



Financira
Europska unija
NextGenerationEU



REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo
gospodarstva

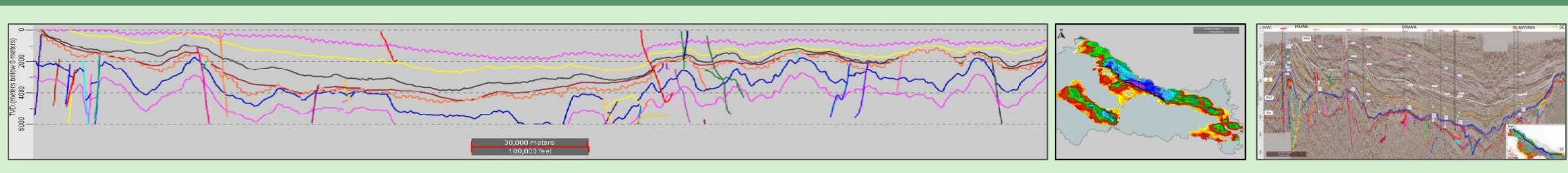


AZU

Agencija za ugljikovodike

Atlas geoloških struktura pogodnih za trajno zbrinjavanje ugljikova dioksida na kopnu

Sažetak



1. Uvod

Atlas skladištenja CO₂ na kopnu u Hrvatskoj pruža sveobuhvatnu tehničku procjenu geološkog potencijala zemlje za trajno zbrinjavanje ugljikova dioksida (CCS), čime predstavlja ključnu komponentu hrvatskog doprinosa regionalnim i europskim naporima za dekarbonizaciju. Cilj ovog dokumenta je procijeniti izvedivost, skalabilnost i zrelost mogućnosti skladištenja CO₂ u hrvatskom dijelu Panonskog bazena, s naglaskom na duboke slane akvifere i iscrpljena ležišta ugljikovodika kao primarne ciljne lokacije za skladištenje. Dokument je ključan doprinos nacionalnim i europskim naporima za dekarbonizaciju te je usklađen s regulatornim okvirom Europske unije, uključujući Uredbu (EU) 2024/1735 o uspostavi okvira mjera za jačanje europskog ekosustava za proizvodnju tehnologija s nultom neto stopom emisija (NZIA) i inicijative za industrijsku dekarbonizaciju, gdje se CCS prepoznaje kao ključno rješenje ze teško smanjive emisije.

Vrijednosni lanac CCS-a, koji obuhvaća hvatanje, transport, skladištenje i nadzor, sve se više primjenjuje u komercijalnim razmjerima diljem Europe. Hrvatska je u poziciji da uđe u ovu fazu razvoja, potpomognuta postojećim podacima o podzemlju, naslijeđenom infrastrukturuom za ugljikovodike i blizinom industrijskih emitera. Atlas objedinjuje desetljeća geoloških i geofizičkih podataka kako bi pružio dosljedan okvir za identificiranje i rangiranje mogućnosti skladištenja te za usmjeravanje investicijskih i političkih odluka u prijelazu na gospodarstvo s niskom emisijom ugljika.

2. Profil emisija i potražnja za CCS-om

CCS potencijal Hrvatske uvelike ovisi o njezinom profilu emisija, koji je karakteriziran koncentracijom točkastih izvora pretežno unutar ili u blizini Panonskog bazena. To uključuje proizvodnju amonijaka, postrojenja za proizvodnju bioetanola i druge industrijske grane sposobne generirati tokove CO₂ visoke čistoće pogodne za hvatanje. Postojeći pilot-projekti u pogonu amonijaka Petrokemija i postrojenju za proizvodnju bioetanola Sisak zajedno pokazuju kapacitete hvatanja koji premašuju 240.000 tona CO₂ godišnje, što naglašava spremnost za primjenu u ranoj fazi. Istovremeno, operativno iskustvo iz postrojenja za preradu plina Molve, gdje približno 0,65 MtCO₂ godišnje uspješno je utisnutoo i zadržano u podzemnim formacijama, što pruža čvrstu tehničku potvrdu za dugoročno skladištenje.

