

Procjena teoretskog kapaciteta uskladištenja CO2 u iscrpljenim plinskim ležištima polja Žutica

Validžić, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:343309>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij geološkog inženjerstva

**PROCJENA TEORETSKOG KAPACITETA USKLADIŠTENJA CO₂ U
ISCRPLJENIM PLINSKIM LEŽIŠTIMA POLJA ŽUTICA**

Završni rad

Marin Validžić

G- 2191

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/21-01/92
URBROJ: 251-70-14-21-2
U Zagrebu, 9.9.2021.

Marin Validžić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/92, URBROJ: 251-70-14-21-1 od 20.4.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

PROCJENA TEORETSKOG KAPACITETA USKLADIŠTENJA CO₂ U ISCRPLJENIM PLINSKIM LEŽIŠTIMA POLJA ŽUTICA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv. prof. dr. sc. Bruno Saftić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Bruno Saftić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko
Ružičić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i
studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

**PROCJENA TEORETSKOG KAPACITETA USKLADIŠTENJA CO₂ U ISCRPLJENIM PLINSKIM
LEŽIŠTIMA POLJA ŽUTICA**

Marin Validžić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Procjena kapaciteta uskladištenja CO₂ u središnjem dijelu Savske depresije, na području naftno-plinskog polja Žutica provedena je na temelju podataka iz 70 dubokih bušotina pojednostavljenom metodom – konstrukcijom karata izopaha pomoću GIS softvera QGIS. Prvo je izračunat ukupni volumen kolektorskih stijena – pontskih pješčenjaka Poljana A₁₋₃ i zatim ukupni volumen pora u ležištu, a na kraju kapacitet uskladištenja CO₂. Za izračun kapaciteta bilo je potrebno procijeniti koeficijent uskladištenja. U nedostatku preciznijih podataka o svojstvima ležišta to je učinjeno korištenjem dvaju koeficijenata uskladištenja – 40% u slučaju da su već sve pore ispunjene slojnom vodom i 70% u slučaju da ležište A₁₋₃ tretiramo kao jedno prosječno iscrpljeno plinsko ležište s padom tlaka na kraju proizvodnje. Ugljični dioksid se u podzemlje utiskuje u nadkritičnom stanju koje se postiže na dubinama većim od 750 m. Konstrukcijom karata izobata određena je krovinska granica podzemnog skladišta CO₂, koje se nalazi u antiklinali na jugoistočnom dijelu polja Žutica, na relativnoj dubini od 1660 m koja je i više nego dovoljna da utisnuti CO₂ bude u nadkritičnom stanju. Dobivene vrijednosti u oba slučaja uzetog koeficijenta uskladištenja su realne i dovoljno velike za planiranje investicije u izgradnju podzemnog skladišta ugljika u pješčenjacima Poljana, ali treba imati na umu da na ovaj način dobiveni podaci nisu najprecizniji. Za preciznije procjene bilo bi potrebno napraviti detaljni geološki model u specijalističkom softveru koji uključuje poznavanje još brojnih drugih svojstava i o kolektorskim i o izolatorskim stijenama.

Ključne riječi: CO₂, geološko uskladištenje ugljičnoga dioksida, Savska depresija, pješčenjaci Poljana, koeficijent uskladištenja

Završni rad sadrži: 26 stranica, 8 slika, 8 priloga, 27 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko naftnog fakulteta,

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Izv.prof.dr.sc. Bruno Saftić
Ocjenjivači: Izv.prof.dr.sc. Bruno Saftić
Doc.dr.sc Iva Kolenković Močilac
Izv.prof.dr.sc Marko Cvetković

Datum obrane: 16.rujan.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. GEOLOŠKE ZNAČAJKE SAVSKE DEPRESIJE.....	3
2.1. Stratigrafska obilježja.....	3
2.1.1. Neogen.....	4
2.1.1.1. Stariji miocen.....	4
2.1.1.2. Srednji miocen.....	5
2.1.1.3. Mlađi miocen i pliocen.....	6
2.1.2. Kvartar.....	6
2.2. Strukturna obilježja.....	6
3. METODE GEOLOŠKOG SKLADIŠTENJA CO₂.....	9
3.1. Skladištenje CO ₂ u iscrpljenim naftnim ili plinskim ležištima.....	12
4. OPIS REZULTATA.....	14
4.1. Geološki model podzemnog skladišta ugljika prikazan na kartama relativne dubine i kartama izopaha.....	14
4.2. Izračun volumena kolektorskih stijena koje čine podzemno skladište CO ₂	15
4.3. Izračun teoretskog kapaciteta uskladištenja CO ₂ u sloju A ₁₋₃ na polju Žutica.....	19
5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK.....	22
6. POPIS LITERATURE.....	24
6.1. Objavljeni radovi.....	24
6.2. Neobjavljeni radovi.....	25
6.3. Web izvori.....	26

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Karta lokacija.....	3
Slika 2.2. Stratigrafski stup Savske depresije.....	4
Slika 2.3. Poprečni geološki profil Savske depresije.....	7
Slika 3.1. Mogućnost geološkog skladištenja ugljika.....	10
Slika 3.2. Dijagram ovisnosti gustoće CO ₂ o tlaku i temperaturi.....	12
Slika 4.1. Naredba „Smooth“.....	14
Slika 4.2. Korelacijski dijagram.....	15
Slika 4.3. Usporedba građe i svojstava pješčenjaka i krivulje SP za GIS A ₁₋₃	20

POPIS PRILOGA

PRILOG 1 – Karta lokacija

PRILOG 2 – Karta ukupne debljine slojeva pješčenjaka A₁₋₃

PRILOG 3 – Karta relativne dubine EK-markera D4

PRILOG 4 – Karta relativne dubine podinske plohe pješčenjaka A₁₋₃

PRILOG 5 – Karta debljine od kontakta CO₂-voda do krovinske plohe pješčenjaka

PRILOG 6 – Karta debljine od kontakta CO₂-voda do podinske plohe pješčenjaka

PRILOG 7 – Profil A – B

PRILOG 8–Tablica izračuna volumena kolektorskih stijena koje čine podzemno skladište CO₂

1. Uvod

Danas je u svijetu općepoznato da ljudske aktivnosti ometaju ciklus kruženja ugljika na Zemlji, na način da svojom aktivnošću neprekidno povećavaju koncentraciju ugljičnog dioksida u atmosferi koja je intenzivno počela rasti nakon početka industrijske revolucije, a raste i dalje. Izgaranje fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin) za proizvodnju energije, industriju, grijanje i transport je značajni uzročnik povećanja količine CO₂ u atmosferi. Ugljični dioksid, uz ostale stakleničke plinove, jedan je od uzroka koji dovodi do sve izraženijih klimatskih promjena, tako da zadržava dio Sunčeve topline i na taj način uzrokuje zagrijavanje Zemljine površine. Usto, povećanje temperature uslijed zagrijavanja povećat će globalnu razinu mora, doći će i do povećanja učestalosti i intenziteta požara, poplava, suša i tropskih oluja, promjena u količini i distribuciji kiša, acidifikacije oceana i posljedičnog masovnog izumiranja biljnih i životinjskih vrsta.

U predindustrijsko doba koncentracija CO₂ iznosila je 280 ppm-a, dok je danas pozornim monitoringom utvrđena vrijednost od 413 ppm-a u atmosferi (<https://www.co2.earth/daily-co2>), a to je itekako značajan porast koji zahtjeva radikalni zahvat kako i ova sada već zabrinjujuća vrijednost ne bi narasla iznad kritične razine od 450 ppm. Svjetski stručnjaci se slažu da iznad te razine možda više neće biti moguće ublažiti i/ili spriječiti najdrastičnije posljedice.

Najviše se električne energije dobiva korištenjem neobnovljivih izvora, i to prvenstveno fosilnih goriva i nuklearne fisije, a čovječanstvo je uveliko ovisno upravo o takvom načinu proizvodnje, te još uvijek nije u potpunosti spremno za potpuni prelazak na obnovljive izvore energije. Prelazak na izvore energije koji ne štete okolišu bit će dug i financijski zahtjevan, stoga je potrebno prijelazno rješenje koje će pomoći smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima, a prvi bi korak trebao biti korištenje ovih sirovina na način da ne zagađujemo okoliš. Tim će se postupkom osigurati dovoljno vremena za razvoj tehnologije i infrastrukture za obnovljive izvore energije. Jedna od takvih opcija je sustav u kojem bi se ugljik koji je izvorno izvađen iz podzemlja u obliku plina, nafte i ugljena ponovno tamo vratio u obliku CO₂. Podzemna skladišta već postoje, ona nisu ljudski izum nego su prirodne strukture, a očituju se u ležištima plina, nafte i ugljena.

U ovom radu provedena su istraživanja na području polja Žutica, koje se nalazi u Savskoj depresiji, radi određivanja kapaciteta geološkog uskladištenja ugljičnog dioksida u kolektorske stijene – slojeve pontskih pješčenjaka Poljana. U tu svrhu korišteni su podaci iz

70 dubokih istraživačkih bušotina, na temelju kojih je određena ukupna debljina slojeva pješčenjaka, relativna dubina njihove krovinske i podinske plohe u obliku karata, te volumen podzemnog skladišta u čije pore će se uskladištiti ugljik.

Karte su napravljene u besplatnom GIS softveru QGIS, dok je sav izračun proveden u Microsoft Office Excel 2016.

2. Geološke značajke Savske depresije

Područje Savske depresije nalazi se u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena, ograničenog Alpskim masivom, Karpatima i Dinaridima (Slika 2.1). Panonski bazen se počeo formirati tijekom miocena, prije 17,5 do 20 milijuna godina, raspadom Parathetysa na niz manjih bazena, te u geotektonskom smislu Panonski bazenski sustav obuhvaća najveći dio nekadašnjeg centralnog Parathetysa (BUCKOVIĆ, 2006). Savska depresija je najvećim dijelom ispunjena klastičnim sedimentima neogenske i kvartarne starosti, dok predtercijarnu podlogu čini magmatsko-metamorfni i manjim dijelom sedimentni kompleks stijena paleozojske, mezozojske i paleogenske starosti.



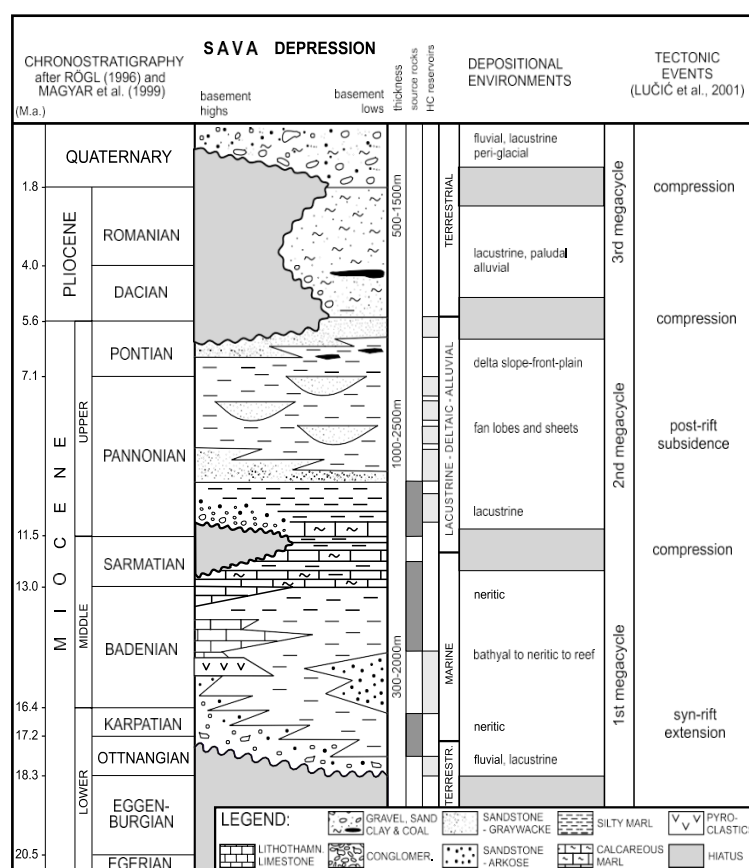
Slika 2.1. Karta lokacije (<https://www.azu.hr/istra%C5%BEivanje-i-eksploatacija/geolo%C5%A1ki-pregled-kopna/>)

2.1. Stratigrafska obilježja

Savsku depresiju ispunjavaju sedimentne stijene s ponešto vulkanoklastita neogenske i kvartarne starosti koje naliježu na podlogu bazena te tako čine sedimentni slijed čija debljina u Savskoj depresiji doseže 5000 m (SAFTIĆ et al., 2003). Najstarije naslage

pripadaju egenburškim paraličkim i marinskim sedimentima, koje nisu razvijene na širem području depresije, nego samo na zapadnim graničnim dijelovima Panonskog bazena i stoga nisu prikazane na stratigrafskom stupu Savske depresije (Slika 2.2.). Većina sedimentnog slijeda akumulirana je u depresijama koje su međusobno odijeljene izdignutim i djelomično erodiranim tektonskim jedinicama.

