

Definiranje dubokog slanog vodonosnika Osijek u Osječkim pješčenjacima istočnog dijela Dravske depresije i procjena perspektivnosti za geološko skladištenje ugljičnog dioksida

Brezovac, Ivana

Master's thesis / Diplomski 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:169:227892>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geologije

DEFINIRANJE DUBOKOG SLANOG VODONOSNIKA OSIJEK U OSJEČKIM
PJEŠČENJACIMA ISTOČNOG DIJELA DRAVSKE DEPRESIJE I PROCJENA
PERSPEKTIVNOSTI ZA GEOLOŠKO SKLADIŠTENJE UGLJIČNOG DIOKSIDA

Diplomski rad

Ivana Brezovac

G365

Zagreb, 2021.

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

DEFINIRANJE DUBOKOG SLANOG VODONOSNIKA OSIJEK U OSJEČKIM
PJEŠČENJACIMA ISTOČNOG DIJELA DRAVSKE DEPRESIJE I PROCJENA
PERSPEKTIVNOSTI ZA GEOLOŠKO SKLADIŠTENJE UGLJIČNOG DIOKSIDA

IVANA BREZOVAC

Diplomski rad izrađen u: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Zbog sve većih klimatskih promjena uzrokovanih ljudskim djelovanjem, javlja se potreba za pronalaženjem načina na koje će se smanjiti taj utjecaj. Postoje dokazi da najveći učinak na klimatske promjene imaju velike količine ugljikovog dioksida koje nastaju sagorijevanjem fosilnih goriva te sječom šuma. Jedan od načina smanjivanja emisije CO₂ u atmosferu je njegovo kaptiranje i geološko skladištenje u duboke slane vodonosnike. Duboki slani vodonosnik Osijek definiran je unutar Osječkih pješčenjaka u istočnom dijelu Dravske depresije, koja spada u hrvatski dio Panonskog bazenskog sustava. U ovom radu provedena je interpretacija podataka dobivenih geofizičkim mjerenjima u bušotinama s ciljem definiranja granica dubokog slanog vodonosnika Osijek te analize saliniteta i poroznosti istraživanog intervala. Interpretacija i analize napravljene su u programu *Interactive Petrophysics*. Nakon toga su karta dubine do krovine te karta efektivne debljine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek izrađene u programu *Petrel E&P software platform 2020*.

Ključne riječi: Dravska depresija, Osječki pješčenjaci, duboki slani vodonosnik Osijek, geološko skladištenje ugljikovog dioksida

Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 18 slika, 1 tablicu i 27 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Voditelj: dr.sc. Iva Kolenković Močilac, docent, RGNF

Ocjenjivači: dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docent, RGNF

dr. sc. Bruno Saftić, izvanredni profesor, RGNF

dr. sc. Marko Cvetković, docent, RGNF

Datum obrane: 18. veljače 2021.

University of Zagreb

Master's thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

DEFINING OF THE DEEP SALINE AQUIFER OSIJEK IN THE OSIJEK
SANDSTONES OF THE EASTERN PART OF THE DRAVA DEPRESSION AND
EVALUATION OF THE POTENTIAL FOR GEOLOGICAL STORAGE OF CARBON
DIOXIDE

IVANA BREZOVAC

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Geology and Geological Engineering

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Due to the growing acceleration of climate change caused by human activity, there is a raising need for finding a way of minimalising that impact. It is proven that the biggest impact on climate change have large amounts of carbon dioxide which are emitted by burning fossil fuels and also caused by deforestation. One of the ways for reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere is by its capture and geological storage. Deep saline aquifer Osijek is defined in the Osijek sandstones in the eastern part of the Drava Depression which is a part of the Croatian part of the Panonian Basin System. This thesis contains interpretation of the data from geophysical measurements (well logs) carried out in order to define the boundaries of the deep saline aquifer, as well as the salinity and porosity analyses of the defined interval. Interpretation and analyses are made in the computer software *Interactive Petrophysics*. Based on the interpretation of the well data, the map of the top of the potential deep saline aquifer and the map of its effective thickness were made in *Petrel E&P software platform 2020*.

Keywords: Drava depression, Osijek sandstone, deep saline aquifer Osijek, geological storage of carbon dioxide

Thesis contains: 39 pages, 18 figures, 1 table and 27 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Iva Kolenković Močilac, Ph.D.

Reviewers: Assistant Professor Iva Kolenković Močilac, Ph.D.

Associate Professor Bruno Saftić, Ph.D.

Assistant Professor Marko Cvetković, Ph.D.

Date of defense: 18. February 2021.

Zahvale

Prvenstveno se zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Ivi Kolenković Močilac na velikoj potpori i stručnoj pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se i svim profesorima, docentima i asistentima za sav trud i pruženo znanje tijekom svih godina studija.

I would like to thank Schlumberger company for providing academic licences for Petrel E&P software platform 2018 and Lloyd's Register organisation for providing academic licences for Interactive Petrophysic software package.

Zahvaljujem se Agenciji za ugljikovodike i Ministarstvu zaštite okoliša i energetike na ustupljenim podacima.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je omogućila obrazovanje i pružala podršku tijekom svih godina studija.

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Geografski položaj područja istraživanja.....	2
3.	Strukturno-stratigrafski odnosi istraživnog područja.....	3
3.1.	Stratigrafske značajke	4
3.2.	Strukturne značajke.....	7
4.	Skladištenje CO ₂	10
4.1.	Skladištenje CO ₂ u dubokim slanim vodonosnicima.....	12
5.	Opis metoda	16
5.1.	Interactive Petrophysics	16
5.2.	Petrel	18
6.	Salinitet	19
6.1.	Izračun saliniteta	20
7.	Određivanje poroznosti iz zvučne karotaže	23
8.	Rezultati istraživanja.....	25
8.1.	Karta efektivne debljine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek.....	25
8.2.	Karta relativne dubine do krovine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek	26
8.3.	Rezultati izračuna saliniteta	29
8.4.	Rezultati analize poroznosti.....	30
9.	Diskusija i zaključak.....	34
10.	Popis literature	36
10.1.	Objavljeni radovi.....	36
10.2.	Web izvori.....	38

Popis slika

Slika 2-1. Područje istraživanja s oznakom granica potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek i oznakama lokacija bušotina.....	2
Slika 3-1. Regionalne tektonske jedinice unutar Panonskog bazenskog sustava	3
Slika 3-2. Depresije i uleknine u hrvatskom dijelu Panonskog bazena (Velić, 2007)	4
Slika 3-3. Litostratigrafske jedinice, litološki sastav i EK markeri u istočnom dijelu Dravske depresije	6
Slika 3-4. Razvrstavanje struktura i rasjeda hrvatskog dijela Panonskog bazena.....	9
Slika 4-1. Mogućnosti geološkog uskladištenja ugljikovog dioksida	11
Slika 4-2. Ovisnost gustoće CO ₂ (kg/m ³) o tlaku (bar) i temperaturi (°C)	12
Slika 4-3. Mehanizmi uzamčivanja ugljikovog dioksida u dubokim slanim vodonosnicima	13
Slika 4-4. Prikaz djelovanja uzamčivanja rezidualnim zasićenjem CO ₂	14
Slika 5-1. Normalizirana krivulja spontanog potencijala (SP) i krivulja volumena šejla dobivena interpretacijom krivulje spontanog potencijala (VSHSP).....	17
Slika 5-2. Vrijednosti volumena šejla uzetih za svakih 10 cm naslaga.....	18
Slika 5-3. Površina napravljena na temelju podataka o dubini do krovine Osječkih pješčenjaka.....	19
Slika 6-1. Nomogram za određivanje otpornosti fluida i saliniteta na temelju temperature formacije	22
Slika 7-1. Prikaz prosječnih brzina prolaska valova kroz različite tipove stijena	24
Slika 8-1. Karta efektivne debljine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek....	27
Slika 8-2. Karta relativne dubine do krovine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek.....	288
Slika 8-3. Poroznost određena na temelju zvučne karotaže za bušotinu B1	32
Slika 8-4. Poroznost određena na temelju zvučne karotaže za bušotinu B4	33

Popis tablica

Tablica 8-1. Podatci korišteni za izračun i dobivena vrijednost saliniteta	29
--	----

1. Uvod

Prema izvješćima IPCC-a (IPCC, 2005) postoje jaki dokazi da je globalno zatopljenje u zadnjih 50 godina najvećim dijelom vezano za ljudsku djelatnost i očekuje se da će se taj trend nastaviti kroz 21. stoljeće. Sagorjevanjem fosilnih goriva te sječom šuma povećava se udio stakleničkih plinova u atmosferi, a najveći dio tih plinova čini ugljikov dioksid. Zbog toga se javlja potreba za pronalaženjem mjera koje će dovesti do smanjenja emisije CO₂ u atmosferu, a one uključuju povećanje energetske učinkovitosti, zamjenu ugljena prirodnim plinom, povećanje upotrebe obnovljivih izvora energije ili nuklearne energije, povećanje prirodnog uklanjanja CO₂ iz atmosfere sprječavanjem sječe šuma i pošumljavanjem te kaptiranje i geološko skladištenje CO₂.

Cilj ovog rada je istražiti potencijal dubokog slanog vodonosnika Osijek u Osječkim pješčenjacima istočnog dijela Dravske depresije za geološko skladištenje ugljikovog dioksida. Za to je bilo potrebno interpretirati podatke dobivene geofizičkim mjerenjima u bušotinama da bi se odredile dubine krovine i podine Osjećkih pješčenjaka, njihova efektivna debljina te debljina i kvaliteta izolatorskih stijena u krovini pješčenjaka. Nakon definiranja granica Osjećkih pješčenjaka, izračunati su salinitet i poroznost promatranog intervala, a na kraju su izrađene karta dubine do krovine i karta efektivne debljine na kojoj su obilježene pretpostavljene granice vodonosnika.

2. Geografski položaj područja istraživanja

Područje na kojem se nalaze bušotine korištene u ovom radu nalazi se na istoku Republike Hrvatske, a obuhvaća širu okolicu grada Osijeka. Približne granice istraživanog područja i lokacije bušotina prikazane su na slici 2-1. Najvećim dijelom nalazi se u Osječko-baranjskoj županiji, a na jugoistoku zahvaća i mali dio Vukovarsko-srijemske županije.

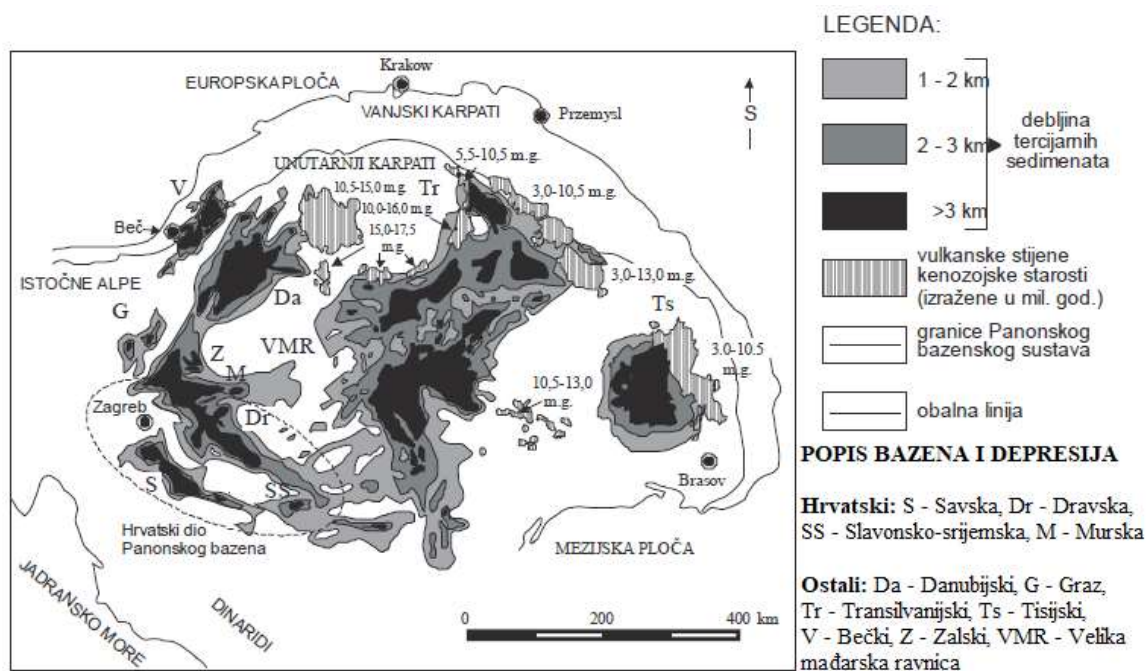


Slika 2-1. Područje istraživanja s oznakom granica potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek i oznakama lokacija bušotina (preuzeto s <https://www.google.com/maps>)

Istraživano područje pripada Dravskoj depresiji koja pokriva područje od oko 12 000 km², od čega oko 9 100 km² pripada Republici Hrvatskoj (Malvić & Cvetković, 2013). To čini Dravsku depresiju najvećom jedinicom unutar hrvatskog dijela Panonskog bazena. Hrvatski dio Dravske depresije na zapadu graniči s Murskom depresijom, na jugu sa Savskom i Slavonsko-srijemskom depresijom, na istoku sa Srbijom, te na sjeveru s Mađarskom. Prema reljefu spada u nizinsko područje do 200 metara nadmorske visine (<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=26390>).

3. Strukturno-stratigrafski odnosi istraživanih područja

Hrvatski dio Panonskog bazena nalazi se na jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava koji je smješten između stare Europske ploče na sjeveru, Alpi na zapadu, Jadranske ploče na jugu te Mezijske ploče na istoku (slika 3-1).



