Procjena potencijala dubokih geotermalnih ležišta istočnog dijela Dravske depresije temeljem analiza petrofizikalnih svojstava

Stojanović, Zrinka

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:169:047879

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geologije

PROCJENA POTENCIJALA DUBOKIH GEOTERMALNIH LEŽIŠTA ISTOČNOG DIJELA DRAVSKE DEPRESIJE TEMELJEM ANALIZA PETROFIZIKALNIH SVOJSTAVA

Diplomski rad

Zrinka Stojanović

G 328

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

PROCJENA POTENCIJALA DUBOKIH GEOTERMALNIH LEŽIŠTA ISTOČNOG DIJELA DRAVSKE DEPRESIJE TEMELJEM ANALIZA PETROFIZIKALNIH SVOJSTAVA

ZRINKA STOJANOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Uslijed napredovanja klimatskih promjena i porasta cijena fosilnih goriva zbog sve manjih rezervi iz konvencionalnih izvora, kao i nesigurnosti opskrbe prirodnim plinom koji se uvelike koristi za grijanje u kućanstvima, geotermalna energija sve više dobiva na značenju, kao obnovljivi izvor energije. Dravska depresija nalazi se u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava, koji ima geotermalne gradijente iznad svjetskog prosjeka. U ovom radu provedena je početna procjena geotermalnog potencijala u istočnom dijelu Dravske depresije na temelju karte raspodjele prosječnih geotermalnih gradijenata te analiza karotažnih mjerenja u svrhu procjene poroznosti s ciljem identificiranja potencijalnih dubokih geotermalnih ležišta. Glavne analize izvršene su u programskom paketu „Interactive Petrophysics“, a karta prosječnog geotermalnog gradijenta izrađena je u računalnom programu „Petrel E&P software platform 2018“.

Ključne riječi: Dravska depresija, geotermalni gradijent, poroznost, propusnost

Diplomski rad sadrži: 61 stranicu, 21 sliku, 6 tablica i 21 referencu.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 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. listopad 2019.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF THE DEEP GEOTHERMAL RESERVOIRS IN THE EASTERN PART OF THE DRAVA DEPRESSION BASED ON ANALYSES OF THEIR PETROPHYSICAL PROPERTIES

ZRINKA STOJANOVIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Department of Geology and Geological Engineering

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

With the advancing climate change and rising fossil fuel prices due to declining reserves from conventional sources, as well as the insecurity of natural gas supply, which is largely used for domestic heating, geothermal energy is gaining more and more importance as a renewable energy resource. Drava Depression is located in the Croatian part of the Pannonian Basin System which has geothermal gradients above the world average. In this thesis an initial assessment of the geothermal potential in the eastern part of the Drava Depression has been performed based on the map of average geothermal gradients and analyses of well log data that enabled identification of potential deep geothermal reservoirs. Main analyses were performed using „Interactive Petrophysics" software package and the map of average geothermal gradient was created in „Petrel E&P software platform 2018".

Keywords: Drava Depression, geothermal gradient, porosity, permeability

Thesis contains: 61 pages, 21 figures, 6 tables and 21 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,

Pierottijeva 6, 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 October 2019

Prije svega, zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr.sc Ivi Kolenković Močilac na stručnoj pomoći i podršci pri izradi ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se svim profesorima, docentima i asistentima za 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 podatcima.

Na kraju, zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci tijekom cijelog fakultetskog obrazovanja.

SADRŽAJ:

1. UVOD 1
2. GEOGRAFSKI OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA 2
3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA 3
3.1. Stratigrafske značajke istraživanog područja 4
3.2. Strukturne značajke istraživanoga područja 6
4. METODOLOGIJA 7
4.1. DRILL-STEM TEST (DST) 7
4.2. GEOTERMALNI GRADIJENT 8
4.2.1. PETREL E&P SOFTWARE PLATFORM 2018 9
4.3. PROCJENA POROZNOSTI ANALIZOM KAROTAŽNIH MJERENJA 10
4.3.1. INTERACTIVE PETROPHYSICS 20
4.4. PROPUSNOST 21
5. REZULTATI 26
5.1. KARTA PROSJEČNOG GEOTERMALNOG GRADIJENTA 27
5.2. REZULTATI ANALIZA KAROTAŽNIH MJERENJA 29
5.2.1. Analiza poroznosti u bušotini 1 29
5.2.2. Analiza poroznosti u bušotini 2 32
5.2.3. Analiza poroznosti u bušotini 3 34
5.2.4. Analiza poroznosti u bušotini 4 36
5.2.5. Analiza poroznosti u bušotini 5 38
5.2.6. Analiza poroznosti u bušotini 6 40
5.2.7. Analiza poroznosti u bušotini 7 43
5.2.8. Analiza poroznosti u bušotini 8 46
5.2.9. Analiza poroznosti u bušotini 9 49
5.2.10. Analiza poroznosti u bušotini 10 51
5.2.11. Analiza poroznosti u bušotini 11 54

6. DISKUSIJA 57

7. ZAKLJUČAK 59

8. POPIS LITERATURE 60

8.1. Objavljeni radovi 60

8.2. Web izvori 61

SLIKE:

Slika 2-1. Približne granice istraživanog područja i bušotine čiji su podatci korišteni u ovome radu 2

Slika 3-1. Depresije smještene unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava 3

Slika 3-2. Shematski prikaz rasprostranjenosti formacija, članova, litološkog sastava, elektrokarotažnih markera i repera u istočnom dijelu Dravske depresije. 5

Slika 4- 1. Drill stem test 8

Slika 4- 2. Prosječne brzine rasprostiranja valova u stijenama 12

Slika 4- 3. Rasponi gustoća stijena 16

Slika 4- 4. Dubina prodiranja uređaja za karotažu gustoće 17

Slika 4- 5. Dijagram za korekciju ili procjenu poroznosti na temelju mjerenja neutronskom karotažom. 19

Slika 4- 6. Dubina prodiranja uređaja za neutronsku karotažu 20

Slika 4- 7. Primjer ulaznih bušotinskih podataka. 25

Slika 5-1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta. 28

Slika 5-2. Procjena poroznosti za bušotinu 1 31

Slika 5-3. Procjena poroznosti za bušotinu 2 33

Slika 5- 4. Procjena poroznosti za bušotinu 3 35

Slika 5-5. Procjena poroznosti za bušotinu 4 37

Slika 5- 6. Procjena poroznosti za bušotinu 5 39

Slika 5-7. Procjena poroznosti za bušotinu 6 42

Slika 5-8. Procjena poroznosti za bušotinu 7. 45

Slika 5-9. Procjena poroznosti za bušotinu 8. 48

Slika 5-10. Procjena poroznosti za bušotinu 9. 50

Slika 5-11. Procjena poroznosti za bušotinu 10. 53

Slika 5- 12. Procjena poroznosti za bušotinu 11 56

TABLICE:

Tablica 4-1. Brzine rasprostiranja valova u mineralnim zrnima pojedinih stijena.....13
Tablica 4-2. Brzine rasprostiranja valova u mineralima 13
Tablica 4-3. Gustoća i elektronska gustoća za različite minerale, ugljen i fluide. 15
Tablica 4- 4. Bušotine i propusnosti određenih intervala procijenjenih Hornerovom metodom iz DST-a.....23
Tablica 4- 5. Propusnosti izmjerene na uzorcima jezgara.....24
Tablica 5-1. Bušotine i njima pripadajući geotermalni gradijenti.....26

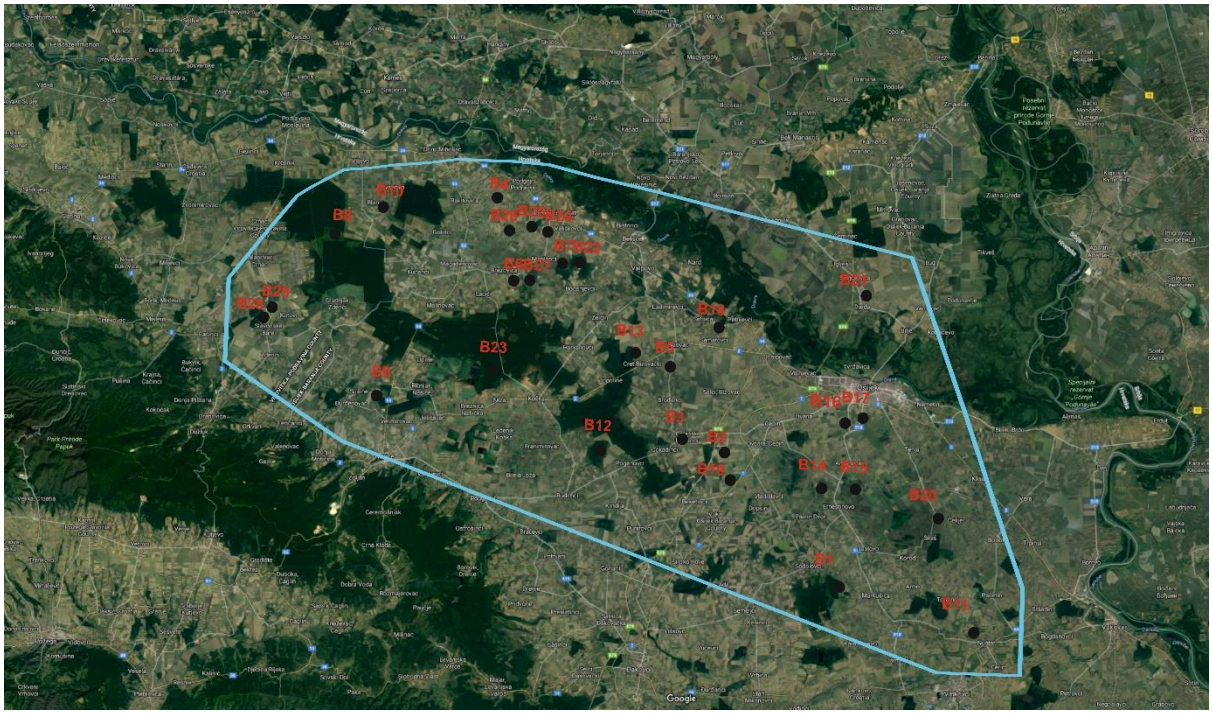
1. UVOD

U novije vrijeme sve se više istražuje geotermalna energija kao jedini obnovljivi izvor koji ima stalni tok energije. Porast temperature po jedinici dubine naziva se geotermalnim gradijentom. Povišeni geotermalni gradijent je prvi pokazatelj potencijala za iskorištavanje geotermalne energije. Prosječni geotermalni gradijent u svijetu je 3 °C/100 m (Jelić et al., 1995). U ovome radu načinjeni su prvi koraci u detaljnijem regionalnom istraživanju geotermalnog potencijala istočnoga dijela Dravske depresije.

Cilj ovog rada je pomoću karotažnih bušotinskih podataka procijeniti poroznost stijena, kao bitno ležišno svojstvo, u bušotinama u kojima je zabilježen povišen prosječni geotermalni gradijent. Kao prvi korak izrađena je karta prosječnog geotermalnog gradijenta na istraživanom području, tj. u istočnom dijelu Dravske depresije. Zatim su na temelju kriterija prosječnog geotermalnog gradijenta većeg od 5 °C/100 m izabrane bušotine za koje su provedene detaljne analize. Prema bušotinskim podatcima sadržanima u operativnim geološkim dijagramima i geološkim izvještajima bušotina definiran je litološki slijed naslaga i stijena u bušotinama te im je temeljem toga pridodan mineralni sastav kako bi se pomoću napredne analize Mineral Solver u softveru Interactive Petrophysics provele procjene poroznosti. Za navede intervale iz izvještaja o DST testiranjima i izvještajima o provedenim petrofizikalnim mjerenjima, uzete su vrijednosti propusnosti te su na temelju tih podataka i rezultata provedenih analiza doneseni zaključci o potencijalnim dubokim geotermalnim ležištima.

2. GEOGRAFSKI OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Istraživano područje nalazi se na krajnjem sjeveroistoku Republike Hrvatske. Najvećim dijelom obuhvaća područje Osječko-baranjske županije. Granice istraživanoga područja i lokacije bušotina (podatci dobiveni od Agencije za ugljikovodike) prikazane su na slici 2-1.



Slika 2-1. Približne granice istraživanog područja i bušotine čiji su podatci korišteni u ovome radu. (preuzeto s https://www.google.com/maps)

Hrvatski dio Dravske depresije, u kojoj se nalazi područje istraživanja, omeđen je državama Mađarskom i Srbijom te Murskom, Savskom i Slavonsko-srijemskom depresijom i gorama koje ih odvajaju (Slika 3-1). Područje je nizinsko s visinom terena između 80 i 100 m nadmorske visine. Klima je umjerena, kišna, bez značajnih suhih razdoblja, s oborinama jednoliko raspodijeljenim tijekom cijele godine prema Köeppenovoj klasifikaciji. Klimatski uvjeti, kao i razvijeno poljodjelstvo otvaraju mogućnost za iskorištavanje srednjotemperaturnih geotermalnih izvora za grijanje kućanstava tijekom zimskih mjeseci, kao i za grijanje staklenika.

3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Dravska depresija pripada Panonskom bazenskom sustavu koji je smješten između stare Europske ploče na sjeveru, Alpi na zapadu, Jadranske ploče na jugu te Mezijske ploče na istoku. Stvaranje Panonskog bazenskog sustava započelo je u otnangu subdukcijom i konvergencijom Apulijske ploče pod Dinaride, kada je započelo i stvaranje njegove južne granice (perijadransko-vardarskog lineamenta) i sjeverne granice (Vanjski Karpati), a u prostoru između njih otvorene su brojne ekstenzijske strukturne depresije uz desne i lijeve transkurentne rasjedne sustave (Velić, 2007; Malvić i Saftić, 2008). Hrvatski dio Panonskog bazena pokriva sjeverni dio Hrvatske i obuhvaća četiri depresije, idući od sjeverozapada prema jugoistoku Mursku, Dravsku, Savsku te Slavonsko-srijemsku (Malvić i Saftić, 2008).



Slika 3-1. Depresije smještene unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (modificirano prema Velić, 2007.; Velić, Malvić i Cvetković, 2015.)

3.1. Stratigrafske značajke istraživanog područja

Dravska depresija zahvaća područje od približno 12 000 km^2, od čega otprilike 9 100 km^2 površine pripada Hrvatskoj. Dravska depresija sastoji se od magmatsko-metamorfnog kompleksa podloge koji se naziva „temeljnim gorjem“ i naslaga uglavnom neogenske i kvartarne starosti (Velić, 2007). Lokalno se između stijena temeljnog gorja i neogensko-kvartarnih sedimenata nalaze mezozojski karbonati i karbonatni klastiti.

Većina bazenske ispune sastoji se od srednjomiocenskih, gornjomiocenskih, pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih klastičnih i biogenih sedimenata, a mjestimice se mogu naći i pojave efuzivnih stijena srednjomiocenske starosti te fluvijalnih i jezerskih sedimenata donjeg miocena. Stijene podloge u Dravskoj depresiji obuhvaćaju karbonate (vapnenace i dolomite), metamorfite (amfibolite, škriljavace i gnajseve) i magmatite (granite i gabra) mezozojske i palozojske starosti (Malvić i Cvetković, 2013).

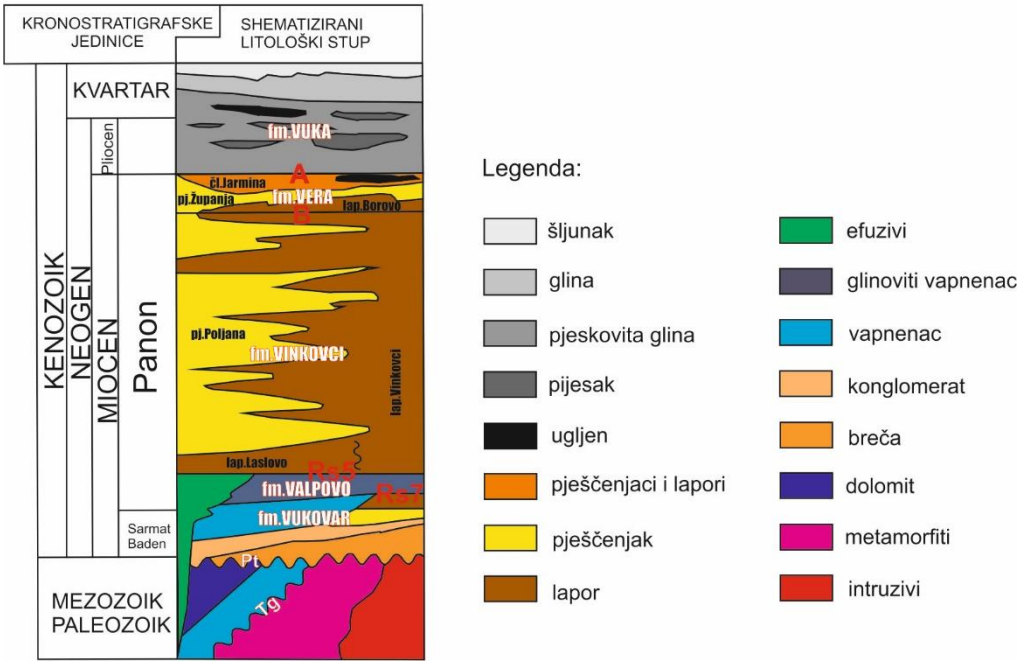
Općenito, sve stijene starije od neogena predstavljaju „temeljno gorje“ u širem smislu. Magmatske i metamorfne stijene, najčešće paleozojske starosti, čine „temeljno gorje“ u užem smislu (ispod repera Tg), a formacije mezozojskih sedimenata označavaju se kao „podloga tercijara“ (ispod repera Pt, P.T., PTc) (Velić, 2007; Malvić i Saftić, 2008).

Prema Hernitzu (1983) te Malviću i Cvetkoviću (2013), u istočnom dijelu Dravske depresije naslage srednjomiocenske do starije panonske starosti mogu se podijeliti na formaciju Vukovar i formaciju Valpovo (Slika 3-2). Formacija Vukovar sadrži krupnoklastične sedimente (breče i konglomerate) u svom baznom dijelu, a pješčenjake i vapnence u gornjem dijelu koji približno pripada sarmatu. Formacija Valpovo sastoji se većinom od glinovitih vapnenaca. Granica sa stijenama podloge definirana je repernim horizontom „Tg“ ili EK-markerom „Pt“. EK-marker Rs5 odvaja formaciju Valpovo od mlađe gornjopanonske formacije Vinkovci, a EK-marker Rs7 je granica između formacije Vukovar i formacije Valpovo.

Donji dio formacije Vinkovci obuhvaća naslage mlađe panonske starosti. Bazni dio te formacije, neposredno iznad EK-markera Rs5, karakteriziran je

sitnozrnastim klastitima, tj. sastoji se od lapora člana lapor Laslovo i njegovom bočnom ekvivalentu laporu Vinkovci. Idući prema mlađim naslagama, uključujući naslage donjeg i gornjeg ponta, formacija Vinkovci obilježena je izmjenom lapora Vinkovci i pješčenjaka Poljana.

U krovini je formacija Vinkovci odvojena od formacije Vera EK-markerom B. Formacija Vera sastoji se od lapora Borovo u baznom dijelu, na kojem slijedi pješčenjak Županja i član Jarmina u vršnom dijelu. U krovini je formacija Vera omeđena EK-markerom A. Pliocensko-kvartarne naslage pripadaju formaciji Vuka koja se sastoji od gline, siltova i pijesaka u baznom dijelu te šljunaka i pijesaka u gornjem dijelu.



Slika 3-2. Shematski prikaz rasprostranjenosti formacija, članova, litološkog sastava, elektrokarotažnih markera i repera u istočnom dijelu Dravske depresije (prema Malvić i Cvetković, 2013).

3.2. Strukturne značajke istraživanoga područja

U Panonskom bazenskom sustavu ekstenzija je započela u otnangu, uz prisutnost lokalnih marinskih transgresija (Malvić, 2003). Prva transtenzijska faza počela je u badenu kada je tektonska aktivnost formirala većinu struktura (Rögl i Steininger, 1984). Rast razine mora u kasnom badenu uzrokovao je ponovno otvaranje veze s Indopacifikom te potapanje uzdignutih blokova u većini dijelova Dravske depresije (Malvić i Cvetković, 2013). U postekstenzijskoj fazi hlađenje litosfere postaje glavni uzročnik dinamike procesa, a glavni izvor materijala postaju istočne Alpe (Royden, 1988).