Slika 2.2. prikazuje geološki stup Savske depresije s kronostratigrafskim i litostratigrafskim jedinicama, odnosno međusobni odnos članova i formacija u Savskoj depresiji (SAFTIĆ et al., 2003), a označeni su i prevladavajući taložni okoliši, te faze tektonskih promjena.



Slika 2.2. Stratigrafski stup Savske depresije (SAFTIĆ et al., 2003).

2.1.1. Neogen

2.1.1.1. Stariji miocen

U Savskoj depresiji su, prema podacima iz geoloških istraživanja, kao najstarije naslage utvrđene egenburške naslage koje se sastoje od pješčenjaka s tufovima, proslojenih

sa šljunkovitim pješčenjacima i laporima te glinama. Za egenburške naslage se pretpostavlja da ukazuju na lokalnu ingresiju u ranom miocenu, a starost im je određena prema fosilima školjaka, foraminifera i pelagičkih mikrogastropoda (LUČIĆ et al., 2001).

Otnang je karakteriziran taloženjem naslaga u prijelaznim okolišima, u marinsko-brakičnim i slatkovodnim uvjetima. Nalazak molasnih sedimentata upućuje na početak otvaranja sedimentacijskog prostora (LUČIĆ et al., 2001), te na povremene prodore mora u slatkovodnu sredinu, stoga su već u mlađem otnangu prisutni jezerski klastiti: siltiti, lapori, pješčenjaci, konglomerati, te rjeđe vapnenci i piroklastiti (BUCKOVIĆ, 2006).

Karpatske naslage dokaz su prodora mora te razvoja marinske sedimentacije (LUČIĆ et al., 2001). Tijekom karpata vulkanska aktivnost je bila pojačana, a dokaz toga su tufovi kiselog sastava, te glinoviti i pjeskoviti lapori proslojeni s tufovima.

2.1.1.2. Srednji miocen

Donjobadenske naslage taložene su u kontinentalnom/slatkovodnom okolišu, dok je srednji baden marinskog karaktera, gdje su se u plićim okolišima taložili krupnozrnati pješčenjaci, konglomerati i litotamnijski vapnenci, a u dubljevodnim dijelovima lapori, te u najdubljim turbiditi (ĆORIĆ et al., 2009). Kasnobadenska tektonska aktivnost, promijenila je paleoreljef i naslage su postale još heterogenije. Određena područja su izdignuta iznad morske razine i djelomično snažno erodirana, dok su drugi dijelovi podvrgnuti marinskoj transgresiji koja je uzrokovala taloženje naslaga u kojima su najviše zastupljeni litotamnijski vapnenci i biokalkareniti, pogotovo u rubnim dijelovima sedimentacijskog bazena, te konglomerati, breče i pješčenjaci. Istovremeno su se opet taložili turbiditi sa pjeskovitim i glinovitim laporima u dubljim dijelovima bazena (LUČIĆ et al., 2001).

Sarmatske naslage su tanke, te su nastale u vrijeme regresije i jačanja terestičkog utjecaja. Konkordantno nalježu na badenske. Litološki su dosta heterogene i uglavnom se sastoje od tankoslojevitih glinovitih vapnenaca, pješčenjaka i listićavih dijatomejskih lapora (LUČIĆ et al., 2001).

2.1.1.3. Mlađi miocen i pliocen

Tijekom panona se marinski prostor postupno oslađivao, tako da su se taložile brakične i slatkovodne naslage bogate fosilnim sadržajem, a upravo zbog tako bogate faune

donjopanonske naslage dobile su ime prema pužu *Radix croatica*, stoga ih nazivamo Croatica-naslage, dok su gornjopanonske su nazvane prema školjci *Congeria banatica*, pa ih prema tome zovemo Banatica-naslage. Croatica-naslage se sastoje od vapnenaca, glinovitih vapnenaca, konglomerata i pijesaka (LUČIĆ et al., 2001), a brakični lapori, pijesci i pješčenjaci izgrađuju Banatica-naslage.

Pontske naslage prekrivaju široko područje, a upravo su donjopontske naslage poznate po brojnim naftnim i plinskim ležištima. Izgrađene su od sivih sitnozrnatih pješčenjaka i glinovitih i siltnih lapora koje nazivamo Abichi-naslagama prema školjki *Paradacna abichi* (SAFTIĆ, 1998). Gornjopontske naslage raširenije su od donjopontskih, te ih nazivamo Rhomboidea-naslagama po školjki *Congeria rhomboidea*. Sastoje se od pješčenjaka i pijesaka, te pjeskovitih i glinovitih lapora sa slojevima ugljena i konkordantno naliežu na starije naslage (SAFTIĆ, 1998).

U pliocenu se Panonski bazen raspao na niz manjih bazena na što upućuju fluvijalno-limnički i proluvijalni sedimenti. Pliocenske naslage izgrađene su od glina i tanko laminiranih pijesaka s proslojcima ugljena (lignita), te su poznate i pod nazivom Paludinske naslage (po slatkovodnom pužu *Paludina*) (BUCKOVIĆ, 2006).

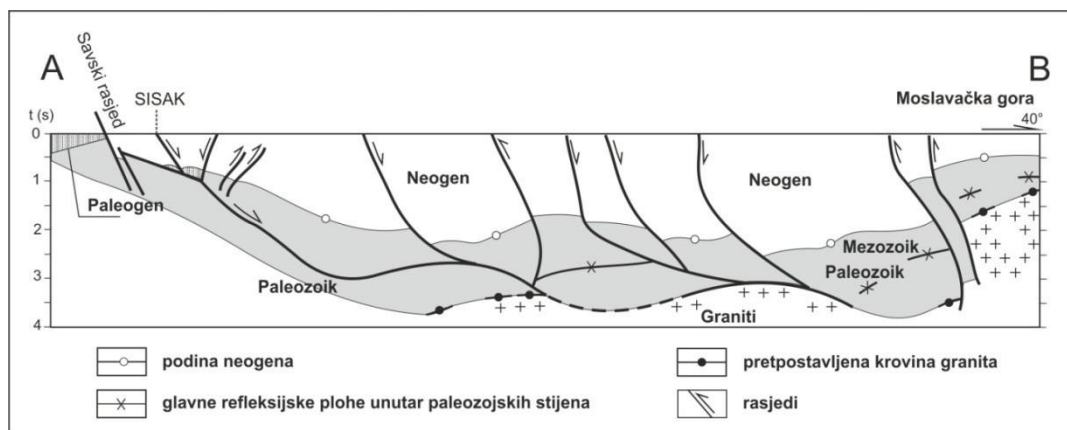
2.1.2. Kvartar

Pleistocenske i holocenske naslage nastale su u uvjetima povremenog isušivanja i izravnog utjecaja erozijskih i denudacijskih procesa. Pleistocenske naslage tvore pet osnovnih litotipova – šljunci, pijesci, prapor, prahovi i gline. Najveći dio naslaga nastao je u močvarnim okolišima, od tzv. močvarnog lesa do pjeskovitih glina (SAFTIĆ, 1998). Holocenske naslage karakterizirane su šljuncima, pjeskovitim šljuncima i glinama, te predstavljaju savske nanose taložene u uvjetima tople klime, tzv. Savske šljunke.

2.2. Strukturna obilježja

Prema LUČIĆ i dr. (2001), strukturni odnosi koji su posljedica otvaranja Savske depresije započeli su se razvijati u razdoblju oligocen-donji miocen, nastavili su se kroz glavnu ekstenziju u razdoblju egenburg-baden, zatim se od sarmata do ponts glavna

ekstenzija počinje pomalo završavati, a neotektonska faza u pliocenu i kvartaru karakterizirana je sasvim novim strukturnim deformacijama. Glavne strukturne jedinice orijentirane SZ–JI odsječene su mlađim rasjedima sa smjerom pružanja SI–JZ . Rasjedi su većinom normalnog karaktera, ali postoje i reverzni čiji je rasjedni karakter izmijenjen recentnim tektonskim događajima (SAFTIĆ et al., 2003). Savska depresija kao cjelovita strukturna jedinica formira se u vrijeme mlađeg miocena (PRELOGOVIĆ et al., 1998). U Panonu je prestala subdukcija u Vanjskim Karpatima te je počelo termalno spuštanje kore u Panonskom bazenu (PRELOGOVIĆ et al., 1998) praćeno taloženjem velikih količina gornjomiocenskih sedimenata. Tijekom pliocena i kvartara orijentacija regionalnog stresa mijenja se na S–J , dolazi do izražene kompresije (transpresije) na području između velikih rasjeda s horizontalnim pomakom (PRELOGOVIĆ et al., 1998). Talože se jezerske, močvarne, riječne i eolske naslage. Na profilu A-B prikazani su regionalni strukturni odnosi unutar Savske depresije (Slika 2.3.), rekonstruirani na temelju regionalnih seizmičkih mjerenja.



Slika 2.3. Poprečni geološki profil Savske depresije (preuzeto iz KOLENKOVIĆ, 2012, modificirano prema PRELOGOVIĆ et al., 1998)

U najmlađoj tektonskoj fazi, tijekom transpresije došlo je do završnog oblikovanja struktura u podzemlju, pa su tada konačno formirane i strukturne zamke za ugljikovodike. One se u Savskoj depresiji u pravilu nalaze nedaleko od trasa rubnih uzdužnih rasjeda koji se pružaju smjerom SZ–JI i po kojima je uz naprezanje S–J došlo do desnoga pomaka tektonskih blokova. U tim blokovima stvoreni su nizovi kratkih „en-echelon“ bora pružanja

I–Z, a njihove više ili manje rasjednute antiklinale tvore većinu naftnih i plinskih polja u Savskoj depresiji (osebna komunikacija B. Saftić).

Jedno od takvih polja je i polje Žutica koje sadrži do 14 različitih gornjomiocenskih slojeva pješčenjaka zasićenih ili naftom ili plinom, a ima oblik dvije antiklinale i jednoga strukturnog sedla između njih. Donjopontski slojevi, koji se operativno nazivaju „A-serija“ sadrže od najplićih prema najdubljim ove slojeve pješčenjaka: A', A, A₁₋₃, A₄, A₅ i Z. Najdublja tri sloja su beznačajna, nalaze se na samo nekoliko bušotina, a sloj Z je jedini zasićen naftom. Sva ostala ležišta A-serije otkrivena su u plinskom zasićenju i danas su iscrpljena (SAFTIĆ, 1993). Polje je bilo otkriveno još 1964. godine i razrada je bila dovršena tijekom 1970-tih. U svojoj punoj proizvodnji bilo je nekoliko puta najveće proizvodno polje u Hrvatskoj, a i danas je najveće po godišnjoj proizvodnji nafte. Trenutno se na sjevernim dijelu polja Žutica i na susjednom polju Ivanić provodi projekt utiskivanja CO₂ radi povećanja iscrpka nafte (CO₂-EOR projekt Ivanić). Planira se po završetku ove faze sva ležišta na spomenuta dva polja konvertirati u podzemna skladišta ugljika, ali te godine su još dosta daleko. Iscrpljena plinska ležišta na južnoj antiklinali polja Žutica nemaju izravno veze sa spomenutim EOR projektom. Njihovi stari podaci iz magistarskog rada (SAFTIĆ, 1993) ovdje se koriste isključivo za testiranje metode izračuna kapaciteta uskladištenja.