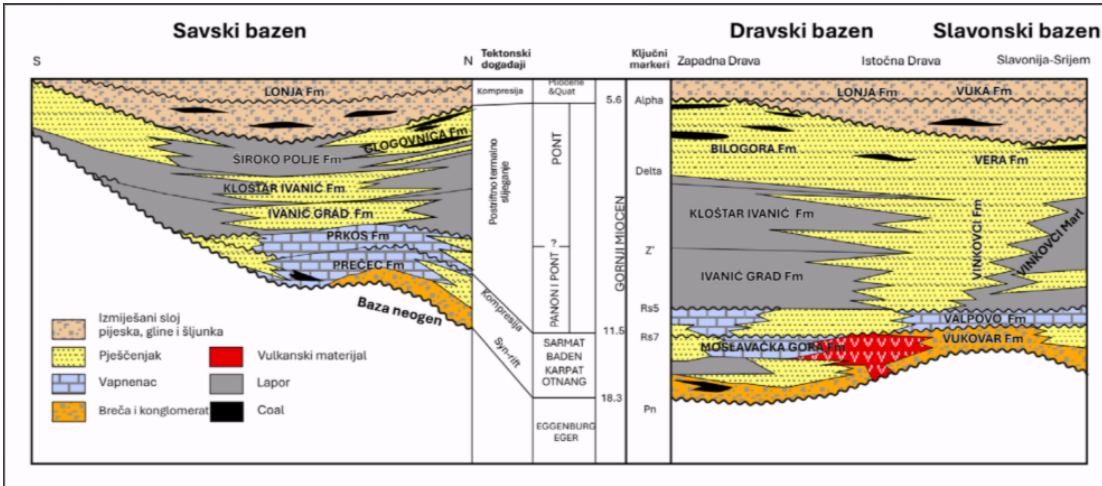
Očekuje se da će se budući razvoj CCS-a u Hrvatskoj značajno proširiti, pri čemu trenutačni i planirani projekti ciljaju na kombinirani kapacitet od približno 1,9 MtCO₂ godišnje. Ključna prednost je prostorna usklađenost između izvora emisija i lokacija za skladištenje, budući da se većina industrijskih izvora nalazi unutar 25–30 km od potencijalnih geoloških skladišta. Ta blizina minimizira zahtjeve za transportom i podržava razvoj isplativih CCS sustava temeljenih na klasterima, sličnih onima koji su provedeni u drugim europskim regijama.

3. Geološki okvir i potencijal skladištenja

3.1 Karakteristike Panonskog Bazena

Hrvatski dio Panonskog bazena predstavlja zreli sedimentni bazen s kompleksnom tektonskom evolucijom i značajnim naslagama neogeniskih sedimenata. Bazen je podijeljen na podbazene Drava, Sava, Mura i Slavonija, od kojih svaki ima posebne geološke značajke relevantne za skladištenje CO₂. Strukturni trendovi kontrolirani su regionalnom tektonikom, pri čemu dominantne orijentacije rasjeda utječu na raspodjelu ležišta, njihovu povezanost i potencijalnu cjelovitost zadržavanja.

Ležišne formacije unutar bazena obuhvaćaju kombinaciju pješčenjaka, karbonata, konglomerata i rasjedom razlomljene podloge, prekrivene izolatorskim litologijama kao što su lapor, škrljevci i evaporiti. Prisutnost više tektonostratigrafskih slijedova, uključujući naslage iz predriftne, sinriftne i postriftne faze, stvara vertikalno slojevit sustav potencijalnih parova ležište-isolator, čime se povećava ukupni kapacitet skladištenja.



