-5 Zagreb, 31. siječnja 2025.). Trgovačko društvo Bukotermal d.o.o. u vlasništvu je Varaždinske županije (85 %) i Općine Mali Bukovec (15 %).



Slika 5. Dubinska karta po krovini geotermalnog ležišta s ocrtanom granicom visoke vjerojatnosti prostiranja ležišta (Izvor: Elaborat o rezervama geotermalne vode budućeg eksploatacijskog polja geotermalne vode Lunjkovec-Kutnjak, ležište „Karbonati“).

te općine Donja Dubrava u Međimurskoj županiji. Površine je 99,97 km² (Slika 4) (Srpak i dr. 2019).

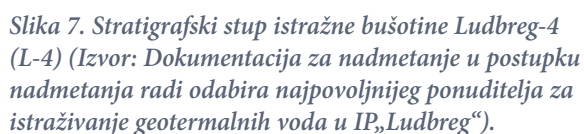
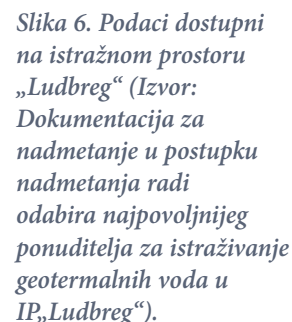
Tijekom istražne faze izvršena su geofizička mjerenja magnetotelurskih podataka, reobrađeni su postojeći seizmički podaci kojima je potvrđeno prostiranje geotermalnog ležišta. Na Slici 5 prikazana je dubinska karta po krovini geotermalnog ležišta s ocrtanom granicom visoke vjerojatnosti prostiranja ležišta dobivenog temeljem analize reobrađenih seizmičkih i snimljenih magnetotelurskih podataka.

IPG Ludbreg

Istražni prostor geotermalne vode Ludbreg nalazi se na području Grada Ludbrega (Slika 6). i obuhvaća površinu 34,94 km². Unutar istražnog poligona izvedeno je pet bušotina: Ludbreg-1, Ludbreg-2, Ludbreg-3, Ludbreg-4 i Podravka-1. Istražno razdoblje planirano

je na pet godina, tijekom kojeg investitor namjerava snimiti geofizičke podatke, izraditi dodatnu istražnu geotermalnu bušotinu te, u slučaju pozitivnih rezultata, privesti polje proizvodnji.

Bušotina Ludbreg-4 (L-4) s testiranim geotermalnim vodonosnikom izgrađena je 1985. godine. Glavni cilj bušenja bio je probijanje sedimenata pliocena i miocena te utvrđivanje karakteristika stijena podloge neogena (Urumović i dr. 1990). Tijekom bušenja probušen je slijed sedimenata gornjeg miocena, uključujući Lonja, Bilogorske, Kloštar Ivanić i Ivanić-Grad formacije, dok su sedimenti donjeg i srednjeg miocena pripadali Moslavačkoj Gori formaciji. Bušenje je prekinuto na dubini od 2921,0 m u konglomeratičnim pješčenjacima, te je testiranjem karbonatnih breča u intervalu 2233,7 – 2250,0 m dobivena je slojna voda temperature 121°C (Borović i dr. 2015., 2019).



Područje Varaždinske županije obuhvaća Mursku potolinu i rubne dijelove Malih zagorskih bazena, gdje neogenske naslage pijesaka, lapora i glina grade ležišta i pokrovne stijene. Bušotinom Va1 utvrđene su debele naslage panonskih pješčenjaka na većim dubinama, koje predstavljaju potencijalna geotermalna ležišta, dok naslage donjeg do srednjeg miocena, uključujući vapnence badenske starosti i biokalkarenite, tvore ležišne stijene. Karbonatne naslage trijaskе starosti u podlozi kenozoika, s razvijenom sekundarnom poroznošću nastalom tijekom više generacija tektonskih naprezanja, predstavljaju atraktivna ležišta geotermalne energije. Strukturni obrasci, uključujući antiklinale, horsteve i grabene uz rasjede, te stratigrafski klino-vi omogućuju stvaranje zamki tipičnih za panonske sustave. Povišen geotermalni gradijent Panonskog bazena, prisutnost termalnih izvora i ležišta raskrivenih bušotinama u širem varaždinsko-topličkom prostoru potvrđuju energetski potencijal geotermalne vode (Lindal, 1973., Larva 2008). Izmjerene temperature u bušotinama, koje dosežu do 121 °C, ukazuju na mogućnost korištenja topline u toplinarstvu, agro-geotermiji te eventualno za proizvodnju električne energije (Tablica 4).