3. Metode geološkog skladištenja CO₂

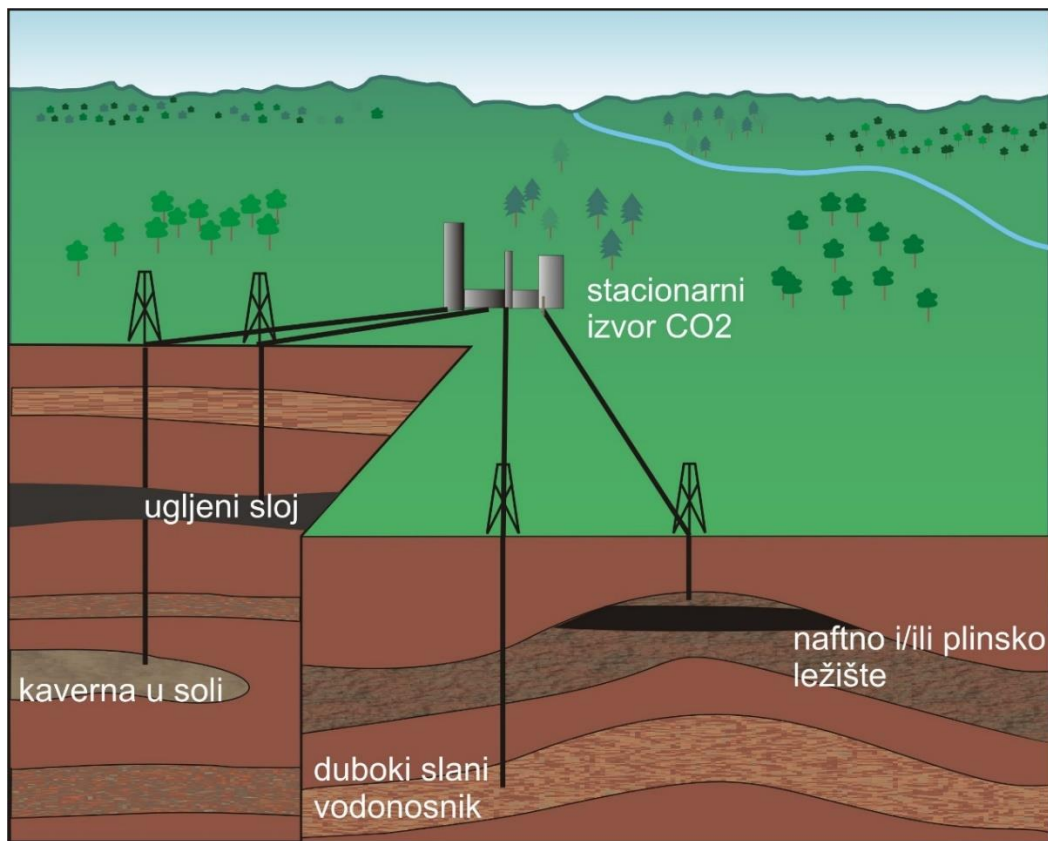
Značajne količine CO₂ nastaju u geosferi, a uzrok njihova nastanka je otplinjavanje magme koje je posljedica pada tlaka pri migraciji magme prema površini (HOLLOWAY et al., 2007). Većina tako nastalog CO₂ izlazi u atmosferu kroz vulkane ili hidrotermalne izvore, no dio može duž rasjeda migrirati u sedimentne bazene i tamo se akumulirati u podzemlju (BAINES & WORDEN, 2004). Ugljični dioksid može nastati i unutar sedimentnih bazena i to procesom metamorfoze karbonatnih stijena, najčešće uslijed kontakta s intruzijama magme ili u zonama subdukcije, te termalnom alteracijom ugljena i organske tvari, biodegradacijom nafte i prirodnog plina i otapanjem karbonatnih stijena (WYCHERLEY et al., 1999; HOLLOWAY et al., 2007).

Kombinacijom ovih procesa u podzemlju nastaju prirodna ležišta ugljičnog dioksida. Ona su dokaz da je trajno uskladištenje moguće ostvariti u odgovarajućim stijenama, koje postoje u cijelom svijetu i pružaju dovoljan kapacitet kako bi se ostvario značajan doprinos u ublažavanju klimatskih promjena. Prema posebnom izvješću IPCC-a (2005) i u svim kasnijim dokumentima dostupnim na internetu (npr. IPCC, 2018), geološko uskladištenje ugljika duboko u podzemlju pruža trajno rješenje za smanjenje količine ugljičnog dioksida koja se ispušta u atmosferu. Koncept kaptiranja i geološkog skladištenja ugljika je takav da se CO₂ izdvaja iz dimnih plinova na velikim stacionarnim izvorima (npr. termoelektranama, rafinerijama, postrojenjima za pročišćavanje prirodnog plina), sigurno transportira cjevovodima ili brodovima od izvora do mjesta uskladištenja, te na kraju utiskuje u duboko smještene porozne i propusne stijene (KOLENKOVIĆ & SAFTIĆ, 2012).

Koncept geološkog skladištenja ugljika temelji se na dvije činjenice. Prvo, CO₂ je već prisutan u podzemlju na raznim mjestima u Zemljinoj kori, gdje se nalaze prirodna ležišta čistog CO₂ ili pomiješanog s ugljikovodicima i drugim plinovima. Ove akumulacije nastale su izdvajanjem plina uslijed djelovanja polaganih procesa u geološkoj prošlosti i postoje već milijunima godina. To znači da se ugljični dioksid zadržao u podzemlju tijekom geološkog vremena koje je neusporedivo duže od ičega što čovječanstvo može izgraditi. Zato postoji mogućnost definiranja uvjeta u podzemlju u kojima će se moći prirodne procese vezanja ugljika u podzemne zamke iskoristiti za trajno uskladištenje antropogenog CO₂. Druga važna činjenica je da se podzemlje već dugo istražuje i iskorištava, prvenstveno u sklopu naftnogeoloških istraživanja, tako da već postoji metodologija i oprema za istraživanje geološke građe u dubini, a naravno i odgovarajuće znanje za tehničke operacije

transporta i utiskivanja u podzemlje. Potrebno je samo usavršiti metodologiju za iskorištavanje geološkog prostora u ovu svrhu i osigurati stabilne ekonomske uvjete za razvoj ove nove industrije (KOLENKOVIĆ & SAFTIĆ, 2012).

Ugljik je moguće uskladištiti u razne tipove sedimentnih bazena u podzemlju, a to su iscrpljena naftna i plinska ležišta, naftna ležišta u proizvodnji (operacije povećanja iscrpka primjenom ugljičnog dioksida kao istiskujućeg fluida), slojevi ugljena (često povezani uz crpljenje metana), te slani vodonosnici. Osim toga, ugljik se može skladištiti i u kaverne u soli, unutar bazalta s razvijenom pukotinskom poroznošću, te u šejlove bogate organskom tvari (Slika 3.1.).

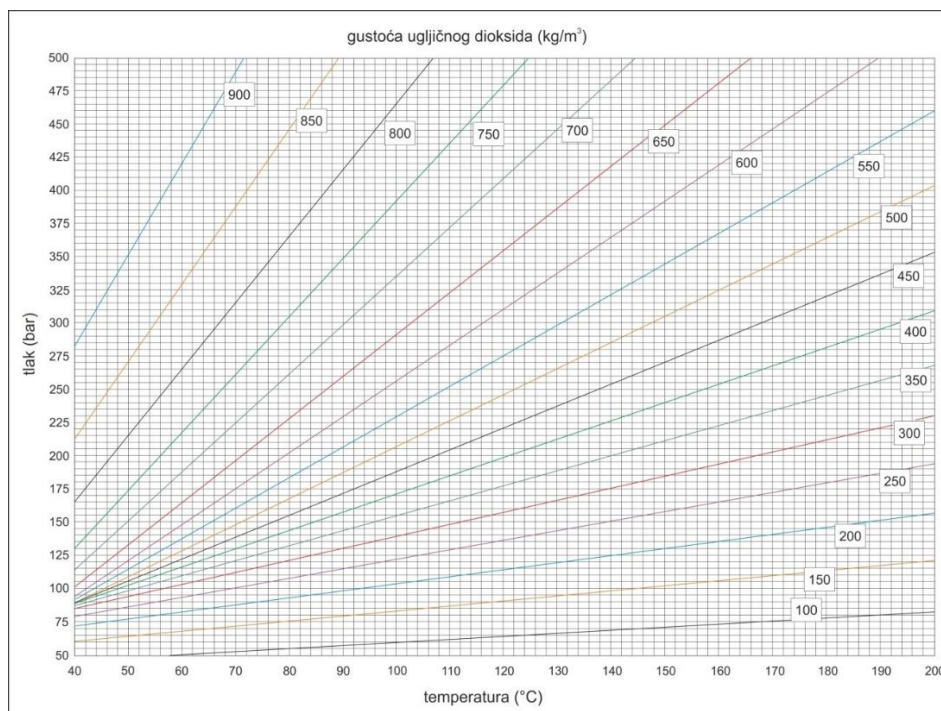


Slika 3.1. Mogućnosti geološkog skladištenja ugljika (KOLENKOVIĆ, 2012, modificirano prema BACHU-u, 2003)

Niz kriterija je potrebno razmotriti pri odabiru lokacije pogodne za izgradnju podzemnog skladišta ugljika. Ona moraju biti dostatnog kapaciteta i injektibilnosti, biti prekrivene debelim nepropusnim pokrovnim naslagama, te smještene u tektonski stabilnom području. Svakako treba uzeti u obzir geološke, hidrodinamičke i geotermalne kriterije, kao i naftonosni potencijal i stupanj istraženosti bazena, te ekonomske, društvene i političke

kriterije. Na području aktivnih orogenetskih područja nije moguće provesti uskladištenje ugljika, zato jer su ona intenzivno borana i rasjedana. Također, neprikladna su i područja štitova, jer su izgrađena od kristalinskih stijena u kojima izostaju kolektorske stijene, koje bi mogle zaprimiti CO₂. Izuzetak bi u tim područjima bile bazaltne stijene s razvijenom pukotinskom poroznošću. Po svemu navedenom može se zaključiti da su za skladištenje CO₂ najpogodniji sedimentni bazeni, jer su najvećim dijelom ispunjeni slojevima poroznih i propusnih stijena. (IPCC, 2005; BACHU, 2000)

Neizostavni kriteriji su termički gradijent i gradijent tlaka, jer o njima ovisi dubina slojeva ležišnih stijena koji će se razmatrati kao potencijalna podzemna skladišta. Ugljični dioksid se u podzemlje utiskuje u nadkritičnom stanju, jer je cilj da se što bolje iskoristi porni prostor, ali i iz sigurnosnih razloga, a upravo u nadkritičnom stanju ugljičnom dioksidu je značajno povišena gustoća, te se zbog manje razlike u gustoći ugljičnog dioksida i vode smanjuje i djelovanje sile uzgona. Kritični tlak iznosi približno 74 bara, a kritična temperatura oko 31°C (304,15 K). Pretpostavi li se hidrostatski gradijent tlaka (aproksimirana vrijednost 10 bar/100 m), kritični tlak se dostiže na dubini većoj od 750 m, pa se ta dubina uzima za gornju dubinsku granicu podzemnih skladišta ugljika (SPAN & WAGNER, 1996). Uz pretpostavku da je gradijent tlaka jednak, utiskivanje je povoljnije vršiti u bazene s nižim geotermalnim gradijentom, jer će u slučaju ako temperatura poraste iznad kritične temperature, za isti tlak, gustoća CO₂ biti niža, kako je prikazano na dijagramu ovisnosti gustoće ugljičnog dioksida o tlaku i temperaturi (Slika 3.2).



Slika 3.2. Dijagram ovisnost gustoće CO₂ o tlaku i temperaturi (VULIN, 2010, prema SPAN & WAGNER, 1996)

3.1. Skladištenje CO₂ u iscrpljenim naftnim ili plinskim ležištima

Ova metoda skladištenja se danas rjeđe koristi, budući da cijene energenta na svjetskom tržištu utječu na to da se više primjenjuje metoda za povećanje iscrpka, jer na taj način ležišta duže ostaju u proizvodnji. Bez obzira na to metoda skladištenja CO₂ u iscrpljenim naftnim/plinskim ležištima ima značajnu ulogu i odlikuje se svojim prednostima, a to su veliki kapacitet uskladištenja i njihova detaljna istraženost, od poznavanja građe ležišta i sastava stijena do njihovih petrofizikalnih značajki. Značajna prednost je i u tome što u nekima od tih ležišta, tijekom crpljenja nafte i/ili prirodnog plina, dolazi do sniženja tlaka, što je vrlo važno s aspekta sigurnosti i kapaciteta. Naime, utiskivanje CO₂ u kolektorske stijene uzrokuje značajan porast tlaka u blizini utisne bušotine, a polje tlaka se, ovisno o propusnosti kolektorske stijene, širi u prostoru. U takvim ležištima inicijalni tlak je snižen uslijed proizvodnje, te se očekuje da porast tlaka pri utiskivanju neće biti tako drastičan. Ipak, važno je uzeti u obzir da se danas ležišta tijekom sekundarne faze proizvodnje najčešće zavodnjavaju čime se smanjuje učinak sniženja tlaka, kao i da se ispod ležišta u pravilu nalazi veliki vodonosnik pa je pad tlaka uslijed proizvodnje ugljikovodika

umanjen dotokom vode u ležište istovremeno s crpljenjem ugljikovodika (KOLENKOVIĆ & SAFTIĆ, 2012).

Najpovoljnija ležišta za izgradnju podzemnih skladišta CO₂ su iscrpljena plinska polja u koje nije bilo značajnog dotoka slojne vode, pa je tlak značajno snižen u odnosu na inicijalni. Naravno, postoje i nepovoljne strane korištenja iscrpljenih ležišta i one se očituje u opasnosti od ispuštanja CO₂ iz podzemnog skladišta. Naime, veliki broj istraživačkih i proizvodnih bušotina predstavlja potencijalne putove migracije ugljičnog dioksida iz ležišta prema plićim propusnim stijenama ili površini (KOLENKOVIĆ & SAFTIĆ, 2012).