Druga transtenzijska faza počinje u panonu (Malvić i Velić, 2011). Tijekom kasnijeg panona Dravska depresija bila je brakično jezero karakterizirano povremenim taloženjem turbidita koji su prekidali pelitnu bazensku sedimentaciju (Lučić et al., 2001). U istočnom dijelu sedimentacija se odvijala u okolišima delte i prodelte, a utjecana je i povremenim turbiditnim događajima. Zbog svega toga taložene su litostratigrafske jedinice koje se ne mogu regionalno korelirati, pa je zbog toga različita nomeklatura u istočnom i zapadnom dijelu hrvatskoga dijela Dravske depresije (Malvić i Cvetković, 2013). U mlađem panonu (pontu) taloženje se uglavnom odvija u brakičnom i slatkovodnom jezerskom prostoru, a mehanizam prijenosa je deltni ili turbiditni (Malvić i Saftić, 2008).

Druga transpresijska faza vladala je tijekom pliocena i kvartara, kada je većina spuštenih struktura izdignuta, što je za posljedicu imalo nastanak antiklinala, odnosno strukturnih zamki za nakupljanje ugljikovodika u ležištima. Sedimentacija se nastavila u lakustrinskim uvjetima samo na manjim područjima. U početku pliocena postojao je veliki broj manjih slatkovodnih jezera koja su se zapunjavala aluvijalnim sedimentima. Taložili su se pijesci, gline, jezerski siltovi, lapori, karbonati (Malvić i Cvetković, 2013). Tijekom kvartara sedimentacija se odvija u kopnenim okolišima gdje se talože močvarni, aluvijalni i eolski sedimenti (les).

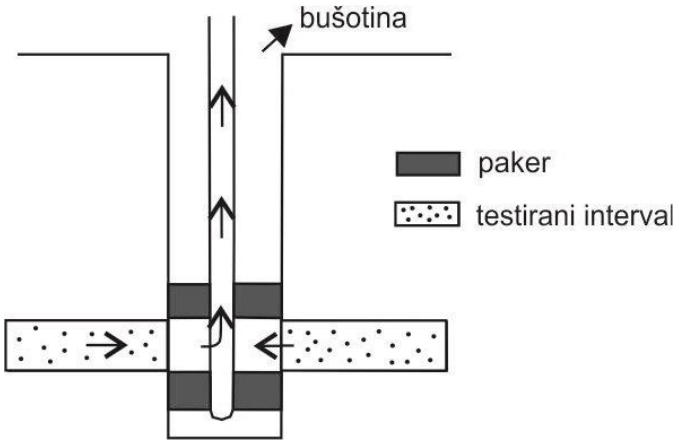
4. METODOLOGIJA

Iz bušotinskih podataka, dobivenih DST (engl.„Drill stem test“) mjerenjima, izdvojene su one bušotine čiji je geotermalni gradijent iznosio više od 5 °C/100 m. Podatci karotažnih mjerenja iz bušotina obrađeni su u računalnom programu „Interactive Petrophysics“, a za izradu karte prosječnog geotermalnog gradijenta korišten je računalni program „Petrel E&P software platform 2018“. Slike krajnjih rezultata uređene su u crtačkom programu „CorelDRAW X6“.

4.1. DRILL-STEM TEST (DST)

DST-om (Slika 4-1) se izvodi testiranje ležišnih fluida tako da se postave pakeri iznad i ispod intervala koji se testira, a kada je jedinica izolirana, može se uzeti uzorak ležišnog fluida za analize. Analizom se može izmjeriti tlak testiranog intervala, temperatura formacije te procijeniti propusnost mjerenjem protoka (uzimajući u obzir razlike u izmjerenim tlakovima). Procjene propusnosti na ovaj način nisu pouzdane prvo jer je problematično izolirati testirani interval naslaga i drugo zbog toga što čestice gline iz isplake mogu ispuniti pore propusnih stijena te tako utjecati na mjerenje (https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&c_id=).

Mjerenja temperature tijekom DST-a smatraju se najpouzdanijim mjerenjima temperature formacije u dubokim bušotinama. Ipak, neki autori upozoravaju na pouzdanost temperaturnih mjerenja iz DST-a u odnosu na količinu iscrpljenih slojnih fluida. Crpljeni fluid mora biti određenog volumena (> 100 bbl) da bi se temperatura mogla izjednačiti s temperaturom formacije. DST-mjerenja daju približno točnu temperaturu formacije sve dok fluid nije pod utjecajem toplinskih poremećaja oko bušotine (Peters i Nelson, 2012).



Slika 4-1. Drill stem test (modificirano prema

https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&c_id=)

4.2. GEOTERMALNI GRADIJENT

Pri procijeni geotermalnog potencijala nekog područja, valja procijeniti prostornu raspodjelu toplinskog toka u podzemlju istraživanog područja. Toplinski tok dobiva se iz umnoška prosječne toplinske vodljivosti i geotermalnog gradijenta, prema Fourierovom zakonu koji glasi:

$$q = - \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (3.1)$$

gdje je: q – toplinski tok, λ – toplinska vodljivost, A – površina, ΔT – razlika u temperaturi, Δx – razlika u debljini medija. Toplinska vodljivost je sposobnost materijala da prenosi toplinu, a geotermalni gradijent predstavlja promjenu temperature u intervalima određene debljine, ovisno o njihovom litološkom sastavu (Kutasov, 1999).

U ovom radu nije istraživana prostorna raspodjela toplinskog toka, jer bi to zahtijevalo detaljnu raščlambu i korelaciju litoloških jedinica, kao i procjenu njihove toplinske vodljivosti, što premašuje opseg diplomskog rada. Stoga se ovaj rad ograničio na istraživanje prostorne raspodjele prosječnog geotermalnog gradijenta na istraživanom području.

Prema Jeliću i suradnicima (1995), gradijenti u južnom dijelu Hrvatske su poprilično ispod svjetskog prosjeka s minimumima oko Splita i Pule, a oni iznose manje od 1 °C/100 m. U sjevernom dijelu Hrvatske gradijenti su viši od svjetskog prosjeka s izrazitim maksimumom sjeveroistočno od Zagreba koji prelazi 7,5 °C/100 m. Dravska i Slavonsko-srijemska depresija imaju najviše geotermalne gradijente. Prosječno Dravska ima 4,5-5,7 °C/100 m, a Slavonsko-srijemska 4,5-5,5 °C/100 m.

Pri izračunu podataka za kartiranje prosječnog geotermalnog gradijenta korištena je sljedeća formula:

$$Gg = \frac{Th - Ts}{h} * 100 \qquad (3.2)$$

gdje je: Gg – geotermalni gradijent, Th – temperatura na određenoj dubini, Ts – srednja godišnja temperatura, h – dubina.

Istraživano područje nalazi se u hrvatskom dijelu Dravske depresije. To područje ima umjerenu kontinentalnu klimu sa srednjom godišnjom temperaturom koja iznosi 11,04 °C. Sa stranice Državnog hidrometeorološkog zavoda (http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=srednjak&Grad=osijek) prikupljeni su podatci prosječnih mjesečnih temperatura u gradu Osijeku u razdoblju od 1899.-2016. Računanjem aritmetičke sredine za sve prosječne mjesečne temperature dobivena je srednja godišnja temperatura.

4.2.1. PETREL E&P SOFTWARE PLATFORM 2018

U računalni program „Petrel E&P software platform 2018“ uneseni su podatci koji su sadržavali lokaciju i geotermalni gradijent za 29 bušotina u istočnom dijelu Dravske depresije. Konstruirana je karta prosječnoga geotermalnog gradijenta na kojoj su istaknute bušotine koje se dalje analiziraju u ovome radu.

4.3. PROCJENA POROZNOSTI ANALIZOM KAROTAŽNIH MJERENJA

Poroznost (šupljikavost) se izražava kao odnos obujma šupljina i ukupnog obujma uzorka stijene za koju se određuje poroznost. Ona ima izuzetno značenje u geologiji nafte, jer je neophodan podatak pri procjenjivanju volumena ležišta, odnosno kad se izračunavaju početne zalihe nafte, kondenzata i plina te kad se izračunavaju veličine iscrpka. Ukupna ili apsolutna poroznost sadržava efektivnu i rezidualnu poroznost. U efektivnu poroznost ubrajaju se samo međusobno povezane pore i šupljine, a izolirane ili zatvorene pore i šupljine tvore rezidualnu poroznost.

Karotažna mjerenja omogućuju procjenu poroznosti na bilo kojem mjestu u bušotini i to na više načina, uz pomoć više vrsta mjerenja. Određivanje poroznosti prema dijagramima geofizičkih mjerenja u bušotinama može biti vrlo složeno i ovisno o dosta detalja, kao što su prisutnost plina u porama, količina i način pojave glina u pješčenjacima te mineralni sastav stijene, a također je zbog malih dubinskih zahvata ovih mjerenja snažno utjecano promjenama promjera bušotine.

Zvučnom karotažom mjeri se intervalno prolazno vrijeme potrebno da zvučni val prevali određenu dužinu puta kroz probušenu stijenu (Velić, 2007). Koristi se za procjenu poroznosti, a može pomoći u procjeni vrste stijene, otkrivanju normalne kompacije i nadpritiska. Često se koristi za korelacije (Rider, 1996).

U početku se sonda sastojala od odašiljača i prijemnika, a u novije vrijeme sastoji se od dva odašiljača i dva para prijemnika. Sondom se mjeri vrijeme putovanja vala duž najkraćeg puta, a to će se dogoditi po zakonima loma elastičnih valova. Zatim se mjere razlike u vremenu nailaska vala na dva prijemnika i time se odstranjuje djelovanje stupca isplake i izobličenja kanala bušotine (Šumanovac, 2012).

Dubina prodiranja kompresijskog vala je 2,5 – 25 cm i ona ovisi o valnoj duljini, a ne o udaljenosti odašiljača i prijemnika. Što je veća valna duljina, veće je i prodiranje, odnosno dubinski zahvat mjerenja (Rider, 1996).

Veza između brzine i poroznosti je dana formulom:

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{Vf} + \frac{1-\phi}{Vma} \qquad (3.3)$$

Gdje je: V – brzina, V_f – brzina u fluidu, V_{ma} – brzina u čvrstom dijelu stijene, ϕ - poroznost.

Formula može biti zapisana i na slijedeći način:

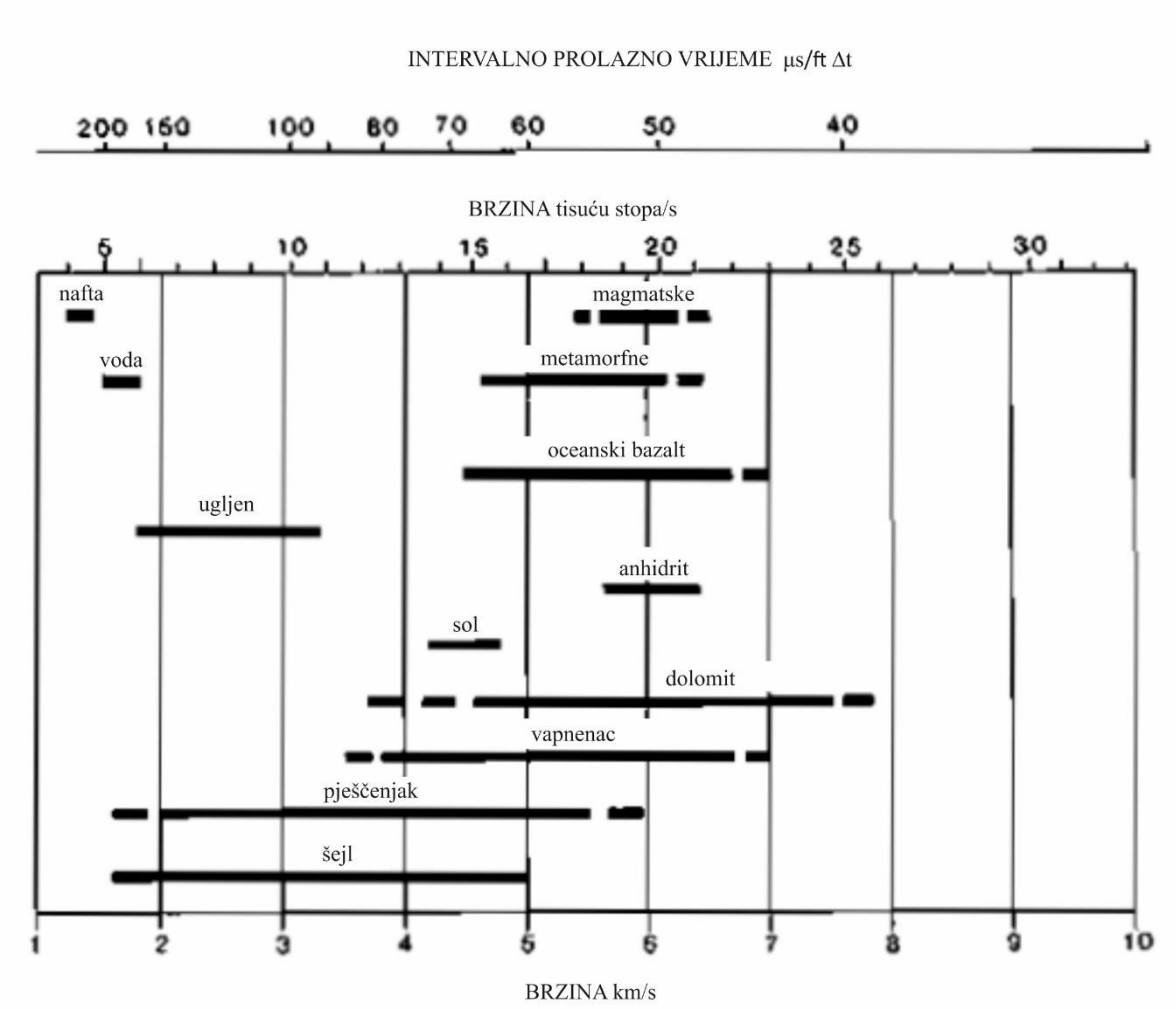
$$\Delta t = \phi \Delta t_f + (1 - \phi)\Delta t_{ma} \qquad (3.4).$$

Poroznost se izračunava prema formuli:

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \qquad (3.5)$$

gdje je: ϕ - poroznost, Δt – intervalno prolazno vrijeme (očitanje mjerenja zvučne karotaže) , Δt_f – intervalno prolazno vrijeme kroz fluid u porama stijene (uzima se vrijednost intervalnog prolaznog vremena za fluid kojim su pore saturirane), Δt_{ma} – intervalno prolazno vrijeme kroz čvrsti dio stijene (uzima se aproksimativna vrijednost temeljem procijenjenog mineralnog sastava) (Wyllie, 1956).

Brzina rasprostiranja valova u sedimentnim stijenama daje indikacije njihova litološkog sastava. Velike brzine širenja karakteristične su za karbonatne stijene, srednje brzine za pijesak i šejl, a male brzine za šejl (Slika 4-2). U tablici 4-1. prikazane su brzine rasprostiranja valova u mineralnim zrnima pojedinih stijena, a u tablici 4-2. prikazane su brzine rasprostiranja valova u mineralima. Pomoću zvučne karotaže može se utvrditi dubinski položaj ugljenih slojeva, jer su ugljeni karakterizirani vrlo malim brzinama rasprostiranja, odnosno velikim intervalnim vremenom.



Slika 4-2. Prosječne brzine rasprostiranja valova u stijenama (ft – oznaka za stopu, a ona iznosi 0,3048 m) (Rider, 1996)

Tablica 4-1. Brzine rasprostiranja valova u mineralnim zrnima pojedinih stijena (Rider 1996 prema Schlumberger, 1972; Serra, 1979; Gearhart, 1983)

	Δt_{ma} (μ/ft)	V (m/s)	V (ft/s)
pješčenjaci	55,5-51	5490-5950	18000-19500
kvarc	55,1	5530	18150
vapnenci	53-47,6	5800-7000	19000-23000
kalcit	46,5	6555	21500
dolomiti	45-38,5	6770-7925	22200-26000
dolomit	40	7620	25000
šejl	167-62,5	1600-5000	5000-16000

Tablica 4-2. Brzine rasprostiranja valova u mineralima (Rider, 1996 prema Serra, 1979; Gearhart, 1983; Schlumberger, 1985)

	Δt (μs/ft)	brzina* (m/s)	brzina* (ft/s)
voda (slana)	189-200	1610-1525	5290-5000
halit	66,7-67	4550	15000
anhidrit	50	6100	20000
gips	52-53	5860	19000
antracit	90-120	3050	10000
lignit	140-180	2000	6500

* - prosjek

Kod **karotaže gustoće** stijene se bombardiraju gamma zrakama energije 0,66 MeV koje se emitiraju iz radioaktivnih elemenata, a uređajima se mjeri količina zraka koje su prošle od izvora kroz stijenu do detektora (Velić, 2007). Potreban je izvor gamma

zraka i dva detektora (bliži i dalji), a njihova očitanja se kombiniraju za izračun mjerenja (Rider, 1996). Na bliži detektor jače djeluje utjecaj isplačne obloge pa se na taj način može procijeniti njen utjecaj na mjerenja (Šumanovac, 2012).

Ovo karotažno mjerenje koristi se za procjenu poroznosti i indirektno gustoće formacije. Indicira litološki sastav i korisna je za određivanje mineralnog sastava. Može pomoći odrediti nadpritisak i pukotinsku poroznost (Šumanovac, 2012).

Mjerenjem karotaže gustoće dobije se ukupna gustoća stijene ρ_b:

$$\rho_b = \phi\rho_f + (1-\phi)\rho_m, \qquad (3.6)$$

pa se poroznost može dobiti iz izraza:

$$\phi = \frac{\rho_{ma}-\rho_b}{\rho_{ma}-\rho_f}, \qquad (3.7)$$

gdje je: ϕ - poroznost, ρ_b – gustoća stijene dobivena karotažom, ρ_{ma} – gustoća čvrstog dijela stijene (mineralnih zrna), ρ_f – gustoća fluida u porama stijene.

Broj elektrona koje formacija sadrži daje elektronsku gustoću, a ona je približna pravoj gustoći stijene. U tablici 4-3. dane su vrijednosti stvarne i elektronske gustoće nekih minerala, ugljena i fluida, a na slici 4-3. prikazani su rasponi gustoća stijena u g/cm^3.

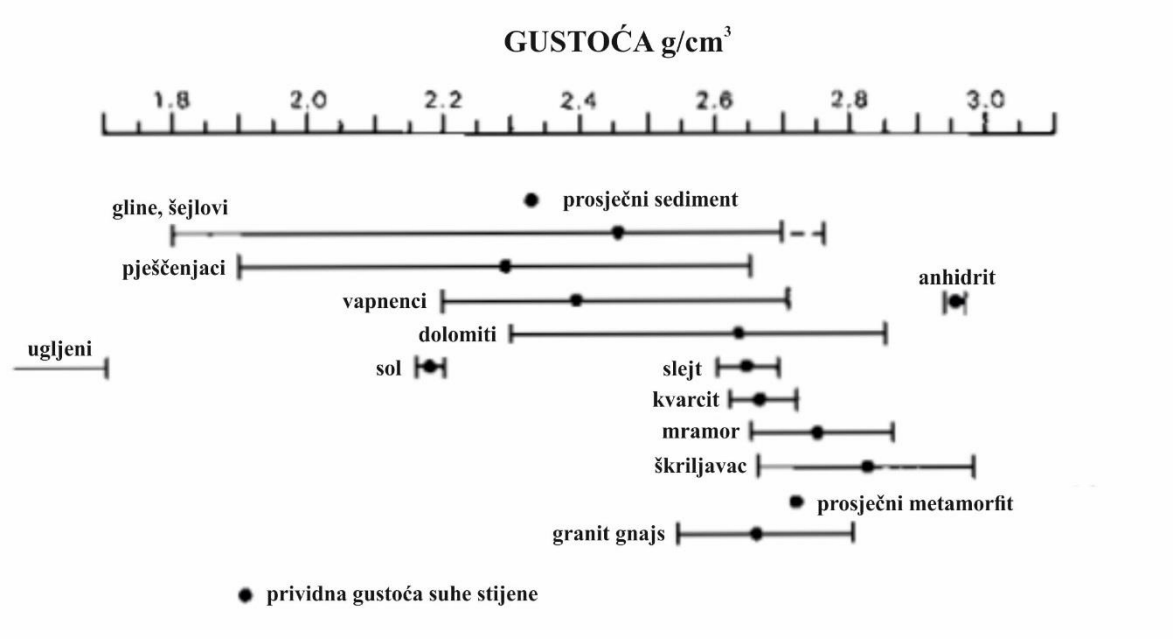
Prilikom izvođenja mjerenja, približno 80% signala dolazi iz 10 cm stijene od kanala bušotine, a većina modernih uređaja ima dubinski zahvat od 10 cm za dobivanje prosječne gustoće (Slika 4-4.). Ovako mali dubinski zahvat rezultira neželjenim velikim učincima promjene promjera kanala bušotine na rezultat mjerenja. Naime, povećanje promjera bušotine uzrokuje prividno smanjenje gustoće formacije, jer je mjerenje snažno utjecano gustoćom isplake (Rider, 1996).

