

Procjena poroznosti pješčenjaka Okoli u zapadnome dijelu Savske depresije temeljem analiza geofizičkih mjerenja u bušotinama

Šolić, Šime

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:169:403422>

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

**PROCJENA POROZNOSTI PJEŠČENJAKA OKOLI U ZAPADNOME DIJELU
SAVSKE DEPRESIJE TEMELJEM ANALIZA GEOFIZIČKIH MJERENJA U
BUŠOTINAMA**

Diplomski rad

Šime Šolić

G401

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
HR-10002 Zagreb, Parosijeva 6, p.p. 390

OBRAZAC SUSTAVA UPRAVLJANJA KVALITETOM

KLASA: 602-01/22-01/105
URBROJ: 251-70-15-22-2
U Zagrebu, 9.9.2022.

Šime Šolić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/105, URBROJ: 251-70-15-22-1 od 01.05.2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

PROCJENA POROZNOSTI PJEŠČENJAKA OKOLI U ZAPADNOME DIJELU SAVSKE DEPRESIJE TEMELJEM ANALIZA GEOFIZIČKIH MJERENJA U BUŠOTINAMA

Za mentoricu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Doc.dr.sc. Iva Kolenković Močilac nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

Doc.dr.sc. Iva Kolenković
Močilac

(titula, ime i prezime)

O:



Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

Oznaka: OB 8.5.-1 SRF-1-13/0

Stranica: 1/1

Čuvanje (godina)

Trajno

PROCJENA POROZNOSTI PJEŠČENJAKA OKOLI U ZAPADNOME DIJELU SAVSKE DEPRESIJE
TEMELJEM ANALIZA GEOFIZIČKIH MJERENJA U BUŠOTINAMA

ŠIME ŠOLIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Istraživanje provedeno u ovom radu predstavlja početak istraživanja pješčenjaka Okoli za korištenje u geoenergetske svrhe. U okviru ovog diplomskog rada obrađeni su i interpretirani podatci geofizičkih mjerenja u bušotinama na području zapadnog dijela Savske depresije koja pripada jugozapadnom dijelu Hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava. Analizirani su podatci litostratigrafske jedinice pješčenjaka Okoli, člana u kojem su slojevi pješčenjaka proslojeni laporima. Pješčenjaci su predstavljani kalkarenitnim subgrauvakama te im je temeljem interpretacije geofizičkih mjerenja u bušotinama procijenjena debljina te ukupna i efektivna poroznost. Glavne analize su izvršene u softveru „*Interactive petrophysics*“, dok su proračunski podatci obrađeni u računalnom programu „*Microsoft Excel*“. Temeljem rezultata izdvojeno je šest bušotina u kojima pješčenjaci imaju povišenu poroznost i gdje bi trebalo nastaviti istraživanja u smjeru razvoja modela propusnosti.

Ključne riječi: poroznost pješčenjaka, interpretacija karotaže, Savska depresija, geoenergetski potencijal

Diplomski rad sadrži: 66 stranica, 7 tablica, 28 slika, i 19 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNF
Dr. sc. Bruno Saftić, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 16. rujan 2022, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

ASSESSMENT OF POROSITY OF OKOLI SANDSTONES IN THE WESTERN PART OF SAVA
DEPRESSION BASED ON WELL-LOG ANALYSIS

ŠIME ŠOLIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

The research conducted in this thesis represents the beginning of exploration of the Okoli sandstones for geoenergy purposes. This thesis framework defines, processes and interprets data from well logs located in the western part of the Sava Depression area, situated in the southwestern Croatian part of the Pannonian basin system. Lithostratigraphic unit Okoli sandstones, is a member characterized by sandstone layers interlayered with marls. Sandstones, represented by calcarenite subgreywacke, were analyzed for their thickness, total porosity and effective porosity estimation based on the well log interpretation. The main analyzes in this research were performed in the "*Interactive petrophysics*" software, while the calculation of the data were processed in the "Microsoft Excel" software program. Six wells were identified where sandstones show increased porosity and where research should be continued to enable the permeability model development.

Keywords: sandstone porosity, well-log interpretation, Sava depression, geoenergy potential

Thesis contains: 66 pages, 7 tables, 28 figures, and 19 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD. Iva Kolenković Močilac, Assistant Professor

Reviewers: PhD Iva Kolenković Močilac, Assistant Professor
PhD Bruno Saftić, Associate Professor
PhD Marko Cvetković, Associate Professor

Date of defense: September 16, 2022, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici, doc. dr. sc. Ivi Kolenković Močilac na predloženoj temi, znanstvenom i stručnom vodstvu te podršci pri izradi ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem obitelji, prijateljima i djevojci na podršci i zabavnim trenucima tijekom studiranja.

I would like to thank Lloyd's Register organisation for providing academic licences for Interactive Petrophysic software package.

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

Za kraj, posebna zahvala mojoj majci Kati bez koje ovo ne bi bilo moguće.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. GEOGRAFSKI POLOŽAJ ISTRAŽIVANOG PODRUČJA	2
3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA	3
3.1. Stratigrafski odnosi istraživanog područja	4
3.2. Strukturne značajke istraživanog područja	7
4. METODOLOGIJA	9
4.1. Neutronska karotaža	9
4.2. Karotaža gustoće	11
4.3. Zvučna karotaža	13
4.4. Softver <i>Interactive petrophysics</i>	15
4.4.1. Procjena sadržaja (volumena) gline	18
4.4.2. Procjena poroznosti	21
4.5. Poroznosti i propusnosti iz laboratorijskih mjerenja na jezgrama	28
5. REZULTATI POROZNOSTI IZ ANALIZA KAROTAŽNIH MJERENJA	30
5.1. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-2	30
5.2. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-4	32
5.3. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-5	34
5.4. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-7	36
5.5. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-9	38
5.6. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-11	42
5.7. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-12	44
5.8. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-13	46
5.9. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-15	48
5.10. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-16	51
5.11. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-17	53
5.12. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-19	55
5.13. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-20	57
5.14. Sažetak rezultata	60
6. DISKUSIJA	61
7. ZAKLJUČAK	64
8. LITERATURA	65