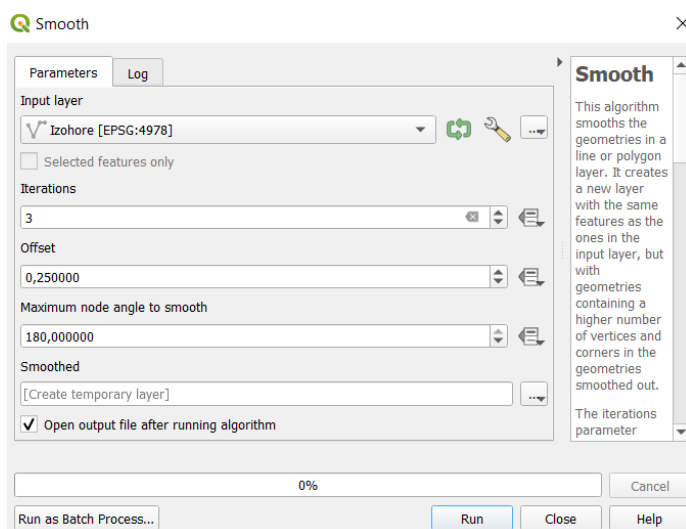
Ukupni procijenjeni kapacitet u ležištima na 17 polja (18 ako se posebno računa Žutica kao plinsko polje i kao naftno polje) u Republici Hrvatskoj iznosi 188,83 Mt (EU GEOCAPACITY, 2009). Važno je reći da su sva ležišta još u proizvodnji, a procijenjeni kapacitet se odnosi na količinu ugljičnog dioksida koja bi se u tim ležištima teoretski mogla uskladištiti nakon što završi proizvodnja ugljikovodika.

4. Opis rezultata

Rezultati prikazani su profilima radi korelacije i kartama na kojima je ocrтана građa odabranog ležišta u podzemlju.

Karta lokacija (Prilog 1) prikazuje oznake bušotina i njihov položaj na području polja Žutica. Na karti se nalazi 71 bušotina, 70 od njih je korišteno za izradu karata, dok je jedna od njih, bušotina sa oznakom Zu-158, poslužila za uzimanje podataka o poroznosti stijena koja su utvrđena tijekom prijašnjih istraživanja, te su objavljena u magistarskom radu (SAFTIĆ, 1993). Karta ima mjerilo M 1:30.000, a tako i sve ostale karte (Prilozi 2 do 6).

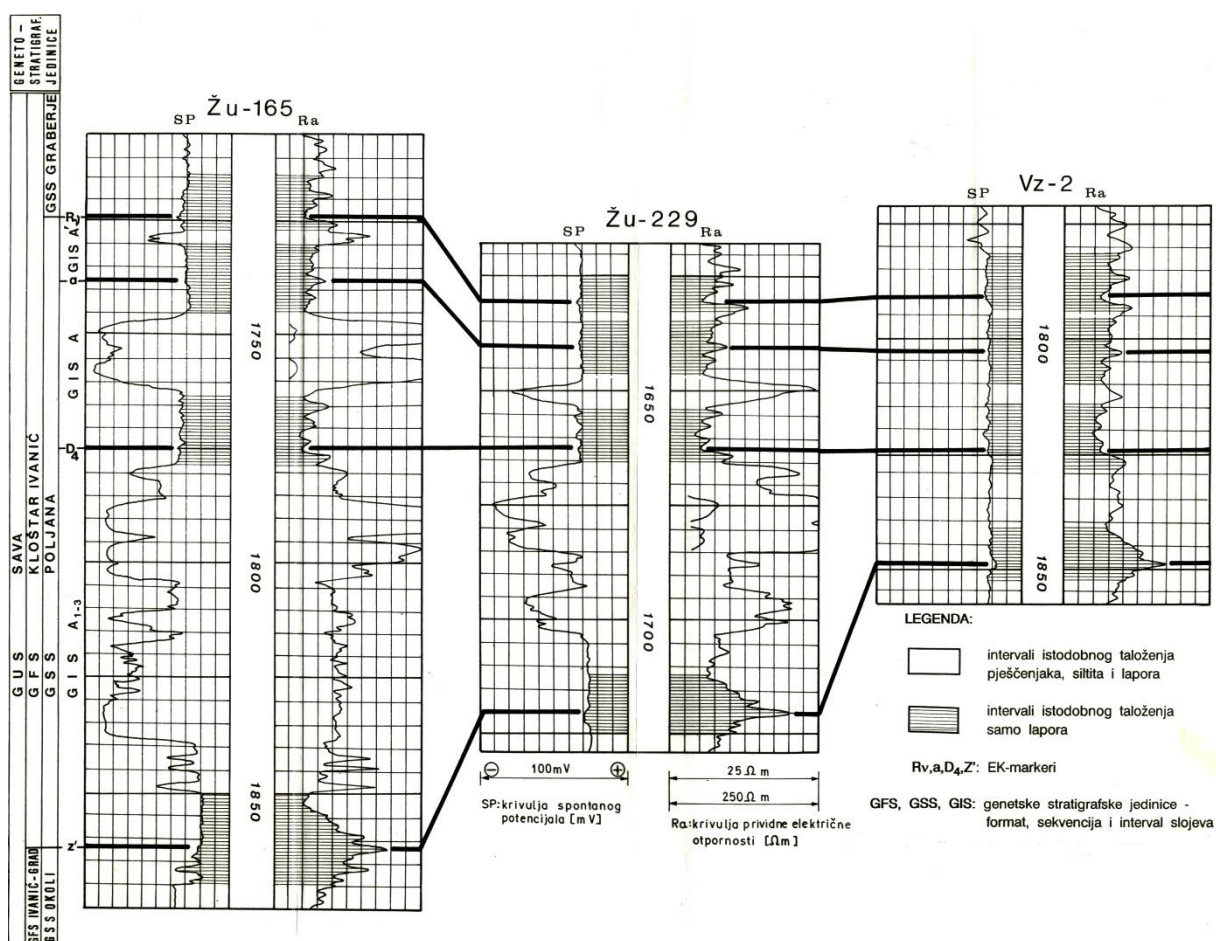
Karte su konstruirane pomoću besplatnog GIS softvera QGIS (<https://www.qgis.org/en/site/>) u kojem je moguće napraviti i karte izolinija. Softver radi karte postupkom jednostavne linearne triangulacije tako da između svake tri bušotine postavlja ravninu čiji nagib ovisi o odnosima kartiranih vrijednosti, što stvara izrazito uglate linije. Prvo je konstruirana karta ukupne debljine slojeva pješčenjaka (Prilog 2) na kojoj je linearna promjena debljine sloja prikazana bojama, a kasnije su u istome softveru napravljene zaobljene izolinije koje realnije ocrtavaju oblik sloja. Isti postupak je ponovljen za sve karte. Zaobljene izolinije su se dobile opcijom „Smooth“ tako da se u prozor „Input layer“ postavio vektorski sloj prema kojem će softver vršiti zaglađivanje izolinija. U prozoru „Iterations“ postavljena je vrijednost 3, veća vrijednost znači veći stupanj zaglađivanja izolinije. Korišten je i parametar „Offset“, a on kontrolira koliko zaglađene izolinije prate izvorne, dok je parametar „Maximum node angle to smooth“ ostao izvorno zadan (Slika 4.1.).



Slika 4.1. Naredba „Smooth“

4.1. Geološki model podzemnog skladišta ugljika prikazan na kartama relativne dubine i kartama izopaha

Slojevi gornjopontskih pješčenjaka na području polja Žutica sastoje se od tri jedinice (Slika 4.2.). Dva plića sloja, unutar GIS A' i GIS A, nisu razvijena na cijelom području polja. Sloj A' isklinjava na sjevernom i sjeveroistočnom dijelu, a sloj A na vrhu južne antiklinale. Jedino sloj A₁₋₃ se nalazi na cijelom području istraživanja i tvori jednu cjelinu pa je on odabran za procjenu kapaciteta uskladištenja CO₂.



Slika 4.2. Korelacijski dijagram (SAFTIĆ B., KOLENKOVIĆ I.: Upute za izradu 2. programa iz Geologije fosilnih goriva. 6 str.)

Na karti ukupne debljine pješčenjaka A₁₋₃ (Prilog 2) se može vidjeti da je sloj najdeblji na zapadnoj strani gdje doseže debljinu iznad 100 m, a isto je tako i duž jugozapadnoga krila južne antiklinale. Na tjemenu te antiklinale debljina je najmanja, ispod

20 m, a tako je i u području Hrastilnice, sjeveroistočno od samog polja. Također je važno uočiti da se na temelju podataka iz odabranih 70 bušotina debljina sloja A_{1-3} može sasvim dobro kartirati. Ako bismo gledali samo na ovu kartu, najveći kapacitet uskladištenja nalazio bi se u njenome središtu, u jednom izduženom području koje se pruža smjerom SZ–JI između sjeverne i južne antiklinale jer je tamo debljina uglavnom uvijek veća od 70 m. Međutim, to nije dovoljno kao ulazna vrijednost. Sama debljina kolektorskih stijena bila bi dovoljna za regionalne procjene, a u ovom slučaju se radi o jednoj strukturi u podzemlju te je bilo potrebno konstruirati sljedeću kartu.

Karta relativne dubine EK-markera D4 (Prilog 3) označava relativnu dubinu tog korelacijskog horizonta, koji se nalazi u neposrednoj krovini sloja A_{1-3} (Slika 4.1) i ovdje se radi pojednostavljenja smatra krovinskom granicom propusnih stijena, mada je u stvarnosti par metara plići. Vrijednosti ove dubine nisu prava strukturalna karta, jer su to dubine od ušća bušotine do markera D4. Ako se uzme u obzir da je cijelo područje polja Žutica jedna nizinska šuma na sjevernoj obali Save, razlike u visinama kote ušća su zanemarive. To znači da relativna dubina predstavlja vrijednost na temelju koje se može kartirati oblik sloja u podzemlju, jer je teren zaravnan na oko 100 m.n.m. Dakle, ovo jest strukturalna karta ako teren shvatimo kao nivo svođenja, odnosno referentnu ravninu umjesto srednje razine mora, ali izolinije na njoj nisu stratoizohipse (linije apsolutne dubine) nego izobate (linije probušene dubine) i one dosta vjerno ocrtavaju strukturu krovinske granice sloja A_{1-3} u podzemlju. Može se vidjeti velika južna antiklinala pružanja SZ–JI koja ima dva vrha ocrтана izobatama od 1680 m, a može se nazrijeti i dio sjeverne antiklinale koju ocrtava izobata od 1780 m. Za potrebe planiranja izgradnje podzemnog skladišta ugljika odabrana je južna antiklinala na koji bi se teoretski moglo utisnuti CO_2 u sloj sve do dubine od 1720 m što čini sasvim sigurno zatvorenu strukturu omeđenu bušotinama koje bi se mogle koristiti za kontrolu, da plin tijekom utiskivanja ne bi neravnomjerno napredovao pa možda migrirao iz strukture. Na Prilogu 3 se također može vidjeti da visina strukturalnog zatvaranja, od dubine 1720 m do tjemena antiklinale, iznosi 61 m, što nije zanemarivo s obzirom na veličinu ovoga iscrpljenog ležišta plina. Ono se pruža približno 4 kilometra u dužinu (smjerom ZSZ–IJI) i više od 1,5 km u širinu (smjerom JZ–SI, odnosno okomito na pružanje antiklinale). Zato je dubina od 1720 m odabrana kao budući kontakt CO_2 -voda kad jednom podzemno skladište bude ispunjeno i sad je trebalo dovršiti model ležišta kako bi se mogao izračunati volumen kolektorskih stijena.

Sljedeća stvar koja je bila bitna je usporediti dubinu EK-markera D4 i debljinu sloja A₁₋₃. Ako je na najplićoj bušotini (Zu-70) ta debljina manja od visine strukturnog zatvaranja, onda to znači da podinsku plohu ležišta neće činiti samo kontakt CO₂-voda, nego i podinska granica sloja A₁₋₃. Tako je i ispalo, najmanja dubina markera D4 je 1659 m (Prilog 3), a debljina sloja A₁₋₃ u njoj iznosi 42 m, što znači da je podinska granica na dubini od 1701 m, dakle definitivno iznad planiranih 1720 m. Zbog toga je bilo neophodno konstruirati još jednu kartu relativne dubine, odnosno kartu izobata podinske plohe sloja. Ulazne vrijednosti za tu kartu izračunate su pribrajanjem debljine sloja A₁₋₃ na vrijednost dubina markera D4. Nije sve tako jednostavno, oblik podinske plohe sloja ne ocrta sasvim sličnu strukturu zbog toga što sam sloj A₁₋₃ ima različite probušene debljine.

Karta relativne dubine podinske plohe pješčenjaka A₁₋₃ (Prilog 4) prikazuje izobate podinske granice sloja i na njoj se vidi da dubina podine varira od bušotine do bušotine. Konstruiranje ove karte bilo je od izrazite važnosti, zato jer se pomoću nje konstruirala karta debljine od kontakta CO₂-voda do podinske plohe pješčenjaka (Prilog 6), koja će biti potrebna za izračunavanje volumena stijena koji će se oduzeti od volumena koji zatvara kontakt CO₂-voda do krovinske granice kolektorskih stijena (Prilog 5). Taj volumen do podinske granice predstavljaju nepropusne stijene u koje nije moguće utisnuti ugljikov dioksid. Antiklinala je i na ovoj karti pružanja SZ–JI, te ima jedan vrh ocrtan izobatom 1700 m.

