

Integrirana studija izvodljivosti trajnog zbrinjavanja ugljikova dioksida u geotermalnom akviferu na lokaciji Bockovac



SAŽETAK



10. lipnja 2026.

Sažetak

Agencija za ugljikovodike Republike Hrvatske (AZU) planira provesti projekt GT-CCS Bockovac, koji predstavlja inovativni pristup u integraciji hvatanja i trajnog skladištenja ugljikova dioksida (CCS) s proizvodnjom geotermalne energije u Dravskoj depresiji u istočnoj Hrvatskoj. Stoga su AZU i SLB ugovorili izradu integrirane studije izvedivosti za trajno zbrinjavanje CO₂ u akvifer na lokaciji Bockovac, s posebnim naglaskom na primjenu kombiniranog koncepta geotermalne energije i hvatanja i skladištenja ugljikova dioksida (GT-CCS) (ova Studija).

Konačni cilj studije je definirati robustan razvojni koncept koji je:

- Ekonomski isplativ – osigurava konkurentnu ekonomiku projekta i mogućnost skalabilne primjene
- Ekološki siguran – jamči dugoročni integriteti zadržavanja CO₂ i minimalan utjecaj na okoliš
- Tehnički i operativno izvediv – potkrijepljen pouzdanim ležišnim inženjeringom, projektiranjem bušotina i integracijom površinskih sustava

Projekt je strukturiran u tri faze:

- **Faza 1** je fokusirana na inženjering transporta i skladištenja, počevši od uvodne analize izvora emisija CO₂, mogućnosti transporta i regulatornog okvira (Poglavlje 1), nakon čega slijedi detaljna podzemna karakterizacija za CCS i odabir geotermalne lokacije (Poglavlje 2) te projektiranje sustava transporta i utiskivanja CO₂ (Poglavlje 3).
- **Faza 2** obuhvaća preostali dio inženjeringa površinskih postrojenja, osobito projektiranje utisnih bušotina za utiskivanje CO₂ (Poglavlje 4) te projektiranje geotermalnog para bušotina (1 proizvodna + 1 utisna) i geotermalne elektrane (Poglavlje 5).
- **Faza 3** se sastoji od analize i procjene rizika projekta i izrade plana monitoringa, koji su zajedno opisani u Poglavlju 6 ove studije.

Na kraju su procjena troškova i terminski plan projekta sažeti u poglavlju 7 Provedba projekta i procjena troškova, dok su zaključci Studije dani u poglavlju 8 Zaključak.

Poglavlje 1: Uvod

Temelj projekta zasniva se na prostornoj i tehničkoj analizi glavnih izvora emisija CO₂ u Hrvatskoj (1.1–1.2), pri čemu se područje interesa Bockovac nalazi u blizini istočnog klastera industrijskih izvora. Najveći lokalni emiter, cementara, proizvodi više od 600.000 tona CO₂ godišnje i nalazi se na udaljenosti od svega 35 kilometara od planirane lokacije utiskivanja.

Ova blizina, zajedno s postojanjem postojeće mreže plinovoda prirodnog plina, predstavlja logističku prednost za transport CO₂. Usporedna analiza metoda transporta CO₂ pokazuje da su cjevovodi najprikladnije rješenje za velike količine, pri čemu se predlaže izgradnja namjenskih CO₂ cjevovoda duž postojećih koridora, uz mogućnost razmatranja prenamjene postojećih cjevovoda.

Usporedna analiza sastava toka CO₂ (čistoća, sadržaj vode, kisika i nečistoća) pokazuje usklađenost s međunarodnim standardima. Posebnu pozornost potrebno je posvetiti smanjenju udjela vode i kisika kako bi se spriječila korozija i osigurala sigurnost transporta. U konačnici, rezultati analize potvrđuju da je integracija CCS tehnologije na području Bockovac i za regionalne emitere CO₂ u potpunosti izvediva.

Pravni okvir Republike Hrvatske za CCS (1.3) usklađen je sa standardima Europske unije te pruža čvrst temelj za provedbu ovog projekta. Proces ishođenja dozvola na području Bockovca omogućen je zahvaljujući opsežnim regionalnim geološkim podacima i relativno malom broju ekoloških i regulatornih ograničenja. To Bockovac stavlja u povoljan položaj za integrirani razvoj CCS-a i geotermalne energije, koji podupire ciljeve energetske tranzicije Republike Hrvatske.