Tablica 4-3. Gustoća i elektronska gustoća za različite minerale, ugljen i fluide. (Schlumberger 1989; Rider 1996)

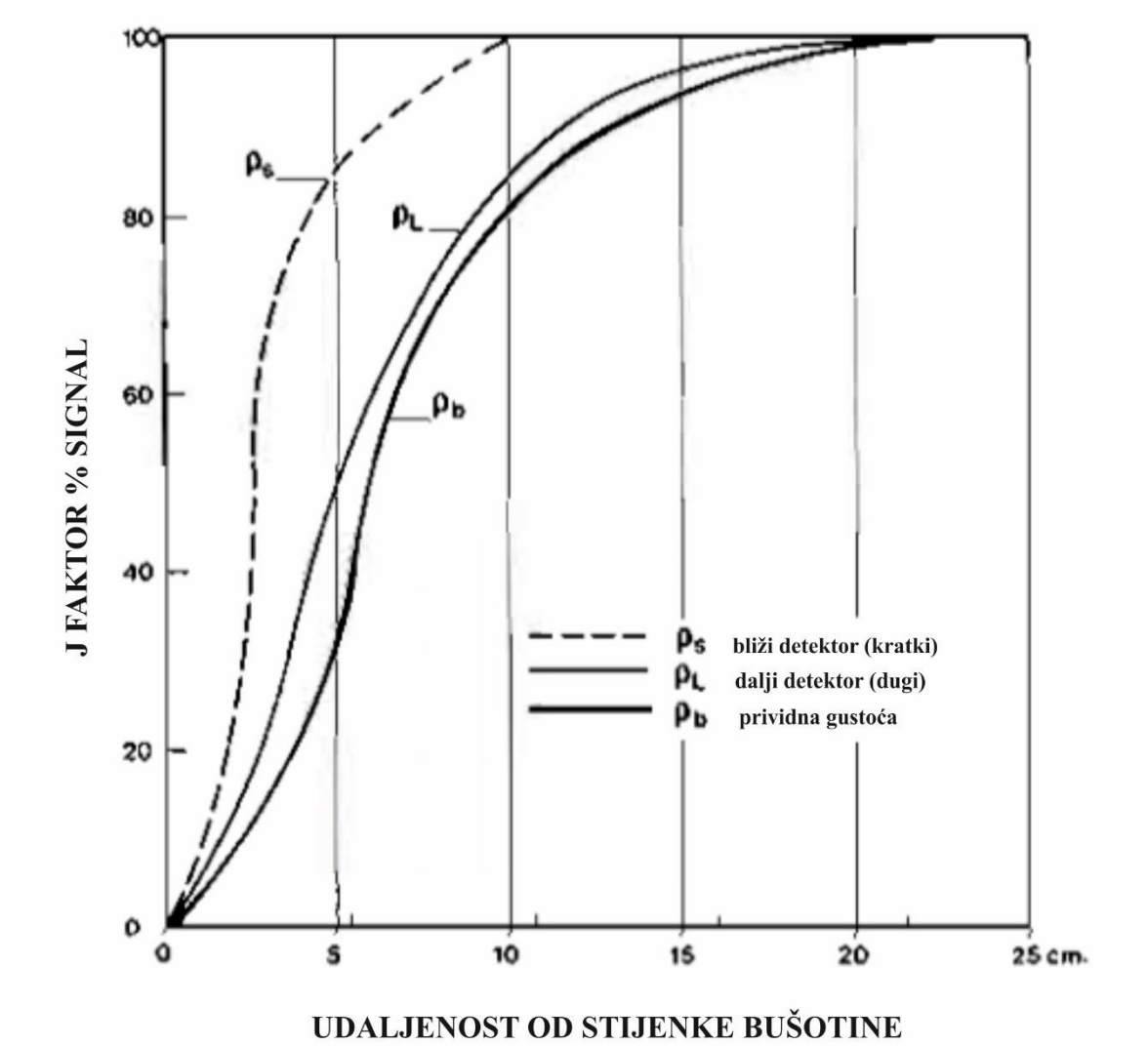
	Stvarna gustoća	Elektronska gustoća
kvarc	2,654	2,650
kalcit	2,710	2,708
dolomit	2,850	2,863
halit	2,165	2,074
gips	2,320	2,372
anhidrit	2,960	2,957
silvin	1,984	1,916
kameni ugljen	1,200	1,272
antracit	1,400	1,442
svježa voda	1,000	1,110
slana voda*	1,146	1,273
nafta	0,850	0,970
metan	0,000677	0,00084
prirodni plin**	0,00773	0,00096

*slana voda s 200 000 ppm ukupno otopljenih čvrstih tvari

**prirodni plin prosječnog sastava $C_{1,1}H_{4,2}$



Slika 4-3. Rasponi gustoća stijena (Rider 1996 modificirano prema Jackson i Talbot, 1986)



Slika 4-4. Dubina prodiranja uređaja za karotažu gustoće (Rider 1996 modificirano prema Sherman i Locke, 1975)

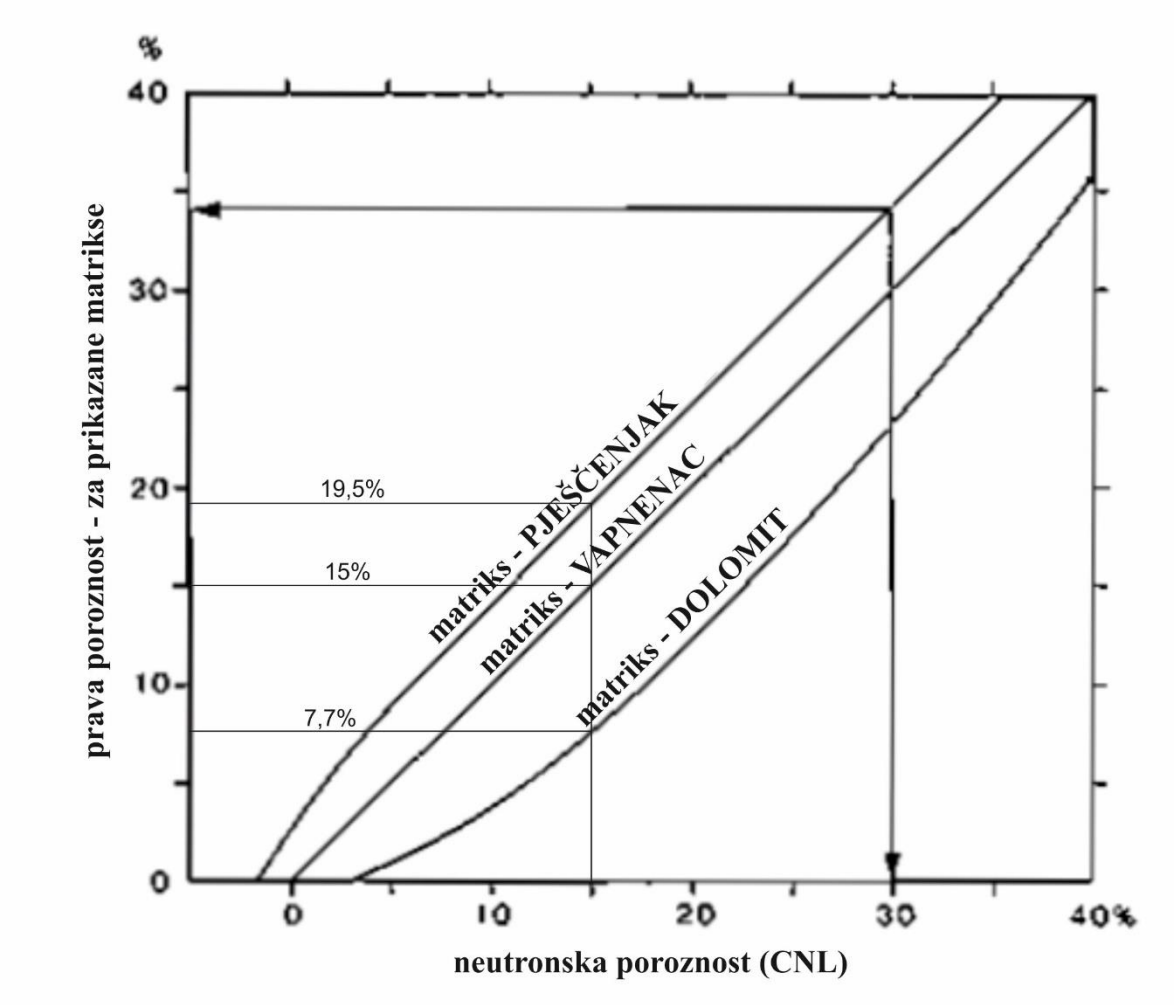
Neutronskom karotažom stijene se bombardiraju brzim neutronima i bilježi se njihovo usporavanje koje ovisi o količini vodika u stijeni (Velić, 2007). Sonda sadrži izvor neutrona i dva detektora (Rider, 1996). Kada se brzi neutroni sudaraju s jezgrama atoma dolazi do elastičnih i neelastičnih sudara, pri čemu gube energiju i usporavaju. Kod elastičnih sudara kinetička energija prenosi se na jezgru i nema zračenja, neutroni se usporavaju, a kod neelastičnog sudara prenosi se kinetička energija i unutarnja energija na jezgru, pri čemu se pojavljuje gamma zračenje. Zbog toga razlikujemo dvije vrste detektora: detektore sporih neutrona i detektore gamma zraka (Šumanovac, 2012).

Neutronska karotaža može pomoći kod definiranja litoloških granica. U kombinaciji s karotažom gustoće omogućuje najtočniju odredbu litološkog sastava (Rider, 1996). Koristi se i za procjenu poroznosti pomoću formule:

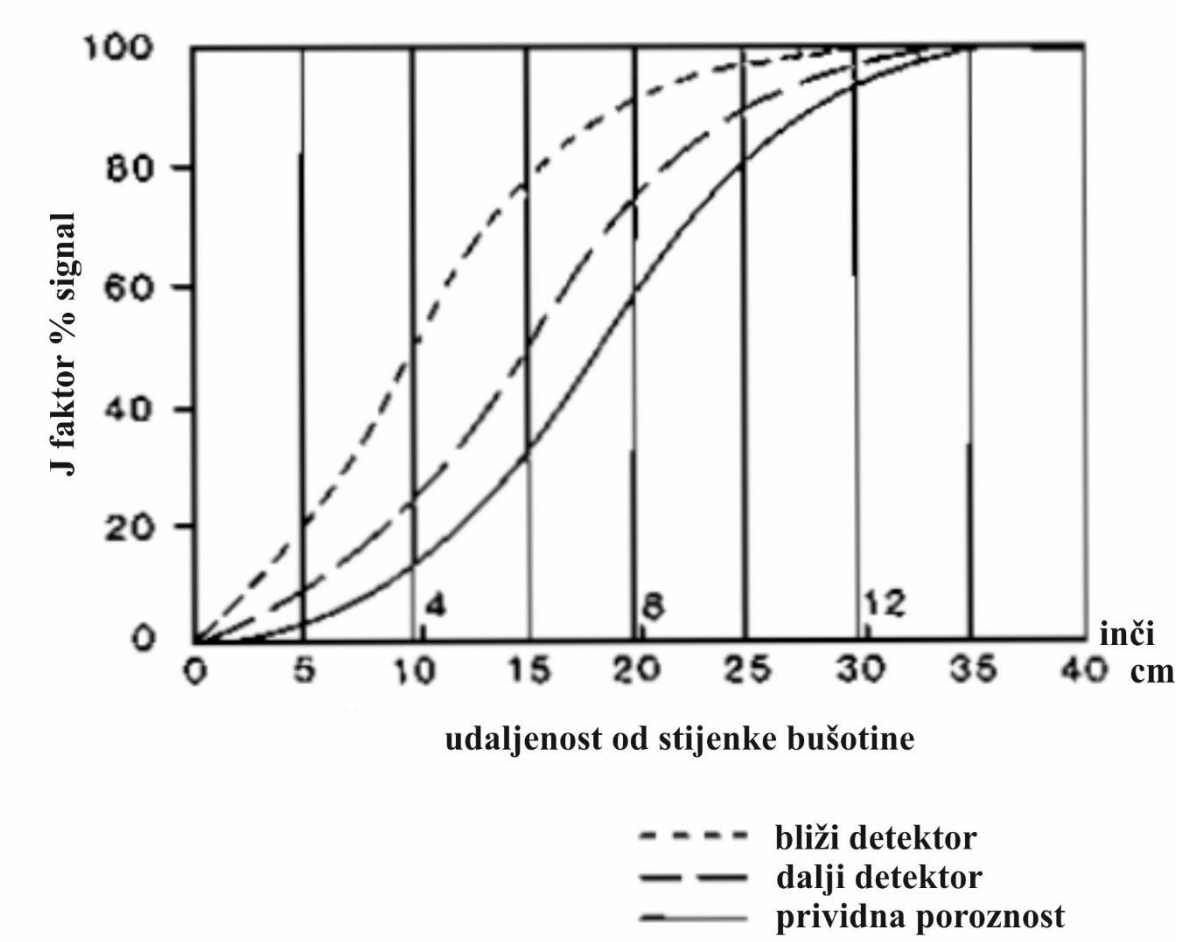
$$\log\phi = A*NEU+B, \qquad (3.8)$$

gdje je: ϕ - poroznost, A, B – konstante, NEU – očitanje neutronske karotaže (Velić, 2007). Neutronska poroznost razvijena je na vapnencima, te se još naziva i „vapnenačka poroznost“ i stoga odgovara stvarnoj poroznosti samo za vapnence. Da bi se odredila stvarna poroznost za druge vrste stijena, može se koristiti dijagram prikazan na slici 4-5. (Rider, 1996). Na primjer, ako je za vapnenac očitana poroznost od 15 % na određenoj dubini, onda će poroznost za dolomit iznositi 7,7 %, a za pješčenjak 19,5 %.

Pri mjerenju oko 95% signala dolazi iz stijene na dubini od 15 – 30 cm od kanala bušotine. Dubinski zahvat varira ovisno o uređaju, količini vodika i o poroznosti (slika 4-6). Zbog tako malog dubinskog zahvata izražen je utjecaj povećanja promjera bušotine na rezultate mjerenja, odnosno na povećane vrijednosti poroznosti. Uređaji automatski vrše korekcije za utjecaje slane isplake, temperature i tlaka (Rider, 1996).



Slika 4- 5. Dijagram za korekciju ili procjenu poroznosti na temelju mjerenja neutronskom karotažom. (modificirano prema Schlumberger 1972; Rider 1996)



Slika 4- 6. Dubina prodiranja uređaja za neutronsku karotažu (Rider 1996, modificirano prema Sherman i Locke, 1975)

4.3.1. INTERACTIVE PETROPHYSICS

„Interactive Petrophysics“ je programski paket kojim se služe geoznanstvenici pri interaktivnom rješavanju zadataka. U ovom radu korišten je za procjenu poroznosti iz karotažnih mjerenja 11 bušotina.

Prvi korak je unošenje karotažnih krivulja za svaku pojedinu bušotinu. Unesene karotažne krivulje uključivale su: spontani potencijal, prirodnu radioaktivnost, prividnu električnu otpornost, zvučnu karotažu, karotažu gustoće, neutronsku karotažu, mikrolog i kaliper (Slika 4-7). Zatim je pomoću opcije „Calculation“, iz prosječne godišnje temperature i izmjerene temperature na određenoj dubini dobiven graf porasta temperature s dubinom.

Nakon toga su izvršene korekcije krivulja karotaže gustoće i neutronske karotaže. Korekcije su izvršene uzimajući u obzir tipove sonde koji su korišteni te svojstva isplake. Promjena promjera bušotine jako utječe na karotažu gustoće i na neutronsku karotažu zato što su uređaji za ove dvije karotaže papučicama pričvršćeni za stijenke bušotine i svaki pomak od nominalnog promjera bušotine uzrokuje pogreške u mjerenju, jer su mjerenja zbog malog dubinskog zahvata utjecana svojstvima isplake, kao što je ranije spomenuto. Korekcije ne pomažu kada se ne zna tip sonde koja je korištena za mjerenje ili u slučaju kada je došlo do razrušavanja kanala bušotine (odnosno kada je povećanje promjera bušotine veće od 2“), što uzrokuje velike greške koje se ne mogu umanjiti korekcijama.

Pomoću „Advanced Interpretation – Mineral Solver“ izrađen je, temeljem litološkog stupa iz operativnog geološkog dijagrama, model mineralnog sastava za svaku litološku jedinicu unutar istraživanog intervala. Iz modela mineralnog sastava i karotažnih krivulja (neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže) proizašla je procjena poroznosti po dubini u vidu krivulje.

Gornja granica analiziranih intervala utvrđena je temeljem dubine na kojoj se dostiže temperatura formacije koja omogućava uporabu fluida u geotermalne svrhe (minimalno 60 °C), dok je donja granica uglavnom dno bušotine. Tamo gdje čitavi interval od interesa nije bio zahvaćen karotažama poroznosti, analiziran je samo dio intervala gdje je bilo moguće provesti analizu.

4.4. PROPUSNOST

Propusnost stijena je svojstvo koje se odnosi na njezinu sposobnost da propušta kapljevine i plinove kroz pore, odnosno šupljine koje su međusobno povezane. Svaka propusna stijena mora biti porozna, ali svaka porozna stijena ne mora biti propusna, jer izolirane pore ne omogućuju protok fluida, a vrlo sitna ušća pora znatno usporavaju njihovo kretanje kroz stijenu. U tom smislu, propusnost stijene ovisi o njezinoj efektivnoj poroznosti.

Kvalitativne opisne vrijednosti propusnosti te procijenjene vrijednosti izračunate na temelju procjena transmisivnosti Hornerovom metodom iz DST-a dane su tablicom 4-

4. Kvantitativna procjena propusnosti iz rezultata DST-a temelji se na modificiranom Hornerovom dijagramu. Analiza Hornerovom metodom provodi se uz pomoć semi-log dijagrama tlak – vrijeme, pri čemu je apscisa predstavljena s $(T+\Delta T)/\Delta T$ u logaritamskom mjerilu, dok se na ordinatu nanose izmjerene vrijednosti tlaka p (psi) u linearnom mjerilu. Pri tome T (min) predstavlja vremenski period tijekom kojeg je aparat bio zatvoren (*engl. Shut-in period*), dok ΔT (min) predstavlja odsječak vremena nakon otvaranja aparata kada je mjeren tlak testiranog intervala. Pomoću nagiba pravca na Hornerovom dijagramu izračunavaju se transmisivnost i propusnost. Nagib pravca izračuna se iz razlika u tlaku za $\log_{10}((T+\Delta T)/\Delta T) = 0$ i za $\log_{10}((T+\Delta T)/\Delta T) = 1$, tj, razlika u tlaku za jedan cijeli logaritamski ciklus.