Slika 3-1. Regionalne tektonske jedinice unutar Panonskog bazenskog sustava (izvor: Malvić & Saftić, 2008; modificirano prema: Royden, 1988)

Panonski bazenski sustav pripada skupini zalučnih (pozadinskih, engl. *back-arc*) bazena, a njegovo nastajanje započelo je u otnangu subdukcijom i konvergencijom Apulijske ploče pod Dinaride (Malvić & Saftić, 2008). Tim procesom otvara se prostor između Alpa, Karpata i Dinarida prilikom čega se stvaraju normalni listrički i transkurentni rasjedi (Pavelić & Kovačić, 2018). U prostoru koji nazivamo Panonski bazen otvorene su brojne ekstenzijske strukturne depresije uz lijeve i desne transkurentne rasjedne sustave, a posljedica tih procesa je nastanak bazena, depresija i uleknina, koje su prikazane na slici 3-2 (Malvić & Saftić, 2008).



Slika 3-2. Depresije i uleknine u hrvatskom dijelu Panonskog bazena (Velić, 2007)

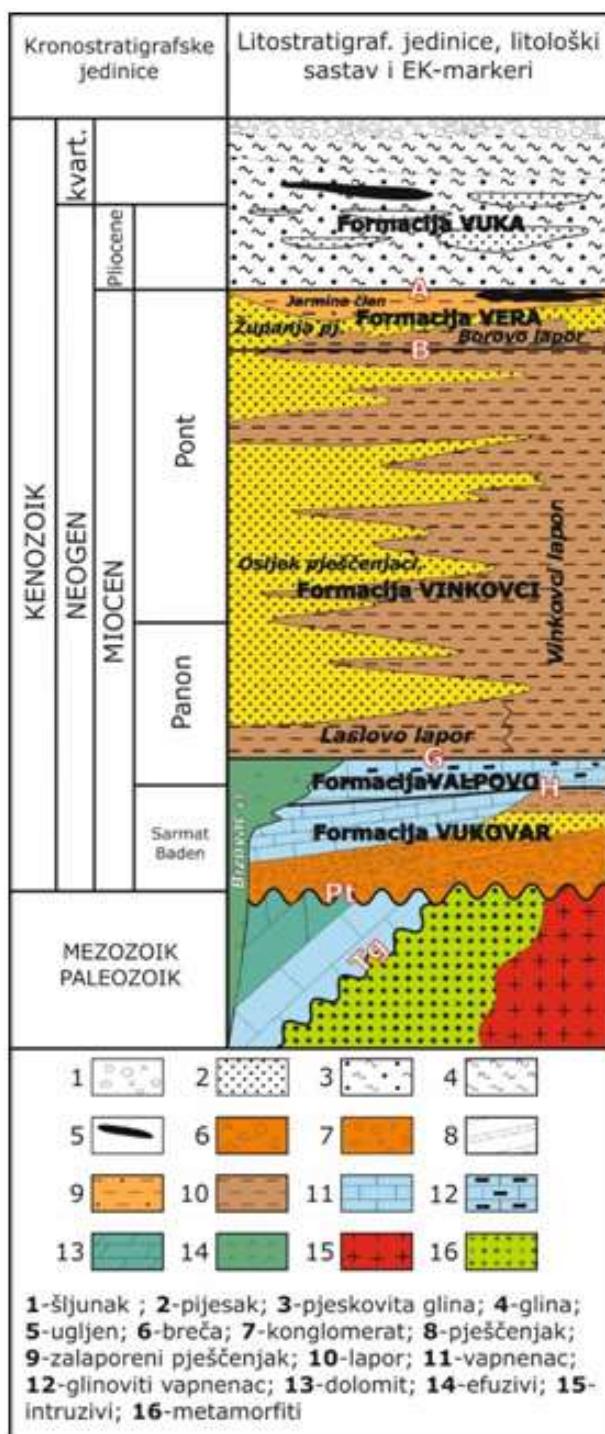
Jedna od depresija nastalih ovim procesima je Dravska depresija koja je podijeljena na istočni i zapadni dio. Područje istraživanja nalazi se u istočnom dijelu Dravske depresije. Dravska depresija je SZ-JI orijentacije i asimetričnog je oblika, što se odnosi na blagu SI i strmu JZ granicu (<https://www.azu.hr/istra%C5%BEivanje-i-eksploatacija/geolo%C5%A1ki-pregled-kopna/>).

3.1. Stratigrafske značajke

Ukupna debljina naslaga Dravske depresije doseže i preko 7 000 m na nekim mjestima (Pavelić & Kovačić, 2018). Većinu ispune čine klastične sedimentne stijene srednjeg i mlađeg miocena i pliocena te holocenski sedimenti. Na nekim mjestima se mogu pronaći i efuzivne stijene srednje miocenske starosti te fluvijalni i lakustrinski sedimenti starijeg miocena. Podina Dravske depresije je mezozojske i paleozojske starosti, a sastoji se većinom od karbonatnih stijena, amfibolita, zelenih škriljavaca, gnajseva, granita i gabra (Malvić & Cvetković, 2013). Metamorfiti i magmatiti mezozojske i paleozojske starosti

nazivaju se temeljno gorje (EK-reper Tg), a sedimentne stijene mezozojske starosti koje se nalaze između temeljnog gorja i neogensko-kvartarne ispune nazivaju se podloga tercijara (EK-reper Pt, P.T. ili PTc) (Malvić & Saftić, 2008).

Najdublja formacija u istočnom dijelu Dravske depresije je formacija Vukovar. U podini je omeđena EK-reperom Tg ili pT, a u krovini EK-markerom Rs7. U donjem dijelu formacija Vukovar sastavljena je od krupnoklastičnih sedimenata (breče i konglomerati), a u gornjem dijelu sastoji se od pješčenjaka i vapnenaca sarmatske starosti (Malvić & Cvetković, 2013). Formacija Valpovo nalazi se između EK-markera Rs7 i Rs5. Većinom se sastoji od glinovitih vapnenaca, a po starosti pripada starijem panonu (Malvić & Cvetković, 2013). Iznad formacije Valpovo nalazi se formacija Vinkovci. Donji dio te formacije taložen je tijekom starijeg panona i sastoji se većinom od pelita, odnosno lapora Laslovo i njegovog bočnog ekvivalenta lapora Vinkovci, dok pješčenjaci prevladavaju samo unutar člana Poljana pješčenjaci. Gornji dio formacije Vinkovci čine naslage donjeg i gornjeg pontaa. Unutar naslaga mlađe pontske starosti nalaze se Osječki pješčenjaci, predmet istraživanja ovog rada. Od formacije Vinkovci EK-markerom B je odvojena formacija Vera koja je raščlanjena na lapor Borovo u donjem dijelu i pješčenjake Županja i član Jarmina u gornjem dijelu (slika 3-3). Naslage taložene tijekom pliocena i kvartara obuhvaćene su formacijom Vuka, koja se u baznom dijelu sastoji od gline, siltova i pijesaka, a u gornjem dijelu od pijesaka i šljunaka (Malvić & Cvetković, 2013).



Slika 3-3. Litostratigrafske jedinice, litološki sastav i EK markeri u istočnom dijelu Dravske depresije (Malvić & Cvetković, 2013)

Starija podjela naslaga ispune hrvatskog dijela Panonskog bazena bazirala se na fosilnom sadržaju i naslage su raščlanjene u biostratigrafske jedinice – akrozone, pa su tako donjopanonske naslage nazvane Croatica naslagama, prema brojnim nalazima puža *Radix croatica*. Croatica naslage uglavnom čine lapori i glinoviti vapnenci u različitim

udjelima. Na Croatica naslage naliježu gornjopanonske Banatica naslage. One su ime dobile po karakterističnom fosilu, školjkašu *Congerina banatica*. Tijekom starijeg pontatalože se Abichi naslage, koje su ime dobile po školjkašu *Paradacna abichi*. Za vrijeme mlađeg pontatalože se Rhomboidea naslage koje su nazvane po školjkašu *Congerina rhomboidea* (Malvić & Cvetković, 2013).

3.2. Strukturne značajke

Evolucija JI dijela Panonskog bazena odvijala se tijekom kontinuirane subdukcije Jadranske ploče pod Dinaride i Alpe. Ta kolizija dovela je do stvaranja reversnih rasjeda u Južnim Alpama i Dinaridima te do desnih transkurentnih pomaka (Prelogović et al, 1998). Postanak hrvatskog dijela Panonskog bazena podijeljen je na dvije faze. Prva je sin-riftna, koja je trajala od ranog miocena (otnanga) do srednjeg miocena (srednji baden), a druga je post-riftna faza, koja je trajala od srednjeg miocena (kasni baden) do kasnog pontata kada dolazi do kompresije koja je uzrokovala stvaranje struktura u kojima se danas nalaze ležišta ugljikovodika (Pavelić & Kovačić, 2018).

Ekstenzijska tektonika započela je između oligocena i ranog miocena u vrijeme aktivnog andezitnog vulkanizma u području sjeverno od Zagreba (Prelogović et al, 1998). Tada nastupa sin-riftna faza tijekom koje dolazi do podizanja astenosfere, stanjivanja kore zbog ekstenzijske tektonike te izostatičkog slijeganja (Pavelić & Kovačić, 2018). Slijedila je glavna ekstenzijska faza tijekom ranog i srednjeg miocena kada su pomaci (prema sjeveroistoku) blokova duž Medvedničkog rasjeda i rasjeda između Pakraca i Osijeka doveli do otvaranja velikih ekstenzijskih bazena koji su ispunjeni neogenskim sedimentima (Prelogović et al, 1998). Od srednjeg miocena, tijekom post-riftna faze, dolazi do termalne subsidencije zbog hlađenja litosfere (Pavelić & Kovačić, 2018).

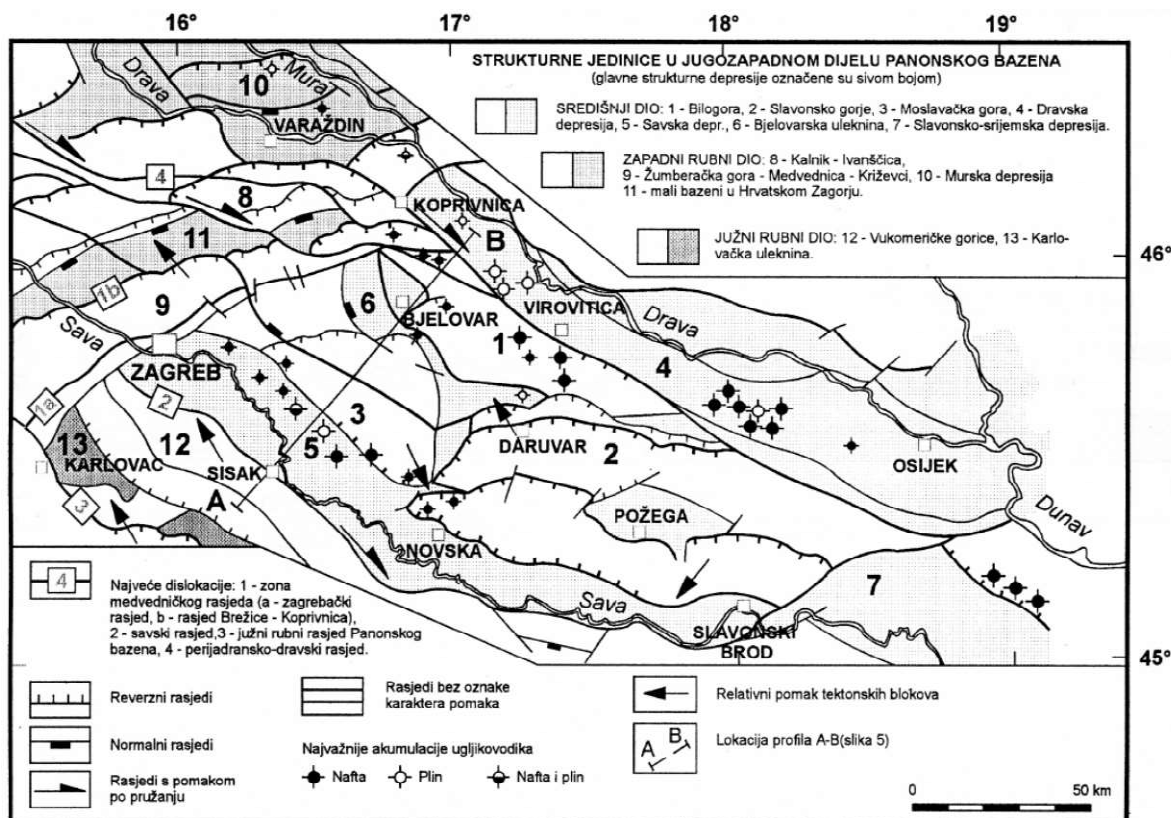
Tijekom ranog miocena na cijelom području PBS-a vladala je marinska transgresija, a taloženje se odvija diskordantno na paleozojske i mezozojske stijene. Tada započinje formiranje središnjeg Paratethysa, kada današnje gore u Sjevernoj Hrvatskoj predstavljaju izolirane otoke (Medvednica, Psunj). Zbog ekstenzije nastaju manje romboidalne grabe na morskom dnu, a najveća od njih je Bjelovarska subdepresija. U plitkim morima i na kopnu dolazi do trošenja, a rastrošeni materijal taložen je u dubljim dijelovima mora. Glavni mehanizam taloženja bile su aluvijalne lepeze (Malvić &

Cvetković, 2013). Od ranog miocena do sarmata zajedno se pojavljuju andezitne i bazaltne eruptivne stijene s piroklastitima u području Drave i Slavonskih planina (Prelogović et al, 1998). U badenu, tijekom prve transtenzijske faze, dolazi do maksimalne ekstenzije u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. Glavni mehanizam strukturnog razvoja bila je strike-slip tektonika. U kasnom badenu dolazi do promjene iz transtenzijske u post-ekstenzijsku fazu koja je karakterizirana lokalnom termalnom subsidencijom (Malvić & Velić, 2011). Razina mora raste te se ponovno otvara veza s Indo-pacifikom, a dotad izdignuti dijelovi kopna se na većem dijelu Dravske depresije potapaju. Na kraju badena se gubi veza s Indo-pacifikom i dolazi do dezintegracije središnjeg Paratethysa (Malvić & Cvetković, 2013). U sarmatu dolazi do prve transpresijske faze. Ekstenzijska tektonika, odnosno strike-slip strukture i normalni rasjedi, zamijenjena je kompresijskom tektonikom (većinom reversni rasjedi) u gotovo cijelom Panonskom bazenskom sustavu (Malvić & Velić, 2011). Nakon što je središnji Paratethys dezintegriran u badenu, iz njega u panonu nastaje brakično jezero Panon. Salinitet vode konstantno opada zbog donosa slatke vode i nepostojanja veze s otvorenim morem. Jezero Panon se kasnije dezintegriralo na nekoliko regionalnih slatkovodnih jezera, a područja na kojima su se nalazila ta jezera se približno podudaraju s današnjim depresijama u Panonskom bazenskom sustavu (Malvić & Cvetković, 2013).