Poglavlje 2: Rezultati geološkog i ležišnog inženjeringa

Geološka istraživanja područja Bockovca ukazuju na složen, ali perspektivan podzemni sustav oblikovan tektonskim i sedimentacijskim procesima. Korištenjem podataka iz više desetaka bušotina, seizmičke interpretacije i povijesne dokumentacije, u studiji su identificirani produktivni intervali koji pokazuju dvostruke porozne sustave te, u nekim slučajevima, akumulacije nafte i plina. Na temelju seizmičke interpretacije, analize petrofizikalnih podataka i korelacije bušotina izrađen je detaljan geološki model, koji osigurava konzistentnu i pouzdanu karakterizaciju ležišta za potrebe daljnje procjene izvedivosti CCS-a i geotermalne energije.

Studija interpretacije seizmike (2.2) integrirala je povezivanje seizmičkih podataka s podacima iz bušotina, analizu atributa, kartiranje rasjeda i horizonata te konverziju vremena u dubinu, s fokusom na ključne stratigrafske horizonte: Alfa, B, C, D, Z', Rs7 i Tg.

Interpretacija je rezultirala strukturnim kartama u vremenskoj domeni i početnim modelom brzina za konverziju vremena u dubinu, pri čemu su identificirane dvije glavne skupine rasjeda koje doprinose strukturnoj složenosti i segmentaciji ležišta.

Petrofizikalna analiza (2.3) bila je usmjerena na 16 odabranih bušotina s visokokvalitetnim karotažnim mjeranjima, što je omogućilo procjenu volumena lapora (Vsh), efektivne poroznosti i propusnosti ležišta te određivanje temperatura formacija, ključnih za procjenu geotermalnog potencijala. Studija korelacije bušotina (2.4) dokumentirala je vertikalne i lateralne stratigrafske odnose na području interesa, koristeći markere iz karotažnih mjerenja i litološke opise za povezivanje ključnih ležišnih i krovinskih intervala te praćenje njihovog lateralnog rasprostiranja. Također je provedena početna geomehanička analiza (2.6), s naglaskom na određivanje sigurnih granica tlaka utiskivanja za CCS.

Geološki model područja (2.5) podijeljen je u dvije zone: gornji dio (od Alfa do Z horizonta) i strukturno složeniju donju zonu (ispod Z horizonta), kako bi se poboljšala kvaliteta modela. Kod modeliranja ključni

parametri bili su litologija, volumen lapora, poroznost, propusnost, temperatura i tlak. Kod volumetrijskog izračuna i procjene rezervi korišteni su različiti pristupi određivanja efektivne debljine i površine za gornje i donje horizonte.

Odabir lokacije za CCS operacije (2.7) proveden je uz temeljitu usporednu analizu tehničke i regulatorne usklađenosti. Procijenjeni kapaciteti skladištenja iznose između 15 i 21 milijun tona CO₂, pri čemu su zahtjevi za godišnjim utiskivanjem bili ključni kriterij u evaluaciji. Ležišta su odabrana na dubinama potrebnima za održavanje CO₂ u superkritičnom stanju, uz odgovarajuća svojstva zadržavanja, dok su lokacije u blizini naseljenih ili zaštićenih područja izbjegavane radi smanjenja zdravstvenih, sigurnosnih i okolišnih rizika. Volumetrijska analiza i kartiranje vjerojatnosti uspjeha omogućili su identifikaciju optimalnih lokacija, pri čemu su izdvojene tri najbolje rangirane lokacije u blizini bušotina Bockovci-1, Magadenovac-1 i Čamagajevci-1, pri čemu svaka lokacija ima više ciljanih formacija kako bi se maksimalno povećao skladišni kapacitet.