Formule za nagib pravca, transmisivnost, debljinu propusnog sloja i propusnost redom glase:

$$m = 162.6 * q * \mu * B / (K * h), \qquad (3.9)$$

$$K * h / \mu = 162.6 * q * B / m, \qquad (3.10)$$

$$K * h = (162.6 * q * B / m)* \mu, \qquad (3.11)$$

$$K = ((162.6 * q * B / m)* \mu) / h, \qquad (3.12)$$

gdje je: m – nagib pravca, q – protok (STB/dan), μ – viskoznost (mPa-s), B – faktor formacije (RB/STB), K – prosječna propusnost (mD), h – vertikalna debljina kontinuirane poroznosti (ft) (Horner, 1951).

Ova procjena je gruba, jer pretpostavlja radijalni tok, homogenost ležišta (sloja) te beskonačnost ležišta (sloja), kao i jednofazni protok. Pretpostavka radijalnog toka uvjetuje dotok fluida u bušotinu jednako iz svih smjerova formacije. Homogenost ležišta označava stalne karakteristike po dužini i debljini te sve vrijednosti dobivene iz podataka istraživanja postaju prosjeci. Beskonačni rezervoar je onaj koji nema konačnih ograničenja ili iscrpljenosti. Jednofazni protok je kad samo jedna faza ulazi u bušotinu (http://www.kgs.ku.edu/software/DST/HELP/horner/qa_fluid.html).

Propusnost stijena ocjenjuje se kao slaba kad je manja od 1 mD, povoljna kad iznosi 1-10 mD, osrednja kad iznosi 10-50 mD, dobra kad iznosi 50-250 mD te vrlo dobra kad je veća od 250 mD (Velić, 2007). U tablici 4-5 dane su vrijednosti propusnosti izmjerene na uzorcima jezgara, a preuzete iz izvještaja o petrofizikalnim analizama.

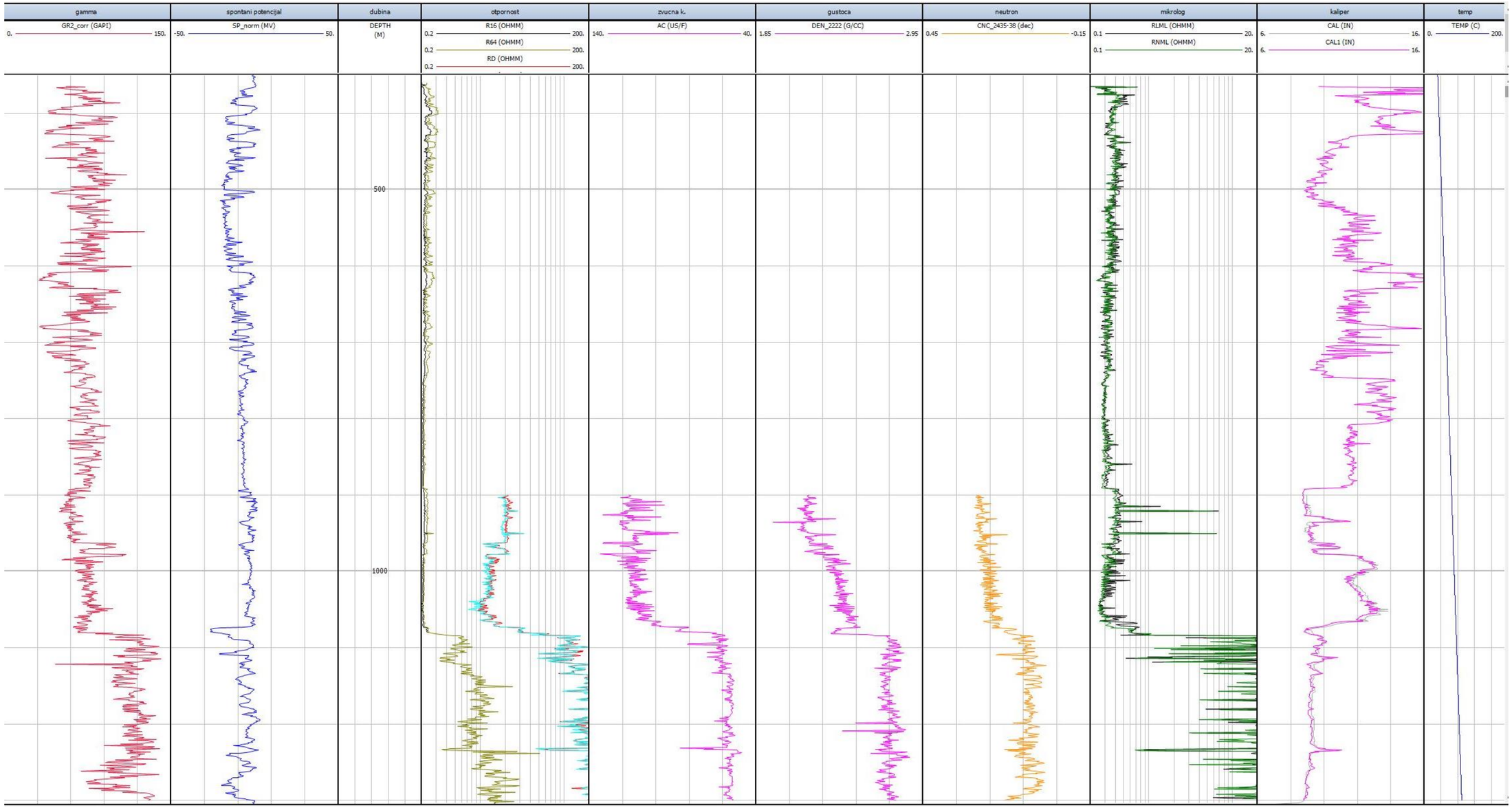
Tablica 4- 4. Bušotine i propusnosti određenih intervala procijenjenih Hornerovom metodom iz DST-a

BUŠOTINA	MJERENJE	DUBINA INTERVALA (m)	PROPUSNOST (mD)
B2	DST-1	1561,00-1639,00*	1,85
B3	DST-1	1538,84-1559,00	vrlo slaba
	DST-2	1558,00-1633,00	vrlo slaba
B4	DST-1	1070,60-1079,00	193,94
B5	DST-1	1807,00-1827,00	0,39
B6	DST-1	1906,00-1919,00	0,81
	DST-2	2359,00-2374,00	nepropustan
	DST-5	2274,00-2390,00	slaba
B7	DST-1	2249,74-2265,00	slaba
	DST-2	2890,03-2926,00	3,71
	DST-3	2649,50-2655,50 i 2658,50-2664,50	slaba
	DST-4	2497,50-2509,50	slaba
B8	DST-1	2615,39-2627,00	7,07
	DST-2	2979,74-3004,00	slaba
B9	DST-1	1084,77-1115,00	vrlo slaba
	DST-2	1218,90-1231,00	70,37
B10	DST-1	2548,90-2561,00	19,94
	DST-2	2820,80-2829,00	nepropustan
B11	DST-1	1353,50-1364,70	nepropustan
	DST-2	1851,00-1878,00	vrlo slaba
	DST-3	1907,53-1927,00	6,47
	DST-4	2036,90-2049,00	2,52
	DST-5	2070,00-2080,00	145,90

*mjerenjem DST-a zahvaćen je donji dio krovinskih lapora i gornji dio intervala brečokonglomerata iznad intervala za koji su provedene analize karotažnih mjerenja

Tablica 4- 5. Propusnosti izmjerene na uzorcima jezgara.

BUŠOTINA	DUBINA INTERVALA (Jezgre)	HORIZONTALNA PROPUSNOST (mD)	VERTIKALNA PROPUSNOST (mD)
B1	1595,00-1598,00	0,05-20,00	0,04-4,00
B2	2600,00-2603,00	0,02	0,02
B3	1549,00-1551,00	0,04-20,30	/
	1623,00-1629,00	0,45	/
B4	1075,00-1079,00	113,50 – 422,02	57,80-393,44
B5	1818,00-1821,00	0,13-103,40	/
B6	2370,00-2373,00	0,01-0,55	/
	3653,00-3657,00	0,01-39,50	0,00-0,02



Slika 4-7. Primjer ulaznih bušotinskih podataka.

5. REZULTATI

Za ukupno 29 istraživačkih bušotina u istočnome dijelu Dravske depresije, u kojima su provedena DST mjerenja, izračunati su geotermalni gradijenti (Tablica 5-1). Najviši geotermalni gradijent ima bušotina B4 i on iznosi 6,03 °C/100 m.

Tablica 5-1. Bušotine i njima pripadajući geotermalni gradijenti.

BUŠOTINA	DUBINA(m)	TEMPERATURA(°C)	GEOTERMALNI GRADIJENT(°C/100m)
B1	739,00	52,7	5,64
B2	1537,67	97,0	5,59
B3	1552,00	91,0	5,15
B4	1077,00	76,0	6,03
B5	1825,00	104,0	5,09
B6	1916,00	121,0	5,74
B7	2637,50	148,8	5,22
B8	2625,50	149,0	5,25
B9	1228,50	73,9	5,12
B10	2561,00	149,0	5,39
B11	1925,80	119,3	5,62
B12	1285,00	65,0	4,20
B13	2000,00	110,5	4,97
B14	2526,00	129,0	4,66
B15	2601,00	132,2	4,66
B16	1346,50	65,0	4,01
B17	1077,90	50,0	3,61
B18	2410,00	115,0	4,31
B19	1526,45	77,8	4,37
B20	1976,70	107,0	4,85
B21	961,00	43,0	3,33

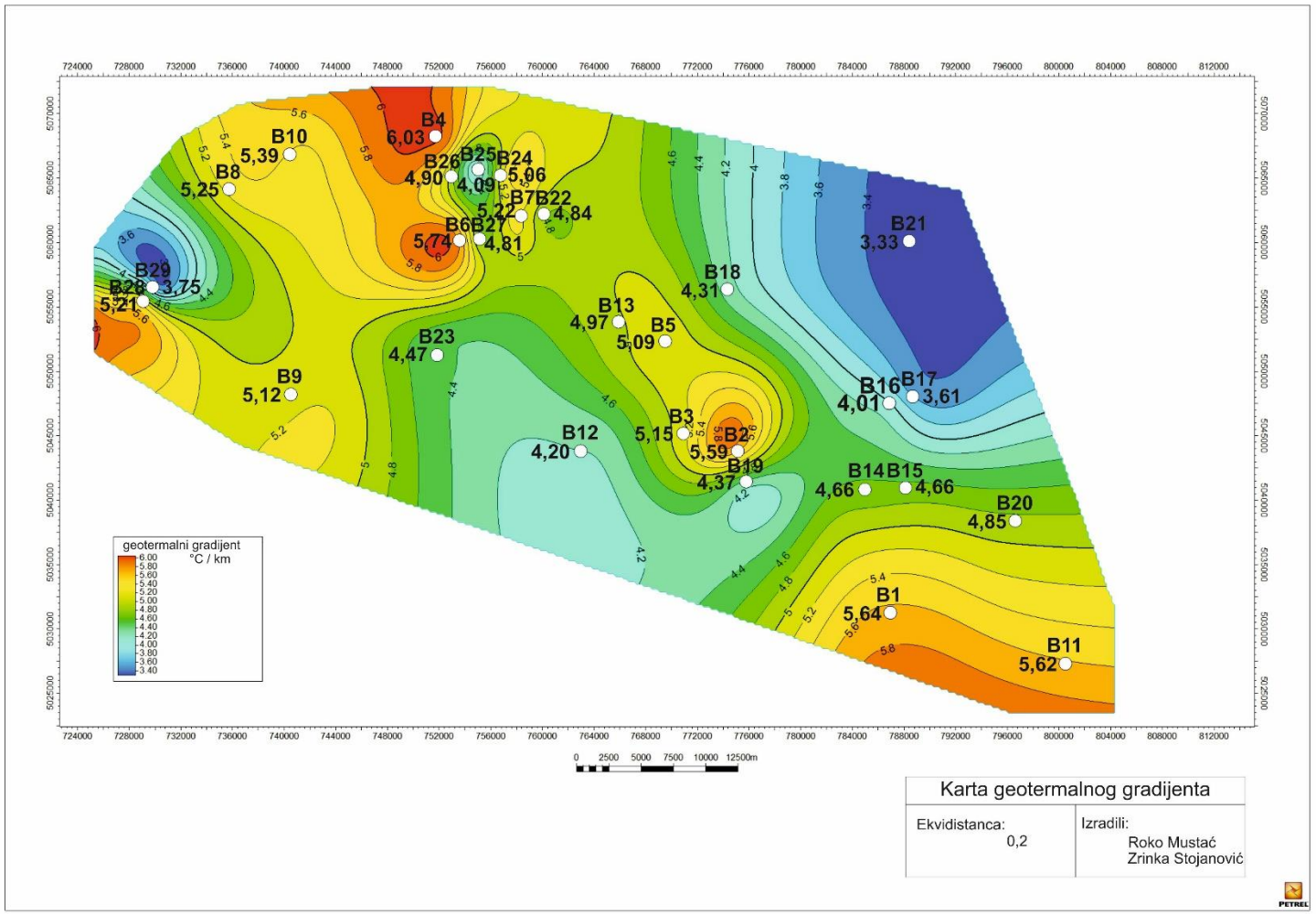
B22	2788,00	146,1	4,84
B23	3707,00	176,6	4,47
B24	1736,00	98,9	5,06
B25	1670,00	79,4	4,09
B26	2243,00	121,0	4,90
B27	2868,00	149,0	4,81
B28	1610,00	95,0	5,21
B29	2982,50	123,0	3,75

5.1. KARTA PROSJEČNOG GEOTERMALNOG GRADIJENTA

Na slici 5-1. prikazana je karta prosječnog geotermalnog gradijenta u istočnom dijelu Dravske depresije i istaknute su bušotine za koje su izvršene analize karotažnih mjerenja u ovome radu. Ono što se jasno uočava jest da je prosječni geotermalni gradijent na čitavom istraživanome području veći od svjetskog prosjeka koji iznosi 3 °C/100 m (Jelić et al., 1995).

Na istraživanome području geotermalni gradijent je niži od 4 °C/100 m samo na dva mjesta, u sjeveroistočnom dijelu te na manjoj površini uz zapadni rub istraživanog područja (plavo obojena područja).

Na sjeveru, jugoistoku, jugozapadu i u središnjem dijelu geotermalni gradijent se povećava do iznad 5 °C/100 m. Na sjeveru je zabilježen najviši geotermalni gradijent koji iznosi 6,03 °C/100 m, kao što je ranije spomenuto on je određen u bušotini B4. Znatno povišen geotermalni gradijent uočava se i u bušotini B6, isto tako u bušotinama B2 i B1. U bušotini B6 on iznosi 5,74 °C/100 m, u B1 5,64 °C/100 m te u B2 5,59 °C/100 m.



Slika 5-1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta. (Mustać i Stojanović, 2019)

5.2. REZULTATI ANALIZA KAROTAŽNIH MJERENJA

Rezultati analiza karotažnih mjerenja su prikazani na slikama na kojima se nalaze modelirani mineralni sastav, krivulja neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže, mjerenje kalipera te dubina bušotine. Litološki sastav pojedinih intervala određen je prema litološkom stupu bušotina iz operativnog geološkog dijagrama (OGD). Stupac „error“ prikazuje greške procjene koje su uglavnom uvjetovane povećanjem promjera bušotine u odnosu na nominalni promjer, ali su za neke intervale i posljedica pogreške u predviđanju mineralnog sastava, jer softver ima vrlo suženi izbornik minerala, pa se ne mogu adekvatno opisati mineralni sastavi magmatita i metamorfita, kao ni vulkanoklastičnih sedimenata.

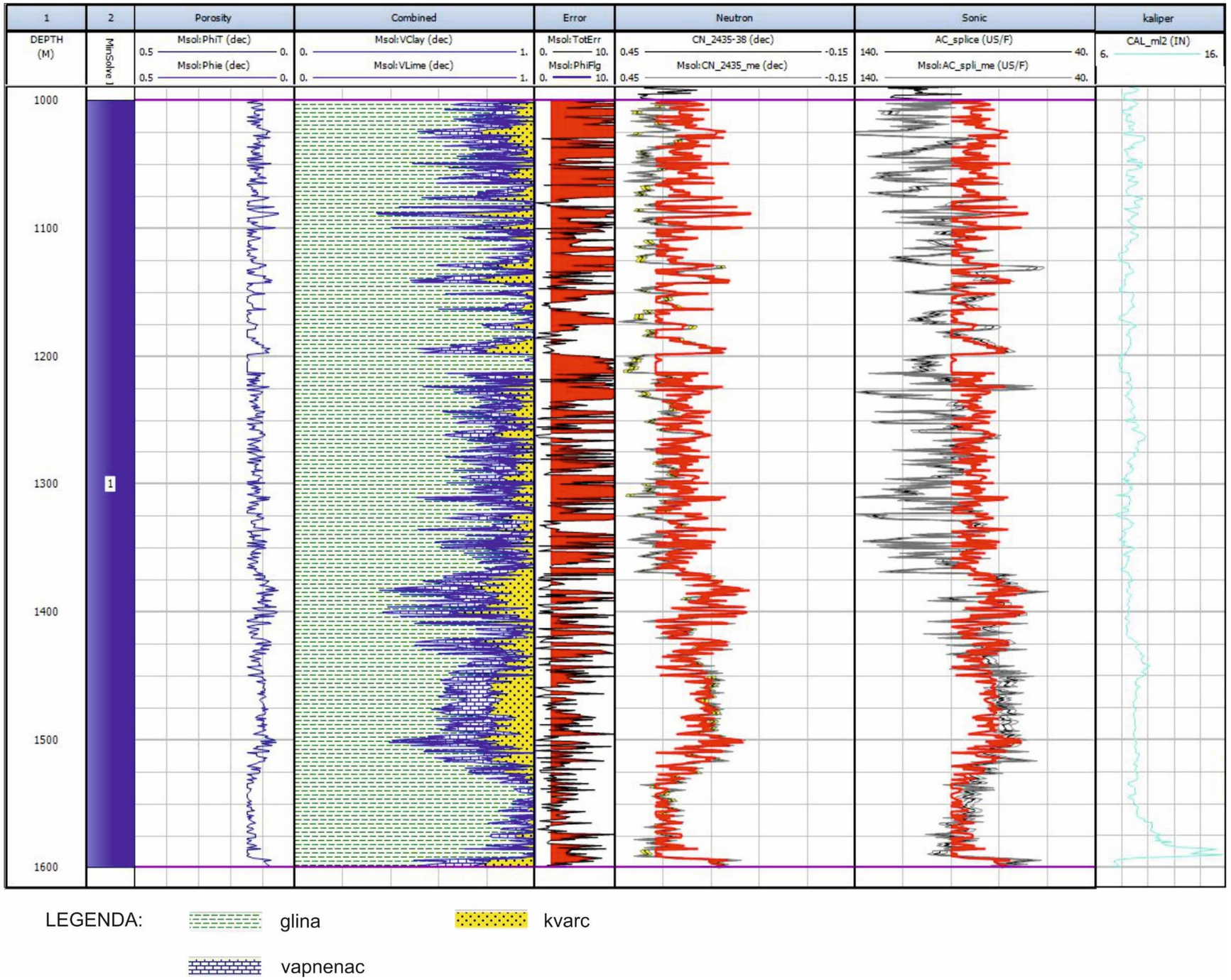
U *Mineral Solveru* u opciji *Confidence* svakoj karotažnoj krivulji program automatski zadaje težinski faktor, pa tako krivulji neutronske karotaže zadaje pouzdanost 0,01, krivulji karotaže gustoće zadaje 0,02, a krivulji zvučne karotaže zadaje 1. Pri definiranju ovih brojeva treba biti vrlo oprezan, jer što je broj koji definira pouzdanost manji, to se krivulji pridaje veći težinski faktor pri procjeni poroznosti, a što je taj broj veći, to se krivulji pridaje manji težinski faktor pri procjeni poroznosti. Kada kaliper pokazuje velike varijacije u mjerenju promjera kanala bušotine, u tim intervalima pridodan je manji težinski faktor krivuljama gustoće i neutronske poroznosti, jer su one bitno utjecane ovim promjenama.

5.2.1. Analiza poroznosti u bušotini 1

Analizirani interval (1000-1600 m) predstavlja lapor do siltit ponegdje konglomeratičan, s prijelazima u konglomeratični litoarenit, za koji je u *Mineral Solveru* postavljeno da sadržava glinu, kalcit i kvarc na temelju opisa iz OGD-a. Prema geološkom izvješću stijena ovog intervala pripada Vukovarskoj formaciji (Slika 3-2).