Tablica 4. Izmjerene temperature u bušotinama na području Varaždinske županije. Oznaka “@” označava izraz „pri kojoj dubini“ (Izvor: AZU)

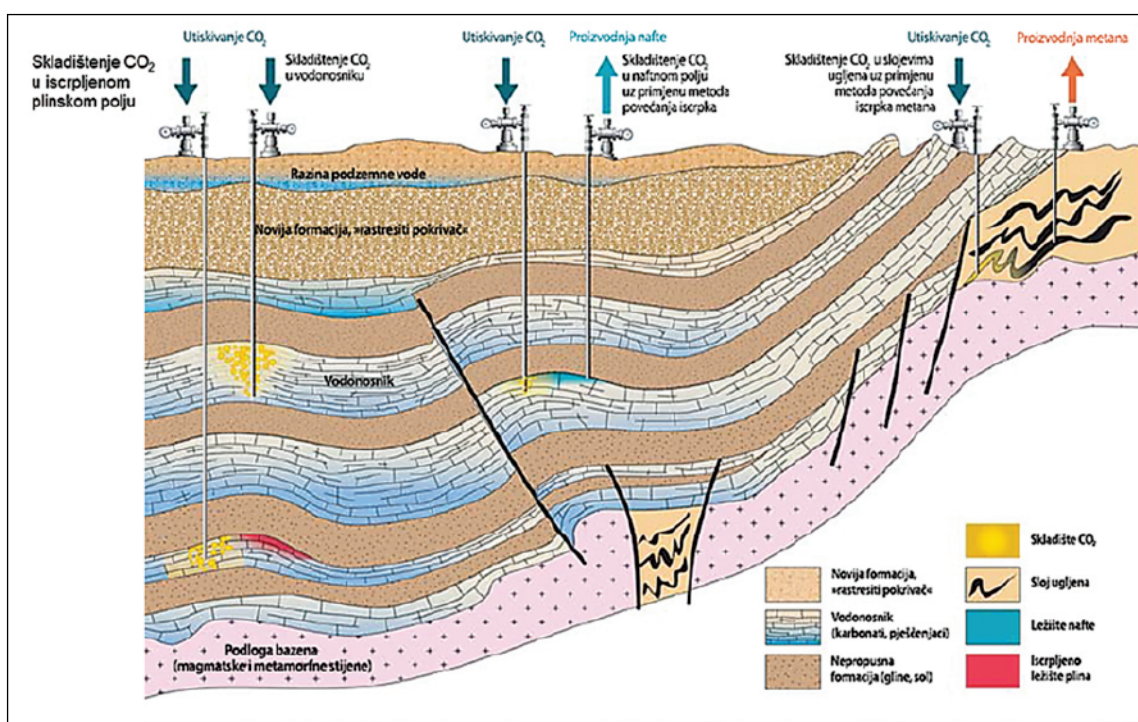
Bušotina	Geotermalni izvor	Jedinica lokalne samouprave	Godina bušenja	Litologija/geotermalni play	Dubina bušotine (m)	Temp. (°C)
Strmec Podravski-1 (StP-1)		Petrijanec	2001	karbonati/ podloga kenozoika	1369	59@1369 m
Varaždin-1 (Va-1)		Jalžabet	1984	pješčenjaci/ panonski pješčenjaci	2697	88@2697
Slanje-2 (Sl-2)		Martijanec	1962	karbonati/ podloga kenozoika	951	46@951
Slanje-1 (Sl-1)		Martijanec	1962	karbonati/ podloga kenozoika	630	61@630 m
Varaždinske Toplice-1 (Vtt-1)		Varaždinske Toplice	1989	podloga kenozoika	605	28@500 m
Ludbreg-2 (L-2)		Ludbreg	1942	pješčenjaci donjeg do srednjeg miocena	1552	N/A
Ludbreg-3 (L-3)		Ludbreg	1960	karbonati/ podloga kenozoika	1531.5	74.6@1450 m
Ludbreg-4 (L-4)		Ludbreg	1985	pješčenjaci, konglomeratični pješčenjaci donji do srednji miocen	2921	121@2200 m
Lunjkovec-1 (Lun-1)		Mali Bukovec	1975	karbonati/ podloga kenozoika	2300	110@1850 m
Podravka-1 (Pdk-1)		Ludbreg	1982	pješčenjaci, polimiktne breče/ donji do srednji miocen	2547	113@2500 m
B-1 – B-4	Varaždinske Toplice	Varaždinske Toplice	povijesni izvor	pješčenjaci, vapnenci, dolomiti/ podloga kenozoika	30 – 60	60@ površina