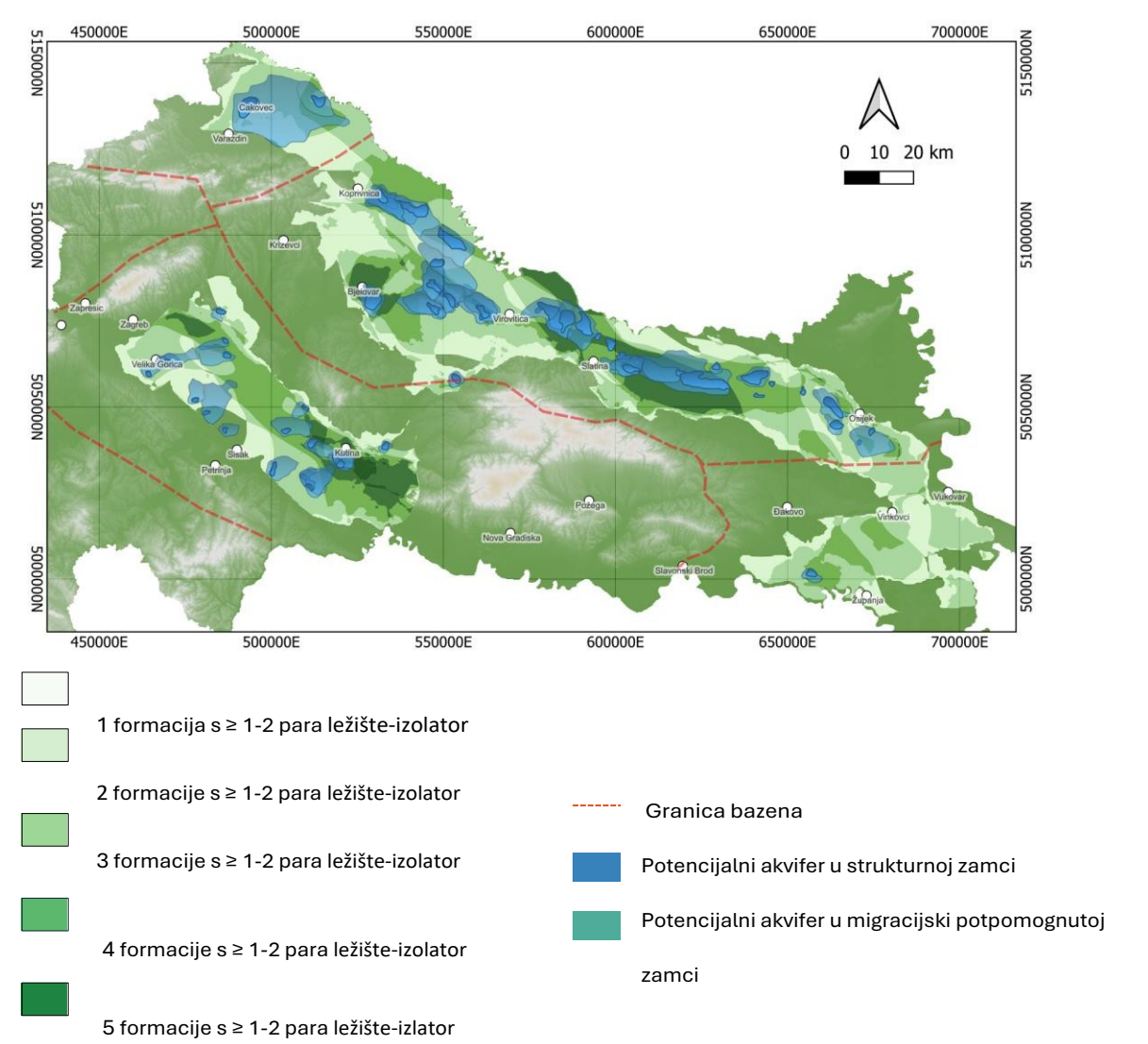
Slika 1. Sažeti litostratigrafski dijagram za bazene Save, Drave i Slavonije (prilagođeno prema Saftić i dr. 2003.) koji prikazuje glavne formacije koje su procijenjene u ovom Atlasu skladištenja CO₂. Saftić, B., Velić, J., Sztanó, O., Juhas, G. i Ivković, Ž. 2003. Tercijarne podzemne facije, izvorne stijene i ležišta u jugozapadnom Panonskom bazenu. *Geologia Croatica* 5c: 101–122.

