



Financira
Europska unija
NextGenerationEU

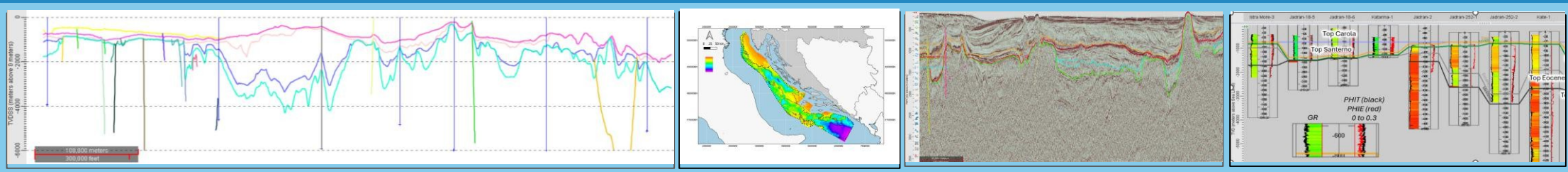


REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo
gospodarstva



AZU
Agencija za ugljikovodike

Atlas geoloških struktura pogodnih za trajno zbrinjavanje ugljikova dioksida na moru Sažetak



1. Uvod

Atlas geoloških struktura pogodnih za skladištenje CO₂ na odobalju Republike Hrvatske pruža prvu integriranu procjenu geološkog potencijala za dugoročno skladištenje ugljikova dioksida (CO₂) unutar hrvatskog dijela Jadranskog bazena. Atlas je razvijen kako bi podržao rastuću industriju hvatanja i skladištenja ugljikova dioksida (CCS) u Hrvatskoj te kako bi pružio tehničke osnove za buduću procjenu skladišta, razvoj projekata, regulatorno planiranje i investicijske odluke. Studija procjenjuje i duboke slane akvifere i iscrpljena plinska polja (nazvana EPU), koji zajedno predstavljaju najzrelije i tehnički najizvedivije opcije skladištenja trenutno dostupne za komercijalnu primjenu CCS-a. Kako se primjena CCS-a u Europi ubrzava kao odgovor na Uredbu (EU) 2024/1735 o uspostavi okvira mjera za jačanje europskog ekosustava za proizvodnju tehnologija s nultom neto stopom emisija (NZIA) i ciljeve industrijske dekarbonizacije, očekuje se da će geološko skladištenje ugljikova dioksida na moru igrati potpornu ulogu osiguravanju potencijalnih resursa za geološko skladištenje. Hrvatska je dobro pozicionirana za sudjelovanje na ovom tržištu koje je u razvoju zbog svojih opsežnih geoloških podataka s odobalnog područja, postojeće infrastrukture za ugljikovodike, operativne stručnosti u području podzemnih slojeva i blizine industrijskih i obalnih izvora emisija CO₂.