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Približne granice istraživanog područja i bušotine čiji su podaci korišteni u ovom radu (podloga preuzeta s https://www.google.hr/intl/hr/earth/)	2
Slika 3-1. Depresije smještene unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (Velić, 2007).....	3
Slika 3-2. Shematski prikaz litostratigrafskih jedinica u Savskoj depresiji (iz Kolenković (2012), prema Šimon (1973))	6
Slika 3-3. Tektonski razvoj hrvatskog dijela PBS-a (preuzeto iz Velić (2007), prema Prelogović et al. (1995); Lučić et al., (2001)).	8
Slika 4-1. Dijagram za korekciju poroznosti s obzirom na litološki sastav (apscisa–prividna poroznost vapnenca, ordinata–stvarna poroznost) (Schlumberger, Log Interpretation Charts – Por-7, 2009).....	10
Slika 4-2. Prosječne brzine rasprostiranja valova u stijenama u $\mu\text{s}/\text{ft}$ (Δt) (Rider, 1996)...	15
Slika 4-3. Primjer ulaznih bušotinskih podataka.....	16
Slika 4-4. Alat za izračun geotermalnog gradijenta u softveru <i>Interactive petrophysics</i> ...	18
Slika 4-5. Alat iz softvera <i>Interactive petrophysics</i> za procjenu volumena gline.....	20
Slika 4-6. Alat iz softvera <i>Interactive petrophysics</i> za korekciju krivulja.....	22
Slika 4-7. Primjer modela mineralnog sastava i procijenjene poroznosti korištenjem alata <i>Mineral Solver</i>	24
Slika 4-8. Primjer modela poroznosti za krivulju zvučne karotaže korištenjem alata <i>Porosity and water saturation</i>	26
Slika 5-1. Procjena poroznosti za bušotinu B-2	31
Slika 5-2. Procjena poroznosti za bušotinu B-4.....	33
Slika 5-3. Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-5.....	35
Slika 5-4. Procjena poroznosti za bušotinu B-7	37
Slika 5-5. Procjena poroznosti za bušotinu B-9 korištenjem alata <i>Porosity and water saturation</i>	39
Slika 5-6. . Procjena poroznosti intervala 2195 – 2318 m za bušotinu B-9 korištenjem alata <i>Mineral Solver</i>	41
Slika 5-7. Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-11	43
Slika 5-8 Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-12	45
Slika 5-9. Procjena poroznosti za bušotinu B-13	47

Slika 5-10. Procjena poroznosti intervala 2816 – 2850 m za bušotinu B-15 korištenjem alata <i>Mineral Solver</i>	49
Slika 5-11. Procjena poroznosti intervala 2850 – 2906 m za bušotinu B-15 korištenjem alata <i>Porosity and water saturation</i>	50
Slika 5-12. Procjena poroznosti za bušotinu B-16	52
Slika 5-13. Procjena poroznosti za bušotinu B-17	54
Slika 5-14. Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-19	56
Slika 5-15. Procjena poroznosti intervala 2870 – 3090 m za bušotinu B-20	58
Slika 5-16. Procjena poroznosti intervala 3090 – 3275 m za bušotinu B-20	59

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Tablica za srednje vrijednosti gustoće (ρ) i elektronske gustoće ($\rho_{GG} = \rho_e$) u 10^3 kg m^{-3} , efektivni omjer Z/A i efektivni fotoelektrični indeks (PE) u barn/elektron (Schlumberger, 1989; prema Hearst i Nelson, 1985)	13
Tablica 4.2. Bušotine i procijenjeni volumen gline intervala pješčenjaka Okoli	21
Tablica 4.3. Popis bušotina i krivulja karotažnih mjerenja koje su analizirane u svrhu određivanja poroznosti	27
Tablica 4.4. Poroznosti i propusnosti iz laboratorijskih mjerenja na mehaničkim jezgrama za 20 istraživanih bušotina	29
Tablica 5.1. Podatci poroznosti mehaničkih jezgri i procijenjene ukupne i efektivne poroznosti iz analize modela poroznosti	53
Tablica 5.2. Podatci poroznosti mehaničkih jezgri i procijenjene ukupne i efektivne poroznosti iz analize modela poroznosti	55
Tablica 5.3. Efektivna debljina pješčenjaka, prosječna efektivna poroznost i prosječna ukupna poroznost pješčenjaka procijenjenih interpretacijom karotažnih mjerenja za 20 istraživanih bušotina	60