Detaljne simulacije utiskivanja CO₂ (2.8), temeljene na integriranom ležišnom modelu, bile su usmjerene na tri odabrane lokacije u području Karaš Šuma–Bockovac. Optimalni scenarij predviđa korištenje četiri usmjerene utisne bušotine za skladištenje približno 19 milijuna tona CO₂ tijekom trideset godina na lokaciji Karaš Šuma. Rezultati simulacija pokazuju stabilan tlak u ležištu, učinkovito ograničavanje širenja CO₂ te mehanizme zadržavanja koji osiguravaju dugoročnu sigurnost skladištenja. Dane su preporuke za dodatno povećanje pouzdanosti procjene učinkovitosti skladištenja, osobito u pogledu zadržavanja CO₂.

Odabir geotermalne lokacije i procjena izvedivosti u Studiji (2.9) je usmjerena na duboke geološke horizonte (Rs5, Rs7 i Pn), uz primjenu koncepta višeslojnog ležišta radi povećanja vjerojatnosti presijecanja produktivnih intervala. Identificirana su dva ključna razvojna područja i područja interesa: Rasovac i Bockovac, svako s povoljnijim podzemnim uvjetima, odnosno površinskim ograničenjima. Studija također detaljno opisuje nesigurnosti, uključujući ograničene podatke iz ispitivanja bušotina i kemijske analize fluida; geokemijske analize fluida (2.10) ukazale su na varijabilnost sastava vode i plina, uz potencijalne rizike od taloženja mineralnih naslaga i korozije.

Dugoročne simulacije (2.10) potvrdile su tehničku izvedivost geotermalnog para bušotina (1 proizvodna + 1 utisna) na oba područja interesa, što omogućuje održive proizvodne protoke od 80 litara u sekundi tijekom 30 godina. Minimalne proizvodne temperature ostaju iznad 148 °C u Rasovcu i 152 °C u Bockovcima, uz potporu povoljnih svojstava donje Pn formacije.

Poglavlje 3: Razrada transportnog sustava

Projektiranje površinskih postrojenja povezuje glavni izvor emisija (cementara) s lokacijom skladištenja putem mreže cjevovoda koji prate postojeće infrastrukturne koridore. Zahtjevi za površinska postrojenja strukturirani su oko tri glavna stupa: sigurno i učinkovito utiskivanje na razini ležišta, optimalni uvjeti na ušću bušotine i konfiguracija bušotina te siguran transport CO₂ od izvora emisije do lokacije skladištenja. Razvoj je usmjeren na osnovnu stopu utiskivanja od 0,636 milijuna tona godišnje tijekom 30 godina rada, pri čemu je trajanje/količina utiskivanja po bušotini skladu s karakteristikama ležišta.

Mreža cjevovoda trasirana je uglavnom duž postojećih infrastrukturnih koridora za transport prirodnog plina, čime se smanjuje utjecaj na okoliš i izbjegavaju naseljena područja te zaštićene zone poput područja Natura 2000. Transportni cjevovod dug je 37 kilometara, polaže se na dubinu od 1,5 metara i projektiran je za rad bez izolacije. Unutarnji promjer (ID) od 304,8 mm (12 inča) omogućuje veću fleksibilnost za prihvrat vršnih opterećenja ili povećanih količina. Uzdužni profil trase smanjuje gubitke tlaka i potrebe za kompresijom.

Modeliranje bušotina pokazalo je da je optimalni unutarnji promjer cijevi 76 mm (3 inča), pri čemu se postiže ravnoteža između nižih tlakova na ušću utisne bušotine, erozijskih brzina strujanja i troškova. Uspješnost utiskivanja se poboljšava s vremenom kako CO₂ i potiskuje vodu iz ležišta. Pad tlaka kroz perforacije je značajan, ponajprije zbog hlađenja fluida u ležištu, no sustav ostaje izvan uvjeta za stvaranje hidrata. Simulirano je više operativnih scenarija, uključujući varijacije promjera cjevovoda, temperature okoliša i čistoće CO₂.

Energetski zahtjevi sustava uključuju kompresiju CO₂ na približno 100 bar na izvoru, pri čemu izmjenjivači topline hlade fluid na 40 °C prije ulaska u cjevovod. Analizirano je više modela uvjeta, pri čemu su dobiveni zahtjevi između 1,9 i 2,8 MW za očekivani izlazni tlak na izvoru emisije.