Karta debljine od kontakta CO₂-voda do krovinske plohe pješčenjaka (Prilog 5) označava ukupnu debljinu kolektorskih stijena pješčenjaka, mjerenu od krovine pješčenjaka do kontakta CO₂-voda, koji se nalazi na dubini od 1720 m. Izopaha od 0 m je na ovoj karti referentna horizontalna ravnina koja predstavlja kontakt CO₂-voda, vrijednosti ispod nulte izopahe su negativne, te su površine između njih označene plavom bojom (debljine slojeva) i neće biti uključene u izračun volumena kolektorskih stijena. Izopahe pozitivnih vrijednosti ocrtavaju volumen kolektorskih stijena (ljubičasta boja), one se nalaze iznad nulte izopahe. Vidi se da je ležište u obliku antiklinala pružanja SZ–JI sa dva vrha omeđena izopahama 40 m. Kapla ležišta je svega 1 m visoka, ali opet neizostavna za proračun volumena.

Karta debljine od kontakta CO₂-voda do podinske plohe pješčenjaka (Prilog 6) označava debljinu nepropusnih stijena, mjerenu od podinske plohe pješčenjaka do kontakta CO₂-voda. Preciznije rečeno na ovoj karti se može vidjeti dio stijena, koje neće činiti skladište za utisnuti CO₂ i njihov volumen će se oduzimati. Taj dio stijena je također u obliku

antiklinale, koja je puno manja i koja sada ima puno veću visinu kape, omeđenu izopahom 20 m. Karta zorno prikazuje da kolektorske stijene imaju podinsku plohu iznad referentne horizontale izobate 1720 m.

Struktura podzemnog skladišta CO₂ prikazana je na Profilu A–B, azimuta 60° (Prilog 7). Profil je postavljen poprečno na pružanje antiklinale kako bi se prikazao oblik podzemnog skladišta.

4.2. Izračun volumena kolektorskih stijena koje čine podzemno skladište CO₂

Za sam izračun volumena kolektorskih stijena korištene su dvije karte, Karta debljine od kontakta CO₂-voda do krovinske plohe pješčenjaka (Prilog 5) i Karta debljine od kontakta CO₂-voda do podinske plohe pješčenjaka (Prilog 6). Prvi korak je bilo očitavanje ekvidistancije s njih, koja je u oba slučaja jednaka i označena je kao h (u m), te je nakon toga bilo potrebno izračunati površine (u m²), koje zatvara svaka pojedina izopaha. Očito je da su površine sve manje kako izopaha idu prema središtu. Površina koju zatvara nulta izopaha označena je sa A₀, prva sa A₁ itd., dok je površina koju zatvara posljednja izopaha označena sa A_n. Dalje, su se sve te vrijednosti unosile u dvije formule, Simpsonovu, koja glasi:

$$V_S = \frac{h}{3} (A_0 + 2A_1 + 4A_2 + \dots + 2A_{n-2} + 4A_{n-1} + A_n) \quad (4-1)$$

i Trapezoidalnu, koja glasi:

$$V_T = h (\frac{A_0}{2} + A_1 + A_2 + \dots + A_{n-1} + \frac{A_n}{2}). \quad (4-2)$$

Te dvije formule dale su volumen krnjeg stošca do krovinske granice sloja (V_{u1}), ali i onoga do podinske granice (V_{u2}). Važno je naglasiti da su to volumeni dobiveni iz aritmetičke sredine vrijednosti volumena dobivenih Simpsonovom i Trapezoidalnom formulom. Tako je odlučeno zbog toga što stvarni volumen ne odgovara ni krnjem stošcu niti krnjoj piramidi, nego se radi o relativno gruboj geometrijskoj aproksimaciji, tako da niti jedna formula ne daje preciznu vrijednost. Nakon toga se išlo u izračun volumena kape. Volumen kape (V_p) za oba slučaja se dobio iz dvije formule, iz kojih se opet uzela aritmetička srednja vrijednost.

Prva formula naziva se Piramidalna formula, a ona glasi:

$$V_1 = \frac{h_n * A_n}{3} \quad (4-3)$$

gdje su: h_n – visina iznad zadnje izopahe (m) i A_n – površina koju zatvara zadnja izopaha (m^2).

Druga formula naziva se Sferna formula i ona glasi:

$$V_2 = \frac{h_n^3 * \pi}{6} + \frac{a_n * h_n}{2} \quad (4-4)$$

gdje su: h_n – visina iznad zadnje izopahe (m) i A_n – površina koju zatvara zadnja izopaha (m^2).

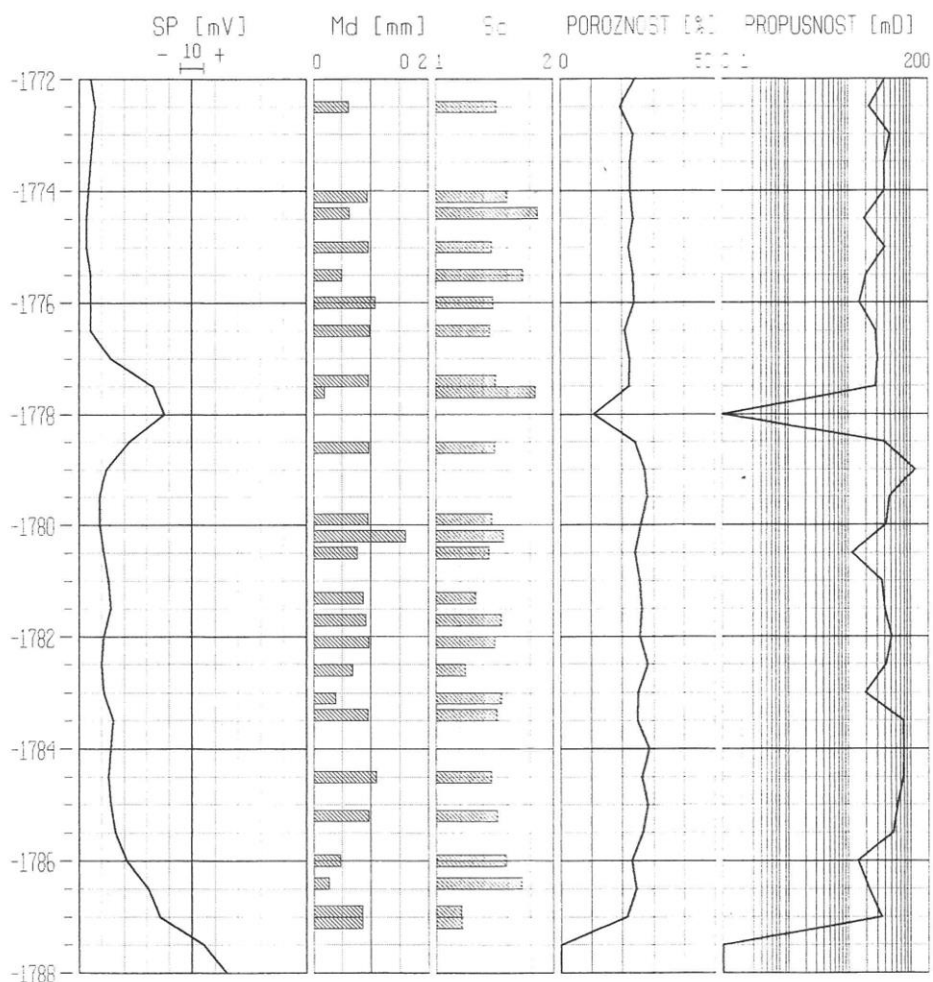
Ukupni volumen do krovinske granice (V_a) izračunat je zbrajanjem volumena krnjeg stošca do krovinske granice (V_{u1}) i volumena kape do krovinske granice (V_{p1}), dok se ukupni volumen do podinske granice (V_b) dobio zbrajanjem volumena krnjeg stošca do podinske granice (V_{u2}) i volumena kape do podinske granice (V_{p2}). Ukupni volumen kolektorskih stijena (V) podzemnog skladišta CO_2 izračunat je kao razlika ovih dvaju volumena. Od ukupnog volumena do krovinske granice (V_a) oduzet je ukupni volumen do podinske granice (V_b), što znači da volumen kolektorskih stijena koje čine podzemno skladište ugljika iznosi $80.471,959 m^3$. Sve je prikazano u tablici koja se nalazi u Prilogu 8. Površine koje zatvaraju pojedine izopahe izračunate su pomoću besplatnog softvera QGIS.

4.3. Izračun teoretskog kapaciteta uskladištenja CO_2 u sloju A_{1-3} na polju Žutica

Nakon izračuna volumena kolektorskih stijena, koji bi da je riječ o ležištu ugljikovodika bio osnovna ulazna vrijednost za izračun geoloških rezervi, u sljedećem je koraku bilo potrebno prvo izračunati koliko je od toga u stvari ukupni volumen pora. Pod pretpostavkom da su sve izmjerene pore i povezane može se za taj korak koristiti srednja vrijednost poroznosti izmjerena na uzorcima iz toga sloja kolektorskih stijena ili neka općenita regionalna vrijednost ovisna o dubini i veličini zrna ako su napravljene odgovarajuće regionalne korelacije. U ovom je slučaju olakšavajuća okolnost bila to što su tijekom 1980-ih godina baš na polju Žutica i to na sloju A_{1-3} napravljena brojna mjerenja kolektorskih svojstava na jezgrama. Usporedno s tim napravljene su i granulometrijske analize kako bi se vidjelo da poroznost i propusnost ovise o veličini i sortiranosti zrnaca pješčenjaka. Većina tih podataka je arhivska, vlasništvo poduzeća INA d.d., ali tri bušotine su objavljene u jednome magistarskom radu (SAFTIĆ, 1993). Sve su one iz sloja A_{1-3} , pa je

odabrana jedna radi ilustracije, bušotina Žutica-158 (Slika 4.3.) koja je locirana na južnom dijelu polja (v. Prilog 1).

Usporedba sedim. podataka i krivulje SP
za GIS A₁₋₃ (rezervoar A₁)
Bušotina Žu-158, meh. jezgra 1772,40-1787,20 m



Slika 4.3. Usporedba geološke građe i svojstava pješčenjaka i krivulje SP za GIS A₁₋₃ (SAFTIĆ, 1993)

Iz dijela stupa na kojem je prikazana poroznost može se iščitati da je srednja vrijednost u krovinskom dijelu sloja A₁₋₃ približno 22%, a u podinskom se kreće oko 24%.

Zato je odabrana srednja vrijednost od 23% i ona je ekstrapolirana u proračun za cijeli sloj A₁₋₃ koji se nalazi na južnoj antiklinali polja Žutica.

Drugo pitanje u izračunu jest koliko će se od tih pora prilikom stvaranja umjetnoga podzemnog ležišta CO₂ zapravo ispuniti nadkritičnim plinom. Nisu sve pore povezane, neke su premale pa je otpor kapilarne vode u njima prevelik i jasno je da to neće moći biti 100%. Ovo umanjeno se u geološkom skladištenju ugljika naziva „koeficijent uskladištenja“ i on je za regionalne formacije obično u rasponu od 2 do 3% (EU GEOCAPACITY, 2009). Ako se radi o tzv. strukturno definiranim vodonosnicima, znači antiklinalama u kojima su sve pore zasićene slojnom vodom, onda se može računati s većim koeficijentom uskladištenja. Prema CHADWICK et al. (2008), slični bi pješčenjaci, poroznosti 20-25%, u strukturama u Danskoj (Gassum, Havnsø, Stenlille...) mogli imati efektivni volumen za uskladištenje (tj. koeficijent uskladištenja od 40%).

Treći element koji je potreban za izračun kapaciteta uskladištenja koji bi naravno trebao biti izražen u tonama (kao i sve rezerve), bio kolika je gustoća nadkritičnog CO₂ na srednjoj dubini ležišta. Ta se dubina može očitati na Karti izopaha od kontakta CO₂-voda do krovine (Prilog 5) gdje je najveća izopaha 60 m, znači srednja vrijednost je 30 m. Ako tih 30 metara oduzmemo od dubine kontakta CO₂-voda koji je odabran na 1720 m, onda je to 1690 m, a na toj dubini pri hidrostatskom tlaku i temperaturi ležišta gustoća CO₂ iznosi 480 kg/m³ (v. Sl. 3.2).

Zaključno se rezultati izračuna kapaciteta uskladištenja u ležištu A₁₋₃ mogu sumirati na sljedeći način:

Izračun teoretskog kapaciteta uskladištenja CO₂ u sloju A₁₋₃ na polju Žutica					
Volumen kolektorskih stijena (m ³)	Poroznost (%)	Ukupni volumen pora u ležištu (m ³)	Koeficijent uskladištenja (%)	Gustoća CO ₂ na srednjoj dubini ležišta (t/m ³)	Kapacitet podzemnog skladišta ugljika (t)
80.471.959	23	18.508.551	40	0,48	3.553.642
80.471.959	23	18.508.551	70	0,48	6.218.873

Ovo znači da je kapacitet uskladištenja u odabranoj strukturi dovoljno velik za planiranje investicije u izgradnju podzemnog skladišta ugljika u pješčenjacima Poljana, posebno ako se uzme u obzir da na istome polju postoje i dublji slojevi sa sličnim kolektorskim svojstvima koji bi se mogli iskoristiti na isti način, a to su slojevi pješčenjaka Okoli i Iva.