3.2 Vrste skladišta i resursi

Procjena se usredotočuje na dvije glavne opcije skladištenja: duboke slane akvifere i iscrpljena ležišta nafte i plina. Slani akviferi nude velike teorijske kapacitete skladištenja, ali su relativno slabije karakterizirani, dok EPU-i (eksploatacijska polja ugljikovodika) pružaju veću pouzdanost zbog opsežnih podataka o proizvodnji i dokazanog zadržavanja ugljikovodika tijekom geološkog vremena.

Među procijenjenim bazenima, Dravski bazen pokazuje najpovoljnije uvjete, koje karakteriziraju značajna debljina sedimenata, visokokvalitetni parovi ležišta i izolatora te opsežna pokrivenost podacima (Slika 2). Savski bazen ima umjereni potencijal s relativno dobrom raspodjelom mogućnosti skladištenja, dok Murski bazen nudi lokalizirane, ali obećavajuće ciljeve, osobito unutar dubljih stratigrafskih intervala. Slavonski bazen je usporedno limitiran zbog ograničenih podataka i smanjenog kontinuiteta ležišta.

Svojstva ležišta obično uključuju vrijednosti poroznosti u rasponu od približno 6 % do više od 20 %, debljine između 60 i 177 metara, a mnoge formacije dosežu dovoljan prag dubine za održavanje superkritičnih uvjeta CO₂. Procjene kapaciteta skladištenja ukazuju na značajan potencijal ključnih intervala, osobito u slavonskom dijelu Dravskog bazena. Ukupni kapacitet procijenjenih geoloških formacija u sva četiri bazena iznosi 346 Mt, od čega 222 Mt dolazi iz Slavanskog dijela Dravskog bazena. Ova procjena pretpostavlja utiskivanje u sve dijelove formacija koje ispunjavaju kriterije za utiskivanje i stoga je teorijska. Ukupni resurs pronađen u strukturiranim i s njima povezanim migracijskim zamkama iznose 132 Mt raspoređenih na 6 lokacija u bazenima Drave i Mure. Te zamke dosežu prag od 10 Mt koji se smatra komercijalno atraktivnim.