Druga transtenzijska faza počinje u ranom panonu kada se ponovno javlja strike-slip tektonika (Malvić & Velić, 2011). Tijekom mlađeg panona Dravska depresija je bila izduženo brakično jezero u kojem se odvijala pelitna bazenska sedimentacija uz povremene prekide turbiditima. Istočni dio Dravske depresije je najvjerojatnije bio rubno područje u kojem su na sedimentaciju utjecali i turbiditni događaji koji su prevladavali u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava, ali i deltna i prodeltna sedimentacija koja je prevladavala u mađarskom dijelu Panonskog bazenskog sustava. Posljedica takvog taloženja su litostratigrafske jedinice koje se ne mogu regionalno korelirati, a prema tome je i litostratigrafska nomenklatura različita u istočnom i zapadnom dijelu Dravske depresije (Malvić & Cvetković, 2013).

U pontu se nastavlja taloženje velikih količina klastičnog materijala kojem je izvorišno područje daleko na sjeveroistoku. Najveće debljine pješčenjaka talože se u najdubljim dijelovima iz turbiditnih tokova materijalom s Istočnih Alpi (Malvić & Cvetković, 2013). Tijekom panona i pontu formirane su Savska i Dravska depresija te su izdignute Slavonske planine (Prelogović et al, 1998). Za vrijeme kasnog pontu, pliocena i kvartara dolazi do druge transpresijske faze kada se većina spuštenih, većinom cvjetnih,

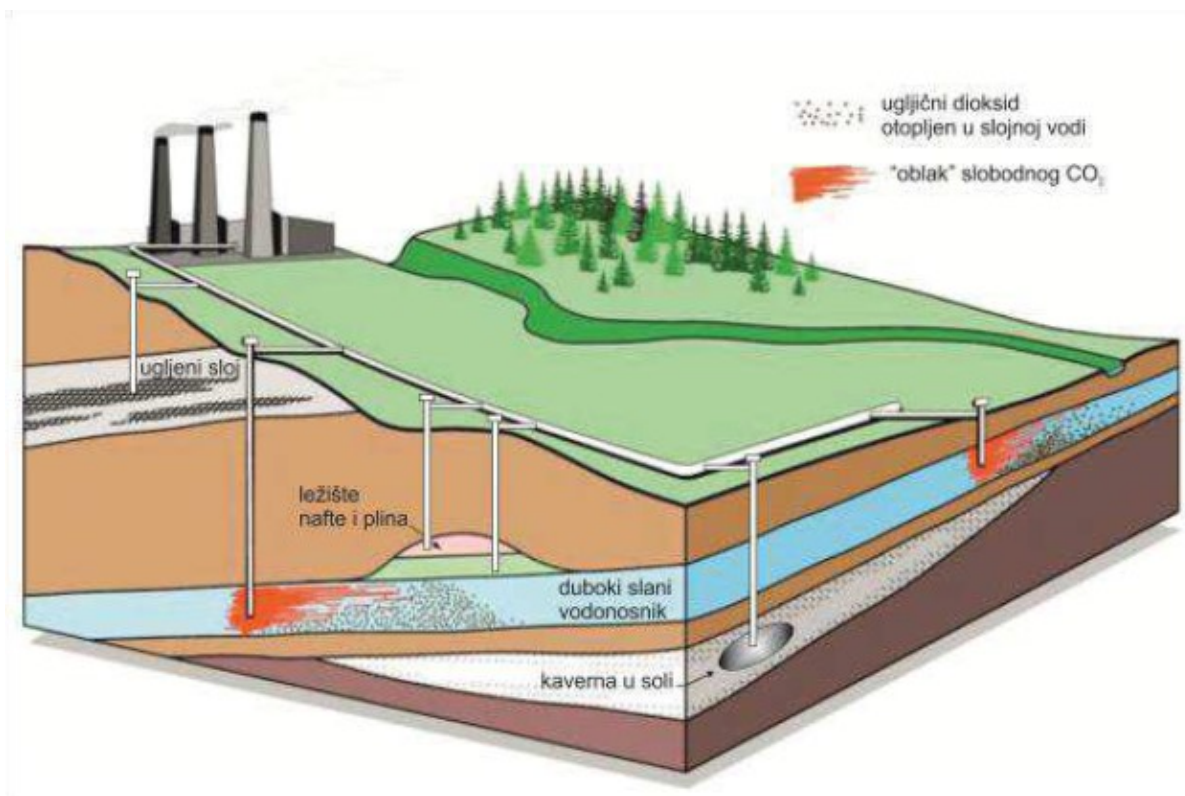
struktura izdiže, što uzrokuje stvaranje antiklinala povoljnih za nakupljanje ugljikovodika. Jezerski okoliš je smanjen. Na dijelovima gdje je prije bilo jezero taloženjem pijeska i gline, a u nekim dubljim dijelovima siltova, lapora i karbonata, nastaju močvarni, aluvijalni i kopneni sedimenti (les) (Malvić & Cvetković, 2013). U pliocenu dolazi do stvaranja novog stila deformacija koji se nastavlja i danas. Dominantno je rasjedanje na desnim rasjedima s pomakom prema SZ i desnih transpresijskih pomaka na rasjedima s pomakom prema ZSZ. (Prelogović et al, 1998; slika 3-4)



Slika 3-4. Razvrstavanje struktura i rasjeda hrvatskog dijela Panonskog bazena (iz Velić, 2007, preuzeto iz Prelogović et al., 1998 i Lučić et al., 2001)

4. Geološko skladištenje CO₂

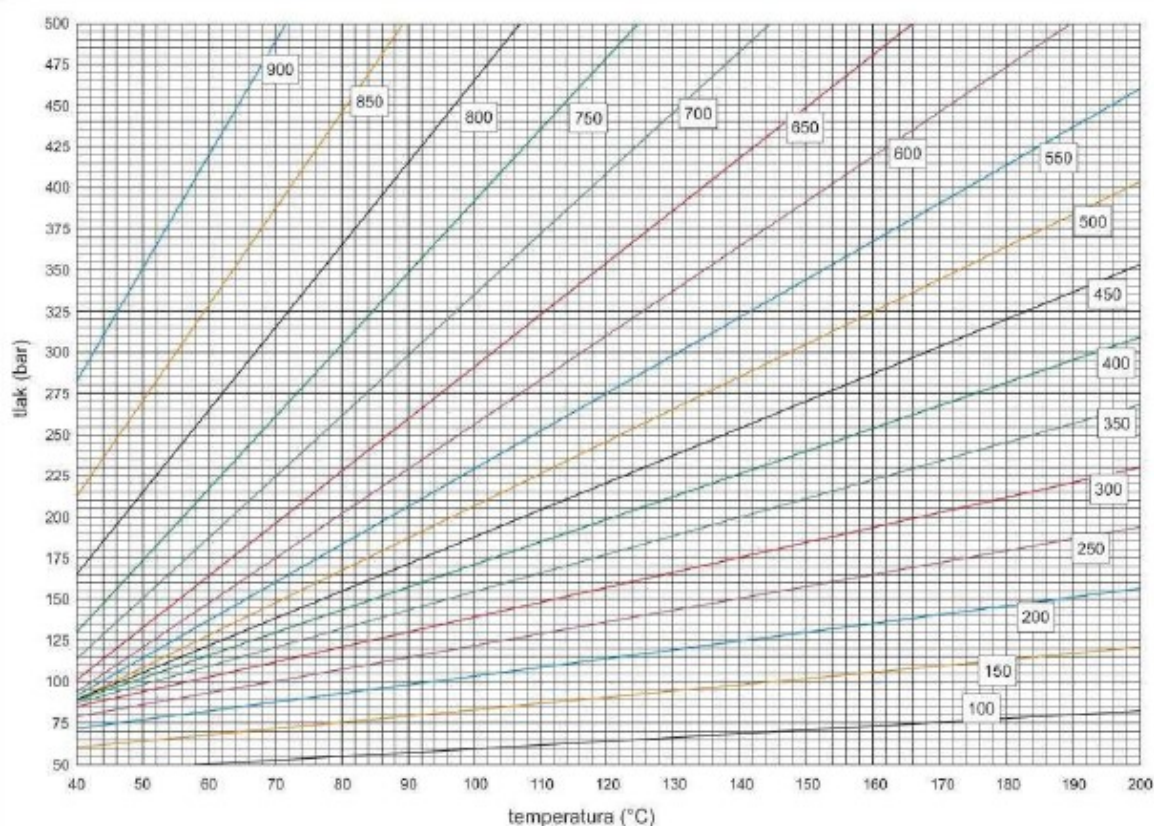
Ugljikov dioksid se može trajno skladištiti utiskivanjem u slojeve poroznih i propusnih stijena duboko u podzemlju, stvaranjem karbonatnih minerala na površini te otapanjem u oceanima na dubinama većim od 3500 m. Otapanje u oceanima odbačeno je jer su oceani već sada najveći prirodni stabilizatori razine ugljikovog dioksida u atmosferi jer se gotovo trećina antropogenog CO₂ ukloni iz atmosfere otapanjem u oceanima (Sabine & Feely, 2007) i dodatno utiskivanje tog plina bi poremetilo prirodne procese i uvjete života u oceanu. Skladištenje vezanjem CO₂ na karbonatne minerale se intenzivno istražuje, ali je to skup i spor proces, pa je time još daleko od industrijske primjene. Koncept geološkog skladištenja ugljikovog dioksida temelji se na činjenici da se on već nalazi na različitim mjestima u Zemljinoj kori kao čisti CO₂ ili pomiješan s ugljikovodicima i drugim plinovima i da se tamo zadržava već milijunima godina. Također, podzemlje se već dugo istražuje i iskorištava što znači da već postoji metodologija, znanje i oprema za istraživanje potencijalnih mjesta za skladištenje CO₂. Ugljikov dioksid može se skladištiti na više mjesta u sedimentnim bazenima, a to su iscrpljena naftna i plinska ležišta, naftna ležišta u proizvodnji gdje se CO₂ utiskuje u ležište i time istiskuje ugljikovodike, slojevi ugljena, duboki slani vodonosnici, kaverne u soli, bazalti s razvijenom pukotinskom poroznošću, šejlovi bogati organskom tvari (slika 4-1).



Slika 4-1. Mogućnosti geološkog uskladištenja ugljikovog dioksida (preuzeto iz Kolenković & Saftić, 2014; modificirano prema Bachu, 2003)

Prema IPCC (2005), kako bi skladištenje CO_2 bilo moguće, potencijalne lokacije moraju zadovoljiti određene kriterije. Za početak trebaju imati dovoljno velik kapacitet i injektibilnost, moraju imati zadovoljavajuću pokrovnu stijenu i moraju biti smještene u tektonski stabilnom području. Nadalje, treba se istražiti tektonska aktivnost, vrsta sedimenta, geotermalni i hidrotermalni režimi, ležišta ugljikovodika, ugljena i soli, razvijenost industrije i infrastrukture te socijalna pitanja kao što su razvijenost, ekonomija, briga za okoliš, opće obrazovanje te stavovi (IPCC, 2005). Bitno je također i gdje se ta potencijalna lokacija nalazi. Idealne lokacije su unutar sedimentnih bazena formiranih na sredini ili blizu ruba stabilne kontinentalne ploče zbog stabilnosti i građe (sadrže porozne i propusne stijene, te ležišta ugljikovodika i ugljena). Također je bitno da se prostor za skladištenje nalazi na dovoljno velikoj dubini kako bi termički gradijent i gradijent tlaka dosegli uvjete za skladištenje CO_2 u nadkritičnom stanju, a to je tlak od približno 74 bara i temperatura od približno 31°C (304,15 K). Kada je CO_2 u nadkritičnom stanju, gustoća mu je znatno povišena što znači da će se puni prostor bolje iskoristiti te će se djelovanje sile uzgona smanjiti zbog manje razlike u gustoći ugljikovog dioksida i vode. Na 4-2 prikazana je ovisnost gustoće CO_2 (kg/m^3) o tlaku (bar) i temperaturi ($^\circ\text{C}$). Dosadašnja istraživanja

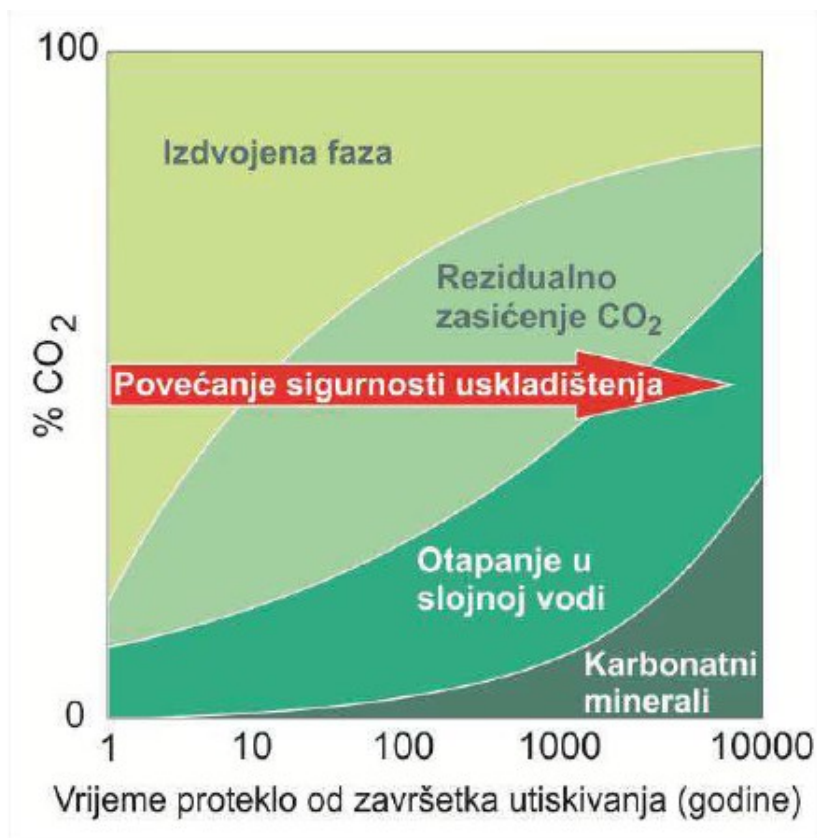
pokazala su da najveći potencijal za skladištenje CO₂ imaju iscrpljena plinska i naftna ležišta te duboki slani vodonosnici (Kolenković & Saftić, 2014).