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

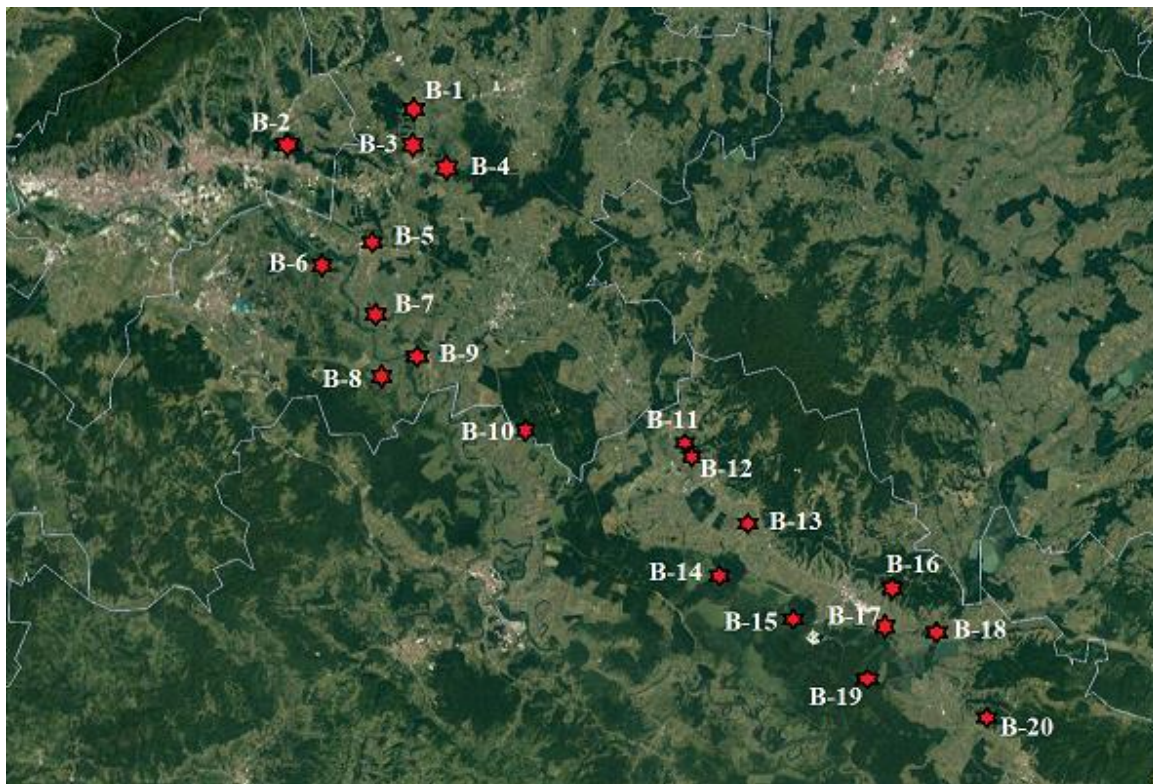
Oznaka	Jedinica	Opis
Z	-	atomska broj
A	-	maseni broj
PE	-	efektivni fotoelektrični indeks
ρ_b	kg/m^3	volumna gustoća stijene
ρ_e	kg/m^3	elektronska gustoća stijene
ρ_f	kg/m^3	gustoća tekućine
ρ_m	kg/m^3	gustoća mineralnih zrna
V_p	m^3	volumen pora u stijeni
V_b	m^3	ukupni volumen stijene
V_{ma}	m^3	volumen zrna, čvrsti dio stijene
$\emptyset$	%	poroznost
q	$\text{m}^3/\text{s (D)}$	propusnost
μ	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	viskoznost
A	m^2	površina presjeka
L	m	duljina protoka
Δp	Pa	razlika tlaka
V_f	m/s	brzina prostiranja valova u sredini
V_t	m/s	brzina prostiranja u tekućini koja zasićuje stijenu
V_m	m/s	brzina prostiranja kroz mineralna zrna (i/ili bioklaste) stijene
Δt	s/m	intervalno vrijeme prolaska kroz sredinu (sporost)
Δt_f	s/m	intervalno vrijeme prolaska kroz tekućinu koja zasićuje stijenu
Δt_m	s/m	intervalno vrijeme prolaska kroz mineralna zrna (i/ili bioklaste) stijene

1. UVOD

U ovom diplomskom radu cilj je procijeniti poroznosti pješčenjaka Okoli u zapadnome dijelu Savske depresije temeljem analiza geofizičkih mjerenja u bušotinama. Ulazni podatci karotažnih mjerenja iz 20 bušotina su obrađeni i interpretirani u računalnom programu *Interactive petrophysics*. Kao prvi korak, geotermalni gradijent je izračunat iz podataka DST-a ili iz podataka zapisnika o radu. Nadalje, procijenjen je sadržaj gline na temelju karotažnog mjerenja spontanog potencijala, čiju je krivulju prvo potrebno normalizirati. Zatim su se korigirale krivulje neutronske karotaže i karotaže gustoće, kako bi se zajedno s krivuljom zvučne karotaže koristile u procjenjivanju poroznosti. Za izračun poroznosti, korištena su dva alata - *Mineral solver* ili *Porosity and water saturation*. Rezultati sadržaja gline te ukupne i efektivne poroznosti za 20 istraživanih bušotina su obrađeni i analizirani u računalnom programu *Microsoft Excel*. Na taj je način dobivena efektivna debljina pješčenjaka, prosječna efektivna poroznost i prosječna ukupna poroznost pješčenjaka, koji su uspoređeni s poroznostima i propusnostima iz laboratorijskih mjerenja na jezgrama. Na temelju analize rezultata, izdvojene su bušotine B-5, B-7, B-9, B-11 i B-12 s višim vrijednostima ukupne i efektivne poroznosti.

2. GEOGRAFSKI POLOŽAJ ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Istraživano područje nalazi se u središnjem dijelu Republike Hrvatske. Najvećim dijelom obuhvaća središnji dio Zagrebačke županije te sjeveroistočni dio Sisačko-moslavačke županije. Granice istraživanog područja i lokacije bušotina prikazane su na slici 2-1.



Slika 2-1. Približne granice istraživanog područja i bušotine čiji su podatci korišteni u ovom radu (podloga preuzeta s <https://www.google.hr/intl/hr/earth/>)

Zapadni dio Savske depresije, u kojoj se nalazi područje istraživanja, pruža se pravcem sjeverozapad-jugoistok, a omeđen je planinom Medvednicom na sjeverozapadu, Turopoljskim lugom i Lonjskim poljem na jugozapadu, planinom Psunj na istoku i Moslavačkom gorom na sjeveroistoku. Cjelokupan prostor ima znatne denivelacije terena gdje prevladavaju poplavne nizine rijeke Save u Zagrebačkoj županiji, koje u Sisačko-moslavačkoj županiji prelaze u brežuljkast kraj Moslavine. Prema Köppenovoj klasifikaciji to je područje koje se označava klimatskom formulom Cfb, što je oznaka za umjereno toplu vlažnu klimu s toplim ljetom. Najviše padalina ima u toplom dijelu godine te nema izrazito sušnih niti vlažnih razdoblja. Prema Bognarovoj geomorfološkoj regionalizaciji Republike Hrvatske, istraživano područje pripada megamakrogeomorfološkoj regiji Panonski bazen, tj. mezogeomorfološkoj regiji Nizina Save (Bognar, 1999).

3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Savska depresija pripada jugozapadnom dijelu Hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava. Omeđena je Medvednicom i Žumberačkom gorom na sjeverozapadu, Moslavačkom gorom na sjeveru, Papukom i Krndijom na sjeveroistoku te Petrovom gorom na jugozapadu. Na sjeveru graniči s Dravskom depresijom, a na istoku je omeđena s Dilj gorom i Slavonsko-srijemskom depresijom. Hrvatski dio Panonskog bazena obuhvaća četiri depresije, od sjeverozapada prema jugoistoku Mursku, Dravsku, Savsku te Slavonsko-srijemsku (Slika 3-1). Panonski bazen zalučni je bazen smješten između stare Europske ploče na sjeveru, Alpa na zapadu, Jadranske ploče na jugu te Mezijske ploče na istoku. Formiranje ovog složenog bazenskog sustava započinje u otnangu subdukcijom i konvergencijom Apulijske ploče pod Dinaride. Tada započinje i formiranje njegove južne granice (perijadransko-vargarskog lineamenta) i sjeverne granice (Vanjski Karpati). U prostoru između njih otvorene su brojne ekstenzijske strukturne depresije uz desne i lijeve transkurentne rasjedne sustave, a posljedica je nastanak bazena, potonina i uleknina. Prostor Panonskog bazenskog sustava danas najvećim dijelom zahvaća južni rub Europske ploče, a manjim dijelom dio Unutrašnjih Dinarida (Malvić i Saftić, 2008).