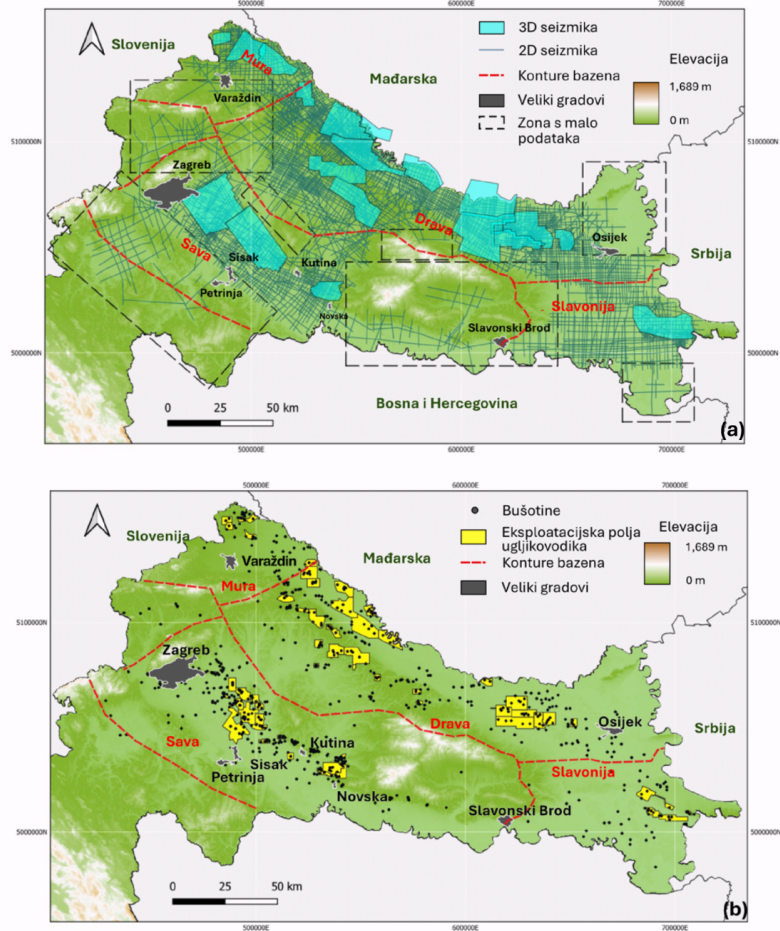


4. Spremnost vrijednosnog lanca CCS-a

Hrvatska ima dobro uspostavljenu naftnu i plinsku infrastrukturu, što značajno povećava izvedivost primjene CCS-a. Skup podataka o podzemlju uključuje otprilike 950 istražnih bušotina, 3.000 razradnih bušotina i opsežnu seizmičku pokrivenost koja premašuje 30.000 km 2D podataka i više od 3.300 km² 3D seizmičkih podataka (Slika 3). Ovaj skup podataka pruža čvrstu osnovu za d o b r u geološku interpretaciju i smanjuje rizik istraživanja povezan s razvojem lokacija za skladištenje.

Postojeći cjevovodi i postrojenja za obradu nude mogućnosti za prenamjenu u dio mreže za transport CO₂, dok blizina lokacija izvora emisija skladišnim lokacijama minimizira potrebu za opsežnom novom infrastrukturom. Integracija CCS-a s novim industrijskim projektima, kao što su inicijativa KODECO za cement s gotovo nultom emisijom i koncepti CCS-a temeljeni na geotermalnoj energiji, dodatno povećava potencijal za razvoj integriranih industrijskih čvorišta s niskom emisijom ugljika.

Slika 3. (a) Naslijeđeni 2D i 3D seizmički podaci u Panonskom bazenu (b) Bušotine i nalazišta ugljikovodika u Panonskom bazenu



Slika 2. Karta potencijalnih slanah akvifera na razini formacije koja prikazuje potencijalna područja za skladištenje CO₂ u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. Poligoni prikazuju samo ona područja gdje postoje odgovarajući parovi ležište-izolator. Također su prikazane lokacije potencijalnih zamki slanah akvifera. Najpovoljnije zamke detaljno su prikazane u Atlasu.

5. Metodologija i okvir za procjenu

Atlas primjenjuje strukturiranu, višefaznu metodologiju kako bi se osiguralo dosljedno identificiranje i rangiranje potencijalnih lokacija za skladištenje. Za slane akvifere implementiran je tijek rada u šest faza, koji obuhvaća definiranje područja od interesa, kvalifikaciju lokacije na temelju temeljnih geoloških kriterija, provjeru kombinacije ležišta i izolatora, detaljnu karakterizaciju svojstava, procjenu rizika na temelju lokacije i konačno rangiranje pomoću sustava bodovanja s temperaturnom kartom.

Paralelni tijek rada u pet faza primjenjuje se na EPU-e (eksploatacijska polja ugljikovodika) uključujući dodatnu evaluaciju utemeljenu na podacima i dinamičkom modeliranju scenarija utiskivanja za reprezentativno polje u svakom bazenu. Kriteriji odabira za slane akvifere i EPU-e uključuju ograničenja dubine između 800 i 3.500 metara, pragove gustoće CO₂ koji prelaze 300 kg/m³, debljinu i propusnost ležišta, integritet izolatora i blizinu infrastrukture i izvora emisija.

Sustav za upravljanje resursima skladišta (SRMS) koristi se za klasifikaciju resursa skladišta prema njihovoj zrelosti i komercijalnoj spremnosti. Ovaj sustav razlikuje između otkrivenih, uvjetovanih i perspektivnih resursa, čime se omogućuje standardizirano izvještavanje i olakšava usporedba između projekata i investicijskih odluka.