4. Prikaz mogućnosti podzemnog skladištenja plina i trajnog zbrinjavanja ugljikovog dioksida u geološkim strukturama

Ugljik dioksid (CO_2) može se trajno skladištiti u nekoliko geoloških formacija: u iscrpljenim naftnim i plinskim ležištima, u dubokim slanim akviferima te u dubokim slojevima ugljena (Slika 8). Postoji još jedan način koji je vrijedno spomenuti, a to je uskladištenje ugljikovog dioksida (CO_2) u solne dome. Princip skladištenja temelji se na utiskivanju CO_2 u ležišne stijene s visokom poroznošću (Φ) i propusnošću (k), gdje se CO_2 nakuplja u porama između zrna i u frakturama, istiskujući postojeći fluid (vodu, plin ili naftu). Ležišne stijene prekrivene su nepropusnim slojevima koji uključuju i propusne i nepropusne rasjede, čime se stvara složena heterogena struktura. Za izgradnju umjetnih ležišta postavljeni su osnovni kriteriji: dovoljna poroznost, propusnost i kapacitet pohrane (S), prisutnost pokrovnih nepropusnih stijena, postojanje strukturnih zamki, dubina veća od 800 m uz zadovoljavajući tlak (p) i temperaturu (T) te odsutnost pitke vode. Takvi uvjeti omogućuju dugotrajnu i sigurnu akumulaciju CO_2 u podzemlju. Tektonika te transtenzijski i transpresijski procesi u geološkoj prošlosti utjecali su na pojavu slane vode, nafte i/ili plina u

porama sedimentnih stijena (pješčenjaka). Većina pješčenjaka smještena je na dubinama 1000 – 4000 m gdje je tlak dovoljno visok za skladištenje gustog tekućeg CO_2 pri čemu slojevi gline niske propusnosti sprječavaju uzdizanje fluida.

Na području Varaždinske županije moguće je skladištenje CO_2 u duboke slane vodonosnike. Skladištenje CO_2 u duboke slane vodonosnike tehnološki je izvedivo, a ujedno i potvrđeno iz demonstracijskih, pilot (*Frio, Ketzin, Nagaoka, US Regional Partnership*) i komercijalnih (Sleipner, Snøhvit, In Salah, utiskivanje kiselih plinova) projekata utiskivanja CO_2 u svrhu smanjena GHG (engl. *Greenhouse Gases*) emisija. Krajem 2008. godine prema Michael i sur. (2009) utisnuto je oko 20 Mt CO_2 u slane vodonosnike postojećim projektima. Zadnjih godina izvedeno je 10 operacija utiskivanja u slane akvifere. Dostupnost i cijena antropogenog CO_2 , loša injektivnost (mala propusnost), cijena monitoringa te izvor informacija, faktori su koji sprječavaju brže ostvarenje projekata. Uspješno utiskivanje CO_2 u duboke slane vodonosnike zahtjeva dostupne ležišne podatke (litologija, k , Φ , stlačivost (c), zasićenje (S_w , S_o , S_g), injektivnost, kemijski sastav vode), upotrebu i procjenu monitoringa (praćenja) korištenih tehnologija za izvođenje operacija i diskusiju o mogućim poboljšanjima projekta (veći broj utisnih bušotina za utiskivanje komercijalnih količina CO_2) (Novak, 2015). Razmjer i vrijeme operacija



Slika 8. Shematski prikaz mogućnosti skladištenja CO_2 (CO2GeoNet 2011).

uskladištenja prvotno ovise o ukupnom volumenu utiskivanja. Sigurnost se postiže pažljivim odabirom i karakterizacijom lokacije, procjenom rizika, ispravnim vođenjem, odgovarajućim planom praćenja te adekvatnim planiranjem popravniha mjera.