Karotaža gustoće nije mjerena unutar intervala od interesa. Korištene su krivulje neutronske karotaže i zvučne karotaže kako je prikazano na slici 5-2. Krivulja poroznosti u analiziranom intervalu prosječno prikazuje poroznost od 12%, a krivulja kalipera prosječno prikazuje promjer bušotine od 8″. Stupac „error“ prikazuje najmanju

grešku na dubini od 1191 do 1197 m, jer se na tom dijelu modelirane krivulje dobro podudaraju s mjerenim krivuljama neutronske i zvučne karotaže. Na tom dijelu promjer bušotine iznosi oko 8″, a vrijednost poroznosti je 9%. Uočava se velika promjenjivost poroznosti s dubinom, vjerojatno zbog minerala glina zbog kojih dolazi do razrušavanja kanala bušotine te samim time i povećanja promjera bušotine. Primjerice, to je vidljivo u intervalu od 1584 do 1591 m, gdje krivulja poroznosti prikazuje poroznost od 15 % zbog povećanog promjera bušotine koji iznosi oko 15″.

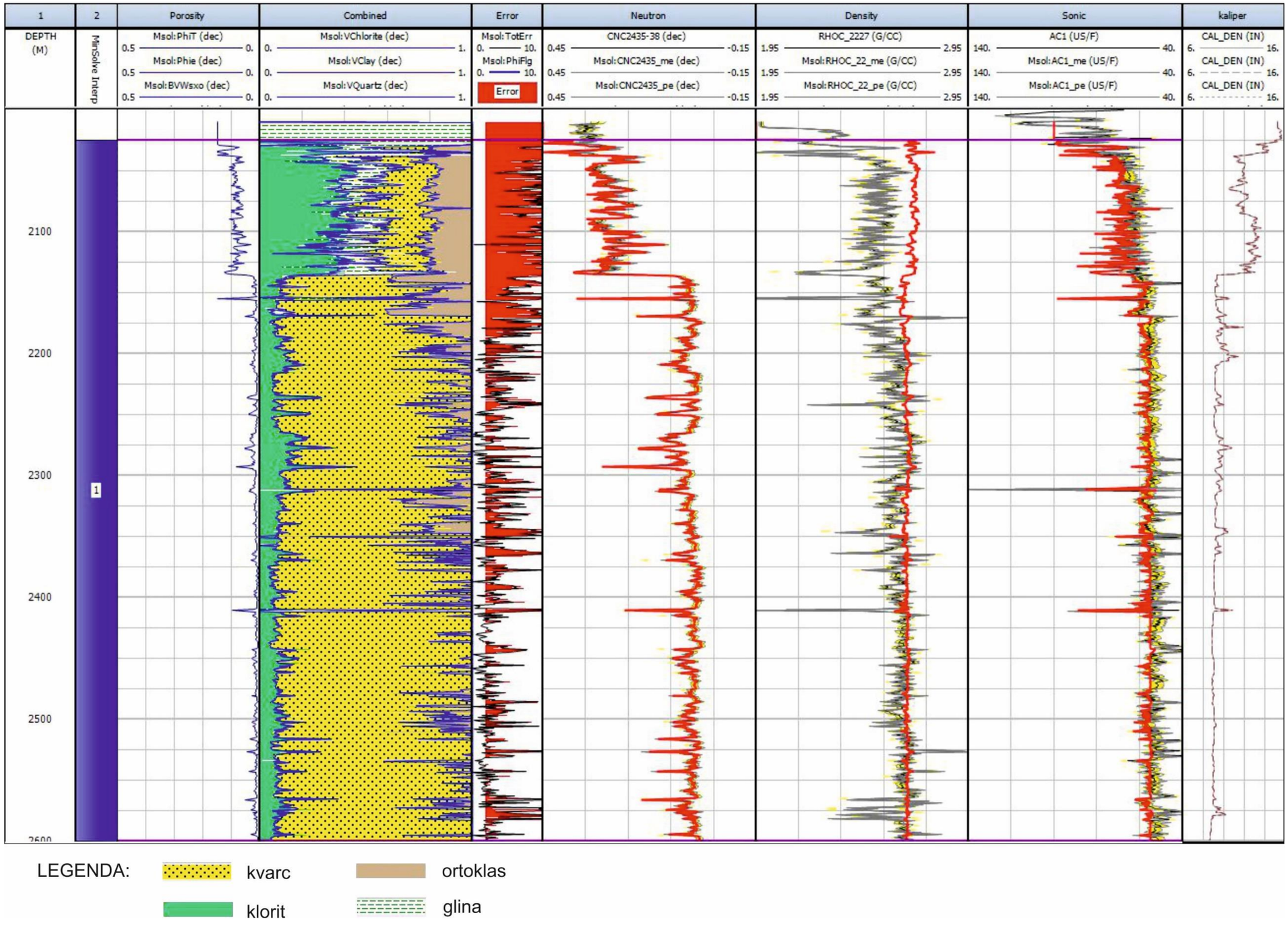


Slika 5-2. Procjena poroznosti za bušotinu 1. (1 – lapor do siltit ponegdje konglomeratičan, s prijelazima u konglomeratični litoarenit)

5.2.2. Analiza poroznosti u bušotini 2

Analizirani interval (2025-2600 m) je polimiktna breča za koju je temeljem opisa s OGD-a procijenjeno da sadržava kvarc, ortoklas, klorit i minerale glina. Prema geološkom izvješću stijena ovog intervala pripada Vukovarskoj formaciji (Slika 3-2).

Za analizu poroznosti korištene su krivulje karotaže gustoće, neutronske karotaže i zvučne karotaže. Na slici 5-3 uočava se da je model automatski korigirao vrijednosti karotaže gustoće u najplićem dijelu intervala, od 2025 do 2135 m, odnosno tamo gdje krivulja kalipera ukazuje na povećanje promjera bušotine oko 12" u odnosu na nominalni promjer od 9,625", a samim time povećana je i poroznost koja iznosi 8-15%. Na tom dijelu je prikazna najveća greška u stupcu „error“. U ostatku bušotine krivulja kalipera poprilično je kontinuirana, vrijednosti joj odskaču samo na mjestima gdje se vjerojatno nalaze otvorene pukotine, što se uočava kao pikovi na krivulji kalipera, a i na krivulji poroznosti kao mjestimično naglo i kratko povećana poroznost. Poroznost u ostatku bušotine iznosi oko 1% osim na dijelovima gdje se javlja spomenuta pukotinska poroznost kao na primjer na dubini 2410 m gdje iznosi 14%.

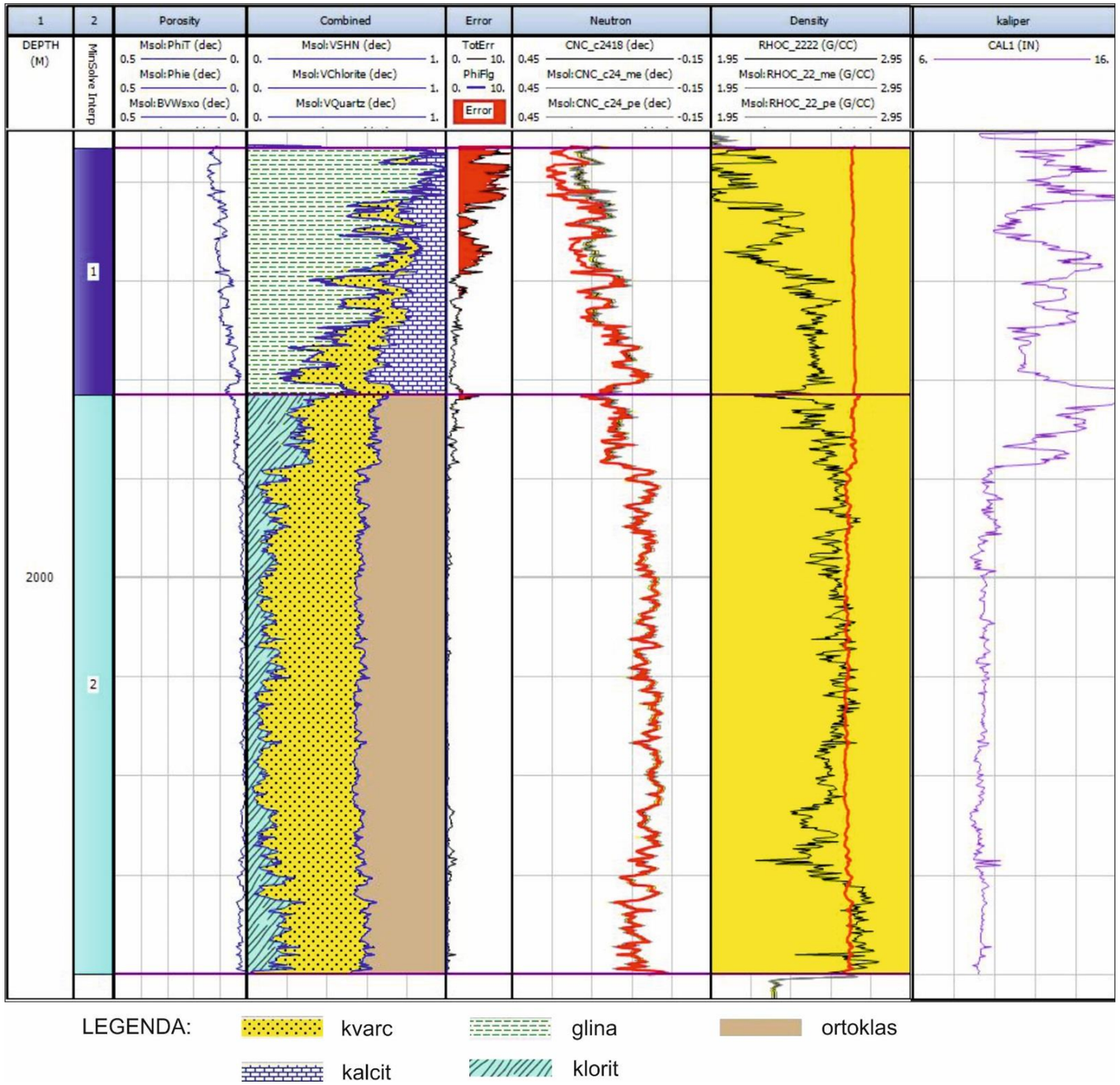


Slika 5-3. Procjena poroznosti za bušotinu 2. (1 – breča)

5.2.3. Analiza poroznosti u bušotini 3

U ovoj bušotini nalaze se dva intervala od interesa. Prema OGD-u pridodani su minerali svakom intervalu i uneseni u *Mineral Solver*. Prvi interval (1566-1815 m) sadrži breču za koju je postavljeno da sadrži minerale kvarc, kalcit i minerale glina. Drugi interval (1815-2400 m) sadrži škriljavac u kojem su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, ortoklas i klorit. Prema geološkom izvješću breča pripada Vukovarskoj formaciji, a škriljavac pripada podlozi tercijara (Slika 3-2).

Procjene poroznosti provedene su na temelju izmjerenih karotaža poroznosti - neutronske i karotaže gustoće (Slika 5-4). Vrijednostima karotaže gustoće dodan je manji težinski faktor od automatski zadanog u odnosu na vrijednosti neutronske karotaže, jer je krivulja karotaže gustoće i nakon provedenih korekcija pokazivala velika odstupanja uslijed promjene promjera kanala bušotine, što se uočava u plićem dijelu testiranog intervala prema velikom pomaku krivulje kalipera od nominalnog promjera koji iznosi 9,625″. Promjer kanala bušotine povećan je do dubine od 1900 m zbog toga u prvom intervalu poroznost iznosi do 15 % u najplićem dijelu dok na 1800 m dubine iznosi 2 %. Početak drugog intervala također je pod utjecajem pomaka kalipera i poroznost mu je 3-8 %. Ostatak drugog intervala ima poroznost 1-2 %, vrijednost joj varira s dubinom, ali nema neke velike promjene. Promjer kanala bušotine nakon vršnog, pretpostavljeno trošnog intervala škriljavca ima također male promjene i uglavnom se kreće oko 9".

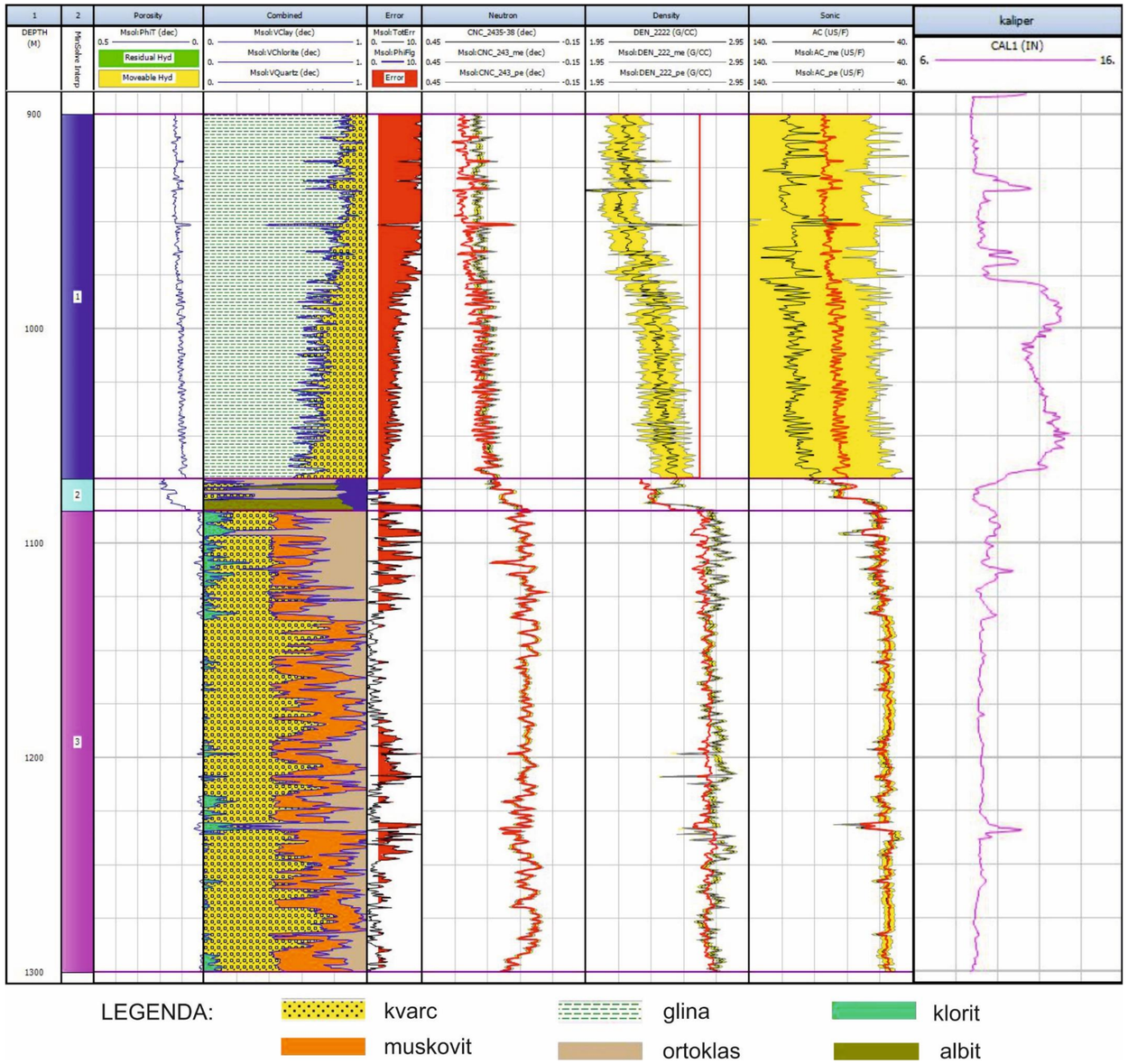


Slika 5- 4. Procjena poroznosti za bušotinu 3. (1 – breča, 2 – škriljavac)

5.2.4. Analiza poroznosti u bušotini 4

U bušotini 4 nalaze se tri intervala od interesa. Prema OGD-u pridodani su minerali svakom intervalu i uneseni u *Mineral Solver*. Prvi interval (900-1070 m) sadrži pješčenjak u kojem prisutni minerali kvarc, muskovit i minerali glina. Drugi interval (1070-1085 m) sadrži brečokonglomerat u kojem prema opisu jezgre prevladavaju zrna kvarca i feldspata, pa su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, ortoklas i albit, uz zadano zasićenje vodom, jer se prema rezultatima DST-a, kao i mjerenjima na uzorcima jezgre radi o stijeni povoljnih petrofizikalnih svojstava (poroznost između 15,2 i 22,1, a horizontalna propusnost između 113,5 i 422,02), a bez zasićenja vodom, analiza je davala male vrijednosti poroznosti (oko 5 %). Treći interval (1085-1300 m) sadrži škriljavac u kojem su prisutni minerali kvarc, muskovit, ortoklas i klorit. Prema geološkom izvješću, pješčenjak pripada Vinkovačkoj formaciji, breča pripada Vukovarskoj formaciji, a škriljavac pripada temeljnom gorju (Slika 3-2).

U intervalima su mjerene neutronska karotaža, karotaža gustoće i zvučna karotaža (Slika 5-5). U prvom intervalu dodan je manji težinski faktor, od automatski zadanoga, karotaži gustoće i zvučnoj karotaži zato što se modelirane krivulje ne podudaraju s njihovim mjerenim krivuljama. Krivulja kalipera ukazuje na povećanje promjera bušotine koje iznosi do 13″ u odnosu na nominalni promjer od 8,375″, samim time i krivulja poroznosti daje precijenjene vrijednosti od oko 13 %. Stupac „error“ ukazuje na potpunu pogrešku do dubine od 960 m, odnosno neupotrebljivost rezultata analize. U ostatku prvog intervala greška je manja, a poroznost iznosi oko 11 %. U drugom intervalu modelirane krivulje dobro se podudaraju s mjerenim krivuljama neutronske i zvučne karotaže na početku intervala te je prikazana velika greška u stupcu „error“ jer se modelirana krivulja ne podudara s krivuljom karotaže gustoće. Poroznost iznosi oko 20 %. U središnjm dijelu intervala modelirane krivulje dobro se podudaraju sa svim mjerenim karotažnim krivuljama, greška nije prikazana i poroznost iznosi oko 12 %. Dok se u donjem dijelu intervala modelirana krivulja ponovno ne podudara s krivuljom zvučne karotaže, te je prikazana greška. U trećem intervalu škriljavaca prisutna je samo pukotinska poroznost, što se može pratiti na krivulji poroznosti i na krivulji kalipera oko 1110 m, 1135 m i 1235 m. U ovom slučaju je pomak krivulje kalipera ograničen na vrlo kratke intervale, što bi moglo ukazivati na postojanje otvorenih pukotina.