2. Profil emisija i potražnja za CCS-om

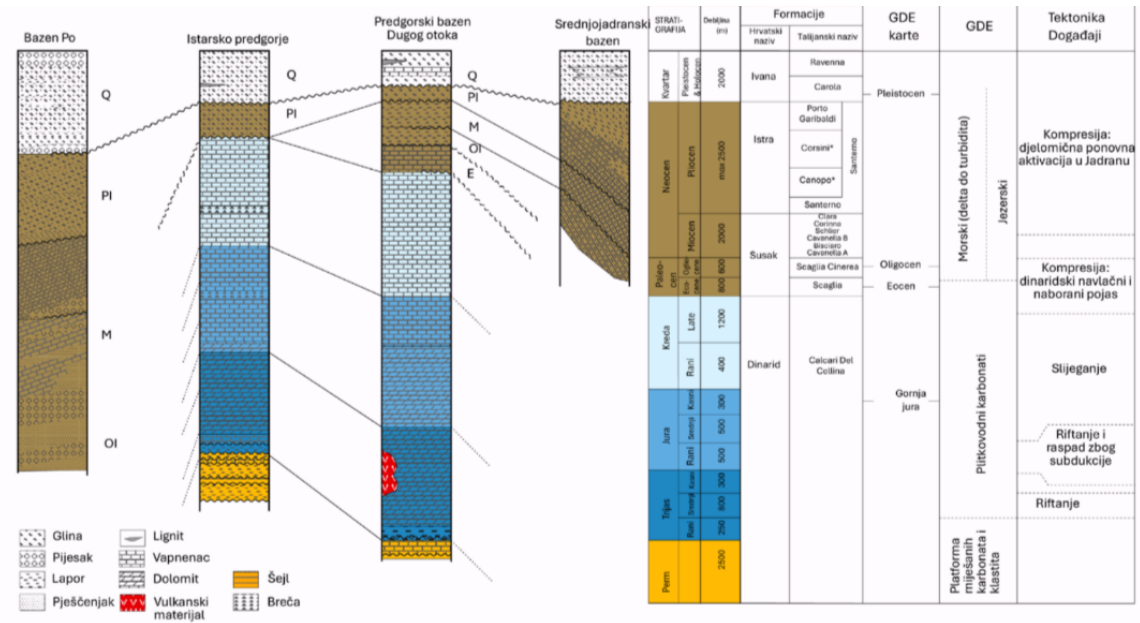
Hrvatska već posjeduje nekoliko elemenata potrebnih za budući lanac vrijednosti CCS-a. Postojeće i planirane CCS inicijative, uključujući projekte povezane s postrojenjem za amonijak Petrokemija, postrojenjem za bioetanol Sisak, operacijama u Molvama i projektom cementa KODECO, pokazuju rastući nacionalni popis CCS projekata s ukupnim potencijalom koji se približava 1,9 Mt CO₂ godišnje. Odobalni sektor pruža priliku za dopunu tih razvoja potencijalno velikim kapacitetom geološkog skladištenja sposobnim podržati ciljeve dekarbonizacije kako na nacionalnoj, tako i na potencijalno regionalnoj razini. Postojeća infrastruktura na moru i mreže cjevovoda pružaju potencijalne mogućnosti za buduću ponovnu uporabu, dok Jadranski bazen nudi niz geoloških okruženja pogodnih za geološko skladištenje CO₂. Razvoj odobalnih lokacija za geološko skladištenje CO₂ stoga bi mogao činiti ključnu komponentu dugoročne strategije energetske tranzicije Hrvatske

3. Geološki okvir i potencijal skladištenja

3.1 Karakteristike Jadranskog bazena

Jadranski bazen je složena sedimentna udolina oblikovana mezozojskim riftanjem, razvojem karbonatnih platformi i naknadnom kompresijskom tektonikom povezanom s dinaridskom orogenezom. Ta je evolucija stvorila više parova ležište-izolator i razne strukturne zamke s potencijalom za geološko skladištenje CO₂ (Slika 1). Identificirana su i procijenjena četiri glavna intervala slanih akvifera; eocensko-mezozojski karbonati, miocensko-oligocenski slojevi, formacija Santerno i formacija Carola, pri čemu eocensko-mezozojski karbonati pružaju najveći potencijalni kapacitet. Miocensko-oligocenski, Santerno i Carola intervali pružaju dodatne mogućnosti, iako s manjim resursima za skladištenje. Te formacije općenito pokazuju bolje istražene odnose ležište-izolator, ali su ograničene limitiranim rasprostriranjem, kontinuiranošću ležišta ili učinkovitošću skladištenja.