Slika 4-2. Ovisnost gustoće CO₂ (kg/m³) o tlaku (bar) i temperaturi (°C) (preuzeto iz Kolenković & Saftić, 2014; Vulin, 2010, prema Span & Wagner, 1996)

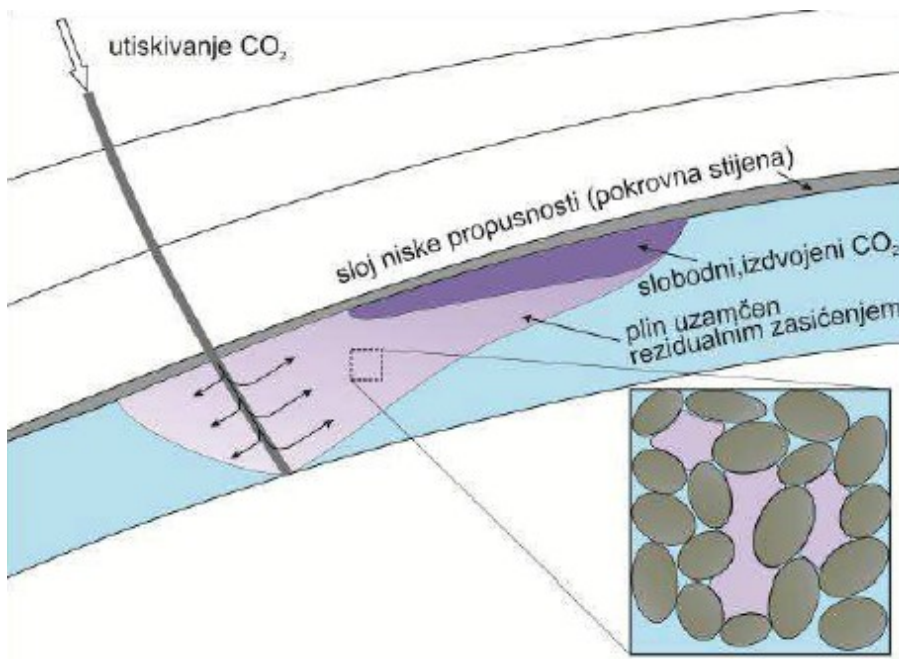
4.1. Skladištenje CO₂ u dubokim slanim vodonosnicima

Duboki slani vodonosnici su porozne i propusne stijene u čijim se porama nalazi voda s visokim udjelom otopljenih tvari. Imaju veliki potencijal za skladištenje CO₂ zato jer se nalaze na dovoljno velikim dubinama za skladištenje CO₂ u nadkritičnoj fazi, geografski su široko rasprostranjeni, imaju veći kapacitet od svih ostalih podzemnih objekata te se često nalaze u blizini glavnih izvora ugljikovog dioksida (Lima et al, 2011). Također im je velika prednost povećanje sigurnosti uskladištenja zbog djelovanja različitih mehanizama uzamčivanja (vezanja) CO₂ (IPCC, 2005; slika 4-3).



Slika 4-3. Mehanizmi uzamčivanja ugljikovog dioksida u dubokim slanim vodonosnicima (preuzeto iz Kolenković & Saftić, 2014; modificirano prema IPCC, 2005)

Na put kretanja ugljikovog dioksida tijekom i nakon utiskivanja najviše utječe uzgon koji plin gura vertikalno prema slabopropusnim stijenama u krovini vodonosnika, gdje se nakuplja kao izdvojena faza unutar stratigrafske ili strukturne zamke. Tako CO₂ iz pora istiskuje vodu koja se nakon prolaska plina vraća u zonu zasićenu s CO₂. Pri većim zasićenjima, CO₂ je kontinuiran u porama, ali smanjenjem zasićenja dolazi do prekida u suženjima pora zbog kapilarnog tlaka. Tako mjehurić CO₂ ostaje zarobljen u velikoj pori, a taj mehanizam naziva se kapilarno uzamčivanje ili uzamčivanje rezidualnim zasićenjem (Juanes et al., 2006; slika 4-4)



Slika 4-4. Prikaz djelovanja uzamčivanja rezidualnim zasićenjem CO₂ (preuzeto iz Kolenković & Saftić, 2014; Juanes et al., 2006)

Do miješanja i otapanja ugljikovog dioksida u vodonosniku dolazi prvo kroz disperziju, a kada slojna voda postane zasićena ugljikovim dioksidom, dolazi do miješanja difuzijom (Bachu et al., 2007). Ako se radi o stijenama visoke vertikalne propusnosti, dolazi i do konvekcijskog strujanja i kontinuirane zamjene sloja vode zasićene ugljikovim dioksidom iz područja kontakta sa slobodnim CO₂ s vodom nezasićenom ugljikovim dioksidom (Ennis-King & Paterson, 2002). Proces otapanja ugljikovog dioksida je spor proces koji počinje značajnije djelovati tek nakon prestanka utiskivanja. (Kolenković & Saftić, 2014) Otapanje ugljikovog dioksida u vodi ovisi o temperaturi, tlaku i salinitetu (Lima et al., 2011). Nakon što je CO₂ otopljen u slojnoj vodi, ona reagira s mineralima unutar vodonosnika te dolazi do otapanja jednih i precipitacije drugih minerala. Taj mehanizam naziva se mineralno uzamčivanje "*in situ*" i ovisi o kemijskom sastavu slojne vode, mineralnom sastavu stijena vodonosnika, temperaturi i tlaku, kontaktnoj površini mineralnih zrna i slojne vode te brzini toka fluida duž tog kontakta (Gunter et al., 2004).

Svi navedeni mehanizmi uzamčivanja su bitni za učinkovitost skladištenja ugljikovog dioksida u podzemnom skladištu, ali zbog građe vodonosnika neki mehanizmi imaju veću učinkovitost od drugih. Tijekom utiskivanja najveću učinkovitost ima uzamčivanje u stratigrafskim i strukturnim zamkama, a nakon prestanka utiskivanja

uzamčivanje rezidualnim zasićenjem CO₂. Uzamčivanje otapanjem i precipitacijom karbonatnih minerala su spori procesi koji su najučinkovitiji tek nekoliko stotina godina nakon utiskivanja (slika 4-3).

Najveći problem kod skladištenja ugljikovog dioksida u dubokim slanim vodonosnicima je činjenica da vodonosnici do sada nisu bili detaljno istraživani, osim ukoliko su se uz njih nalazila naftna i plinska ležišta. Drugi problem je porast tlaka do kojeg dolazi pri utiskivanju velike količine ugljikovog dioksida u duboki slani vodonosnik. Utiskivanjem ugljikovog dioksida u kolektorsku stijenu dolazi do značajnog porasta tlaka u blizini bušotine. Ovisno o propusnosti stijene, polje tlaka se širi kroz stijenu. Porast tlaka nije problem kod utiskivanja u iscrpljena ležišta jer tijekom crpljenja ugljikovodika dolazi do sniženja tlaka (Kolenković & Saftić, 2014).

Vodonosnici pogodni za skladištenje ugljikovog dioksida trebaju zadovoljavati određene kriterije. Za početak, pore im moraju biti zasićene vodom koja se zbog povišenog saliniteta ne može koristiti kao pitka ili tehnička voda (otopljenih tvari trebalo bi ukupno biti više od 30 g/l). Nadalje, poroznost bi im morala biti veća od 10%, a propusnost poželjno veća od 200 mD. Trebaju zalijegati na dubinama od 800 metara ili više da bi se dosegli nadkritični uvjeti temperature i tlaka u kojima ugljikov dioksid ima povećanu gustoću, ali i da ne bi predstavljali direktnu opasnost za pitku vodu, trebaju imati određenu debljinu, poželjno više od 50 metara, kako bi se ograničilo područje utjecaja utiskivanja te iznad vodonosnika moraju postojati slabopropusne stijene, a lateralne granice biti propusne da bi se omogućila migracija slojne vode u susjedne propusne jedinice (Chadwick et al. (ed.), 2008).

5. Opis metoda

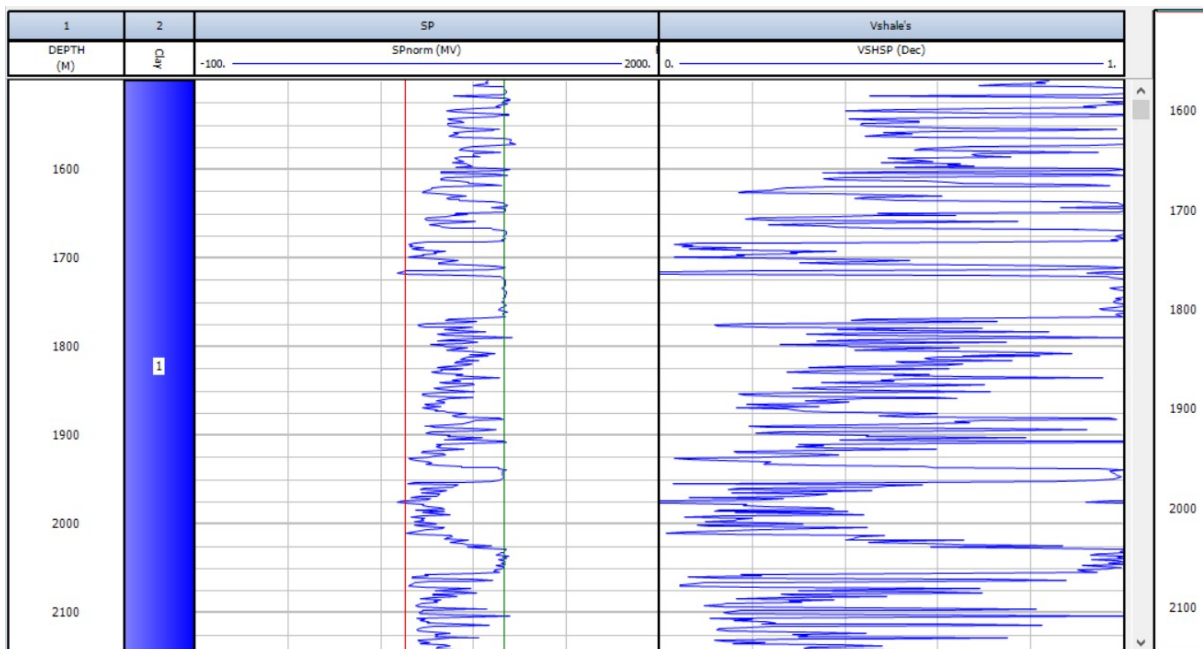
Dio ovog rada izrađen je u programima *Interactive Petrophysics* (IP) i *Petrel E&P software platform 2020*. Ulazni podatci za analize u IP-u su krivulje dobivene geofizičkim mjerenjima u bušotini te podatci iz geoloških izvješća bušotina koji su dobiveni uzimanjem uzoraka s vibracijskog sita na svakih 5 m.

5.1. Interactive Petrophysics

Interactive Petrophysics (IP) je softver za interpretaciju geofizičkih podataka iz bušotina. Primjena mu je vrlo široka, od procjene poroznosti i pornog tlaka do izračuna volumena gline ili šejla, saturacije vodom i produktivnosti ležišta. U ovom radu korišten je u svrhu normalizacije krivulja dobivenih karotažom spontanog potencijala te izračuna udjela šejla unutar određenog intervala naslaga te procjene poroznosti. U program su uneseni podatci dobiveni različitim karotažama (karotaže spontanog potencijala, otpornosti, gustoće, mikrolog,...).