Ovakav način izračuna je konzervativan, jer se pretpostavlja da su sve pore u iscrpljenom ležištu bile ispunjene slojnom vodom. U stvari se brojna plinska ležišta nalaze u situaciji da je nakon iscrpljenja snižen tlak, jer voda nije prodrla u pore. U tome slučaju pravi kapacitet može biti dosta veći zato što koeficijent uskladištenja raste znatno iznad 40%. To je prikazano u donjem retku tablice gdje je kao koeficijent uskladištenja uzet prosječni iscrpak iz plinskih ležišta (<https://www.aapg.org/>) kao suprotni, optimistični slučaj. To bi značilo da u slučaju da voda nije prodrla u pore nakon crpljenja ležišta prirodnog plina, postoji puno veći ukupni volumen pora koje bi se moglo ispuniti ugljikovim dioksidom. Takav scenarij daje bitno veću vrijednost kapaciteta uskladištenja.

U bilo kojem od ova dva krajnja slučaja treba misliti i na to da je na ovaj način pojednostavljeni izračun pogodan samo u stvari za brzu prvu procjenu mogućega kapaciteta u nekoj strukturi. On može služiti za odabir pogodnih objekata za detaljnija istraživanja koja bi pored ostaloga svakako morala uključiti detaljne geološke (statičke) modele u specijaliziranom softveru, a zatim i dinamičko modeliranje porasta tlaka tijekom utiskivanja kao i brojne druge faktore. Tek na taj način procijenjeni kapacitet bi se mogao smatrati praktičnim (engl. *viable*), a ovaj je još uvijek teoretski, ali ipak na određenom ležištu jedne strukture. Makar sadrži veliku nesigurnost ipak je pomak u odnosu na regionalne procjene, jer se na ovaj način od primijenjenih geoloških istraživanja koja mogu služiti samo za prostorno planiranje i strateške dokumente, relativno jednostavno može dati stručna podloga donošenju odluka o izboru lokacije za izgradnju podzemnog skladišta ugljika i to na temelju njezinih prirodnih svojstava.

5. Diskusija i zaključak

Planiranje razvoja tehnologije kaptiranja i geološkog skladištenja ugljika trenutno je najvažniji način na koji naša struka može doprinijeti smanjivanju emisije ugljikova dioksida, a time i ublažavanju posljedice klimatskih promjena. Za iskorištavanje ovoga novog resursa potrebno je ubrzati istraživanja građe podzemlja u svim sedimentnim bazenima. Najatraktivniji su oni bazeni u kojima je već bilo eksploatacije ležišta nafte i plina i to iz dva razloga. Prvi je to što su u Europi ležišta nafte i plina uglavnom već podosta iscrpljena, tako da se nakon faze proizvodnje mogu prenamijeniti u podzemna skladišta ugljika. Drugi razlog je što su dijelovi podzemlja u kojima su ležišta tijekom istraživanja, razrade i proizvodnje desetljećima istraživani tako da postoje detaljni geološki modeli, ili barem podaci na temelju kojih bi se takvi modeli mogli (re)konstruirati. Danas u Hrvatskoj postoji barem desetak polja na kojima su ležišta istražena velikim brojem bušotina. „Rekorder“ je naftno-plinsko polje Žutica na kojem ima ukupno više od 300 bušotina. Od njih je odabrano 70 koje su bile sasvim dovoljne za konstrukciju dubinskih karata odabranoga ležišta.

Izračun teoretskog kapaciteta uskladištenja CO₂ napravljen je pojednostavljenom metodom – konstrukcijom karata izopaha radi izračuna ukupnoga volumena kolektorskih stijena i zatim izračunom ukupnog volumena pora u ležištu, te izračunom kapaciteta korištenjem dvaju koeficijenata uskladištenja – 40% u slučaju da su već sve pore ispunjene slojnom vodom i 70% u slučaju da ležište A₁₋₃ tretiramo kao jedno prosječno iscrpljeno plinsko ležište s padom tlaka na kraju proizvodnje.

Dobivene su dvije vrijednosti, 3.553.642 t za vodom ispunjenu strukturu (strukturno definirani vodonosnik) i 6.218.873 t za iscrpljeno ležište plina. Usporedbom s regionalnim kartama teoretskog kapaciteta uskladištenja u pješčenjacima Poljana u Savskoj depresiji (KOLENKOVIĆ, 2012) može se vidjeti da su obje ove vrijednosti realne. One još nisu precizne, potrebno bi bilo napraviti detaljni geološki model u specijalističkom softveru koji uključuje poznavanje još brojnih drugih svojstava i o kolektorskim i o izolatorskim stijenama. Ipak se može reći da bi ovakav pristup, korištenjem freeware GIS softvera i samo osnovnih podataka iz bušotina mogao biti vrijedan za brzu procjenu (engl: *quick-look*) teoretskog kapaciteta odabranog ležišta na jednoj strukturi, jer bi se na temelju tih rezultata moglo odlučiti na koji bi od nekoliko objekata bilo dobro usmjeriti daljnja istraživanja. Sve ovo je, znači korak od regionalnih prema lokalnim procjenama, odnosno finalni korak na granici između teoretskog kapaciteta i realnog.

6. Popis literature

6.1 Objavljeni radovi

BACHU, S. (2000): Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41, 953–970.

BACHU, S. & ADAMS, J.J. (2003): Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution. *Energy Conversion and Management*, 44, 3151-3175.

BAINES, S.J. & WORDEN, R.H. (2004): The long-term fate of CO₂ in the subsurface: natural analogues for CO₂ storage. U: Baines, S.J. & Worden, R.H. (ur.): *Geological storage of carbon dioxide*, 233. London, Special Publications: Geological Society, 59–85.

BUCKOVIĆ, D. (2006): *Historijska geologija II*. E-knjiga, Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet, 96-101.

CHADWICK A., ARTS, R., BERNSTONE, C., MAY, F., THIBEAU, S., ZWEIGEL, P. eds. (2008): Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. *British Geological Survey Occasional Publication No. 14*, 267.

ĆORIĆ S., et al. (2009). 'Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of North Croatian Basins (Pannonian Basin System, Central Paratethys)', *Geologia Croatica*, 62(1), str. 31-43.

EU GEOCAPACITY, Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide (2009) Technical reports, FP-518318.: EU GeoCapacity. Storage Capacities. WP2.3 D12.

HOLLOWAY, S., PEARCE, J.M., HARDS, V.L., OHSUMI, T. & GALE, J. (2007): Natural emissions of CO₂ from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide. *Energy*, 32, 1194-1201.

IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O. de Coninck, H.C., Loos, M. & Meyer, L.A. (ur.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.

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, 133-147.

KOLENKOVIĆ, I. (2012): Mogućnosti za geološko skladištenje ugljičnoga dioksida u gornjomiocenskim pješčenjacima zapadnoga dijela Savske depresije. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 130 str.

KOLENKOVIĆ, I., SAFTIĆ, B. (2014): Geološko skladištenje ugljičnog dioksida. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 28, 9-22.

PRELOGOVIĆ, E., SAFTIĆ, B., KUK, V., VELIĆ, J., DRAGAŠ, M. & LUČIĆ, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 297, 283-293.

SAFTIĆ, B.; VELIĆ, J.; SZTANO, O.; JUHAS, G.; IVKOVIĆ, Ž. (2003): Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian Basin (northern Croatia and south-western Hungary). *Geologia Croatica*, 56, 1; 101-122.

SAFTIĆ, B. (1998): Genetska stratigrafska sekvencijska analiza pontskih naslaga u zapadnom dijelu Savske depresije. Disertacija, RGNF Sveučilišta u Zagrebu, 136 str.

SAFTIĆ, B. (1993): Taložni sustav pješčanih rezervoara genetske sekvencije slojeva pješčenjaka Poljana u neogenskim naslagama polja Žutica. Magistarski rad. RGNF i PMF Sveučilišta u Zagrebu, 55 str.

SPAN R., WAGNER W. (1996): A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100K at pressures up to 800MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25, 1509–1596.

VULIN, D. (2010): Modeliranje termodinamičkih i petrofizičkih parametara za geološko skladištenje ugljičnog dioksida. Disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 120 str.

WYCHERLEY, H., FLEET, A., & SHAW, H. (1999): Some observations on the origins of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, 16, 489–494.

6.2 Neobjavljeni radovi

KOLENKOVIĆ I., SAFTIĆ B. (2012): Metode geološkog skladištenja ugljika. Nastavni materijal za diplomske radove. Fond struč. dok. RGN fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 28 str.

SAFTIĆ B., KOLENKOVIĆ I.: Upute za izradu 2. programa iz Geologije fosilnih goriva. 6 str.

6.3 Web izvori

[https://www.qgis.org/en/site/\(17.8.2021.\)](https://www.qgis.org/en/site/(17.8.2021.))

[ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf\(25.8.2021.\)](ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf(25.8.2021.))

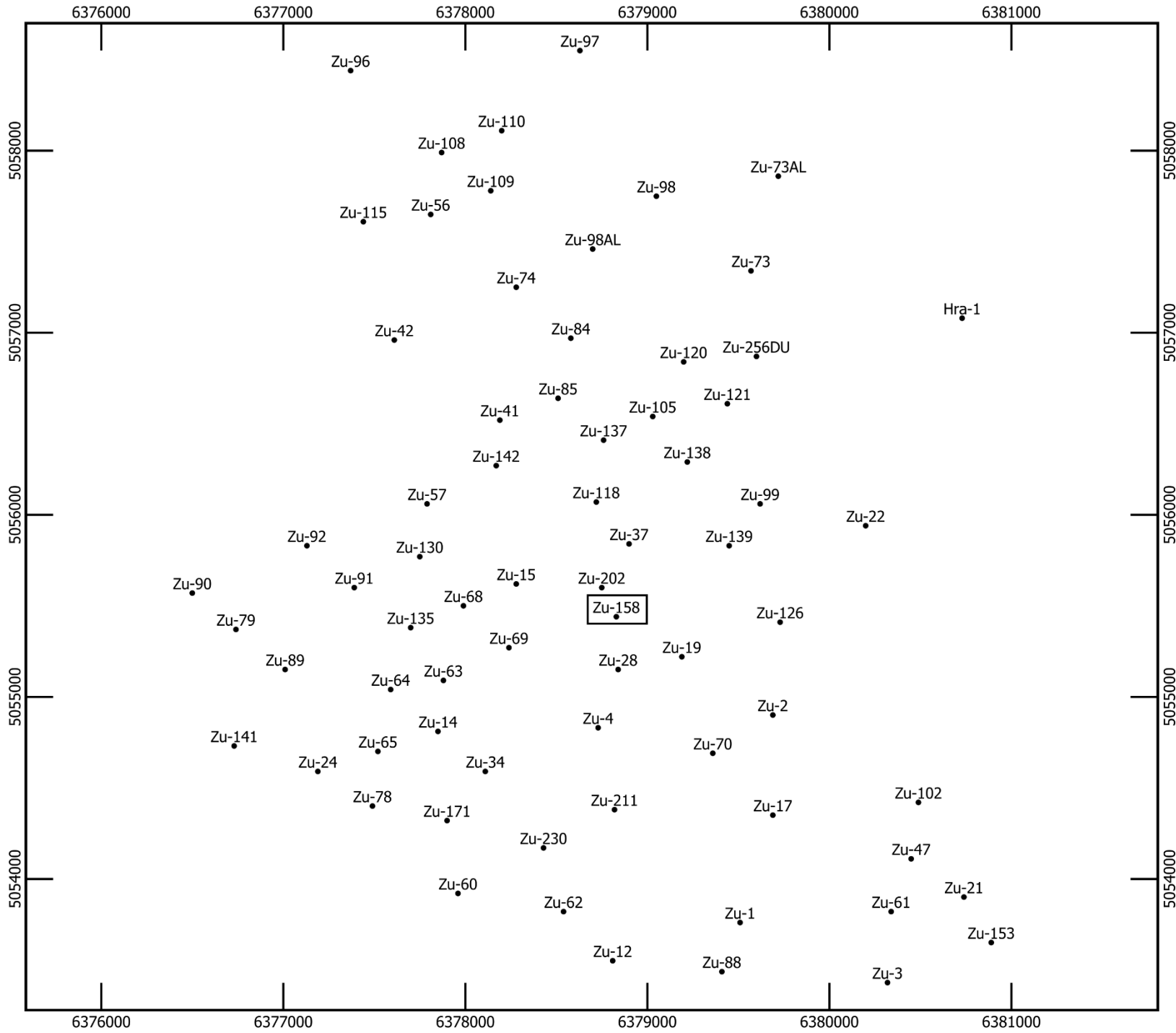
[https://www.azu.hr/istra%C5%BEivanje-i-eksploatacija/geolo%C5%A1ki-pregled-kopna/\(27.8.2021.\)](https://www.azu.hr/istra%C5%BEivanje-i-eksploatacija/geolo%C5%A1ki-pregled-kopna/(27.8.2021.))

[https://www.co2.earth/daily-co2\(2.9.2021.\)](https://www.co2.earth/daily-co2(2.9.2021.))

[https://www.aapg.org/\(4.9.2021.\)](https://www.aapg.org/(4.9.2021.))