Slika 3-1. Depresije smještene unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (Velić, 2007)

3.1. Stratigrafski odnosi istraživanog područja

Prema tektonsko-sedimentacijskom razvoju, Savska depresija se može podijeliti u dva različita stijenska kompleksa. Prvi kompleks stijena čini magmatsko-metamorfni kompleks, unutar kojeg se pojavljuje i nešto sedimenata, mezozojske i paleozojske starosti. Drugi kompleks čine sedimentni pokrov (bazenska ispuna) koji se sastoji od stijena neogena i kvartara. Predneogensku podlogu, izgrađenu od stijena različitog litološkog sastava, karakterizira velika strukturno-tektonska kompleksnost, izlomljenost i metamorfizam (Velić, 2007). Stratigrafski odnosi hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava definirani su prvenstveno litostratigrafskom podjelom (Šimon, 1973). Istraživano područje sadrži stijene od paleozoika do kvartara, a odijeljene su sa šest EK-markera i repera u litostratigrafske jedinice – formacije (Slika 3-2). Upravo se najveće debljine neogensko-kvartarnih sedimenata Savske depresije nalaze u istraživanom području, južno od Moslavačke gore, a procijenjene su na više od 5000 m (Velić, 2007).

Podlogu neogensko-kvartarnih naslaga na području istraživanja predstavljaju stijene paleozojske i mezozojske starosti. Mramorizirani vapnenci, glineni škriljavci, zeleni škriljavci, amfibolitni škriljavci te gnjasevi paleozojske starosti, nalaze se ispod EK-repera „Tg“ i čine temeljno gore. Formacije mezozojskih sedimenata se nalaze na manjem dijelu istraživanog područja, a označavaju se kao “podloga tercijara”, ispod EK-repera „PTc“ (Saftić i Malvić, 2008).

Sedimentacija hrvatskog dijela PBS-a karakterizirana je cikličnošću, gdje se mogu izdvojiti tri taložna megaciklusa. Radi se o tri različite litološko-genetske asocijacije koje su rezultat tektonskih okvira taloženja, ekstenzije i zatim kompresije, ali i drugih lokalnih okolnosti, kao što su donos materijala, spuštanja dna bazena, eustatičkih promjena i klimatskih uvjeta (Velić, 2007).

Prvi i najstariji megaciklus, poznat i kao prva transtenzijska faza je starijemiocenske i srednjomiocenske starosti (18,3-11,5 M.a.). U Savskoj depresiji uključuje formaciju Prečec, koju karakterizira heterogena litološka građa (Saftić i Malvić, 2008), a od formacije Prkos ju odjeljuje Ek-marker „Rs7“. Uobičajeno se početak ekstenzije PBS-a smješta u otnang jer su tada stvoreni uvjeti koji su rezultirali sedimentima široko rasprostranjenim na gotovo cijelom području PBS-a. Litološki sastav je heterogen, obuhvaća krupne klastite, sitne klastite i karbonate, uz mjestimične pojave ugljena (Velić, 2007). Ekstenzija se intenzivirala u karpatu, kao i marinska transgresija, što je rezultiralo prijelazom iz lakustrinske u marinsku

sedimentaciju, gdje je dominantno taloženje lapora i silita, te lokalno krupnozrnatih klastita (Pavelić, 2001). Do sredine badena transgresija je uzrokovala spajanje Mediterana, Središnjeg Paratetisa i Indopacifika. Završetak glavne ekstenzijske faze završava zaključno sa sarmatom te označava kraj prvog taložnog megaciklusa koji litostratigrafski obuhvaća formaciju Prečec.

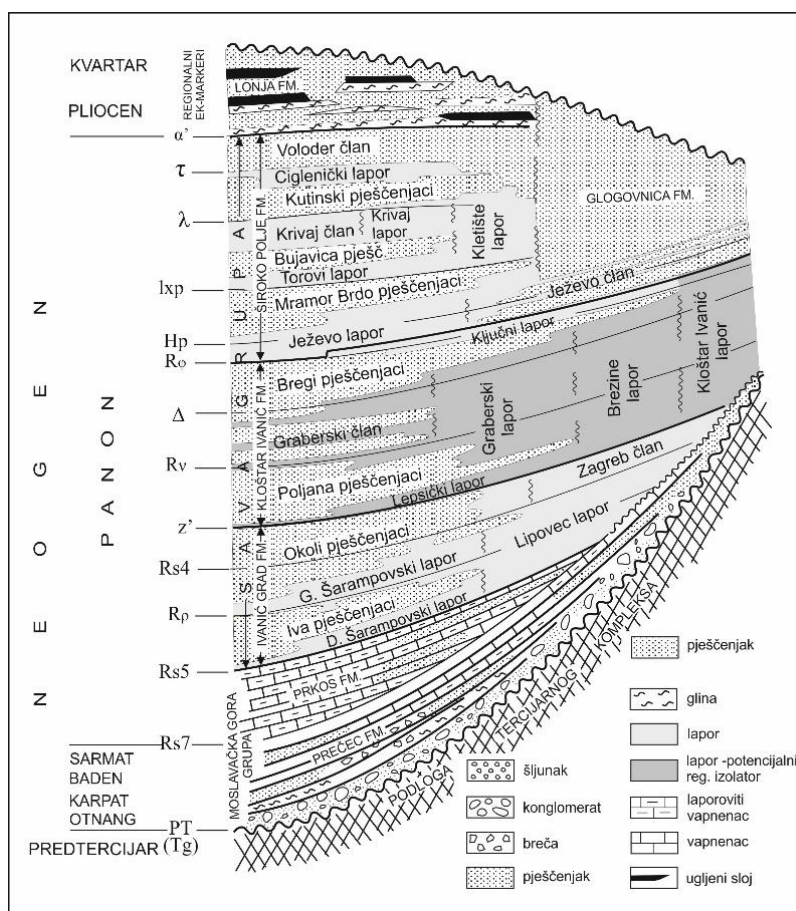
Iznad EK-markera „Rs7“ nalazi se formacija Prkos koja završava s EK-markerom „Rs5“. Približno odgovara naslagama donjopanonske starosti – Croatica, biostratigrafskoj jedinici koja je karakteristična po fosilu *Radix Croatica*. Litološki sastav formacije Prkos s ruba depresije je izgrađen od lapora i vapnenaca koji postupno, idući u dubinu, prelazi u pješčenjake (Saftić i Malvić, 2008).