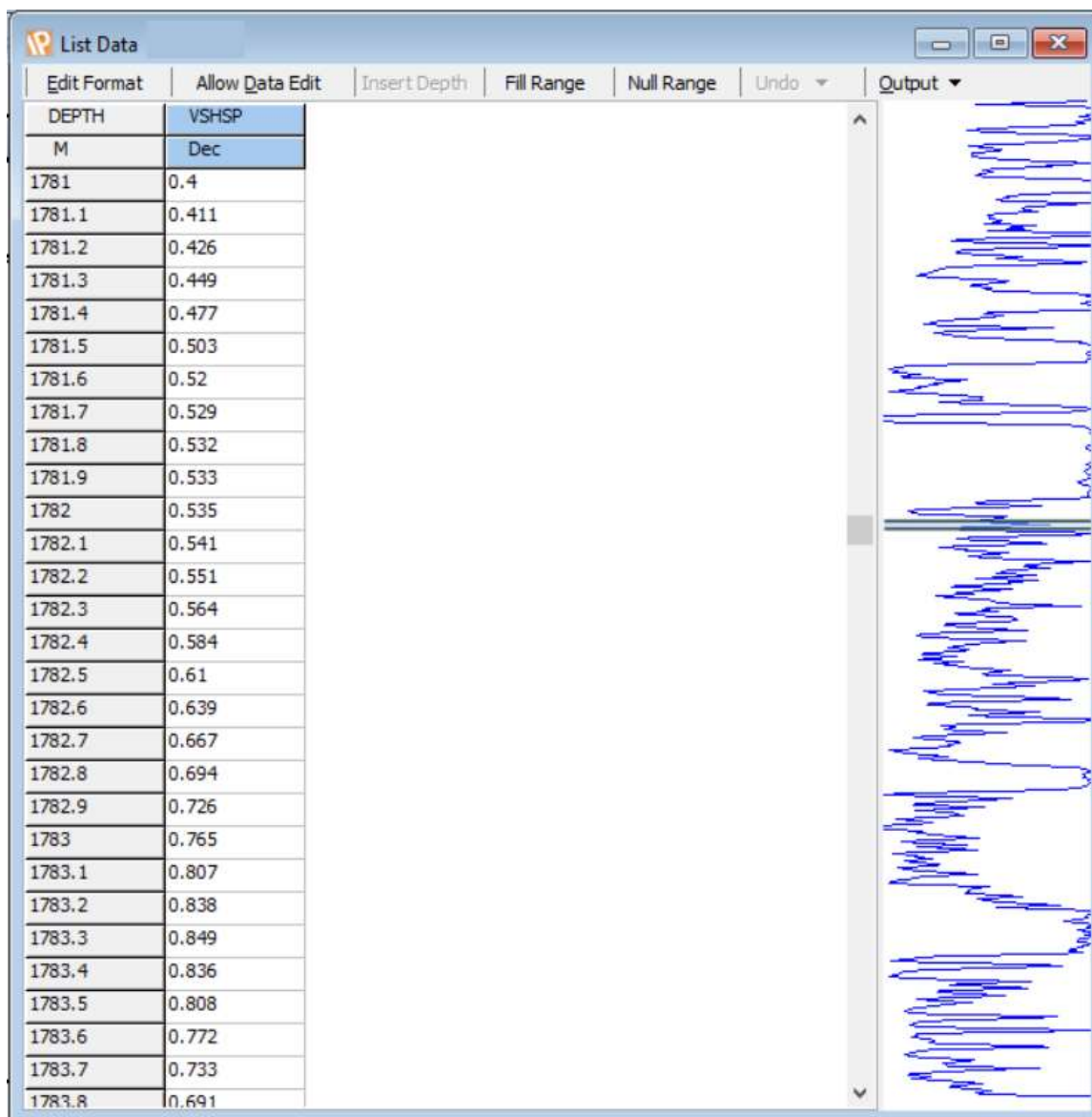
S obzirom da je ovaj rad usmjeren samo na Osječke pješčenjake, prvo je bilo potrebno proučiti geološka izvješća za svaku bušotinu i utvrditi u kojim intervalima se ti pješčenjaci i njihovi izolatori nalaze. Kad je definiran interval od interesa, pristupilo se analizi volumena šejla, kako bi se temeljem rezultata odvojili slojevi pješčenjaka od slojeva lapora, odnosno kako bi se dobila efektivna debljina Osječkih pješčenjaka. Krivulju spontanog potencijala je prije toga bilo potrebno normalizirati, a normalizacija je izvršena pomoću naredbe *Interactive Baseline Shift*. Nakon završene normalizacije, slijedi izračunavanje volumena šejla pomoću naredbe *Clay Volume*. Za izračun korištena je krivulja spontanog potencijala. Inače je pravilo pri izračunu volumena šejla koristiti krivulju prirodne radioaktivnosti, ali u našem području ona se ne koristi jer su pješčenjaci većinom grauvske koje sadrže veći udio kalijevih feldspata. Na slici 5-1 prikazane su normalizirana krivulja spontanog potencijala (SP) i krivulja volumena šejla dobivena interpretacijom krivulje spontanog potencijala (VSHSP) na temelju koje je bilo moguće odrediti granice između slojeva pješčenjaka i šejla. Usporedbom krivulja SP-a i podataka u geološkim izvješćima za svaku bušotinu određeni su slojevi pješčenjaka koji bi se potencijalno mogli koristiti za skladištenje CO₂. Valja naglasiti da je za bušotinu B2

odredba intervala Osječkih pješčenjaka izvršena temeljem operativnog geološkog dijagrama, a ne temeljem karotažnih mjerenja zbog nepouzdanosti krivulje spontanog potencijala.



Slika 5-1. normalizirana krivulja spontanog potencijala (SP) i krivulja volumena šejla dobivena interpretacijom krivulje spontanog potencijala (VSHSP)

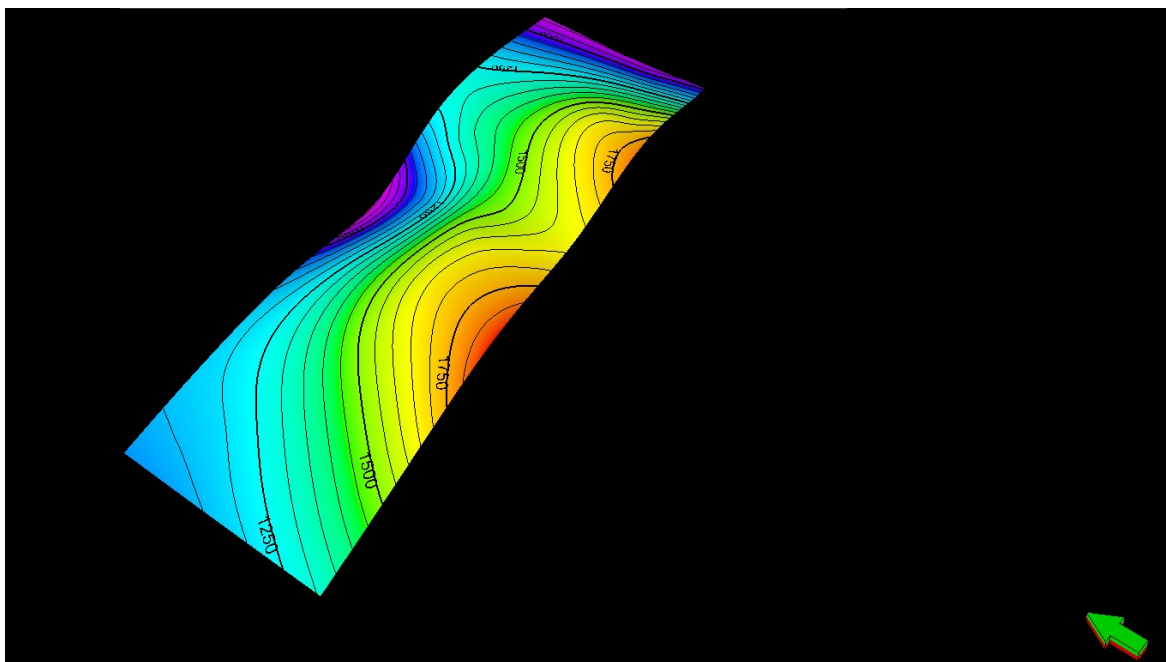
U naftnoj industriji se u pravilu uzima da su propusni slojevi oni koji imaju manje od 50% šejla, ali pregledom karotažnih krivulja koje su korištene u ovom radu uzeto je da se za granicu između propusnih i nepropusnih slojeva uzme 60% šejla. Nakon toga bilo je moguće precizno odrediti na kojim se dubinama nalazi krovina pješčenjaka koji su odabrani kao potencijalni duboki slani vodonosnik za skladištenje CO₂ te kolika je njihova efektivna debljina. Na slici 5-2 prikazane su vrijednosti volumena šejla uzetih za svakih 10 cm naslaga.



Slika 5-2. Vrijednosti volumena šejla s razlučivošću od cm

5.2. Petrel

Nakon obrade podataka dobivenih iz IP-a, gdje je trebalo na svakoj bušotini utvrditi na kojim dubinama se nalaze Osječki pješčenjaci, slijedila je izrada karata u računalnom programu *Petrel E&P software platform 2020*. U ovom radu kontruirane su karta relativne dubine do krovine i karta efektivne debljine. Nakon unosa ulaznih podataka u Petrel, karte su načinjene pomoću naredbe *Make surface* (slika 5-3). Kako bi se iscrtala linija isklinjenja potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek te napravile određene preinake na kartama, korišten je računalni program *Corel DRAW 2020*.



Slika 5-3. Površina napravljena na temelju podataka o dubini do krovine Osječkih pješčenjaka

6. Salinitet

Slojna voda ima važnu ulogu u mnogim geološkim procesima i vrlo je bitno razumjeti njen mineralni sastav. U ovom radu istraživao je salinitet slojne vode unutar dubokog slanog vodonosnika, jer je povišen salinitet preduvjet da bi se određeni duboki slani vodonosnik razmatrao kao potencijalno skladište ugljikovog dioksida.

Salinitet slojne vode određen je količinom otopljenih mineralnih tvari, a izražen je u miligramima po litri [mg/l] ili gramima po litri [g/l] otopljenih tvari. Tako slatke vode sadrže manje od 1 g/l, brakične sadrže između 1 i 10 g/l, slane od 10 do 100 g/l, a sve vode koje sadrže iznad 100 g/l nazivamo hiperslane vode. U pravilu koncentracija otopljenih mineralnih tvari u slojnoj vodi raste s dubinom (osim kod povišenog pronađenog tlaka) (Velić, 2007). Salinitet ovisi o petrofizikalnim svojstvima stijena (poroznost i propusnost), mineralnom sastavu stijena, dubini zalijeganja (tlakovima), geotermalnom gradijentu, mogućnosti infiltracije površinskih voda i slično (Velić, 2007).

Određivanje saliniteta vode može se raditi direktno, kemijskom analizom uzorka slojne vode dobivenog tijekom testiranja bušotine (engl. Drill-Stem Test - DST) ili posredno, pomoću karotaže spontanog potencijala. Drill Stem Test je metoda kojom se određuje produktivnost ležišta i svojstva fluida unutar testiranog sloja. Njime se mjeri tlak

u ležištu, protok (propusnost) i temperatura formacije (Lyons, 2010). Ova metoda daje vrlo precizne podatke o temperaturi formacije pod uvjetom da je volumen crpljenog fluida veći od 100 bbl (15,9 m³) (Peters & Nelson, 2012).

Prema podacima iz geoloških izvješća korištenih u ovom radu, niti jedna DST analiza ne zahvaća interval unutar kojeg se nalaze Osječki pješčenjaci. Jedini podatak o salinitetu unutar Osječkih pješčenjaka nalazi se u geološkom izvješću bušotine B8, gdje je salinitet dobiven interpretacijom karotažnih mjerenja i iznosi 17 g/l NaCl.

U sklopu završnog rada Ide Pavlin prikupljeni su podatci o salinitetu slojnih voda na dubinama između 1600 i 1700 m (Vinkovačka formacija) iz područja istočnog dijela Dravske depresije (zapadnije od područja istraživanja ovoga rada) i rezultati analiza kreću se između 1,14 i 2,9 g/l.

6.1. Izračun saliniteta

Za procjenu kvalitete dubokog slanog vodonosnika Osijek kao potencijalnog podzemnog skladišta CO₂ potrebno je znati salinitet vode koja se nalazi u njemu. Kao što je već navedeno, poželjno je da vodonosnik ima više od 30 g/l otopljenih tvari da bi se mogao koristiti za geološko skladištenje CO₂. Za izračun saliniteta potrebni su podatci o vrijednosti statičkog spontanog potencijala u intervalu za koji se izračunava salinitet slojne vode, nadalje o temperaturi formacije koji se dobivaju iz DST analize ili preko geotermalnog gradijenta, ukoliko se može definirati vrijednost statičke temperature na određenoj dubini te vrijednost otpornosti filtrata isplake.