[https://wiki.aapg.org/Predicting_hydrocarbon_recovery#Estimating_recovery_factor\(4.9.2021.\)](https://wiki.aapg.org/Predicting_hydrocarbon_recovery#Estimating_recovery_factor(4.9.2021.))

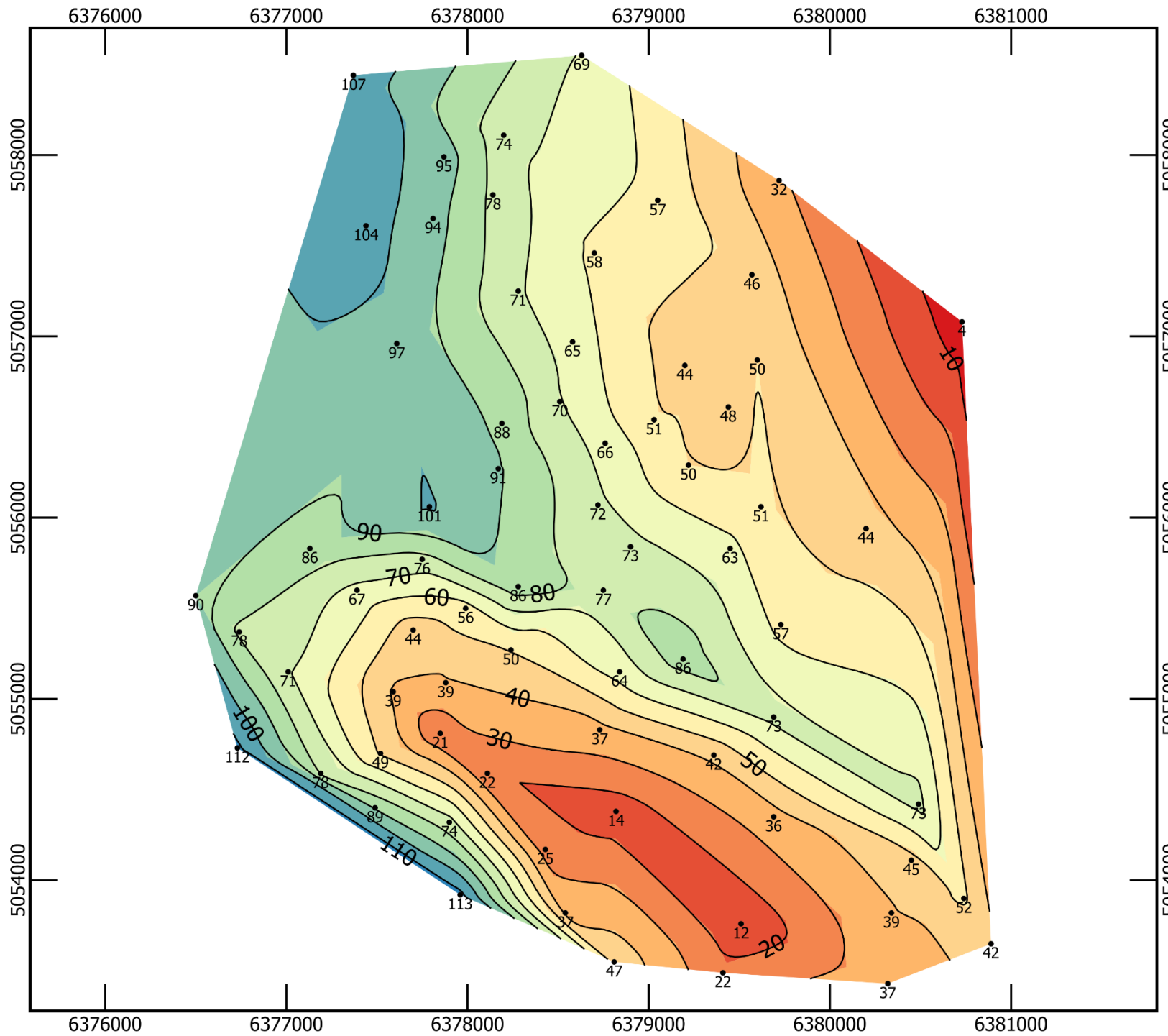
PRILOG 1-Karta lokacija



Legenda

- Bušotine

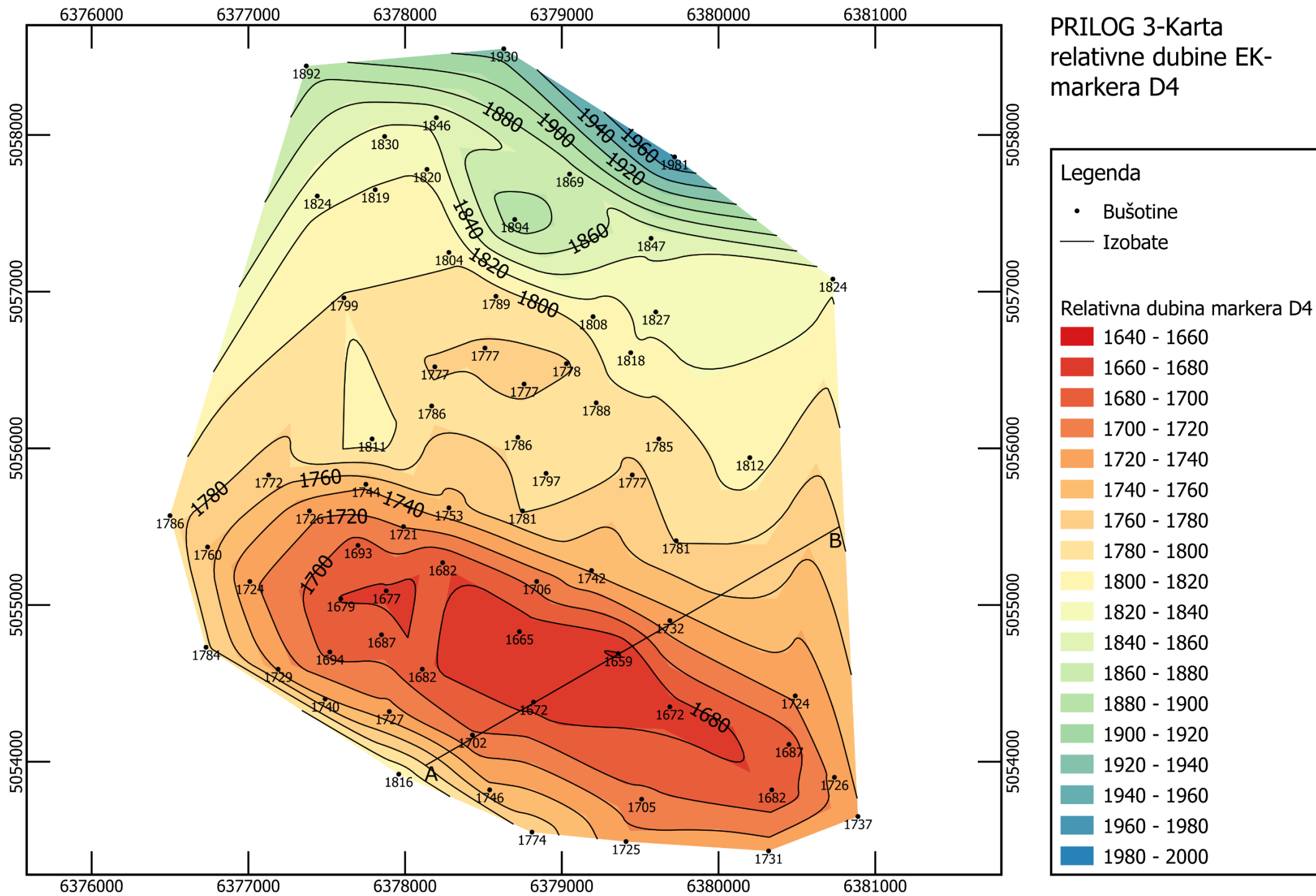
Zu-158 - bušotina korištena za uzimanje jezgre