Snaga kompresora i opterećenje izmjenjivača topline izračunati su za različite scenarije, uz osiguranje da je sva rotacijska oprema pogonjena električnom energijom preuzetom iz mreže. Pregled sustava potvrđuje da projektirano rješenje u svim analiziranim uvjetima sprječava stvaranje hidrata i pojavu protoka u dvije faze.

Poglavlje 4: Sustav utiskivanja CO₂

Sustav bušotina za utiskivanje CO₂ se sastoji od 4 koso usmjerene bušotine (KS1 do 4), izbušene s jednog zajedničkog bušotinskog prostora kako bi se zahvatile duboke ležišne formacije ispod zaštićenog šumskog područja Karaš Šuma, pri čemu je površinska infrastruktura pažljivo smještena izvan granica zaštićenog područja radi usklađenosti s okolišnim propisima. Proces projektiranja uključivao je izradu shematskih prikaza, proračune naprezanja i hidrauličke proračune te preliminarnu analizu troškova, uz fokus na bušotinu KS4 koja služi kao referentni model za ostale utisne bušotine. Ključni inženjerski izazovi uključuju upravljanje ležišnim tlakom tijekom utiskivanja, razmatranje dugoročnih utjecaja CO₂ na integritet bušotine te odabir odgovarajućih materijala, poput cementa otpornog na CO₂ i visokokvalitetnih legura za zaštitne cijevi i završnu opremu bušotine.

Trajektorije bušotina odabrane su s ciljem smanjenja utjecaja na okoliš, a plan uključuje detaljne analize naprezanja i opterećenja kako bi se osigurala strukturna trajnost tijekom cijelog životnog ciklusa bušotine. Predložene strategije ugradnje zaštitnih cijevi i cementiranja prilagođene su osiguravanju zonalne izolacije i sprječavanju migracije CO₂, pri čemu se za bušenje koristi isplaka na bazi vode. Procijenjeno vrijeme bušenja za bušotinu KS4 iznosi približno 45 dana, a za prvu bušotinu na području planirano je opsežno prikupljanje podataka. Preliminarni budžet za bušotinu KS4 iznosi 10 milijuna eura, a obuhvaća sve glavne operativne aktivnosti, te materijale i opremu. Dane su preporuke za daljnji rad, uključujući dodatno prikupljanje bušotinskih podataka, dodatnih inženjerskih analiza za scenarije

dinamike utiskivanja te laboratorijsku verifikaciju odabranih materijala.

Poglavlje 5: Sustav geotermalne proizvodnje energije

Konceptualni projekt geotermalne elektrane na području interesa Rasovac predviđa dvije koso usmjerene bušotine – jednu utisnu i jednu proizvodnu – pozicionirane tako da sva ključna površinska infrastruktura izbjegava zahvat u zaštićenom području. Profil tlaka, korištenog kod dizajna bušotine KS4, koristio se za definiranje dizajna bušenja, odabir gustoće isplake i projektiranje zaštitnih cijevi kako bi se osigurala stabilnost bušotine i kontrolirani radni uvjeti.

Program zaštitnih cijevi uključuje više kolona, projektiranih za otpornost na visoke temperature i različite scenarije opterećenja, uz odgovarajući odabir materijala i korekcije zbog toplinskih utjecaja. Programi bušačkih fluida definirani su za svaki pojedini dio bušotine.

Procijenjeno vrijeme bušenja za utisnu bušotinu na području Rasovac iznosi oko 49 dana, uključujući mobilizaciju i demobilizaciju, uz sličan vremenski okvir za proizvodnu bušotinu. Predviđeni su planovi prikupljanja podataka radi poboljšanja karakterizacije geotermalnog sustava. Plan obuhvaća i neproduktivno vrijeme te uključuje odgovarajuće vrijeme za nepredviđene događaje ili zastoje (contingency).