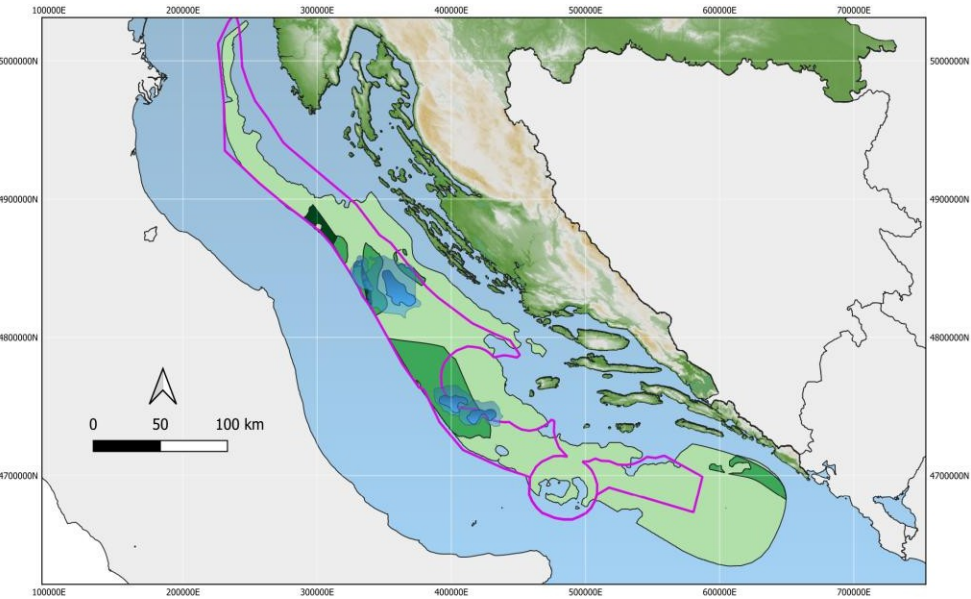
Podmorska plinska polja pružaju dodatnu mogućnost skladištenja zbog svoje dokazane povijesti zadržavanja, opsežne količine podzemnih podataka i postojeće infrastrukture. Atlas je procijenio sva glavna jadranska EPU-a koristeći strukturiranu metodologiju provjere i rangiranja. Međutim, mnogi jadranski EPU-i nisu dovoljno duboki za održavanje superkritičnih uvjeta za skladištenje CO₂. Oni koja zadovoljavaju potrebne pragove nalaze se u najjužnijem dijelu hrvatskih eksploatacijskih polja.



Slika 1. Sažeti stratigrafski dijagram za hrvatski jadranski bazen (prilagođeno iz Saftić i dr. 2015), koji prikazuje formacije koje su procijenjene u ovom Atlasu za skladištenje CO₂. Saftić, B., Kolenković Močilac, I., Cvetković, M., Vulin, D., Velić, J., i Tomljenović, B. 2015. Potencijal za geološko skladištenje CO₂ u odobalju Jadrana. Minerals S(10): 577