Prvo je bilo potrebno očitati statički spontani potencijal (SSP) u točki najvećeg pomaka krivulje spontanoga potencijala u lijevu stranu, odnosno u dijelu sloja koji se smatra čistim pješčenjakom i odražava samo elektrokemijski potencijal, a ne i potencijal šejla. Zatim je trebalo izračunati temperaturu formacije na dubini na kojoj je očitana SSP. Pomoću izraza koji uključuje srednju godišnju temperaturu, dubinu na kojoj se nalazi SSP i geotermalni gradijent (Gt) određena je temperatura formacije:

$$\text{temperatura formacije} = \text{srednja godišnja temperatura} + \left(\frac{\text{dubina SSP}-a}{100} \times Gt \right) (6-1)$$

Zatim se iz dobivene temperature formacije izračuna konstanta Kc:

$$Kc = 65 + 0,24 T [^{\circ}C] \quad (6-2)$$

Nakon toga, potrebno je iz otpora filtrata isplake (R_{mf}) dobiti ekvivalent otpora filtrata isplake ($R_{mf\ eq}$). Ako je otpor filtrata isplake veći od 0,1 na 24°C (75°F), koristi se jednostavan izračun (Schlumberger, 1997):

$$R_{mf\ eq} = 0,85 \times R_{mf} \quad (6-3)$$

Zatim je potrebno izračunati ekvivalent otpornosti slojne vode ($R_{w\ eq}$) uvrštavanjem prethodno definiranih vrijednosti u sljedeći empirijski izraz (Schlumberger, 1997):

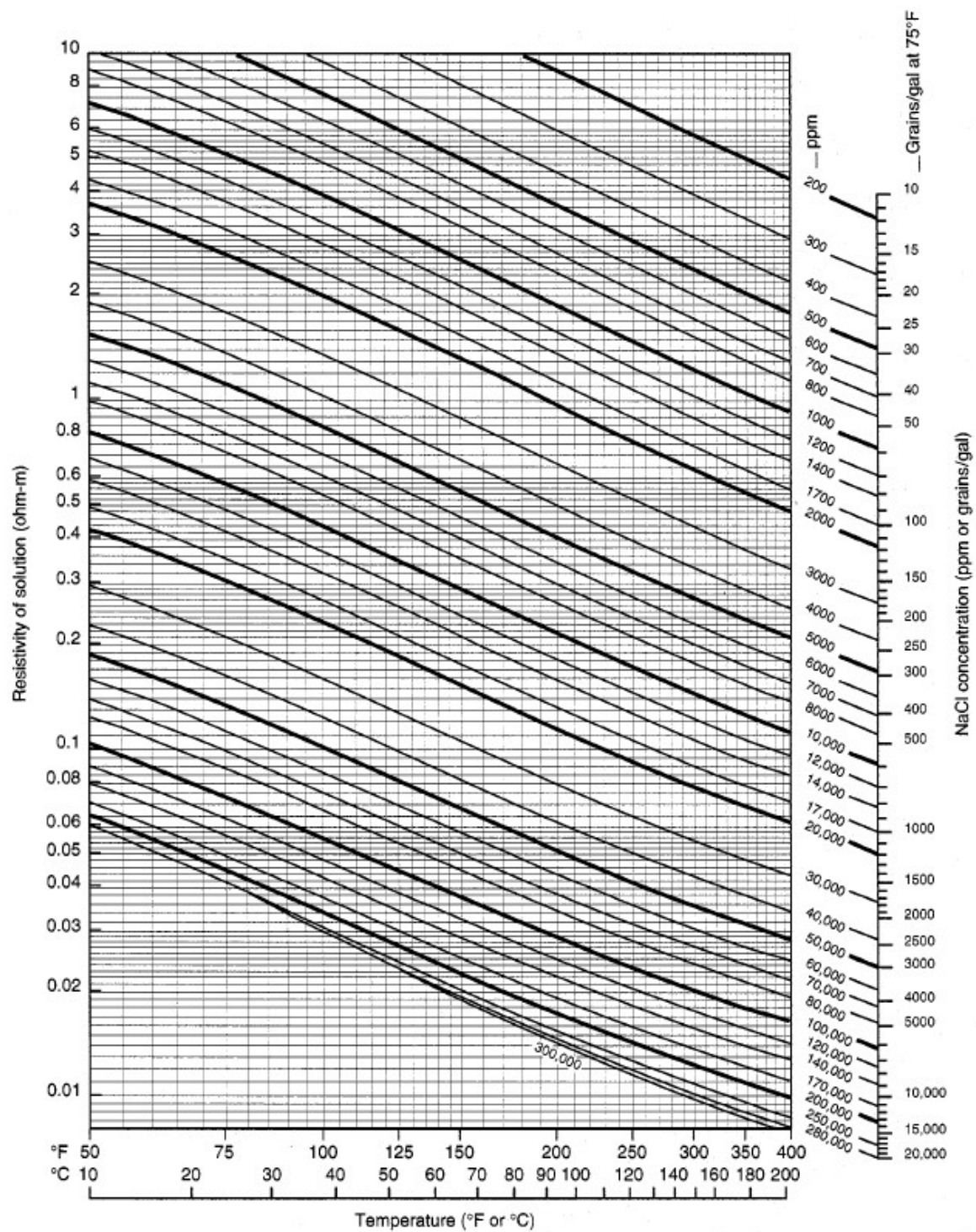
$$SSP = -Kc \times \log \left[\frac{R_{mf\ eq}}{R_{w\ eq}} \right] \quad (6-4)$$

$$R_{w\ eq} = \frac{R_{mf\ eq}}{10^{\left(\frac{SSP}{-Kc}\right)}} \quad (6-5)$$

Otpornost slojne vode dobije se prema izrazu:

$$Rw = R_{w\ eq} \times [(T1 + 21,5)/(T2 + 21,5)]^{\circ}C \quad (6-6)$$

Kako bi se iz izračunate otpornosti odredio salinitet, koristi se dijagram prikazan na slici 6-1, gdje se očita salinitet (koncentracija NaCl) izražen u ppm ili grains/gal, što je zatim potrebno preračunati u g/l.



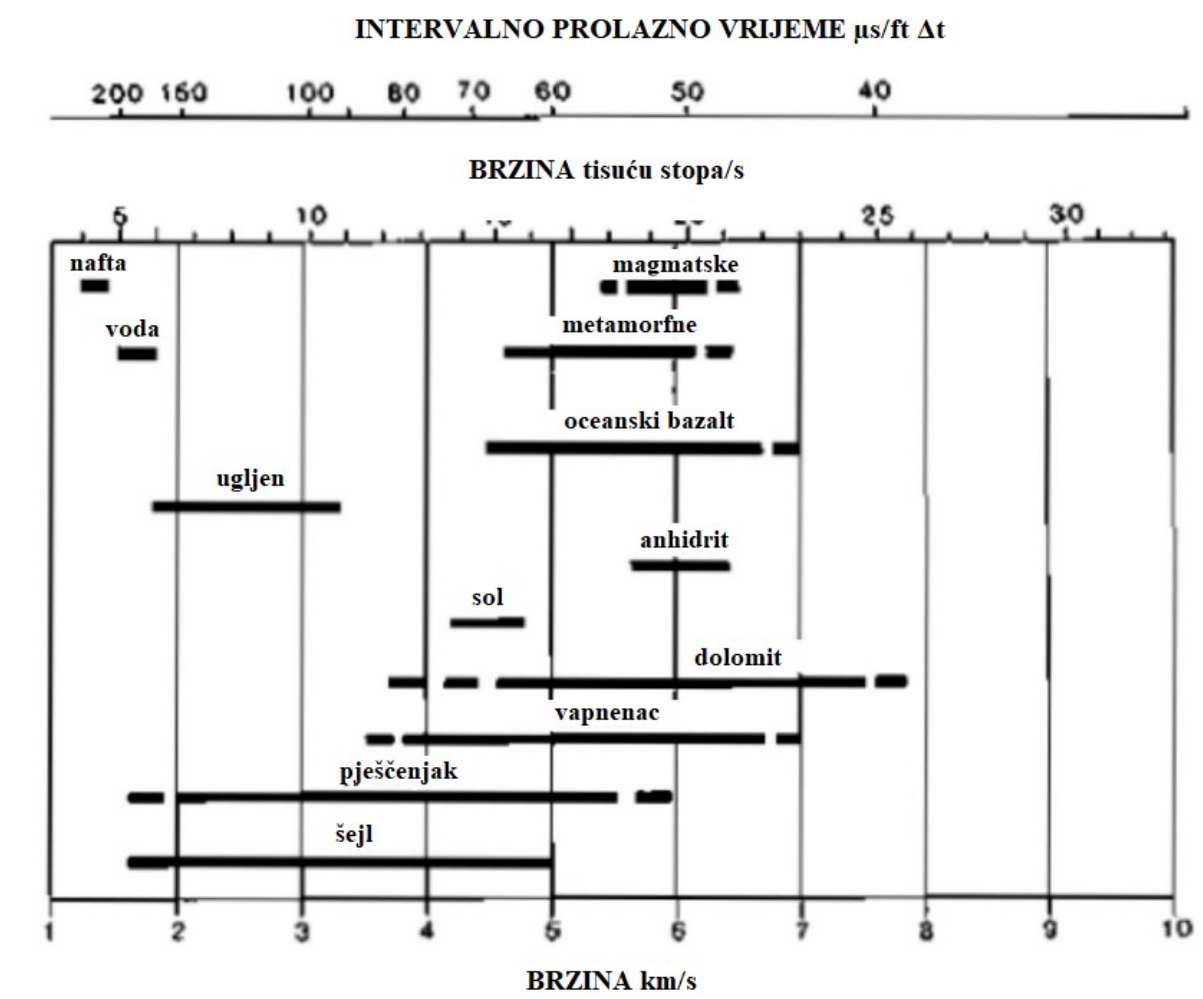
Slika 6-1. Nomogram za određivanje otpornosti fluida i saliniteta na temelju temperature formacije (izvor: Schlumberger, 1997)

7. Određivanje poroznosti iz zvučne karotaže

Kako bi se procijenila kvaliteta Osječkih pješčenjaka u smislu prostora za geološko skladištenje ugljikovog dioksida, bilo je potrebno odrediti i njihovu poroznost. Poroznost se definira kao omjer volumena šupljina stijene i njenog ukupnog volumena. Ukupna poroznost dijeli se na efektivnu, koja podrazumijeva pore koje su međusobno povezane, te rezidualnu poroznost. Za određivanje poroznosti u pravilu se koriste neutronska karotaža, karotaža gustoće te zvučna karotaža.

Zvučnom karotažom mjeri se intervalno vrijeme prolaska elastičnog longitudinalnog vala na određenom putu, a brzina prolaska vala ovisi o litološkom sastavu i poroznosti (Šumanovac, 2012). Zbog osjetljivosti na manje promjene u strukturi stijena, koristi se za procjenu poroznosti, ali i određivanje litoloških granica, otkrivanju matičnih stijena, normalne kompakcije, natpritisaka te pukotina do neke mjere (Rider, 1999).

Prema Rider (1999), zvučnom karotažom ne mogu se točno odrediti tipovi sedimentnih stijena zbog preklapanja njihovih intervalnih brzina, ali je utvrđeno da najveće brzine imaju karbonati, srednje brzine imaju pijesci/pješčenjaci i šejlovi, a najmanje brzine šejlovi. Također, ugljen ima izraženo male brzine pa ga je moguće otkriti zvučnom karotažom. Na slici 7-1 prikazane su prosječne vrijednosti brzina prolaska valova kroz različite tipove stijena.



Slika 7-1. Prikaz prosječnih brzina prolaska valova kroz različite tipove stijena (izvor: Rider, 1999)

8. Rezultati istraživanja

Postavljanje granica Osječkih pješčenjaka predstavljalo je određeni problem, jer EK-marker B koji određuje krovinu Vinkovačke formacije, a time i završetak intervala Osječkih pješčenjaka, na većini bušotina nije utvrđen. Osim toga, krivulja spontanog potencijala bušotine B2 ne odgovara podacima o litološkom sastavu naslaga koji se nalaze u geološkom izvješću pa je pouzdanost mjerenja na ovoj bušotini upitna te su za odredbu intervala Osječkih pješčenjaka korišteni samo podatci iz operativnog geološkog dijagrama. Osim samih problema s nepotpunošću i pouzdanošću podataka, pokazalo se da je na nekim dijelovima izolator vrlo male debljine (B8), a negdje ne može biti utvrđen sa sigurnošću zbog upitne kvalitete izolatorskih stijena (B4), što smanjuje površinu prostiranja dubokog slanog vodonosnika Osijek. U slučaju da se utvrdi da je taj izolator u bušotini B3 neučinkovit, uzele bi se u obzir slabopropusne naslage na većoj dubini, što znatno smanjuje efektivnu debljinu Osječkih pješčenjaka u tom dijelu vodonosnika.

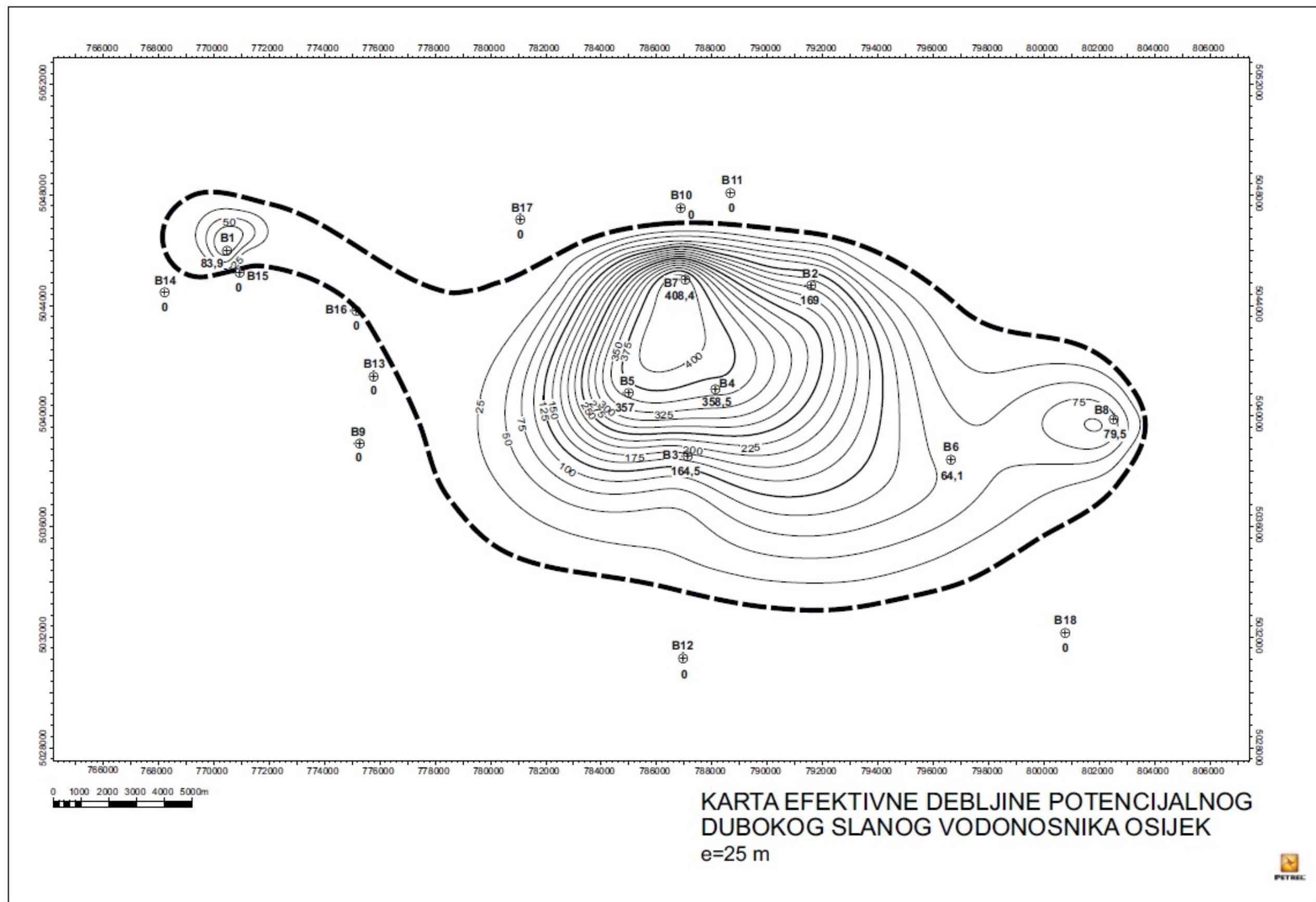
8.1. Karta efektivne debljine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek

Na slici 8-1 prikazana je karta efektivne debljine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek. Na temelju vrijednosti u bušotinama, podebljanom isprekidanom linijom iscrtana je pretpostavljena granica isklinjenja dubokog slanog vodonosnika Osijek.