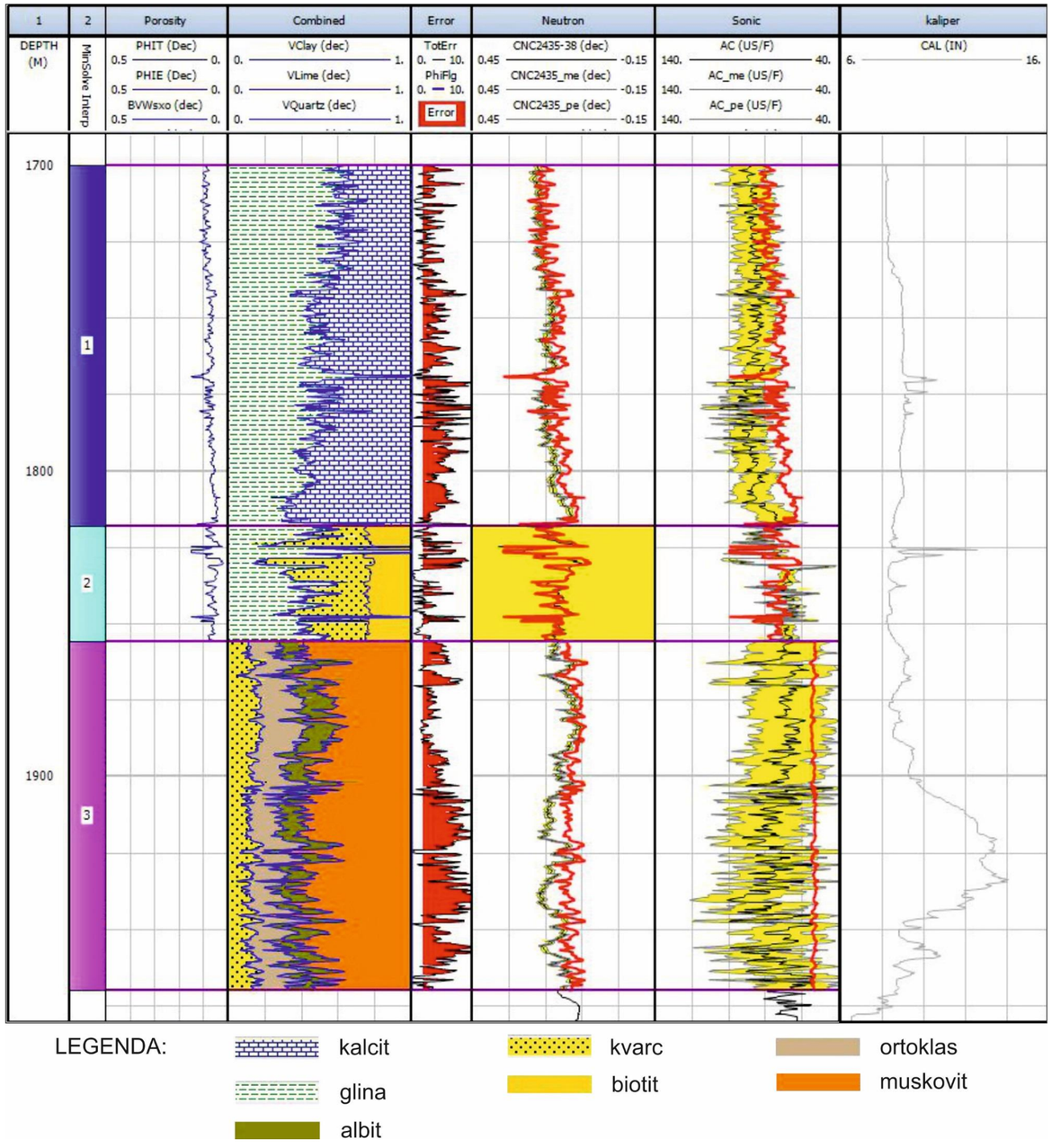


Slika 5-5. Procjena poroznosti za bušotinu 4. (1 – pješčenjak, 2 – brečokonglomerat, 3 – škriljavac)

5.2.5. Analiza poroznosti u bušotini 5

U bušotini 5 nalaze se tri intervala od interesa. Prema OGD-u svakom intervalu pridodani su minerali i uneseni u *Mineral Solver*. Prvi interval (1700-1818 m) sadrži lapor u izmjeni sa sitnozrnastim pješčenjakom i u tom intervalu su pretpostavljeno prisutni minerali kalcit, kvarc i minerali glina. Drugi interval (1818-1856 m) sadrži brečokonglomerat u kojem su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, biotit i minerali glina. Treći interval (1856-1970 m) sadrži gnajs u kojem su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, ortoklas, muskovit i albit. Prema geološkom izvještaju, lapor pripada Vinkovačkoj formaciji, brečokonglomerat pripada Vukovarskoj formaciji, a gnajs pripada temeljnom gorju (Slika 3-2).

U intervalima su mjerene neutronska i zvučna karotaža (Slika 5-6). Krivulja kalipera ukazuje na povećanje promjera bušotine u odnosu na nominalni promjer, koji iznosi 6,125", u svim analiziranim intervalima. U prvom intervalu zvučnoj karotaži je dodan manji težinski faktor u odnosu na automatski zadani, jer se modelirana krivulja ne podudara s mjerenom krivuljom. Krivulja kalipera na samom početku pokazuje stabilnu vrijednost promjera bušotine, a poroznost se kreće oko 10 %. U drugom intervalu poroznost iznosi 4-8 %, a na dubini od oko 1825 m uočava se povećanje promjera kanala bušotine i povećanje poroznosti koja iznosi 15 %. U trećem intervalu, predstavljenom gnajsom, kaliper pokazuje povećani promjer kanala bušotine, što znači da je došlo do razrušavanja kanala bušotine, a to se može dogoditi samo ako je gnajs trećeg intervala jako istrošen i raspucan. Rezultati analize pokazuju da nije prisutna poroznost, unatoč tome što kaliper pokazuje prevelike vrijednosti. To se može objasniti modeliranim krivuljama neutronske i zvučne karotaže koje prilično odstupaju od izmjerenih krivulja. Odstupanje je osobito izraženo za krvulju zvučne karotaže, ali ono manje utječe na rezultate analize, jer je ovoj krivulji dodijeljen manji težinski faktor u odnosu na krivulju neutronske karotaže. Na dubini od 1865 m uočavaju se pikovi na krivuljama koji možda predstavljaju pukotinsku poroznost iako model ne prikazuje vrijednosti poroznosti.



Slika 5- 6. Procjena poroznosti za bušotinu 5. (1 – lapor u izmjeni sa sitnozrnastim pješčenjakom, 2 – brečokonglomerat, 3 – gnajs)

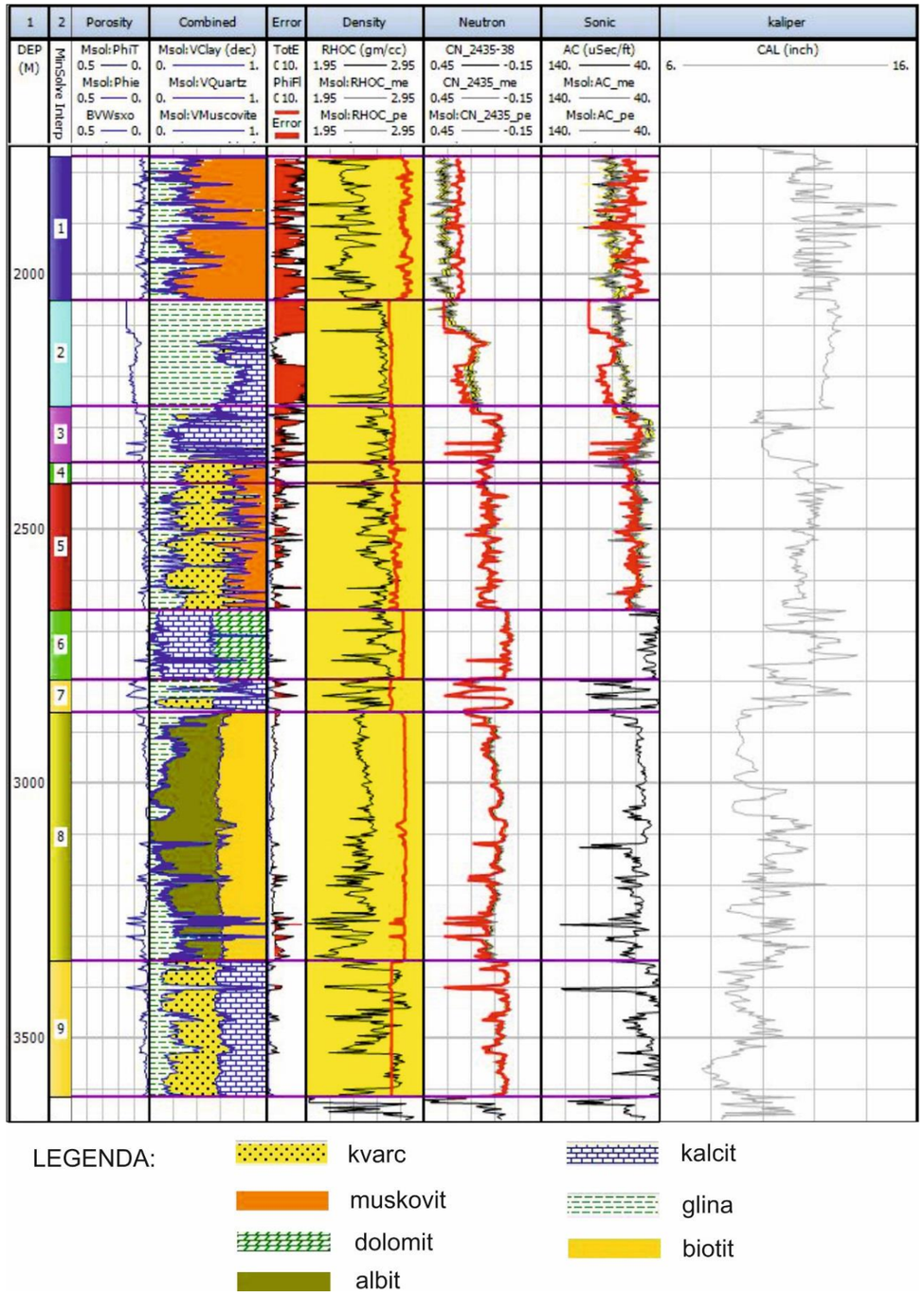
5.2.6. Analiza poroznosti u bušotini 6

U bušotini 6 istraživani interval podijeljen je u 9 zona prema litološkom sastavu iz OGD-a i svakom intervalu pridodani su odgovarajući minerali u *Mineral Solveru*. Prvi interval (1768-2050 m) sadrži pjeskoviti lapor u kojem su prisutni minerali kvarc, kalcit, muskovit i minerali glina. Drugi interval (2050-2260 m) sadrži lapor u kojem su prisutni minerali kvarc, kalcit i minerali glina. Treći interval (2260-2370 m) sadrži brečokonglomerat u kojem su prisutni minerali kvarc, kalcit i minerali glina. Četvrti interval (2370-2410 m) sadrži pješčenjak u kojem su prisutni minerali kvarc, muskovit i minerali glina. Peti interval (2410-2660 m) sadrži konglomeratični pješčenjak u kojem su prisutni minerali kvarc, muskovit i minerali glina. Šesti interval (2660-2795 m) sadrži glinoviti vapnenac u kojem su prisutni minerali kalcit, dolomit i minerali glina. Sedmi interval (2795-2860 m) sadrži breču u kojoj su prisutni minerali kvarc, kalcit i minerali glina. Osmi interval (2860-3350 m) sadrži dacitni tuf u kojem su pretpostavljeno prisutni minerali albit, biotit i minerali glina (zbog pretpostavke hidrotermalne alteracije). U sastav dacitnog tufa nije se mogao unijeti mineral hornblenda, jer ne postoji u popisu minerala. Razlog tome je vjerojatno zato što je IP softver razvijen prvenstveno za analize karotažnih krivulja izmjerenih u sedimentnim stijenama, dok je primjena u magmatskim i metamorfnim, ali i vulkanoklastičnim stijenama ograničena. Deveti interval (3350-3615 m) sadrži breču u kojoj su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, kalcit i minerali glina.

Prema geološkom izvješću pjeskoviti lapor i lapor pripadaju Vinkovačkoj formaciji, brečokonglomerat, pješčenjak, konglomeratični pješčenjak, vapnenac, breče, tuf i breče najdubljeg intervala pripadaju Vukovarskoj formaciji (Slika 3-2).

U analizi su korištene vrijednosti krivulja neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže u prvih pet intervala, a za ostale intervale model je uzeo u obzir samo krivulje neutronske karotaže i karotaže gustoće (Slika 5-7). Modelirana krivulja se ne podudara s mjerenom krivuljom karotaže gustoće, što je vjerojatno uvjetovano velikim odstupanjima promjera bušotine od nominalnog promjera koji iznosi 9,5", što se uočava na krivulji kalipera, te joj je pridodan manji težinski faktor. U prvom intervalu kaliper pokazuje povećan promjer kanala bušotine oko 12" u odnosu na nominalni promjer, a vrijednost poroznosti iznosi oko 8 %. Modelirane krivulje se ne podudaraju

s nijednom karotažnom krivuljom u potpunosti te je zbog toga prikazana greška u stupcu „error“. U drugom intervalu vrijednosti poroznosti su najveće do 15 %, a to je vjerojatno uzrokovano povećanjem promjera kanala bušotine od 13". Ni u ovome intervalu modelirana krivulja se ne podudara s krivuljama karotaže gustoće i zvučne karotaže te je zbog toga prikazana greška u stupcu „error“. U trećem intervalu krivulja kalipera pokazuje stabilniji promjer bušotine, manja je greška prikazana i prisutna je poroznost od oko 5 %, uz izražena dva pika od oko 15 % poroznosti, što vjerojatno ukazuje na mjestimičnu pukotinsku poroznost. Od četvrtog do sedmog intervala krivulja kalipera ponovno pokazuje povećanje promjera bušotine od 10″, ali greška je manja nego na početku i prisutna je poroznost. U četvrtom i petom intervalu poroznost iznosi oko 4 %. U šestom intervalu poroznost je neznatna, osim pukotinske na dubini 2748 m koja iznosi 5 %. U sedmom intervalu poroznost iznosi oko 7 %. U osmom intervalu prisutna je pukotinska poroznost u nekoliko dubinski ograničenih intervala, primjerice na dubini 3400 m iznosi 15% (ta vrijednost je procijenjena zbog povećanja promjera bušotine). Na dubini oko 3560 m promjer kanala bušotine je najmanji i iznosi manje od 8″, a poroznost iznosi 2 %. U devetom intervalu poroznost je promjenjiva s dubinom, iznosi oko 2%, uz prisutnost pukotinske poroznosti kao na primjer na dubini od 3400 m gdje iznosi 8%.



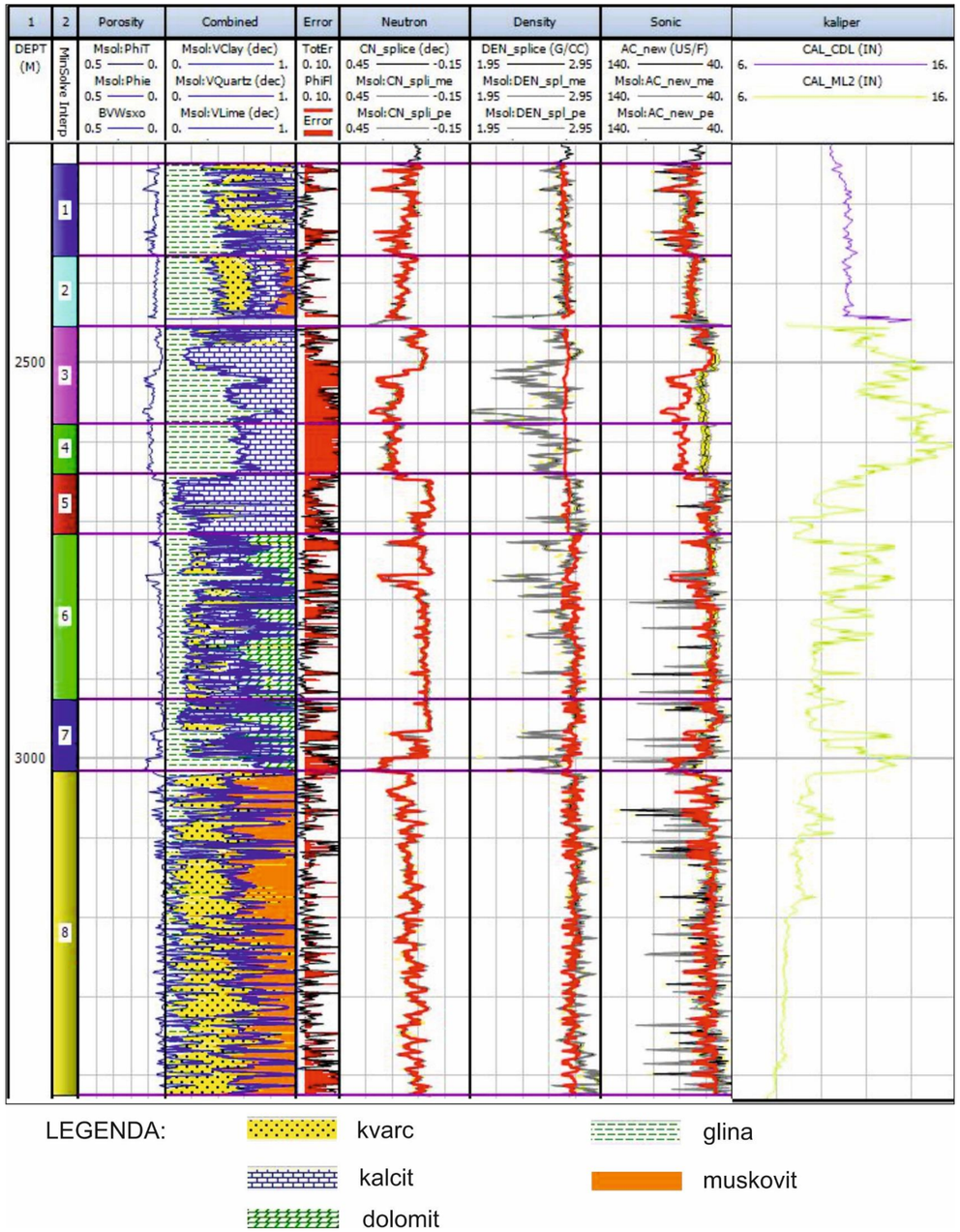
Slika 5-7. Procjena poroznosti za bušotinu 6. (1 – pjeskoviti lapor, 2 – lapor, 3 – brečokonglomerat, 4 – pješčenjak, 5 – konglomeratični pješčenjak, 6 – vapnenac, 7 – breča, 8 - tuf, 9 – breča)

5.2.7. Analiza poroznosti u bušotini 7

U bušotini 7 unutar intervala od intersea izdvojeno je osam zona prema litološkom stupu bušotine u OGD-u te su svakom izdvojenom intervalu pridodani minerali u *Mineral Solveru*. Prvi interval (2250-2365 m) sadrži pješčenjak i pjeskoviti lapor, a u njima su prisutni minerali kvarc, kalcit i glina. Drugi interval (2365-2455 m) sadrži lapor i brečokonglomerat, a u njim su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, kalcit, muskovit i minerali glina. Treći interval (2455-2578 m) sadrži brečokonglomerat u kojem su pretpostavljeni minerali kalcit, kvarc i minerali glina. Četvrti interval (2578-2640 m) sadrži brečokonglomerat s laporom i pješčenjakom i u njemu su prisutni minerali kalcit, kvarc i minerali glina. Peti interval (2640-2717 m) sadrži siltit u kojem su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, kalcit, dolomit i minerali glina. Šesti interval (2717-2926 m) sadrži izmjenu brečokonglomerata, pješčenjak i lapor koji pretpostavljeno sadrže minerale kvarc, kalcit, dolomit i minerale glina. Sedmi interval (2926-3016 m) predstavlja brečokonglomerat u kojem su pretpostavljeni minerali kvarc, kalcit, dolomit i minerali glina. Osmi interval (3016-3425 m) sadrži škriljavac u kojem su prisutni minerali kvarc, muskovit i minerali glina (odstupanja krivulje kalipera od nominalnog promjera bušotine ukazuju na to da se radi o rastrošenoj stijeni). Prema geološkom izvješću stijene prvih sedam intervala pripadaju Vukovarskoj formaciji, a stijene osmog intervala pripadaju podlozi tercijara (Slika 3-2).