3.2 Vrste skladišta i resursi

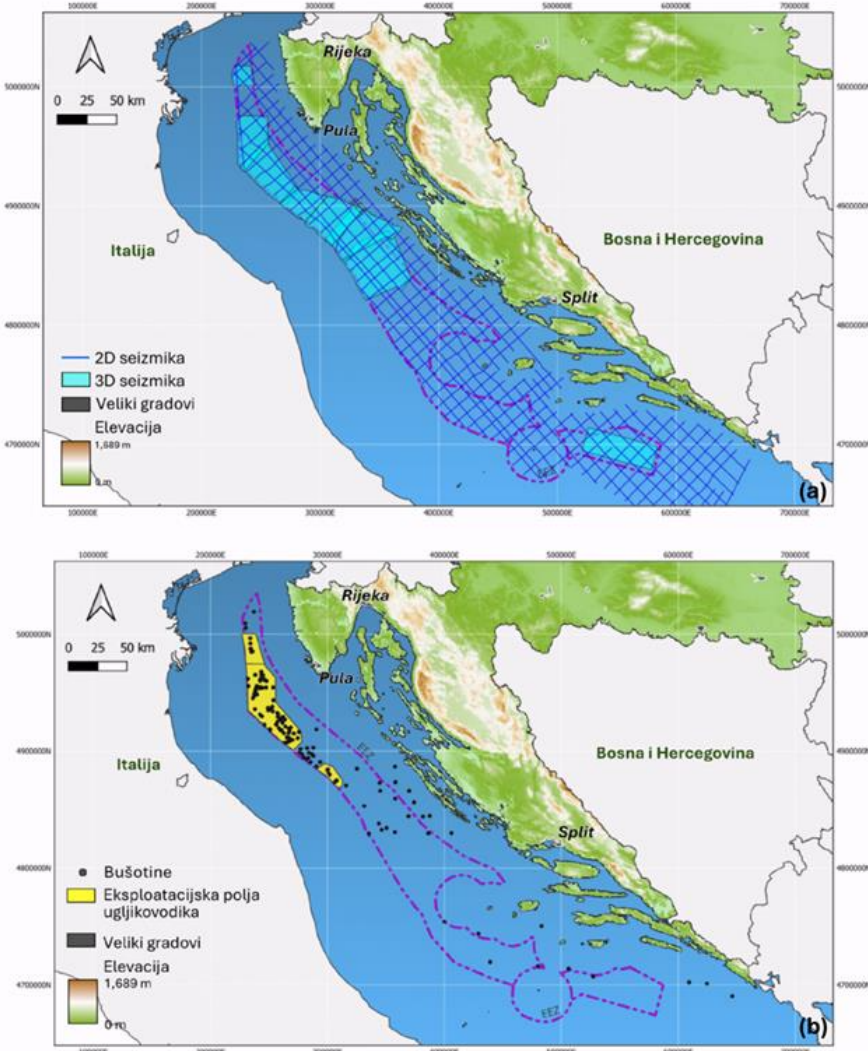
Hrvatski Jadran ima značajan potencijal za skladištenje CO₂, s ukupnim kapacitetom svih procijenjenih geoloških formacija od 717 Mt. Ova procjena pretpostavlja utiskivanje u sve dijelove formacija koje ispunjavaju kriterije za utiskivanje i stoga se smatra teorijskom. Najveći potencijalni kapacitet nalazi se u dubokom akviferu eocensko-mezozojskog karbonatnog sustava, s teorijskom procjenom od 600 Mt CO₂, iako procjene kapaciteta ovog intervala nose znatnu nesigurnost zbog ograničenih podataka o ležištu i heterogenosti ležišta. Dodatni potencijal za skladištenje postoji u akviferima miocensko-oligocenskim karbonatima i pješčenjacima Santerno formacije, s kapacitetima od približno 48 Mt, odnosno 29 Mt CO₂. Interval Carola općenito je manje povoljan jer veći dio formacija ne ispunjava zahtjeve dubine za skladištenje superkritičnog CO₂, unatoč procijenjenom kapacitetu od približno 40 Mt CO₂. Nekoliko strukturnih zamki u karbonatima eocenskog i mezozojskog podrijetla u središnjem i južnom Jadranskom moru moglo bi predstavljati potencijal za razvoj skladišta i zajedno sadrže kombinirani srednji resurs od približno 61 Mt CO₂ raspoređen na 3 zamke, iako su kvaliteta ležišta, heterogenost, nesigurnost u pogledu izolatora i rasjedanje. Iscrpljena plinska polja (EPU) pružaju zreliju priliku za geološko skladištenje, pri čemu polja Ika i Marica pokazuju povoljne karakteristike ležišta i izolatora te procijenjene kapacitete skladištenja od oko 10–13 Mt CO₂ svako.