Formacija Ivanić-Grad je najstarija u grupi Sava, obuhvaća interval između EK-markera „Rs5“ i „Z“. Po litološkom sastavu sastoji se od pješčenjaka (subgrauvake i kalkarenitske subgrauvake), silita, žućkastih lapora i svih prijelaznih tipova u međusobnoj izmjeni (Saftić i Malvić, 2008). Najveći broj pješčenjaka se pojavljuje u dva člana, pješčenjacima Okoli i Iva. Litostratigrafska jedinica istraživanja ovog rada su pješčenjaci Okoli koji predstavljaju kalkarenitne subgrauvake. Karakterističan fosil za formaciju Ivanić-Grad je *Congerina Banatica*. Grupu Sava još čini formacija Kloštar-Ivanić koja se nalazi između EK-markera „Z“ i „R_φ“. Obuhvaća biostratigrafsku jedinicu Abichi, naslage mlađe panonske starosti, a karakterističan fosil je školjkaš *Paradacna Abichi*. Litološki sastav je sličan formaciji Ivanić-Grad, a karakterizira ga izmjena pješčenjaka/pijesaka i lapora. Zadnja formacija grupe Sava je Široko Polje, definirana EK-markerima „R_φ“ u podini i „α“ u krovini. Litološki sastav se podudara s formacijama Ivanić-Grad i Kloštar-Ivanić. Obuhvaća biostratigrafsku jedinicu Rhomboidea naslage gornjopontske starosti koja se odlikuje pijescima, laporovitim pijescima, pjeskovitim laporima te glinovitim laporima (Saftić i Malvić, 2008). Provodni fosil je školjka *Congerina Rhomboidea*.

Zajedno, formacija Prkos i naslage grupe Sava čine drugi megaciklus, tj. drugu transtenzijsku fazu gornjomiocenske starosti (11,5–5,6 M.a.). Tijekom ovog ciklusa, naslage su taložene u brakičnom okolišu za vrijeme starijeg panona, a u mlađem panonu u jezerskim okolišima (Pavelić 2001; Saftić et al., 2003; Pavelić & Kovačić, 2018). Taložni model upućuje da se radilo o dubljoj niskoenergetskoj sredini, gdje je glavni izvor materijala bio iz Istočnih Alpa. Taložni prostor se pomiče na rubove bazenskog sustava, a debljina krupnozrnatih klastita je mnogo veća nego u prvom megaciklusu (Velić, 2007). Mehanizam

prijenosa je deltni ili turbiditni u smjeru sjeverozapad-jugoistok na udaljenosti od nekoliko stotina kilometara (Saftić i Malvić, 2008). U dubljim dijelovima depresije taloženi su krupnije zrnasti klastiti, dok su se sitnije zrnasti klastiti taložili na reljefno istaknutijim dijelovima bazena (Malvić i Saftić, 2008).

Treći i najmlađi megaciklus je pliocensko-kvartarne starosti. U Savskoj depresiji je čine sedimenti formacije Lonja, najmlađa litostratigrafska jedinica kojoj podinu čini EK-marker „α“, a krovinu površina terena. Karakteristična je močvarna, jezerska i riječna sedimentacija koja se odvijala u najnižim dijelovima depresija. Jača kompresijsko naprezanje, rezultirajući reversnim i navlačnim rasjedima po reaktiviranim starijim rasjednim plohama, pri čemu se pojavljuje i inverzija pomaka na istom rasjedu (Malvić i Saftić 2008). Litološki se ovaj megaciklus sastoji od pijesaka, glina, a završava šljuncima, praporima i rastresitim tlom (Velić, 2007). Biostratigrafski odgovara jedinici Paludinske naslage koje sadrže pjeskovite i glinovite sedimente (Saftić i Malvić, 2008). Provodni fosil je barski puž *Viviparus* (starijeg imena *Paludina*).