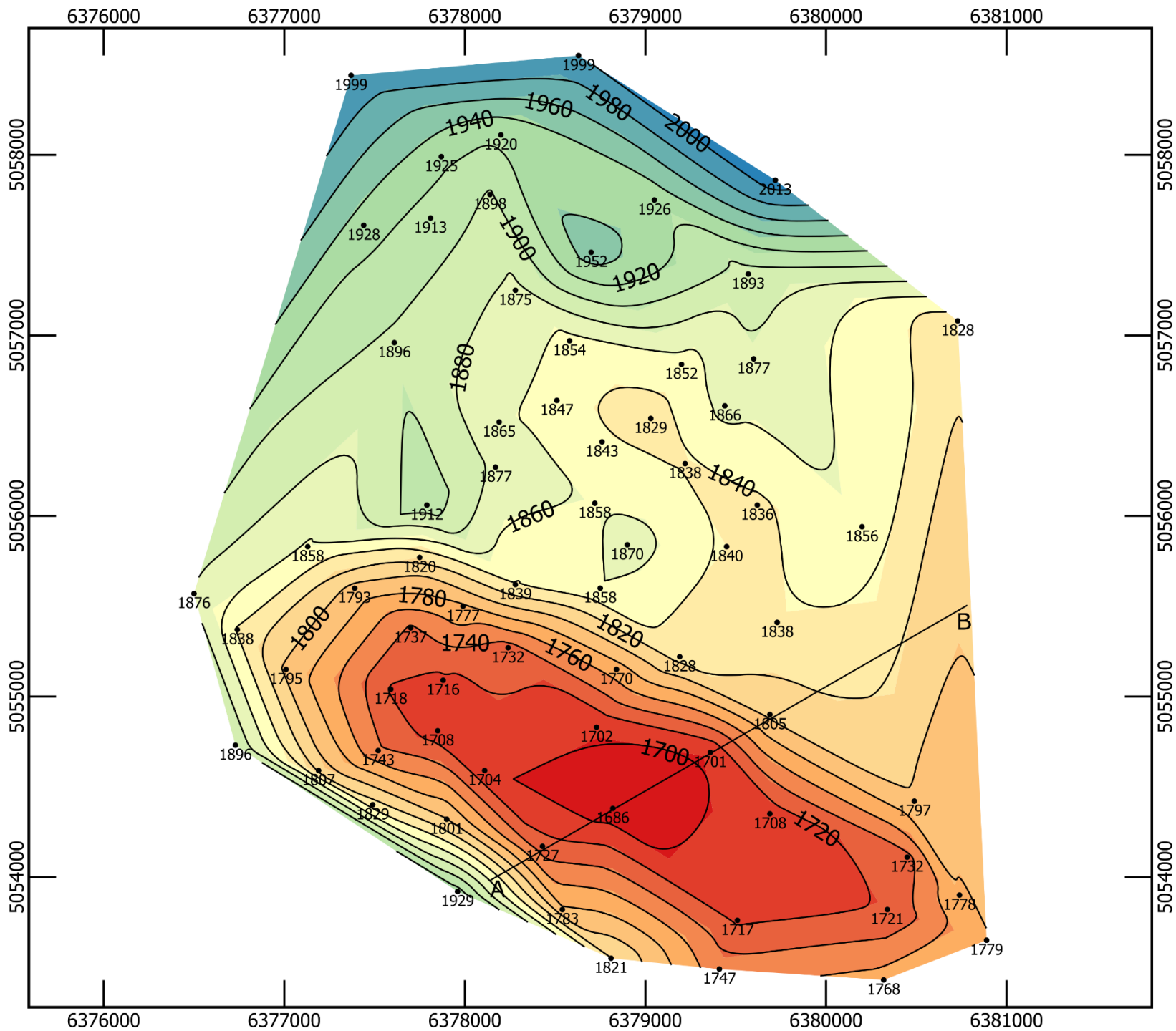


PRILOG 2-Karta
 ukupne debljine
 slojeva pješčenjaka
 A1-3

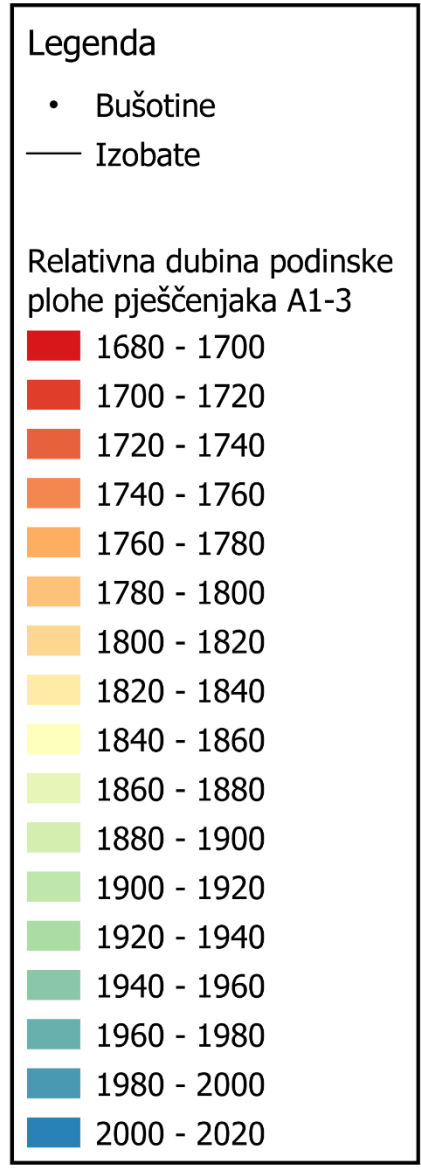


PRILOG 3-Karta
relativne dubine EK-
markera D4

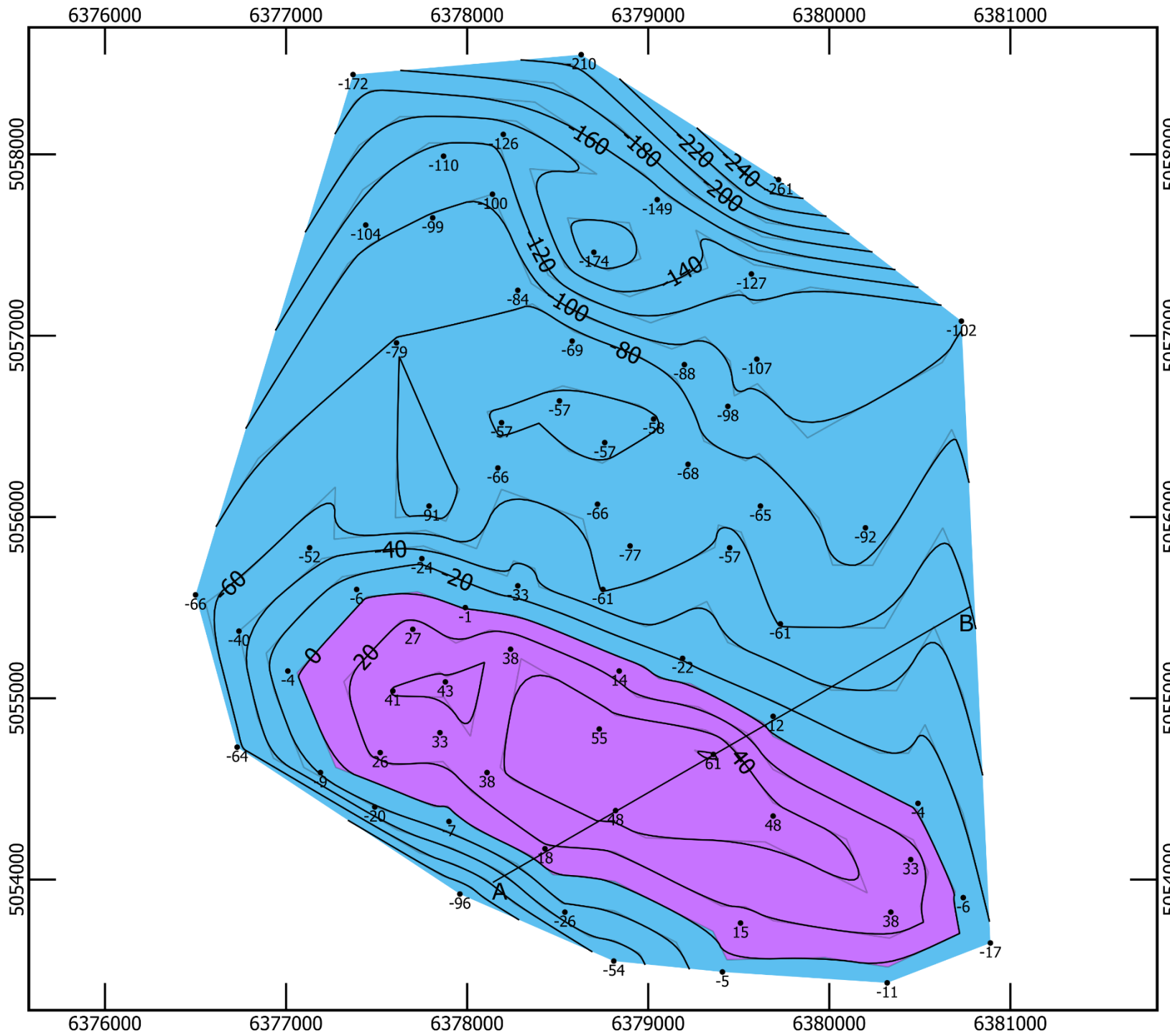




PRILOG 4-Karta
 relative dubine
 podinske plohe
 pješčenjaka A1-3



PRILOG 5-Karta debljine od kontakta CO₂-voda do krovinske plohe pješčenjaka

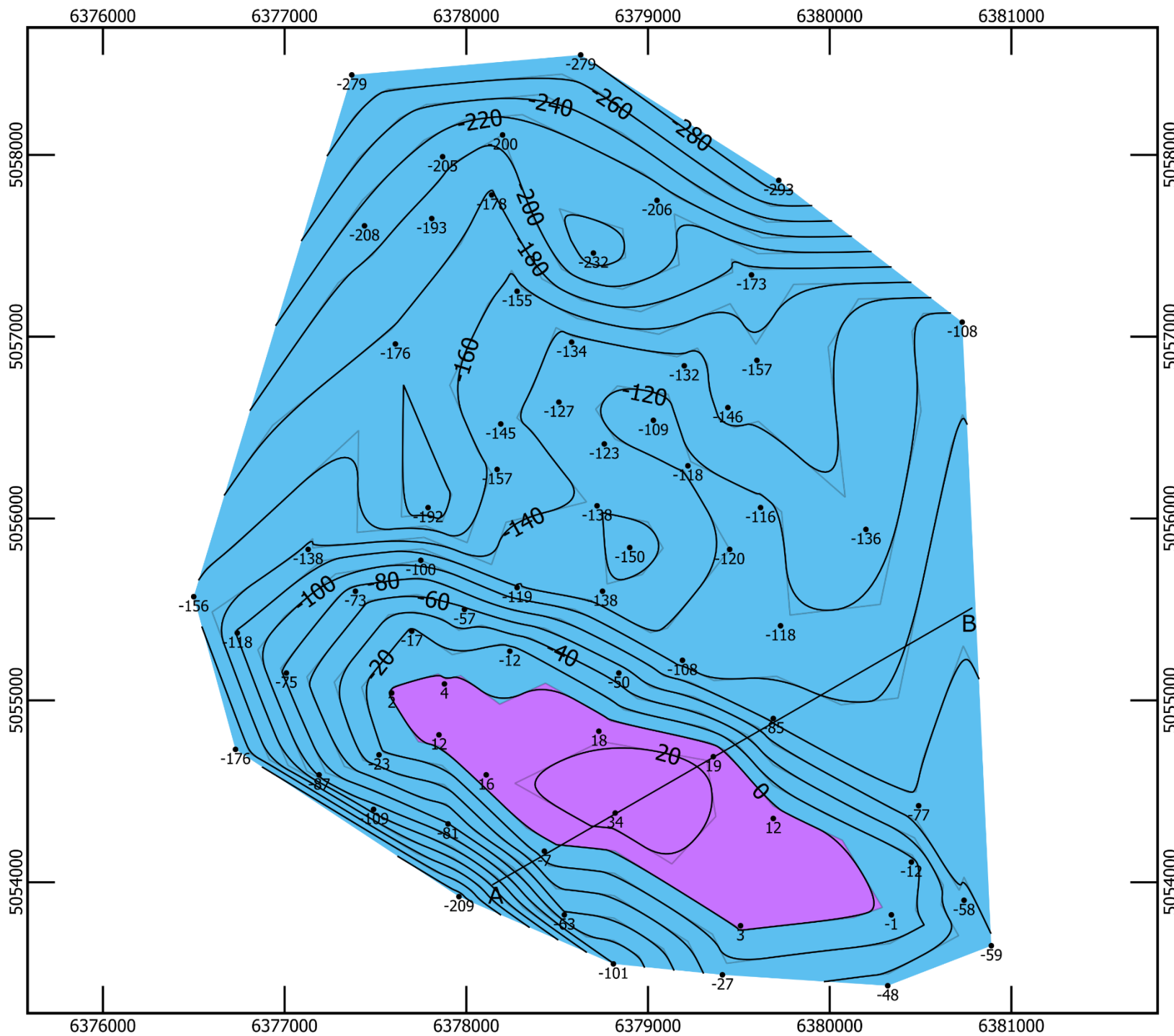


Legenda

- Bušotine
- Izopahe

Debljina od kontakta CO₂-voda do krovine

- 280 - -260
- 260 - -240
- 240 - -220
- 220 - -200
- 200 - -180
- 180 - -160
- 160 - -140
- 140 - -120
- 120 - -100
- 100 - -80
- 80 - -60
- 60 - -40
- 40 - -20
- 20 - 0
- 0 - 20
- 20 - 40
- 40 - 60
- 60 - 80



PRILOG 6-Karta
 debljine od kontakta
 CO₂-voda
 do podinske plohe
 pješčenjaka

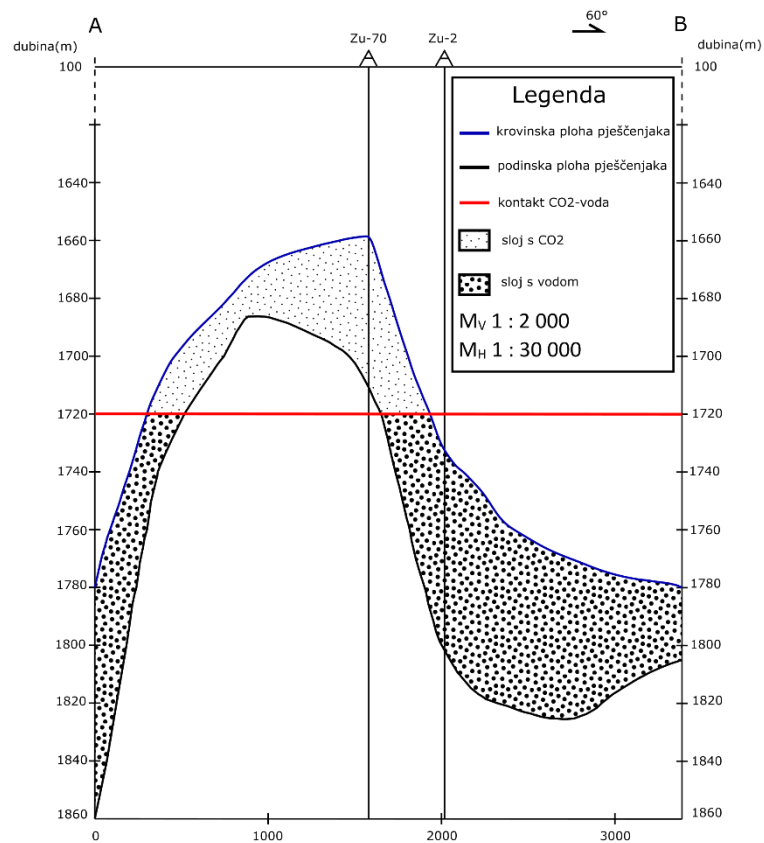
Legenda

- Bušotina
- Izopahe

Debljina od kontakta CO₂-voda
 do podine pješčenjaka

- 300 - -280
- 280 - -260
- 260 - -240
- 240 - -220
- 220 - -200
- 200 - -180
- 180 - -160
- 160 - -140
- 140 - -120
- 120 - -100
- 100 - -80
- 80 - -60
- 60 - -40
- 40 - -20
- 20 - 0
- 0 - 20
- 20 - 40

PRILOG 7-Profil A–B



PRILOG 8-Tablica izračuna volumena kolektorskih stijena koje čine podzemno skladište CO₂

Volumen "krnjeg stošca" do krovinske granice

A ₀ (m ²)	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	A _n (m ²)	h(m)
3.950.718	2.657.647	1.031.475	2.668	20

Simpsonova formula	V _s =	89.314.987	m ³
Trapezoidalna formula	V _t =	113.316.300	m ³
		1,268726607	
	V=	101.315.643	m³

Volumen "krnjeg stošca" do podinske granice

A ₀ (m ²)	A _n (m ²)	h(m)
1.683.793	389.284	20

Simpsonova formula	V _s =	16.415.740	m ³
Trapezoidalna formula	V _t =	20.730.770	m ³
		1,2628593	
	V=	18.573.255	m³

Volumen kape do krovinske granice

A _n (m ²)	h _n (m)
2.668	1

Piramidalna formula	V ₁ =	889	m ³
Sferna formula	V ₂ =	1.335	m ³
Prosječna vrijednost	V_p=	1.112	m³

Volumen kape do podinske granice

A _n (m ²)	h _n (m)
389.284	14

Piramidalna formula	V ₁ =	1.816.659	m ³
Sferna formula	V ₂ =	2.726.425	m ³
Prosječna vrijednost	V_p=	2.271.542	m³

Ukupni volumen do krovinske granice

$$V_{U1}=V+V_p$$

$$V_{U1}= 101.316.755 \text{ m}^3$$

Ukupni volumen do podinske granice

$$V_{U2}=V+V_p$$

$$V_{U2}= 20.844.797 \text{ m}^3$$

Ukupni volumen kolektorskih stijena podzemnog skladišta CO₂

$$V=V_{U1}-V_{U2}$$

$$V_U= 80.471.959 \text{ m}^3$$