Korištene su krivulja neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže (Slika 5-8). U prva dva intervala nema nekih velikih povećanja promjera bušotine i on iznosi oko 11", a modelirane krivulje se dobro podudaraju s mjerenim krivuljama neutronske i zvučne karotaže, dok se s krivuljom karotaže gustoće ne podudaraju u potpunosti. Poroznost u prvom intervalu iznosi oko 6 %, a u drugom 5 %. U trećem i četvrtom intervalu kaliper pokazuje povećane vrijednosti, odnosno ukazuje na razrušavanje bušotine. U trećem intervalu modelirane krivulje se ne podudaraju dobro s krivuljama karotaže gustoće i zvučne karotaže i zbog toga je prikazana velika greška u stupcu „error“. Na tom dijelu poroznost iznosi oko 9 %. Na dubini 2455-2500 m modelirana krivulja se podudara sa zadanom krivuljom zvučne karotaže i na tom dijelu greška je manja te je i poroznost manja i iznosi oko 3 %. U četvrtom intervalu greška u stupcu „error“ je velika, jer se modelirane krivulje ne podudaraju sa zadanim

krivuljama karotaže gustoće i zvučne karotaže, a poroznost iznosi oko 9 %. U petom intervalu modelirana krivulja se ne podudara s mjerenom krivuljom karotaže gustoće, kaliper pokazuje nešto manje vrijednost oko 9″, a poroznost iznosi 1-3 %. U šestom intervalu modelirane krivulje ne podudaraju se u potpunosti s krivuljama karotaže gustoće i zvučne karotaže. Poroznost je niska, iznosi oko 2 %, osim na dubini oko 2770 m gdje iznosi oko 11 %, međutim ta vrijednost upitna je zbog povećanog promjera kanala bušotine. Isto tako u sedmom intervalu model nije potpuno u skladu s krivuljama karotaže gustoće i zvučne karotaže. Poroznost iznosi oko 1-2 %, a na mjestima povećanja promjera kanala bušotine iznosi oko 10 %, vjerojatno se radi o pukotinskoj poroznosti. U osmom intervalu model malo bolje prati krivulju karotaže gustoće u odnosu na prethodne intervale, ali s krivuljom zvučne karotaže i dalje se ne podudara, a kaliper pokazuje razmjerno stabilnu vrijednost promjera kanala bušotine od 6-8″. Poroznost iznosi 1-5 %, pikovi na krivulji zvučne karotaže ukazuju na to da se radi o pukotinskoj poroznosti.



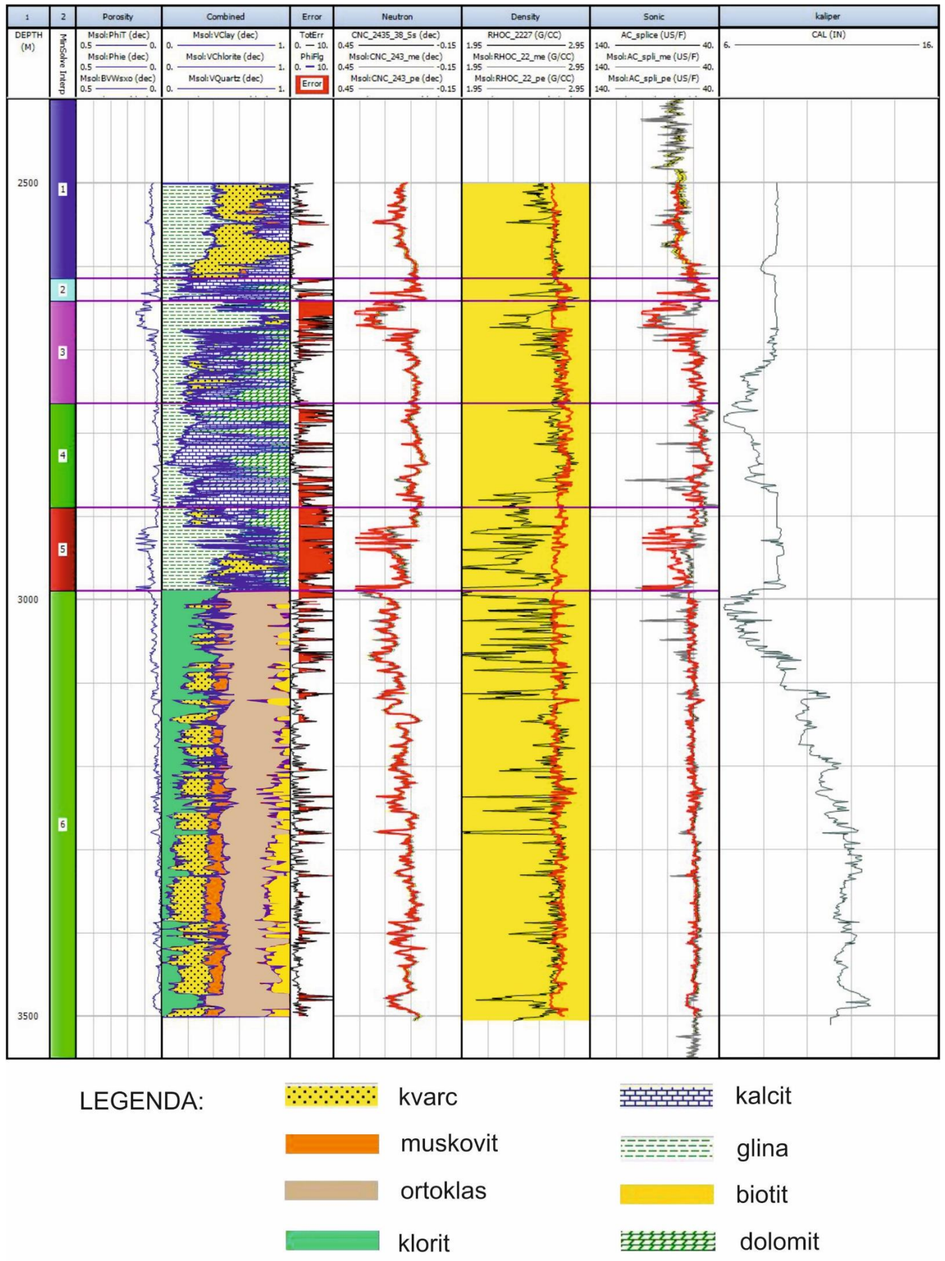
Slika 5-8. Procjena poroznosti za bušotinu 7. (1 – izmjena pješčenjaka i pjeskovitog lapora, 2 - izmjena lapora i brečkokonglomerata, 3 – brečokonglomerat, 4 – brečokonglomerat s laporom i pješčenjakom, 5 – siltit, 6 – izmjena brečokonglomerata, lapora i pješčenjaka, 7 – brečokonglomerat, 8 – škriljavac)

5.2.8. Analiza poroznosti u bušotini 8

U bušotini 8 izdvojeno je 6 intervala od interesa. Prema OGD-u pridodani su minerali svakom intervalu i uneseni u *Mineral Solver*. Prvi interval (1950-2615 m) predstavljen je izmjenom pješčenjaka i lapora te su unutar njega pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, muskovit, kalcit i minerali glina. Drugi interval (2615-2642 m) sadrži vapnenačko-dolomitnu breču u kojoj su prisutni minerali dolomit, kalcit i minerali glina. Treći interval (2642-2765 m) sadrži pjeskoviti dolomit u izmjeni s dolomitičnim vapnencom za koji su pretpostavljeni minerali dolomit, kalcit, kvarc i minerali glina. Četvrti interval (2765-2890 m) sadrži dolomitnu breču u kojoj su prisutni minerali dolomit i kalcit, ali su u analizi dodani i minerali glina, jer se na neutronskoj karotaži i karotaži gustoće uočavaju pikovi koji moguće ukazuju na postojanje pukotinske poroznosti, a model samo s dolomitom i kalcitom rezultirao je s vrijednosti poroznosti od 0 % duž cijelog analiziranog intervala. Peti interval (2890-2990 m) sadrži polimiktnu breču u kojoj su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, kalcit, dolomit i minerali glina. Šesti interval (2990-4150 m) sadrži škriljavac u kojem su prisutni minerali kvarc, tinjci i klorit, pretpostavljeno je da su od tinjaca prisutni muskovit i biotit te je još pretpostavljen ortoklas kao predstavnik feldspata. Prema geološkom izvješću prvi interval pripada Vinkovačkoj formaciji, do dubine 2598 m, a ostatak podlozi tercijara, vapnenačko dolomitna breča (drugi interval),pjeskoviti dolomit (treći interval), dolomitna breča (četvrti interval) i polimiktna breča (peti interval) pripadaju podlozi tercijara, a škriljavac (šesti interval) temeljnom gorju (Slika 3-2).

Za dobivanje krivulje poroznosti korištene su krivulje neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže (Slika 5-9). Karotaži gustoće pridodan je manji težinski faktor u svim intervalima zbog toga što je jako utjecana izraženim promjenama promjera kanala bušotine, što se vidi po izraženim pikovima prema manjoj gustoći stijene. Uočava se da krivulja kalipera pokazuje neobičan oblik i ne može se smatrati pouzdanim mjerenjem. Do 2500 m dubine prvog intervala mjerena je samo zvučna karotaža te zbog toga na tom dijelu nije bilo moguće izvršiti analizu u IP. Model nije u skladu s mjerenom krivuljom karotaže gustoće, a donekle se podudara s krivuljom zvučne karotaže. Poroznost iznosi oko 6 %, a na dubini od 2540 m je vjerojatno pukotinska poroznost koja iznosi 10 %. U drugom intervalu modelirana krivulja se ne podudara s krivuljom karotaže gustoće. Poroznost je oko 4 % i vidljiv je jedan pik pukotinske poroznosti koja iznosi oko 11 %. U trećem intervalu model nije u potpunosti u skladu s nijednom mjerenom karotažnom krivuljom do

dubine od 2670 m te na tom dijelu prikazuje povećane vrijednosti poroznosti, a stupac „error“ prikazuje grešku. Krivulja kalipera pokazuje odmak od nominalnog promjera bušotine koji iznosi 6,125". U četvrtom intervalu model se ne podudara dobro s krivuljama karotaže gustoće i zvučne karotaže. Poroznost se mijenja s dubinom i iznosi 1-6 %. U petom intervalu dublje od 2915 m model se ne podudara dobro s nijednom karotažnom krivuljom te prikazuje precijenjene poroznosti, a stupac „error“ prikazuje grešku. Iznad toga se dobro podudara s krivuljom neutronske karotaže i donekle s krivuljom karotaže gustoće te prikazuje poroznost od 4 %. U šestom intervalu analiza je izvršena do 3500 m dubine zbog toga što su do te dubine vršena mjerenja neutronske karotaže i karotaže gustoće. Model nije u skladu s mjerenom krivuljom karotaže gustoće, a s krivuljom zvučne karotaže podudara se djelomično. Krivulja kalipera prikazuje veliko povećanje promjera bušotine do 13", međutim već je spomenuto da se ne može smatrati pouzdanom. Na početku intervala poroznost iznosi oko 5-8 % te se zatim s dubinom smanjuje, a onda se u donjem dijelu pojavljuju mjestimične pukotine kao primjerice na dubini 3280 m iznosi oko 7 %.

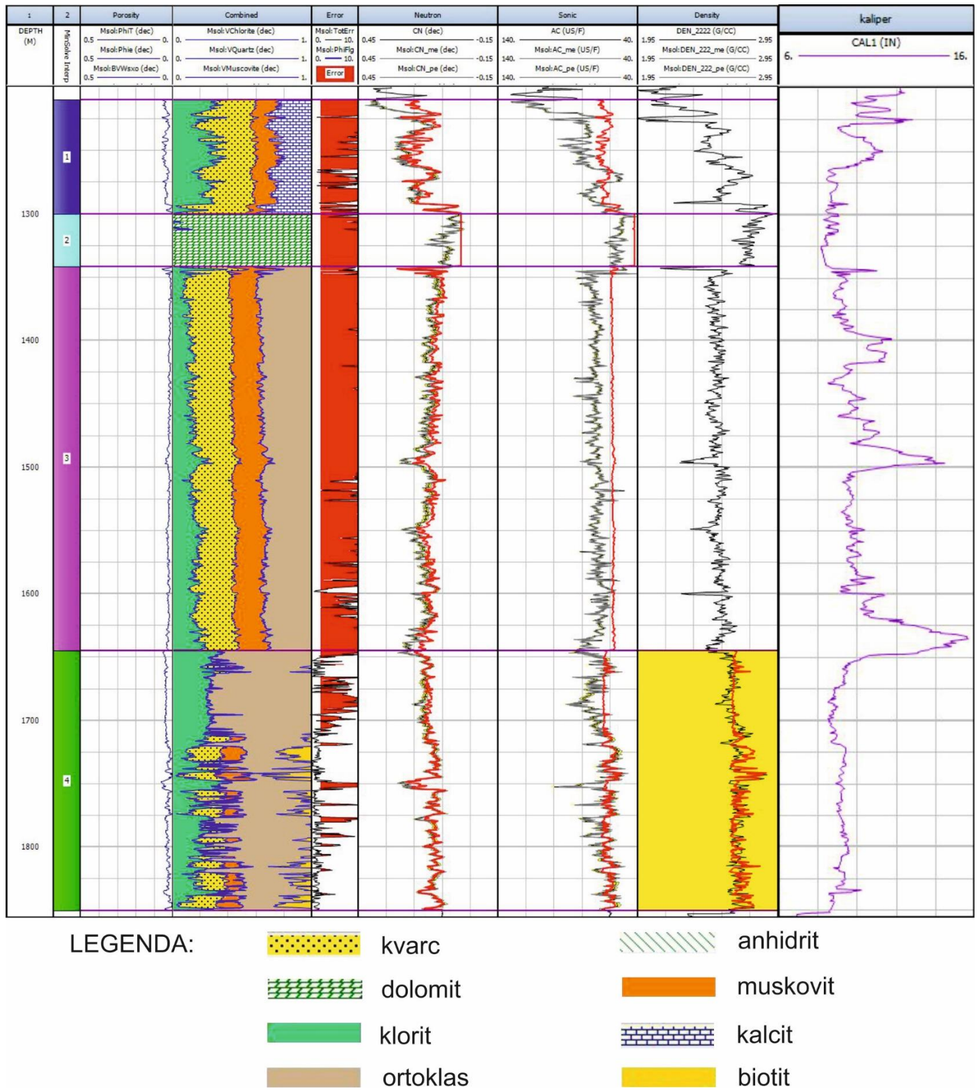


Slika 5-9. Procjena poroznosti za bušotinu 8. (1 – izmjena pješčenjaka i lapora, 2 – vapnenačko dolomitna breča, 3 – pjeskoviti dolomit u izmjeni s dolomitičnim vapnencom, 4 – dolomitna breča, 5 – polimiktna breča, 6 – škriljavac)

5.2.9. Analiza poroznosti u bušotini 9

U bušotini 9 izdvojena su tri intervala s obzirom na litološki sastav prema OGD-u te su svakom intervalu pridodani odgovarajući minerali i uneseni u *Mineral Solver*. Prvi interval (1215-1300 m) sadrži konglomeratični pješčenjak u kojem su prisutni minerali kvarc, muskovit, kalcit i klorit. Drugi interval (1300-1342 m) sadrži anhidrit s tragovima karbonata, vjerojatno dolomita i intervalu su pridodani anhidrit i dolomit. Treći interval (1342-1645) predstavljen je intruzivom u kojem su prisutni minerali kvarc, ortoklas, muskovit i klorit. Četvrti interval (1645-1850 m) sadrži škriljavac u kojem su prisutni minerali kvarc, ortoklas, muskovit, biotit i klorit. Prema geološkom izvješću konglomeratični pješčenjak pripada Vukovarskoj formaciji. Anhidrit i intruziv pripadaju podlozi tercijara, a škriljavac temeljnom gorju (Slika 3-2).

Za analizu su korištene krivulje neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže (Slika 5-10). Pri analizi za prvi, drugi i treći interval model nije uzimao u obzir krivulju karotaže gustoće, jer su povećanja promjera kanala bušotine vidljiva na krivulji kalipera tako izražena da se krivulja gustoće nije mogla korigirati kako bi se uklonio ili adekvatno smanjio utjecaj tih povećanja. U prvom intervalu model nije u potpunosti u skladu s nijednom karotažnom krivuljom. Poroznost iznosi 2-5 %, međutim treba napomenuti da je ovo utjecano povećanim promjerom bušotine do 12″ u odnosu na nominalni promjer koji iznosi 9,625". Na tom dijelu stupac „erorr“ prikazuje veliku grešku. U drugom intervalu model se ne podudara s nijednom krivuljom te se dobiveni rezultat ne može smatrati točnim. U trećem intervalu model se ne podudara ni s krivuljom zvučne karotaže te je zbog toga u stupcu „error“ prikazna velika greška, a krivulja poroznosti pokazuje poroznost od 1-3 %. U četvrtom intervalu model se djelomično podudara s mjerenim krivuljama karotaže gustoće i zvučne karotaže. Poroznost iznosi oko 3-4 %. Od 1660-1710 m dubine stupac „error“ prikazuje grešku jer se model uopće nije u skladu s mjerenom krivuljom zvučne karotaže na tom dijelu i povećana je vrijednost poroznosti na oko 5 %. Na dubini oko 1750 m pristuna je pukotinska poroznost od oko 6 %.



Slika 5-10. Procjena poroznosti za bušotinu 9. (1 – konglomeratični pješčenjak, 2 – anhidrit s tragovima karbonata, 3 – intruziv, 4 - škriljavac)

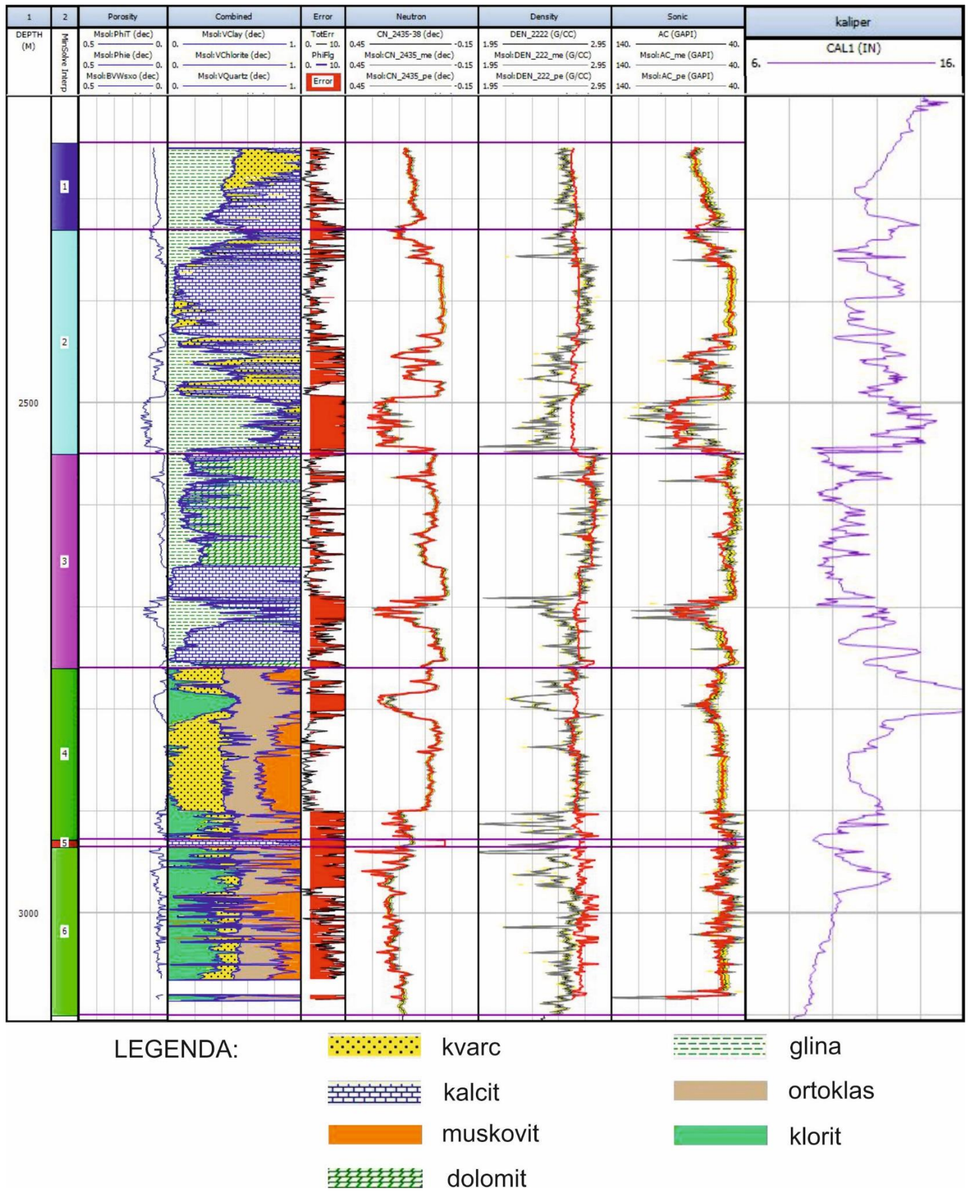
5.2.10. Analiza poroznosti u bušotini 10

U bušotini 10 izdvojeno je 6 intervala s obzirom na litološki sastav prema OGD-u. Svakom intervalu pridodani su pretpostavljeni minerali i uneseni u *Mineral Solver*. Prvi interval (2245-2330 m) sadrži lapor s rijetkim proslojcima brečokonglomeratičnog pješčenjaka u kojem su prisutni minerali kvarc, kalcit i minerali glina. Drugi interval (2330-2550 m) sadrži brečokonglomerat u kojem su prisutni minerali kvarc, kalcit i minerali glina. Treći interval (2550-2760 m) sadrži dolomit u kojem su prisutni minerali dolomit i kalcit, a pretpostavljeno je da sadrži i nešto minerala glina. Četvrti interval (2760-2928 m) sadrži škriljavac u kojem su prisutni minerali kvarc, ortoklas, muskovit i klorit. Peti interval (2928-2935 m) sadrži tektonsku karbonatnu breču u kojoj su prisutni minerali kalcit i pirit (prema determinaciji jezgre s dubine 2923-2925 m). Ovakva determinacija je vrlo upitna s obzirom na smještaj breče unutar metamorfnog kompleksa sastavljenog od škriljavca/gnajsa u njezinoj podini i škriljavca u njezinoj krovini. Također, prisustvo pirita unutar karbonatne breče ukazuje na to da se moguće radi o skarnu. Šesti interval (2935-3100 m) sadrži metamorfit (škriljavac/gnajs) u kojem su pretpostavljeno prisutni minerali kvarc, ortoklas, muskovit i klorit.