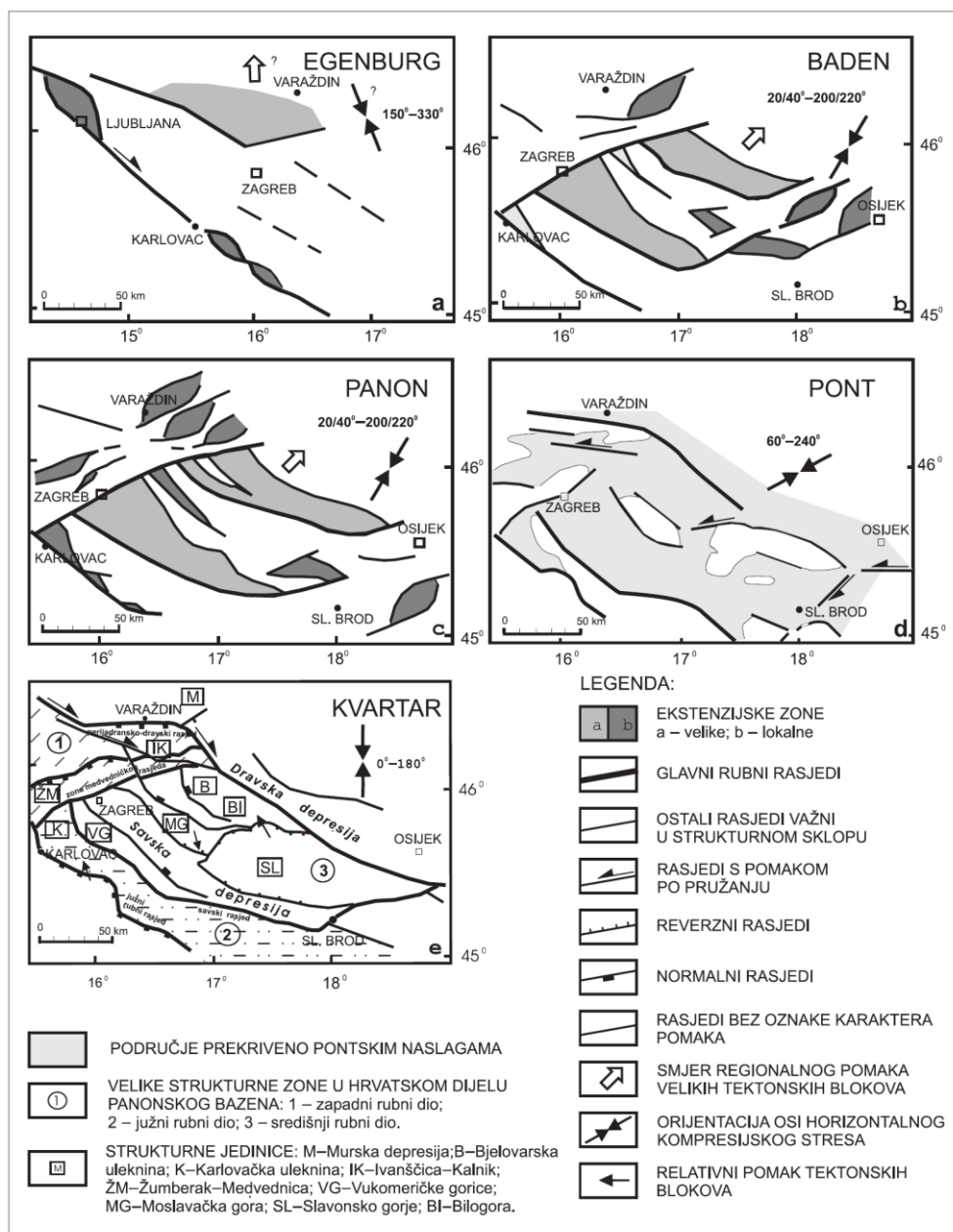
Slika 3-2. Shematski prikaz litostratigrafskih jedinica u Savskoj depresiji (iz Kolenković (2012), prema Šimon (1973))

3.2. Strukturne značajke istraživnog područja

Strukturni razvoj jugozapadnog dijela Panonskog bazena započeo je krajem oligocena i početkom miocena ekstenzijskom tektonikom. Početak ekstenzije je obilježen pojavom andezitnog vulkanizma sjeverno od Zagreba (Pamić, 1997; Pamić i dr., 1998). Tektonski pomaci uzrokovani subdukcijom i konvergencijom Apulijske ploče pod Dinaride formirali su navlake i reversne rasjede u Južnim Alpama i Dinaridima, kao i stvaranje transkurentnih desnih rasjeda (Prelogović i dr., 1998). Duž velikih aktivnih desnih transkurentnih rasjeda koji se pružaju pravcem SZ–JI (Slika 3-3, a) došlo je do stvaranja nekoliko manjih pull–apart bazena (Saftić i dr., 2003).

Glavna ekstenzijska faza je uslijedila tijekom ranog i srednjeg miocena u razdoblju između otnanga i badena (Lučić i dr., 2001). Regionalni stres (Slika 3-3, b) mijenja orijentaciju na SSI–JJZ u Dinaridima i na S–J u jugozapadnom dijelu PBS-a (Bada, 1999). To je uzrokovalo pokretanje lijevih transkurentnih rasjeda gdje dolazi do pomicanja tektonskih blokova prema sjeveroistoku i otvaranja glavnih regionalnih (Savska depresija) i lokalnih ekstenzijskih zona koje su ispunjene neogenskim sedimentima (Prelogović i dr., 1998).

Od srednjeg do kasnog miocena u razdoblju između sarmata i panona došlo je do završetka glavne ekstenzijske faze u jugozapadnom dijelu PBS-a. U panonu je prestankom subdukcije u Vanjskim Karpatima i termalne subsidencije uslijed izostatskog potonuća kore koja je stanjena plašnim dijapirizmom (Stegena et al., 1975), započelo taloženje velikih količina sedimenata. Sve gornjomiocenske naslage se prema obilježjima mogu svrstati u postriftnu fazu u razvoju bazena. Tijekom tog razdoblja nastale su Savska i Dravska depresija te je došlo do uzdignuća slavonskih planina (Prelogović i dr., 1998). Prema tektonskoj slici za vrijeme panona mogu se vidjeti glavne regionalne ekstenzijske zone – Savska i Dravska depresija (Slika 3-3, c, tamnosiva boja), zona Medvedničkog rasjeda, zona Južnoga rubnog rasjeda PB-a i rasjedne zone po rubovima Slavanskog gorja (Lučić i dr., 2001). Panonska i pontska orijentacija regionalnog stresa S–J omogućila je reaktivaciju lijevih transtenzijskih zona u području sjeverozapadno od Medvedničkog rasjeda s ekstenzijom I–Z, dok rasjedi na južnom rubu Savske i Dravske depresije pokazuju normalan pomak s orijentacijom SI–JZ (Lučić i dr., 2001).



Slika 3-3. Tektonski razvoj hrvatskog dijela PBS-a (preuzeto iz Velić (2007), prema Prelogović et al. (1995); Lučić et al., (2001)).

U pliocenu do danas dolazi do reaktivacije tektonske aktivnosti i promjene režima naprezanja iz ekstenzijskog u kompresijski na području PBS-a. Subdukcija Jadranske ploče pod Alpe i Dinaride rezultirala je novim strukturnim odnosima koji su se postupno razvijali. Izražena je transpresija i desni transkurentni pomaci te orijentacija regionalnog stresa S–J (Slika 3-3, e) (Prelogović i dr., 1998). Jačanjem kompresijskih sila formiraju se navlačne i reversne strukture u Južnim Alpama i Dinaridima. Značajan je i aktivni Perijadransko–dravski desni wrench rasjed koji omeđuje glavne izdignute mase zapadnog i središnjeg dijela hrvatskog dijela Panonskog bazena od spuštenih struktura (Prelogović i dr., 1998).