Podaci bušotine Va-1 ukazuju na postojanje debelih slojeva pješčenjaka panonske i srednjemiocenske starosti, koji zaliježu na zadovoljavajućim dubinama. Za sigurnost su presudni: adekvatna poroznost/propusnost ležišta u geološkim strukturama, nepropusna pokrovna stijena (glina/lapor/evaporit), strukturne i/ili stratigrafske zamke, odsutnost visoko-propusnih rasjeda, te cjelovitost postojećih bušotina. Praćenje procesa uključuje monitoring tlaka, mikro-seizmičnost područja, detaljne geokemijske analize te visoko preporučljivo snimanje 4D seizmičkih podataka. Mogućnosti trajnog zbrinjavanja CO₂ naslanja se na geotermalni potencijal te podatke dobivene tijekom istraživanja i proizvodnje ugljikovodika.

5. Zaključak

Provedenom analizom geoloških, strukturnih i geokemijskih podataka potvrđeno je da područje Varaždinske županije posjeduje sve ključne elemente ugljikovodičnog sustava, uključujući razvijene matične stijene, migracijske puteve, ležišne i pokrovne stijene te strukturne i stratigrafske zamke. Postojanje plinskih i naftnih pojava na poljima Veliki Otok, Cvetkovec, Strmec Podravski i Legrad jasno ukazuje na aktivne procese generacije i migracije ugljikovodika u prošlosti, iako dosadašnja istraživanja nisu rezultirala otkrićem većih komercijalnih akumulacija. Time je potvrđen regionalni potencijal, ali i potreba za suvremenijim istražnim pristupima temeljenima na novim geofizičkim snimanjima i integriranim ge-

ološko-geokemijskim modelima. Geotermalni potencijal županije pokazuje se znatno perspektivnijim, osobito u karbonatnom kompleksu predkenozojske starosti s trijaskim dolomitima kao glavnim ležištem. Povišen geotermalni gradijent Panonskog bazena, izmjerene temperature do 121 °C te već potvrđeno eksploatacijsko polje „Lunjkovec-Kutnjak“ upućuju na realnu mogućnost korištenja geotermalne energije u toplinarstvu, agrogeotermiji i potencijalno u proizvodnji električne energije. Daljnji razvoj ovog sektora zahtijeva nastavak sustavnih istraživanja, ali i aktivnu potporu investicijskim projektima na lokalnoj i regionalnoj razini. Analiza mogućnosti trajnog zbrinjavanja ugljikova dioksida pokazuje da su najperspektivniji spremnici duboki slani akviferi u panonskim pješčenjacima, kao i potencijalno trijaski karbonati prekriveni nepropusnim kenozojskim naslagama te iscrpljeno naftno polje Cvetkovec. Geološka građa središnjeg dijela županije, uz relativno mali broj rasjednih struktura na površini, dodatno pogoduje izdvajanje lokacija za sigurno skladištenje CO₂, uz uvjet provedbe detaljnih 3D seizmičkih istraživanja.

Sve navedeno upućuje na to da Varaždinska županija raspolaže značajnim geoenergetskim potencijalom, osobito u području geotermalne energije i dugoročno u području skladištenja CO₂, dok je ugljikovodični potencijal ograničen, ali geološki dokazan. Ovim radom provedena je integrirana znanstvena procjena geoenergetskog potencijala Varaždinske županije, temeljena na objedinjavanju geoloških, geofizičkih, strukturnih i geokemijskih podataka u jedinstveni interpretacijski okvir. U kontekstu energetske tranzicije i smanjenja emisija stakleničkih plinova, upravo kombinacija geotermalne energije i CCS-a može predstavljati strateški važan doprinos održivom razvoju regije.