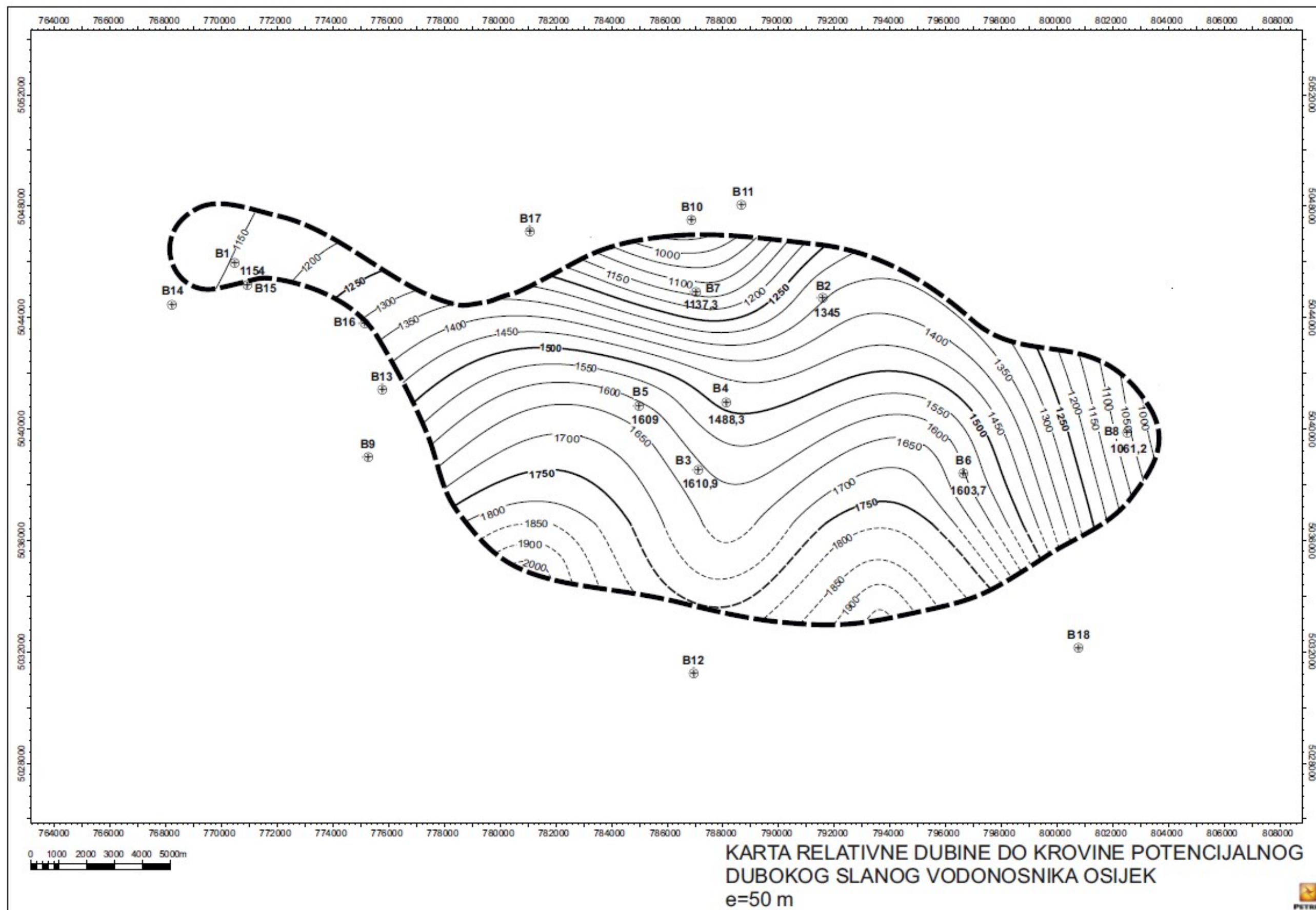
Najveća debljina pješčenjaka zabilježena je u središnjem dijelu istraživanog područja oko bušotine B7, gdje efektivna debljina iznosi 408,4 m. Može se uočiti da je efektivna debljina veća u sjevernom dijelu istraživanog područja u odnosu na južni dio pa je tako najmanja efektivna debljina zabilježena u bušotini B6, gdje ona iznosi 64,1 m. Bušotine korištene u ovom radu vrlo su neravnomjerno raspoređene pa tako u zapadnom dijelu istraživanog područja postoji samo jedna bušotina koja je nabušila pješčenjake. To je bušotina B1, a efektivna debljina pješčenjaka u tom dijelu je 83,9 m.

8.2. Karta relativne dubine do krovine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek

Na karti relativne dubine do krovine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek (slika 8-2) vidljivo je da potencijalni duboki slani vodonosnik na čitavom području zaliježe dublje od 1000 m i dubina mu se povećava idući od sjevera prema jugu, ali zbog neravnomjernog rasporeda ulaznih podataka, kao i izostanka bušotina koje bi nabušile Osječke pješčenjake u južnome dijelu istraživanog područja, dubina je u južnom dijelu područja pretpostavljena. Tako je najmanja dubina nabušena u bušotini B8 i iznosi 1061,2 m, a najveća dubina je nabušena u bušotini B3 i iznosi 1610,9 m. Kako je već spomenuto u prethodnom potpoglavlju, neravnomjerna raspodjela ulaznih podataka te njihov mali broj negativno utječu na kvalitetu karte. Jedina bušotina koja je u zapadnom dijelu istraživanog područja nabušila pješčenjake, bušotina B1, pokazuje da se krovina dubokog slanog vodonosnika Osijek nalazi na 1154 m.



Slika 8-1. Karta efektivne debljine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek



Slika 8-2. Karta relativne dubine do krovine potencijalnog dubokog slanog vodonosnika Osijek

8.3. Rezultati izračuna saliniteta

Od 8 bušotina koje sadrže Osječke pješčenjake, samo bušotina B6 ima zabilježene podatke na temelju kojih se može izračunati salinitet. Podatci korišteni za izračun i dobivena vrijednost saliniteta prikazani su u tablici 8-1. Srednja godišnja temperatura u Dravskoj depresiji preuzeta je iz diplomskog rada Zrinke Stojanović te iznosi 11,04°C. Kada su slojevi pješčenjaka tanji, postoji određen utjecaj šejla na iznos statičkog spontanog potencijala i zbog toga je potrebno raditi korekciju s obzirom na debljinu sloja, ali je procjenjena debljina sloja u kojem je on izmjerjen u ovom slučaju 14,5 m, što je dovoljno velika debljina da taj utjecaj bude zanemariv (Schlumberger, 1997). Salinitet istraživanog intervala prema izračunu iznosi 5,99 g/l NaCl, što bi odgovaralo brakičnoj vodi i nije dovoljno da bi se ovi pješčenjaci uzimali u obzir kao potencijalni prostor za geološko skladištenje ugljikovog dioksida.

Tablica 8-1. Podatci korišteni za izračun i dobivena vrijednost saliniteta

Srednja godišnja temperatura [°C]	11,04
Gt [°C/100m]	4,86
Dubina [m]	1719,7
SSP [mV]	-16
T [°C] – SSP	94,57742
-Kc	-87,6986
Rmf	2,12
Rmf temp [°C]	18
Rmf eq	0,65
Rw eq	0,42704
Rw	1,35
Salinitet [ppm]	6000
NaCl [grains/gal]	350
NaCl [g/l]	5,99

8.4. Rezultati analize poroznosti

Prema podacima iz geoloških izvješća, Osječki pješčenjaci su sitnozrnasti slabovezani kvarc-tinčasti pješčenjaci. Radi o slabovezanim stijenama, što znači da nema cementacije niti drugih diagenetskih procesa koji bi utjecali na smanjenje poroznosti.

Od bušotina koje su analizirane u ovom radu, samo bušotine B1, B2 i B4 imaju snimljenu zvučnu karotažu na promatranom intervalu. Analiza poroznosti uspješno je provedena na bušotinama B1 i B4. Bušotina B2 ima snimljenu zvučnu i neutronska karotažu te karotažu gustoće na promatranom intervalu, ali kao što je ranije navedeno, zbog nepouzdanosti krivulje spontanog potencijala odredba intervala Osječkih pješčenjaka izvršena je temeljem operativnog geološkog dijagrama, pa zbog toga analiza poroznosti u toj bušotini nije provedena.

S obzirom da je zvučna karotaža manje pouzdana od ostalih karotaža koje se koriste za određivanje poroznosti, rezultate dobivene uz pomoć karotažnih krivulja bilo je potrebno usporediti s podacima dobivenim iz drugih analiza. Za bušotinu B1 takvih podataka nije bilo, ali za bušotinu B4 provedena su fizička ispitivanja uzoraka jezgara. Za ovaj rad korisni su bili rezultati analiza dva uzorka jezgri, od kojih je jedna uzeta na dubini od 1940 do 1943 m i kojoj je poroznost procijenjena na 6,9%, a druga na dubini od 2030 m do 2034 m, čija je poroznost 14,3%. Ovi rezultati korišteni su za provjeru procjene poroznosti temeljem zvučne karotaže s kojima pokazuju zadovoljavajuću sličnost.

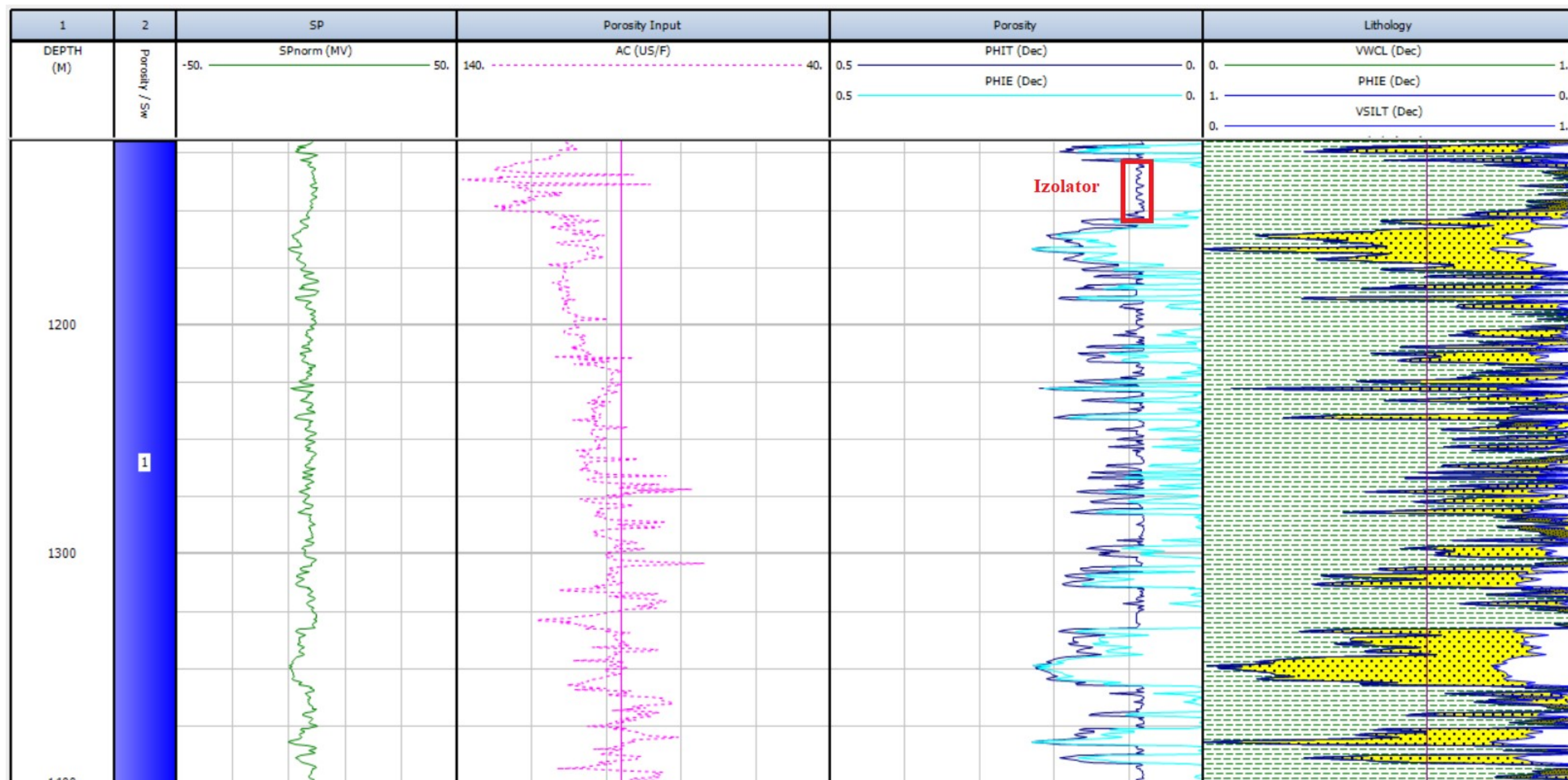
Na kraju je bilo potrebno izračunati prosječnu poroznost slojeva pješčenjaka unutar promatranog intervala prema podacima dobivenim na temelju krivulja zvučne karotaže. Ona iznosi 19,6% u bušotini B1 i 16,7% u bušotini B4. Na slikama 8-3 i 8-4 prikazana je poroznost dobivena na temelju zvučne karotaže na istraživanom intervalu u bušotinama B1 i B4.