4. METODOLOGIJA

Zadatak ovog diplomskog rada bio je procijeniti poroznosti pješčenjaka Okoli u zapadnome dijelu Savske depresije temeljem analiza geofizičkih mjerenja u bušotinama. Ulazni podatci karotažnih mjerenja iz 20 bušotina (Slika 2-1) su obrađeni i interpretirani u računalnom programu *Interactive petrophysics* koji je Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu omogućen od proizvođača Schlumberger i Lloyd's Register. Daljnji proračunski podatci su obrađeni i analizirani u računalnom programu Microsoft Excel.

4.1. Neutronska karotaža

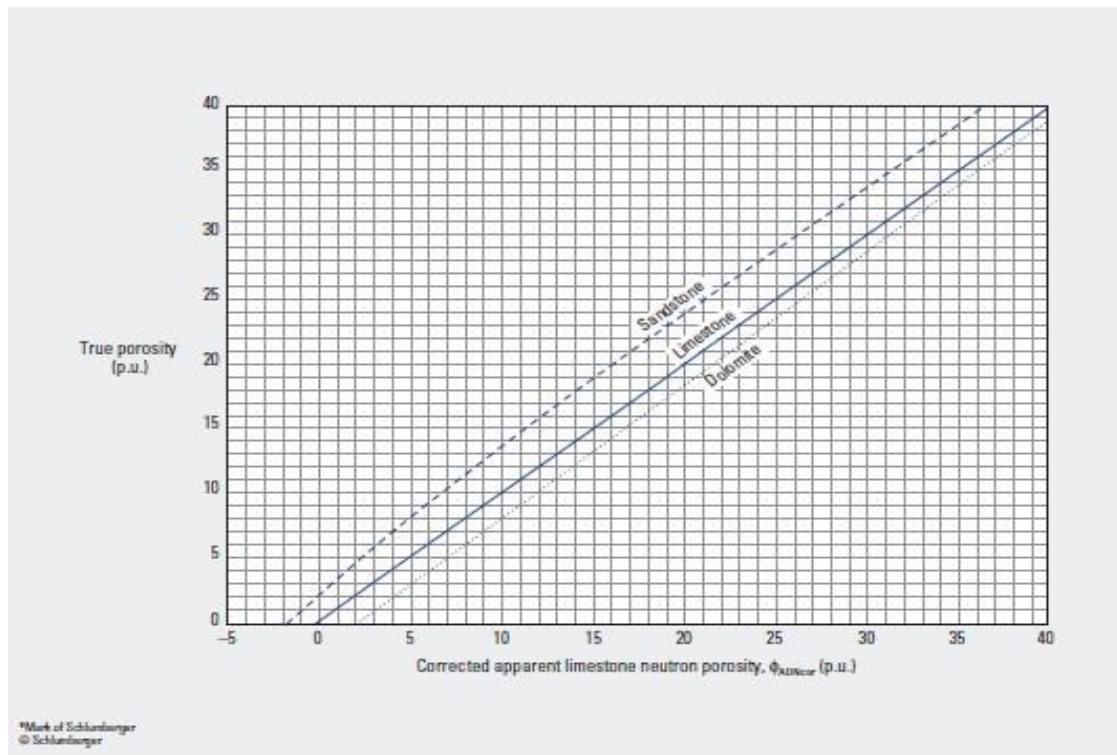
Neutronska karotaža koristi interakciju između neutronske zračenja iz izvora i formacije kroz koju prodire. Upotrebljava se nekoliko izvora neutrona, a uključuju kombinaciju berilija s izvorom alfa-čestice kao što je radij, polonij, plutonij ili americij. Danas se za većinu karotažnih mjerenja kao izvor koristi americij-berilij s vremenom poluraspada od 460 godina i tokom elektrona oko 107 neutrona u sekundi (Telford et al., 1991). Glavne komponente neutronske sonde su: izvor neutrona (kemijski izvor ili generator neutrona), jedan ili više detektora (neutron ili gama) koji detektiraju neutronske zračenje nakon procesa usporavanja i induciranog gama zračenja, te zaštite između izvora i detektora koja suzbija direktno zračenje (Schön, 2015).

Iz izvora u sondi se neutronima visoke energije bombardiraju formacije, pri čemu neutroni gube energiju pretežito elastičnim sudarima s jezgrama (Telford et al., 1991). Postoje dvije vrste interakcija između neutrona i jezgara atoma: djelomična i potpuna interakcija. Kod djelomične interakcije dolazi do sudaranja neutrona s jezgrom atoma te pojave neelastičnih i elastičnih sudara, pri čemu neutroni gube energiju i usporavaju (Šumanovac, 2012). Kod neelastičnih sudara neutroni se sudaraju s jezgrom i prenose dio svoje kinetičke energije na jezgru, što rezultira pobuđenjem jezgre, nakon čega slijedi emisija gama zraka. Elastično sudaranje se odlikuje gubitkom kinetičke energije i usporavanjem neutrona. Maksimalni gubitak energije upućuje na jezgru atoma s istom atomskom masom kao neutron, što je slučaj sa vodikom. Potpuna interakcija uzrokuje zarobljavanje neutrona kada dostignu energiju termalizacije. Takav proces formira složenu jezgru u pobuđenom stanju koja emitira gama zračenje (Schön, 2015).

Prodor neutrona je kontroliran atomima vodika u tekućini i poroznosti formacije, stoga mjerenja neutrona na detektoru ukazuju na relativnu količinu vodika u formaciji (Tiab i

Donaldson, 2012). Kada je glavni izvor vodika u formaciji tekućina u porama, izmjereni neutroni su u korelaciji s količinom tekućine prisutne u porama. U visoko poroznoj sredini, samo će mali broj neutrona prodrijeti do detektora, i obrnuto, u slabo poroznoj sredini će veliki broj neutrona prodrijeti do detektora. Stoga se neutronska karotaža može povezati s poroznošću formacije gdje je porni prostor ispunjen tekućinom (Tiab i Donaldson, 2012).

Međutim, na neutronska karotažu utječu svi atomi vodika, uključujući i one u vodi koja je povezana s glinovitim naslagama ili je kemijski vezana u strukturi kristalne rešetke kao kod gipsa (Telford et al., 1991) te daju povećane vrijednosti poroznosti. Zato je nužno poznavati litološki sastav naslaga i sukladno kalibraciji uređaja koristiti pripadajući dijagram (Slika 4-1) kako bi se podaci ove karotaže mogli ispravno interpretirati (Šumanovac, 2012).