Litostratigrafski, lapor prvog intervala pripada Vinkovačkoj formaciji. Brečokonglomerat pripada Vukovarskoj formaciji i ulazi u podlogu tercijara. Dolomit, škriljavac i breča pripadaju podlozi tercijara, dok metamorfit (škriljavac/gnajs) šestog intervala pripada temeljnom gorju, no prema dubinama EK-markera u geološkom izvještaju, djelomično pripada podlozi tercijara, a djelomično temeljnom gorju (Slika 3-2).

U analizi su korištene krivulje neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže (Slika 5-11). U svim intervalima model nije u potpunosti u skladu s mjerenom krivuljom karotaže gustoće, a razlog treba tražiti u velikim odstupanjima promjera kanala bušotine od nominalnog promjera, što se uočava na krivulji kalipera. U prvom intervalu krivulja kalipera pokazuje povećani promjer bušotine, pa tako i krivulja poroznosti prikazuje precijenjene poroznosti od oko 5-9 %. U drugom intervalu na mjestu gdje stupac „erorr“ prikazuje najmanju grešku, krivulja poroznosti prikazuje da nema poroznosti od 2366 do 2440 m. U ostatku model se ne podudara dobro s

mjerenim karotažnim krivuljama i prikazuje precijenjenu poroznost do 15 %, a stupac „error“ prikazuje grešku. U trećem intervalu model nije u skladu s mjerenom krivuljom karotaže gustoće, a ni s krivuljom zvučne karotaže ne podudara se u potpunosti. Poroznost se pojavljuje samo na mjestima povećanja promjera bušotine. Na dijelu na kojem nema greške u stupcu „error“ nema ni poroznosti, približno od 2660 do 2680 m. U četvrtom intervalu modelirana krivulja se ne podudara s krivuljom karotaže gustoće. Poroznost je prisutna mjestimično, moguće da se radi o pukotinjskoj poroznosti i iznosi oko 8 %. Provedena analiza je posve nepouzdana za peti interval predstavljen vapnenačkim brečama nepoznatog podrijetla, što je dobrim dijelom posljedica manjkavosti podataka o njegovom mineralnom sastavu. Krivulja poroznosti pokazuje 0 % u ovom intervalu. U šestom intervalu prikazana je greška u stupcu „error“, jer modelirana krivulja karotaže gustoće nije u skladu s mjerenom krivuljom uslijed povećanog promjera bušotine, a poroznost iznosi oko 5-10 %, što je vjerojatno precijenjena vrijednost, iako se uočava da modelirana krivulja gustoće ne prati mjerenu krivulju karotaže gustoće, već je korigira, kao i u plićim intervalima.



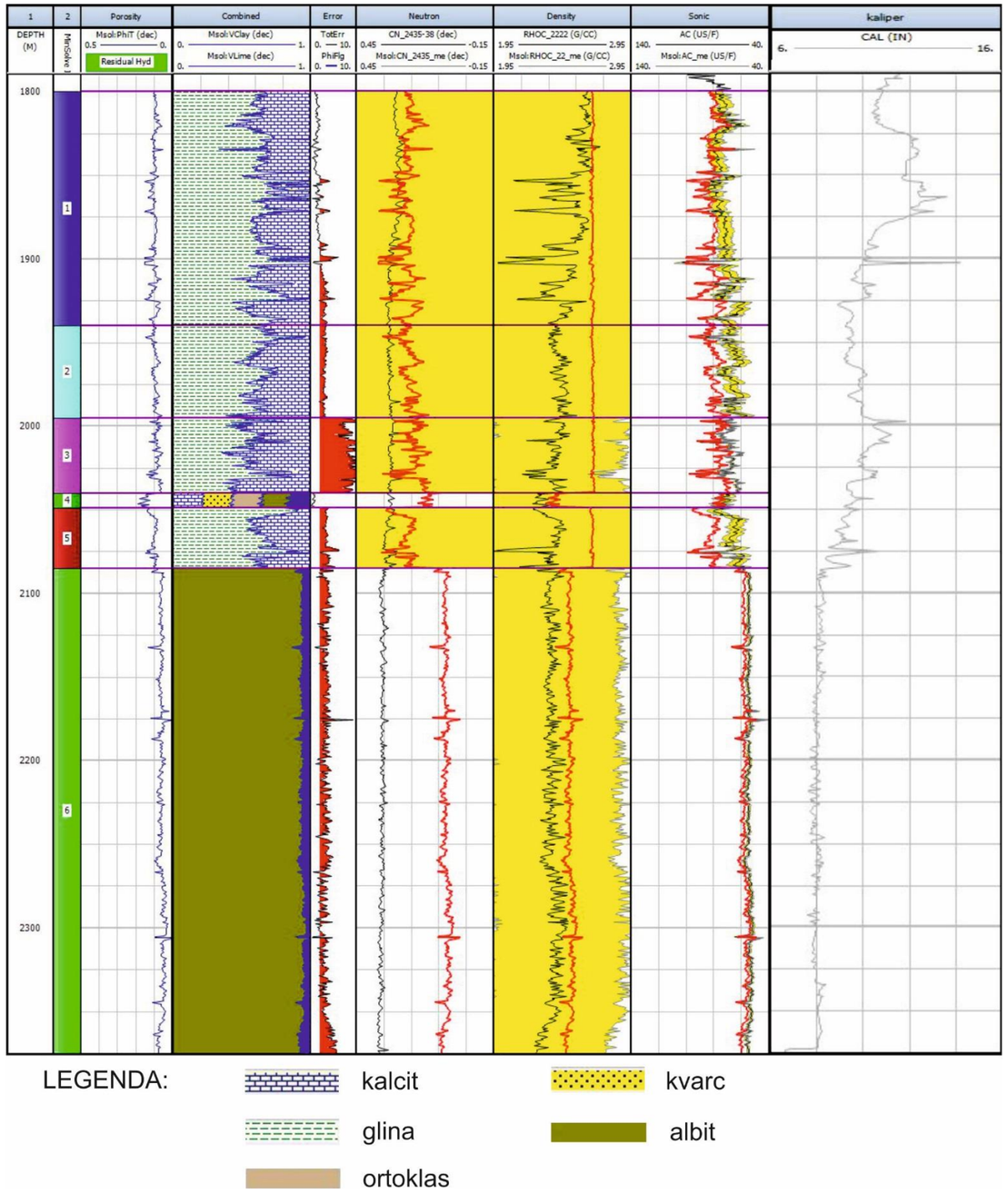
Slika 5-11. Procjena poroznosti za bušotinu 10. (1 – lapor s rijetkim proslojcima brečokonglomeratičnog pješčenjaka, 2 – brečokonglomerat, 3 – dolomit, 4 – škriljavac, 5 – karbonatna breča, 6 – metamorfit (škriljavac/gnajs)

5.2.11. Analiza poroznosti u bušotini 11

U bušotini 11 određeno je 6 intervala za koje su prema litološkom sastavu iz OGD-a pretpostavljeni minerali uneseni u *Mineral Solver*. Prvi interval (1800-1940 m) sadrži lapor s pojavom vapnenačke breče i proslojcima pješčenjaka i u njemu su prisutni minerali kalcit, kvarc i minerali glina. Drugi interval (1940-1995 m) sadrži izmjenu lapora s pješčenjakom i tufitima u kojima su prisutni minerali kalcit, kvarc, glina i ortoklas. Treći interval (1995-2040 m) sadrži izmjenu lapora i pješčenjaka u kojima su prisutni minerali klacit, kvarc i minerali glina. Četvrti interval (2040-2049 m) sadrži breču u kojoj su prisutni minerali kalcit, kvarc, ortoklas i albit. Peti interval (2049-2072 m) sadrži lapor u kojem su prisutni minerali kalcit, kvarc i minerali glina. Šesti interval (2072-2375 m) sadrži izmjenjeni kiseli efuziv za koji je pretpostavljeno da se radi o andezitu, sastavljenome od plagioklasa, piroksena i amfibola. U *Mineral Solveru* zadano mu je da sadrži samo albit i ortoklas, uz zasićenje vodom u ispranoj zoni, jer ostalih minerala nema u izborniku, zato što su analize unutar „Interactive Petrophysics-a“ razvijene za procjene petrofiziklanih analiza sedimentnih stijena. Zasićenje vodom dodano je zato što se temeljem rezultata DST-a radi o dobro propusnoj stijeni. Prema geološkom izvješću bušotine, stijene svih intervala pripadaju Vukovarskoj formaciji (Slika 3-2).

Korištene su krivulje neutronske karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže (Slika 5-12). U prva tri intervala modelirane krivulje se dobro ne podudaraju s krivuljama neutronske karotaže i karotaže gustoće te im je zato pridodan manji težinski faktor od automatski zadanoga. U sva tri intervala poroznost iznosi oko 10 %, a kaliper pokazuje vrijednosti promjera kanala bušotine preko 10″ u odnosu na nominalni promjer od 7,875″. U trećem intervalu u stupcu „error“ prikazana je dosta velika greška, jer modelirane krivulje nisu u skladu s mjerenim karotažnim krivuljama zbog povećanja promjera bušotine, a samim time i poroznosti su precijenjene. U četvrtom intervalu pridodan je manji težinski faktor krivulji karotaže gustoće. Model se dobro ne podudara ni s mjerenom krivuljom neutronske karotaže. Poroznost iznosi oko 20 %, a u stupcu „error“ prikazana je mala greška. U petom intervalu model se dobro ne podudara ni s jednom mjerenom karotažnom krivuljom, osobito je to izraženo za krivulju gustoće kojoj je, shodno tome pridodan manji težinski faktor, što je rezultiralo smanjenjem pogreške, a poroznost iznosi oko 10 %. U šestom intervalu dan je manji težinski faktor krivulji karotaže gustoće. Analiza za alterirani andezit pokazuje da je model pretpostavio monomineralni sastav,

dakle samo prisutnost albita, uz zasićenje vodom. Kao što je već spomenuto, mineralni sastav andezita slabo je definiran uslijed nedostatka programa. Poroznost iznosi oko 7 %, a krivulja kalipera je najkontinuiranija u tom intervalu i pokazuje da je promjer bušotine u cijelom intervalu blizu nominalnog promjera bušotine od 7,875″.



Slika 5- 12. Procjena poroznosti za bušotinu 11. (1 - lapor s pojavom vapnenačke breče i proslojcima pješčenjaka, 2 - lapor s pješčenjakom i tufitima, 3 - izmjena lapora i pješčenjaka, 4 – breča, 5 – lapor, 6 - izmjenjeni kiseli efuziv)

6. DISKUSIJA

Povišeni geotermalni gradijent na istraživanome području daje poticaj da se provedu detaljnija istraživanja radi utvrđivanja potencijala za iskorištavanje geotermalne energije. No, nijedna metoda nije posve pouzdana i potrebna su usklađivanja raznih metoda istraživanja i usporedbe da bi se ostvario što precizniji rezultat. Pa tako ni ovdje korištenu metodu DST-a ne smatraju svi pouzdanom, jer kao što je rečeno, rezultat temperaturnih mjerenja ovisi o količini iscrpljenih slojnih fluida. Rezultati karotažnih mjerenja uvelike ovise o promjeru kanala bušotine koji se tijekom mjerenja često mijenja i to otežava dobivanje stvarnih vrijednosti. Zbog svega toga podatci se korigiraju i geolozi osim podataka moraju upotrijebiti svoje iskustvo i znanje kako bi se pogreške analize svele na minimum.

Velika poroznost stijena je gotovo beznačajna za geotermalni potencijal ako nema propusnosti. Stoga, treba usporediti vrijednosti poroznosti iz analiza i propusnosti u analiziranim bušotinama te donijeti zaključke o potencijalno interesantnim intervalima za daljnja istraživanja. Analizirana polimiktna breča u bušotini 2 ima slabu propusnost i prema DST-u (Tablica 4-4.) i prema analizama na uzorcima jezgre (Tablica 4-5.), a poroznost joj prema analizi karotaže iznosi 1-14 % (Slika 5-3.). Ipak, analiza DST-a zahvatila je interval lapora koji naliježu na polimiktnu breču i samo gornji dio naslaga breče, dok interval naslaga za koji je provedena analiza karotaže nije zahvaćen DST-om, pa se ni procjena propusnosti iz DST-a zapravo ne može smatrati mjerodavnom. Petrofizikalna mjerenja na uzorcima jezgre ukazuju na vrlo slabu propusnost (Tablica 4-5.), no zahvatila su samo mali interval između 2600 i 2603 m te u tom smislu navedenu breču ne bi trebalo okarakterizirati kao stijenu nepovoljnih petrofizikalnih svojstava, osobito s obzirom na rezultate analize karotaže gdje pikovi na krivulji poroznosti vjerojatno ukazuju na postojanje otvorenih pukotina (Slika 5-3.) Brečokonglomerat bušotine 4 ima vrlo povoljnu horizontalnu i vertikalnu propusnost i prema procjeni iz DST-a (Tablica 4-4.) i prema analizama uzoraka jezgre (Tablica 4-5.), a poroznost se prema analizi kreće oko 12-20 %, što je u skladu s rezultatima mjerenja na jezgri koja se kreću između 15,2 i 22,1 %. Konglomeratični pješčenjak bušotine 9 ima povoljnu propusnost prema procjeni iz DST-a (Tablica 4-4.). Poroznost mu prema analizi iznosi oko

2-5 %, ali pod utjecajem promjera bušotine od 12" u odnosu na nominalni promjer bušotine od 9,625". U procjeni iz DST-a za bušotinu 10 zahvaćena su zadnja 2 metra brečokonglomerata i početak dolomita te daju osrednju propusnost (Tablica 4-4). Na tom dijelu prema analizi brečokonglomerat ima poroznost od oko 15 %, ali na tom dijelu model ne prati dobro karotažne krivulje zbog povećanog promjera kanala bušotine. Za breču bušotine 11 temeljem procjene iz DST-a utvrđena je povoljna propusnost (Tablica 4-4), a prema analizi breča ima poroznost od oko 20 % i nije prikazana nikakva greška u stupcu „error“. Također, vršni dio izmijenjenog efuziva (interval 6) ima dobru propusnost prema procjeni iz DST-a (145,9 mD).

Problem pri analizi poroznosti pomoću IP softvera je u tome što je on ograničen brojem i vrstom minerala koji se mogu unijeti. Čini se da je prilagođen analizi sedimentnih stijena zato što većinu minerala koji se nalaze u metamorfitima i vulkanoklastičnim stijenama program ne nudi. Primjerice već je spomenut slučaj s amfibolima, ne postoji mineral kao što je horblenda i slično. Isto tako, nije moguće je provesti analizu poroznosti u *Mineral Solveru* s jednom karotažnom krivuljom. Analize su izuzetno osjetljive u smislu da dodavanje jednog minerala značajno promijeni rezultat. Zbog toga bi za pouzdane analize trebalo raspolagati s detaljnim mineralnim analizama svake litološke jedinice, no i tada bi eventualna varijabilnost sastava rezultirala nepouzdanim procjenama unutar dijelova jedne litološke jedinice.

7. ZAKLJUČAK

Veliki dio područja istočnog dijela Dravske depresije ima prosječni geotermalni gradijent koji prelazi 5 °C/100 m. Sama ta činjenica daje poticaj za detaljnije istraživanje geotermalnog potencijala ovog područja. Iz analiza 11 bušotina vidljivo je da nijedan interval nema izrazito veliku poroznost, većinom se radi o maloj poroznosti. Najveći potencijal imaju breče, zato što imaju povoljne do dobre propusnosti i u nekim slučajevima dosta dobre poroznosti. Mana ovih breča je njihova debljina, većinom su tanke, ali to ne znači da im je debljina kontinuirana u cijelom području jer ima i područja s većim debljinama. Također, daljnja istraživanja bi trebalo usmjeriti i prema metamorfitima i rastrošenim magmatitima ispod diskordancije Tg, kao i prema mlađim rastrošenim efuzivima jer u bušotini 11 kiseli efuziv pokazuje jako povoljnu propusnost.

Ovaj rad predstavlja uvod u istraživanje geotermalnog potencijala istočnog dijela Dravske depresije i osnovu za daljnja istraživanja. U bušotinama gdje je pomoću ovih analiza određen mogući geotermalni potencijal s dobrim poroznostima i propusnostima trebale bi se izvršiti detaljnije provjere drugim vrstama mjerenja. Analizom seizmičkih profila može se iskartirati podzemlje i na temelju toga izraditi modeli geološke građe podzemlja, a time i prostorno definirati geometrija potencijalnih geotermalnih ležišta, njihovi volumeni, a moguće i raspodjela petrofizikalnih svojstava u prostoru.

8. POPIS LITERATURE

8.1. Objavljeni radovi

Horner, D.R. (1951): Pressure Build-up in Wells. Third World Petroleum Congress, 28 May-6 June, The Hague, the Netherlands, 503-521str.

Hernitz, Z. (1983): Dubinski strukturno – tektonski odnosi u području istočne Slavonije. Disertacija, Nafta, Zagreb, 219 str.

Hernitz, Z., Velić, J., Barić, G. (1995): Origins of Hydrocarbons in the Eastern Part of the Drava Depression (Eastern Croatia). Geol.Croat., 48/1, 87-95str.

Jelić, K., Kevrić, I., Krasić, O. (1995): Temperatura i toplinski tok u tlu Hrvatske. Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa, Opatija, 18.-21.10.1995., 245-249 str.

Kutasov, I.M. (1999): Applied geothermics for petroleum energineers. Elsevier scicence, 347 str.

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, 18/1, 133-147 str.

Malvić, T. (2003): Naftnogeološki odnosi i vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u bjelovarskoj uleknini. Disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 123 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.

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.

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, 5-15 str.

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

Rögl, F., Steininger, F.F. (1984): Neogene Paratethys, Mediterranean and Indo−Pacific seaways. Implications for the paleobiogeography of marine and terrestrial biotas. P. Brenchley (ed.), Fossils and Climate, John Wiley & Sons, Chichester Ltd., 171-200 str.

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

Šumanovac, F. (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu, 356 str.

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

Velić, J., Malvić, T., Cvetković, M. (2015): Geologija i istraživanje ležišta ugljikovodika. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 144 str.

8.2. Web izvori

Državni hidrometeorološki zavod, 2019. URL: http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=srednjak&Grad=osijek (06.05.2019.)

Google maps, 2019. URL: https://www.google.com/maps (07.10.2019.)

Kansas Geological Survey, 2019. URL: http://www.kgs.ku.edu/software/DST/HELP/horner/qa_fluid.html (27.09.2019.)

Rigzone, 2019. URL: https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&c_id= (15.08.2019.)