6. Rizici i ograničenja

Potrebno je riješiti nekoliko tehničkih i okolišnih rizika kako bi se osigurala sigurna i učinkovita primjena CCS-a. Geološke nesigurnosti, uključujući varijabilnost svojstava ležišta, heterogenost i kontinuitet izolatora, predstavljaju ključne izazove u točnom određivanju kapaciteta skladištenja i integriteta zadržavanja. Sustavi rasjeda mogu djelovati kao potencijalni putevi istjecanja ili bi se mogli ponovno aktivirati pod uvjetima povećanog tlaka tijekom utiskivanja CO₂.

Seizmičnost je značajan čimbenik u Hrvatskoj, pri čemu određene regije pokazuju umjerenu do visoku seizmičku aktivnost. Okružne zone primjenjuju se oko epicentara potresa i aktivnih rasjeda kako bi se smanjio rizik od inducirane seizmičnosti i osigurala dugoročna sigurnost skladištenja. Dodatno, postojeće bušotine predstavljaju potencijalni rizik od istjecanja ako nisu pravilno napuštene, što zahtijeva detaljnu procjenu i strategiju sanacije prije utiskivanja.

Ograničenja na površini, uključujući zaštićena područja i zahtjevnu topografiju, mogu ograničiti pristupačnost lokaciji i povećati troškove razvoja. Nadalje, praznine u podacima u određenim regijama, posebice u Slavonskom bazenu, uvode dodatnu nesigurnost koju je potrebno otkloniti prikupljanjem i analizom dodatnih podataka.

7. Mogućnosti i strateški izgledi

Hrvatska ima priliku za razvoj CCS-a na regionalnim razinama. Prisutnost više parova ležište–izolator, slojevitih intervala za skladištenje i blizina potencijalnih strukturnih zamki ukazuje na to da bi određena područja mogla imati potencijal za razvoj skladištenja CO₂ u slanim akviferima, a povezani mehanizmi zadržavanja potpomognuti migracijom dodatno povećavaju učinkovit kapacitet skladištenja izvan strukturnih zatvaranja. Osim toga, nekoliko polja ugljikovodika mogla bi predstavljati prilike za skladištenje nakon prestanka proizvodnje. Najpovoljnija su smještena u Dravskom i Murskom bezenu.

Strateške prednosti Hrvatske uključuju dokazane performanse podzemnih formacija, opsežnu infrastrukturu i usklađenost s klimatskom politikom i mehanizmima financiranja EU-a. Ti čimbenici zajedno pozicioniraju Hrvatsku kao potencijalno regionalno središte CCS-a za srednju i istočnu Europu, s mogućnostima za prekogranični transport i skladištenje CO₂. Integracija s inicijativama za dekarbonizaciju industrije, uključujući proizvodnju cementa i geotermalnu energiju, dodatno jača taj potencijal.

8. Zaključci

Procjena pokazuje da Hrvatska posjeduje tehnički održivu i strateški vrijednu bazu resursa za CCS, osobito u bazenima Drave i Mure. Ove regije kombiniraju povoljne geološke uvjete, opsežnu pokrivenost podacima i blizinu emitera CO₂, što ih čini glavnim kandidatima za kratkoročni razvoj.

Budući naponi trebali bi dati prioritet detaljnoj procjeni lokacija s visokim potencijalom, uključujući daljnje prikupljanje podataka kako bi se smanjila nesigurnost i povećalo povjerenje u svojstva ležišta i izolatora. Razvoj klaster-baziranih CCS sustava, uz korištenje postojeće infrastrukture i minimiziranje transporta, trebao bi biti središnja komponenta strategije provedbe.

Mjere ublažavanja rizika, uključujući sveobuhvatnu procjenu postojećih bušotina, seizmičko praćenje i provjeru cjelovitosti izolatorskog sloja, ključne su za osiguranje dugoročne sigurnosti skladištenja. Istovremeno, korištenje mehanizama financiranja EU i usklađivanje s regulatornim okvirima bit će presudno za omogućavanje ulaganja i ubrzanje vremenskog okvira projekta.