U bušotini B1 izolator koji se sastoji od sivog srednje tvrdog lapora nalazi se na dubini od 1128 m do 1154 m i odgovara laporu Borovo (donjem dijelu formacije Vera), a Osječki pješčenjaci se nalaze na intervalu od 1154 m do 1390 m (slika 8-3).

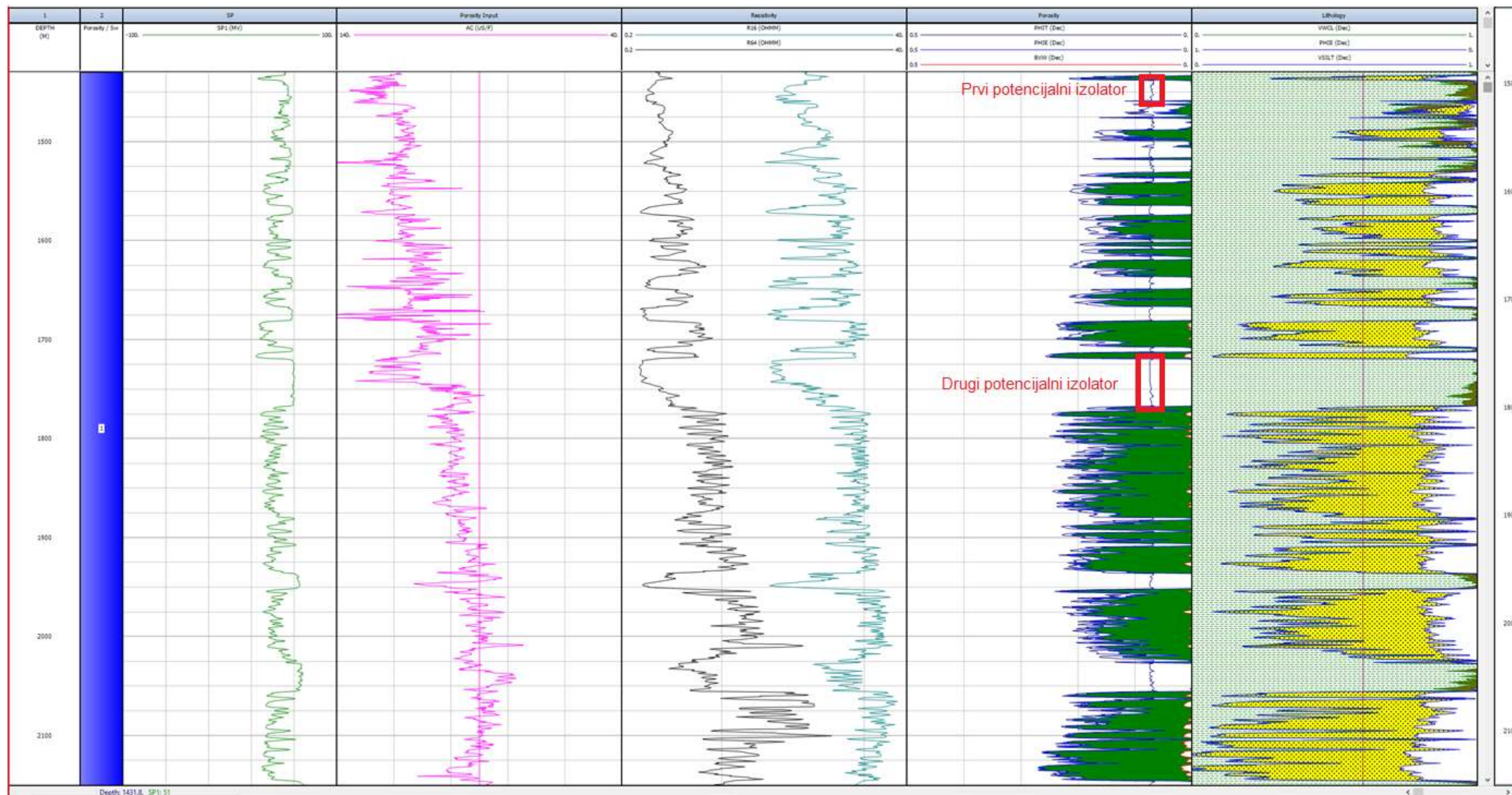
U bušotini B4 pretpostavljeni izolator nalazi se na dubini između 1437 i 1488 m, no prema geološkom izvješću naslage od 800 do 1250 m većinom se sastoje od žutosmeđe gline, mekane laporovite gline i ugljena, što ne predstavlja izolator visoke kvalitete. Zato

se trebaju uzeti u obzir dublje smještene slabopropusne naslage koje se nalaze na intervalu između 1719 i 1767 m, a prema geološkom izvješću, sastoje se od sivih srednje tvrdih lapora (slika 8-4).

S obzirom na sve navedene rezultate, može se zaključiti kako Osječki pješčenjaci nemaju potencijal za geološko skladištenje ugljikovog dioksida, ali zbog visoke temperature formacije (oko 95°C) i razmjerno niskog saliniteta, vode unutar dubokog slanog vodonosnika Osijek mogu se istražiti za korištenje u balneološke svrhe (rekreacija i rehabilitacija) te kao energija za grijanje prostora.



Slika 8-3. Poroznost određena na temelju zvučne karotaže za bušotinu B1



Slika 8-4. Poroznost određena na temelju zvučne karotaže za bušotinu B4

9. Diskusija i zaključak

U određenim bušotinama bilo je problema s postavljanjem granica Osječkih pješčenjaka zbog toga što EK-marker B koji bi trebao označavati krovinu Vinovačke formacije nije utvrđen, a i zbog toga što je krivulja spontanog potencijala u bušotini B2 nepouzdana. Izolatorske naslage u ovoj bušotini su također upitne zbog već navedenog problema s krivuljom spontanog potencijala, a izolator je slabije kvalitete i debljine u bušotini B4 te premale debljine u bušotini B8.

Prema dobivenim rezultatima vidljivo je da je potencijal dubokog slanog vodonosnika Osijek za geološko skladištenje ugljikovog dioksida vrlo slab. Najveći problem je vrlo nizak salinitet, koji iznosi 5,99 g/l NaCl, što dovodi u pitanje opravdanost korištenja vodonosnika u navedene svrhe. Ipak, radi se o tek jednoj vrijednosti koja je dobivena interpretacijom i tako predstavlja procjenu, dok bi se pouzdaniji podatak dobio analizom uzorka dobivenog pri testiranju bušotine (drill-stem-test).

Analizu poroznosti interpretacijom geofizičkih mjerenja u bušotinama bilo je moguće provesti samo u bušotinama B1 i B4 zbog nedostatka podataka za ostale bušotine, a napravljena je interpretacijom krivulje zvučne karotaže. Dobiveni rezultati su 19,6% u bušotini B1 i 16,7% u bušotini B4. Pri tom se manja dubina pješčenjaka u bušotini B1 može povezati s povoljnom poroznošću, jer se, kako je već rečeno, radi o slabijevezanim pješčenjacima te se može pretpostaviti da je značajan utjecaj na poroznost imala kompakcija.

Karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Osijek pokazuje da se radi o debelim slojevima pješčenjaka, ali da je područje unutar kojeg su Osječki pješčenjaci, pa tako i duboki slani vodonosnik, utvrđeni dosta ograničeno. Na karti relativne dubine do krovine dubokog slanog vodonosnika Osijek uočava se da na cijelom području prostiranja DSA Osijek zaliježe na dovoljno velikoj dubini koja bi omogućila skladištenje ugljikovog dioksida u nadkritičnom stanju. Problem vezan za navedene karte je mali broj ulaznih bušotinskih podataka te neravnomjeran raspored bušotina na istraživanom području, što negativno utječe na kvalitetu karata.

S obzirom na visoku temperaturu formacije (95°C) ipak bi se trebalo detaljnije proučiti mineralni sastav vode kako bi se utvrdilo postoji li potencijal za korištenje te vode

u balneološke svrhe. Također, valjalo bi detaljnije istražiti može li se s obzirom na relativno visoku temperaturu ta voda koristiti za grijanje prostora.

10. Popis literature

10.1. Objavljeni radovi

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.

Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., Mathiassen, O.M. (2007): CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 430-443.

Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., Zweigel, P. (ur.) (2008): Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers – Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. European Commission & IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 367 pp.

Ennis-King, J., Paterson, L. (2002): Engineering Aspects of Geological Sequestration of Carbon Dioxide, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 8-10 October, 2002, Melbourne, Australia, 13 pp.

Gunter, W.D., Bachu, S., Benson, S.M. (2004): The role of hydrogeological and geological trapping in sedimentary basins for secure geological storage for carbon dioxide. U: Baines, S.J., Worden, R.H. (ur.), *Geological Storage of Carbon Dioxide*. Geological Society Special Publication 233, London, UK, 129-145.

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., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

Kolenković, I., Saftić, B. (2014): Geološko skladištenje ugljičnog dioksida. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. Vol. 28, str. 9-22. Zagreb.

Lyons, W.C. (2010): Working Guide to Reservoir Engineering, Chapter 2 - Formation Evaluation, Gulf Professional Publishing, str. 97-232. (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856178242000022>)

Malvić, T., Cvetković, M. (2013): Korelacija litostratigrafskih jedinica u Dravskoj depresiji (hrvatski i mađarski dio). Hrvatski nacionalni komitet svjetskog vijeća za naftu i plin, HAZU-Znanstveno vijeće za naftu, Zagreb, 34-38 str.

Malvić, T., Saftić, B. (2008): Dubinsko kartiranje (vježbe): fakultetska skripta. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 46 str.

Malvić, T., Velić, J. (2011): Neogene Tectonics in Croatian Part of the Pannonian Basin and Reflectance in Hydrocarbon Accumulations. Rijeka: Intech, 215-238 str.

Pavelić, D., Kovačić, M. (2018): Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift – type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia): A review. Zagreb : Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu, 455 – 496 str.

Pavlin, I. (2020): Saliniteti slojne vode u dubokim propusnim slojevima na području istočnog dijela Dravske depresije. Završni rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 32 str, Zagreb.

Peters, K.E., Nelson, P.H. (2012): Criteria to Determine Borehole Formation Temperatures for Calibration of Basin and Petroleum System Models. SEPM Special Publication, no. 103, 6 str.

Prelogović, E., Saftić, B., Kuk, V., Velić, J., Dragaš, M., Lučić, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. Elsevier, Tectonophysics 297. 283-293.

Rider, M., (1996): The geological interpretation of well logs. Scotland: Rider – French Consulting Ltd, 280 str.

Royden, L.H. (1988): Late Cenozoic Tectonics of Pannonian Basin System. AAPG Memoir-The Pannonian Basin, 27-48 str.

Sabine, C.L., Feely, R.A. (2007): The oceanic sink for carbon dioxide. U: Reay, D., Hewitt, N., Grace, J., Smith, K. (ur.): Greenhouse Gas Sinks. Oxfordshire: CABI Publishing, 31-49.

Schlumberger (1997): Log Interpretation Charts. Schlumberger Wireline & Testing P.O. Box 2175. Houston, Texas.

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.

Stojanović, Z. (2019): Procjena potencijala dubokih geotermalnih ležišta istočnog dijela Dravske depresije temeljem analiza petrofizikalnih svojstava. Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu. 68 str, Zagreb.

Šumanovac, F. (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Sveučilišni udžbenik. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.

Velić, J. (2007): Geologija ležišta nafte i plina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu, 342 str.

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

Xie, X., Jiao, J.J., Li, S., Cheng, J., (2003): Salinity variation of formation water and diagenesis reaction in abnormal pressure environments. Science in China Series D Earth Sciences, Vol. 46 No. 3, China, 275-277 str.

10.2. Web izvori

AZU, 2018. URL: <https://www.azu.hr/istra%C5%BEivanje-i-eksploatacija/geolo%C5%A1ki-pregled-kopna/> (5.1.2021.)

Google Maps, 2021. URL: <https://www.google.com/maps> (4.2.2021.)

Hrvatska enciklopedija, 2021. URL:
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=26390> (6.1.2021.)



KLASA: 602-04/21-01/16
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 09.02.2021.

Ivana Brezovac, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/16, UR. BROJ: 251-70-14-21-1 od 09.02.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

DEFINIRANJE DUBOKOG SLANOG VODONOSNIKA OSIJEK U OSJEČKIM PJEŠČENJACIMA ISTOČNOG DIJELA DRAVSKE DEPRESIJE I PROCJENA PERSPEKTIVNOSTI ZA GEOLOŠKO SKLADIŠTENJE UGLJIČNOG DIOKSIDA

Za voditeljicu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditeljica

(potpis)

Doc. dr. sc. Iva Kolenković Močilac

(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)