Literatura

1. Borović, S., Terzić, J., Urumović, K. (2019). „Conditions for shallow geothermal energy utilization in Dinaric karst terrains in Croatia“. *Environmental Earth Sciences*, 78, 245–255.
2. Borović, S., Marković, I. (2015). „Utilization and tourism valorisation of geothermal waters in Croatia,“ *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 52–63, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.022.
3. Bukotermal d.o.o. (2024) Elaborat o rezervama geotermalne vode na budućem eksploatacijskom polju geotermalne vode Lunjkovec-Kutnjak, ležište karbonati, (za Bukotermal d.o.o. Geoda Consulting d.o.o., arhiva Bukotermal d.o.o.)
4. Larva, O. (2008). *Ranjivost vodonosnika na priljevnom području varaždinskih crpilišta*. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, str. 198.
5. Loke, M. H. & Barker, R. D. (1995): *Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudo-sections*. *Geophysics*, 1682–1690.
6. Lindal, B. (1973). Industrial and other applications of geothermal energy. UN Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1, 135–148.
7. Loke, M. H., Barker, R. D. (1996): *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method*. *Geophysical Prospecting*, 44, 131–152.
8. Michael, K., Arnot, M., Cook, P., Ennis-King, J., Funnell, R., Kaldi, J., Kirste, D., Paterson, L. (2009). CO₂ storage in saline aquifers I — Current state of scientific knowledge. *Energy Procedia*, 1(1), 3197–3204.
9. Miko, S., Kruk, B., Bukovec, D., Kastmuller, Ž., Pencinger, V., Crnogaj, S., Mesić, S., Dedić, Ž., Kruk, Lj. (2007). Studija potencijala i osnove gospodarenja mineralnim sirovinama na području Varaždinske županije. Hrvatski geološki institut, Zagreb. Fond stručne dokumentacije 059/07.
10. Novak, K. (2015). Modeliranje površinskoga transporta i geološki aspekti skladištenja ugljikova dioksida u neogenska pješčenjačka ležišta Sjeverne Hrvatske 29 na primjeru polja Ivanić. Doktorski rad. Zagreb. Rudarsko – geološko – naftni fakultet.
11. Pravilnik o trajnom zbrinjavanju ugljikova dioksida u geološkim strukturama (NN 95/18, 87/22).
12. Pavlović, D., Banovac, E. (2020). „Natural gas as a geopolitical factor of energy transition.“ In Banovac, E. & Pudić, D. (Eds.) *Zbornik radova 35. Međunarodnog znanstveno – stručnog susreta stručnjaka za plin (Proceedings of the 35th International Scientific & Expert Meeting of Gas Professionals)*.
13. Pavlović, D.; Banovac, E.; Vištica, N. (2018). „Defining a composite index for measuring natural gas supply security – The Croatian gas market case“. *Energy Policy* 114, 30–38.
14. Srpak, M., Požgaj, D., Pavlović, A., & Marković, D. (2025): Dekarbonizacija i geotermalna energija u kontekstu energetske tranzicije – studija slučaja 'Lunjkovec – Kutnjak', *Nafta i plin*, Vol. 45, br. 184–185, 2025, str. 49–59.
15. Srpak, M., Pavlović, D. (2020). „Mogućnosti i potencijal geotermalnih voda u funkciji gospodarskog razvoja Varaždinske županije“. *Nafta i Plin*, 40(163–164), 58–70.
16. Srpak, M., Zeman, S., Sabol, G. (2019). „Analiza i postojeće stanje izvora geotermalnih voda na području Varaždinske županije“. *Podravina*, 18 (35), 190–200.
17. Šimunić, A. (2008): Geotermalne i mineralne vode Republike Hrvatske. Hrvatski geološki institut, Zavod za geologiju, Zagreb.
18. Šimunić, A., Hećimović, I. (1999). Geological aspects of thermal and mineral water occurrences of northwestern Croatia. *Nafta*, 50(3), 95–102.
19. Šumanovac, F. (2007): Geofizička istraživanja podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet i Pauk Cerna.
20. Šumanovac, F. (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
21. Šumanovac, F. (2015): Lithosphere model of the Pannonian–Adriatic overthrusting // *Tectonophysics*, 665 (2015), 79–91.
22. Urumović, K., Hlevnjak B., Prelogovrić, E., Mayer, D. (1990): Hidrogeološki uvjeti varaždinskog vodonosnika. *Geološki vjesnik*, Vol. 43, str. 149 – 158. Zagreb.