Proizvodnja električne energije iz geotermalnih izvora na lokaciji Rasovac planirana je korištenjem elektrane na organski Rankineov ciklus (ORC). Sustav je modeliran za ljetne, zimske i prosječne godišnje radne uvjete, pri čemu je zračno hlađeni kondenzator posebno optimiziran za visoke ljetne temperature. Prognoze pokazuju da bruto proizvodnja sezonski varira između 1,9 i 3,3 megavata, dok neto godišnja isporuka u elektroenergetsku mrežu iznosi približno 18 gigavatsati, nakon odbitka vlastite potrošnje. Važno je naglasiti da je modeliranjem potvrđeno kako ne postoji hidrodinamička povezanost između ležišta za trajno skladištenje CO₂ i geotermalnih ležišta, što znači da utiskivanje CO₂ neće negativno utjecati na proizvodnju električne energije.

Poglavlje 6: Sigurnosne mjere, monitoring i nadzor

Poglavlje 6 ove studije predstavlja sveobuhvatan okvir za upravljanje rizicima, sigurnosnim aspektima, praćenjem i nadzorom u projektu GT-CCS Bockovac. Pristup integrira međunarodne najbolje prakse i hrvatske regulatorne standarde, uz strukturiranu metodologiju za identifikaciju, procjenu, ublažavanje i kontinuirano praćenje rizika tijekom cijelog životnog ciklusa projekta. Rizici se procjenjuju prema više kriterija – financijskim, vremenskim, reputacijskim, okolišnim, pravnim i troškovnim – te se rangiraju prema vjerojatnosti i ozbiljnosti posljedica. Ključne kategorije rizika uključuju zadržavanje i performanse skladišnog lokaliteta, integritet bušotina, zaštitu okoliša te pravna i društvena pitanja.

Detaljan plan praćenja i nadzora posebno prilagođen lokaciji obuhvaća podzemno i površinsko praćenje operacija vezanih uz CO₂. Kontrolne mjere uključuju analizu rasjeda i pokrovnih slojeva, geomehnička istraživanja, integraciju podataka o jezgrama, visoko rezolucijsku seizmiku, robusno projektiranje bušotina, strogo kontrolirano cementiranje i nadzor, laboratorijska ispitivanja te praćenje tlaka u stvarnom vremenu. Okolišni rizici obuhvaćeni su kroz određivanje početnog stanja referentnim

uzorkovanjem voda te sveobuhvatno praćenje površinskih i podzemnih uvjeta, uz potporu sustava zdravstvenog nadzora i protokola za brzu reakciju.

Upravljanje projektom jasno definira odgovornosti, pri čemu se odgovornost za rizike postupno prenosi na operatora kako projekt napreduje. Prilagodljivo upravljanje ima ključnu ulogu, uz kontinuirano prikupljanje podataka, uključivanje dionika i usklađenost s regulatornim zahtjevima, što omogućuje stalno usavršavanje procjene rizika.

Poglavlje 7: Provedba projekta i procjena troškova

Procijenjeni kapitalni trošak za realizaciju ovog projekta iznosi 225 milijuna eura za CCS dio Projekta i 28,5 milijuna eura za geotermalni dio projekta.

Konkretno, za CCS postrojenja procjenjuje se: 21 milijun eura za istraživanje i ocjenu lokacije; 153 milijuna eura za realizaciju projekta (izgradnju) (od čega: 58 milijuna eura za transport, 39 milijuna eura za površinska postrojenja, 41 milijun eura za utisne bušotine i 15 milijuna eura za infrastrukturu na lokaciji utiskivanja CO₂); 13 milijuna eura za izradu projektne dokumentacije i konačno definiranje izvodivosti i isplativosti projekta (definiranje koncepta, FEED i FID); te 39 milijuna eura za provedbu plana monitoringa (bušotine za monitoring). Operativni troškovi procjenjuju se na 19,95 milijuna eura godišnje, uključujući kontinuirano praćenje.

Procijenjeni kapitalni trošak geotermalne komponente iznosi 17,7 milijuna eura za proizvodno-utisni par geotermalnih bušotina i 10,8 milijuna eura za površinska postrojenja (elektrana).

Poglavlje 8: Zaključak

Zaključno, projekt GT-CCS Bockovac predstavlja tehnički, okolišno i strateški snažnu inicijativu. Njegov integrirani pristup objedinjuje geološki potencijal s pouzdanim inženjerskim rješenjima i odgovornim upravljanjem rizicima, čime se uspostavlja model za održivu dekarbonizaciju i proizvodnju obnovljive energije u Hrvatskoj i široj regiji.