- Područje s potencijalno jednim parom ležište-izolator. Ležište se uglavnom sastoji od karbonata, uz značajnu nesigurnost u pogledu kvalitete ležišta, kao i količine i kvalitete podataka.
- Područje s potencijalno 2 intervala ležište-izolator (na temelju dobre gustoće petrofizičkih podataka)
- Područje s potencijalno 3 intervala ležište-izolator (na temelju dobre gustoće petrofizičkih podataka)
- Potencijalni akvifer u strukturnoj zamci
- Potencijalni akvifer u zamci potpomognutoj migracijom
- Ekskluzivna ekonomska zona

4. Skup podataka

Jadransko obalno područje raspolaže opsežnom, naslijeđenom bazom podataka prikupljenom tijekom aktivnosti istraživanja i eksploatacije ugljikovodika. U izradi Atlasa korišteno je više od 5.000 km 2D seizmičkih podataka, približno 6.600 km² 3D seizmičkog pokrivanja te podaci iz 179 istražnih i razradnih bušotina (Slika 2). Ova baza podataka predstavlja čvrst temelj za buduće procjene mogućnosti skladištenja te znatno smanjuje nesigurnost u ranim fazama istraživanja. Iako je pokrivenost podacima najizraženija u sjevernom dijelu Jadrana, na većem dijelu bazena raspoložive su dostatne informacije za procjenu skladišnog kapaciteta u fazi probira. Za buduće, lokacijski specifične procjene bit će nužna dodatna karakterizacija ležišta i ciljano prikupljanje novih podataka.



Slika 3. (a) Naslijeđeni 2D i 3D seizmički podaci kroz hrvatski Jadran. (b) Bušotine i ležišta plina u hrvatskom Jadranu.

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 kombinacija ležišta i izolatora, detaljnu karakterizaciju svojstava, procjenu rizika na temelju lokacije i konačno rangiranje pomoću sustava bodovanja s toplinskom kartom.

Na EPU-e se primjenjuje paralelni tijek rada u pet faza, koji uključuje dodatnu evaluaciju utemeljenu na podacima i dinamičkom modeliranju scenarija utiskivanja za reprezentativna polja. Kriteriji probira uključuju ograničenja dubine između 800 i 3.500 metara, pragove gustoće CO₂ koji prelaze 300 kg/m³, debljinu i poroznost 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

Nekoliko tehničkih rizika mora se riješiti prije nego što se može nastaviti s komercijalnim razvojem. Najznačajniji utvrđeni rizici uključuju nisku kvalitetu ležišta, osobito u eocenskim i mezozojskim karbonatima, migracijske putove pod kontrolom rasjeda, integritet naslijeđenih bušotina, kompartmentalizaciju i heterogenost ležišta, seizmičnost i potencijal za reaktivaciju rasjeda te prekogranična regulatorna pitanja za neka skladišta. Atlas uključuje postupke provjere i rangiranja temeljene na riziku, osmišljene za rano otkrivanje tih nesigurnosti i usmjeravanje budućih procjenjivačkih aktivnosti prema tehnički najizvedivijim prilikama za skladištenje.

7. Mogućnosti i izgledi

Atlas skladištenja CO₂ na odobalju u Hrvatskoj pokazuje da Jadranski bazen sadrži potencijal za geološko skladištenje CO₂. Bazen nudi kombinaciju velikih resursa u slanim akviferam i manjih, ali bolje karakteriziranih prilika za iskorištena plinska polja. Eocensko-mezozojski karbonatni kompleks predstavlja najveći teorijski resurs za skladištenje, dok EPU-i Ika i Marica predstavljaju potencijalno brzo dostupne ciljeve. Budući radovi trebali bi dati prioritet detaljnoj karakterizaciji najviše rangiranih zamki u akviferima i EPU-ima, uključujući procjenu kvalitete ležišta, validaciju izolatora, analizu rasjeda, studije upravljanja tlakom i dinamičku simulaciju. Posebnu pozornost treba posvetiti naslijeđenim bušotinama, migraciji oblaka i smanjenju nesigurnosti kroz geološko modeliranje veće razlučivosti. Sveukupno, hrvatski odobalni sektor predstavlja strateški važan dio budućeg CCS portfelja zemlje. S velikim teorijskim kapacitetom skladištenja, postojećom infrastrukturuom i snažnom usklađenošću s europskim inicijativama za dekarbonizaciju, Jadranski bazen je u mogućnosti podržati ciljeve Hrvatske i šire regije za smanjenje emisija.