Slika 4-1. Dijagram za korekciju poroznosti s obzirom na litološki sastav (apscisa–prividna poroznost vapnenca, ordinata–stvarna poroznost) (Schlumberger, Log Interpretation Charts – Por-7, 2009)

Neutronska karotaža daje smanjene poroznosti kada je plin prisutan u šupljinama, stoga se često koristi za otkrivanje plinskih zona. Također, ako je u formacij poroznost povezana, prema neutronske karotaži se može odrediti kontakt plin–tekućina (Tiab i Donaldson, 2012). Kako bi se omogućila preciznija vrijednost poroznosti i jasniji kontakt plin–tekućina koristi se kombinacija neutronske karotaže i drugih karotaža za poroznost, posebice karotaža gustoće.

4.2. Karotaža gustoće

Karotaža gustoće (gama–gama karotaža) koristi interakciju između gama zračenja iz izvora i formacije kroz koju prodire. Kao usmjereni izvor od 0,662 MeV gama–zraka na dnu sonde se koristi cezij (^{137}Cs), dok su ranije sonde kao izvor koristile kobalt (^{60}Co) (Telford et al., 1991). Na sondi, 60 cm (centimetara) iznad izvora gama zraka nalazi se jedan ili više scintilacijskih detektora koji detektiraju raspršene gama zrake kroz formaciju. I izvor i detektor su okruženi olovnom zaštitom, osim u dijelu koji je okrenut prema stijenci bušotine kako bi gama zrake kroz okolnu formaciju stigle do detektora (Telford et al., 1991).

Usmjerenim izvorom gama zraka se bombardiraju stijene, u kojima dolazi do njihove apsorpcije i rasipanja pa se smanjeno zračenje registrira na detektoru. Energija zračenja smanjuje se proporcionalno s gustoćom stijena ili preciznije rečeno s elektronskom gustoćom, povećanjem broja elektrona u atomima elemenata pa se ovom karotažom dobivaju kontinuirani podaci o gustoćama stijena (Šumanovac, 2012). Gama zrake iz izvora pretežito reagiraju s elementima iz stijena Comptonovim raspršivanjem, a u manjoj mjeri fotoelektričnim efektom (Telford et al., 1991). Comptonovo raspršivanje je reakcija raspršivanja fotona gama zraka uslijed sudara s orbitirajućim elektronima. Vjerojatnost interakcije ovisna je o broju elektrona, tj. atomskom broju (Z). Za većinu uobičajnih minerala omjer atomskog (Z) i masenog (A) broja je konstantan (Slika 4-2), tako da se volumna gustoća stijene (ρ_b), ovisna o masenom broju može povezati s elektronskom gustoćom (ρ_e) iz Comptonovog efekta (Schön, 2015) putem formule:

$$\rho_b = 2 \times \left(\frac{Z}{A}\right) \times \rho_e \approx \rho_e$$

gdje su: ρ_b – volumna gustoća stijene
 Z – atomski broj
 A – maseni broj
 ρ_e – elektronska gustoća stijene

Fotoelektrični efekt pokazuje jaku povezanost s atomskim brojem (Z). Prosječni fotoelektrični presjek po elektronu, tj. efektivni fotoelektrični (PE) indeks se definira prema formuli:

$$PE = (Z / 10)^{3.6}$$

gdje su: PE – efektivni fotoelektrični indeks
 Z – atomski broj

Fotoelektrični indeks izrazito ovisi o elementarnom sastavu, stoga je moguće determinirati vrstu stijene prema vrijednostima karakterističnima za različite minerale (Slika 4-2). Indeks također može pomoći pri razlikovanju između minerala kvarca, kalcita i dolomita te je izrazito osjetljiv na barit (Schön, 2015).

Većina atoma ima skoro dva elektrona po atomskoj masi, osim vodika i nekoliko drugih elemenata koji odstupaju od ovog omjera. Karotaža gustoće je obično kalibrirana za vapnence zasićene slatkom vodom, ali daje sasvim precizne volumne gustoće stijena (ρ_b) i u pješčenjacima i dolomitima (Telford et al., 1991). Korekcije su potrebne kako bi dobili gustoću za halit, gips, ugljen i plin, gdje se omjer atomskog i masenog broja razlikuje od onoga za vapnence ($Z/A=0.5$) (Tablica 4-1).

Kompenzirana karotaža gustoće koristi dva detektora na različitim udaljenostima od izvora. Detektor na bližoj udaljenosti je pod većim utjecajem isplačne obloge te se razlika između dvaju detektora koristi za korekciju debljine i gustoće isplačne zone (Telford et al., 1991). Dubina istraživanja je oko 10 cm čime se zahvaća isprana zona, a mjerenjem se dobiva volumna gustoća stijene (ρ_b) koja se izražava formulom (Šumanovac, 2012):

$$\rho_b = \emptyset \rho_f + (1 - \emptyset) \rho_m$$

gdje su: ρ_b – volumna gustoća stijene

$\emptyset$ – poroznost stijene

ρ_f – gustoća tekućine

ρ_m – gustoća mineralnih zrna

Prema tome, dobivenim volumenom gustoće stijene (ρ_b), te poznavajući gustoću filtrata isplake (ρ_f) i mineralni sastav stijene (ρ_m) može se dobiti poroznost stijene ($\emptyset$) prema formuli:

$$\emptyset = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_f}$$

Karotaža gustoće se koristi u kombinaciji s neutronsom karotažom kako bi se preciznije odredila vrijednost poroznosti i mineralni sastav stijene. Upotrebljava se i za određivanje gustoće za opću karakterizaciju stijene te daje ulazne podatke za izradu sintetskog seizmograma (Schön, 2015).

Tablica 4.1. Tablica za srednje vrijednosti gustoće (ρ) i elektronske gustoće ($\rho_{GG} = \rho_e$) u 10^3 kg m^{-3} , efektivni omjer Z/A i efektivni fotoelektrični indeks (PE) u barn/elektron (Schlumberger, 1989; prema Hearst i Nelson, 1985)

Mineral, tekućina	ρ	$(Z/A)_{\text{eff}}$	ρ_{GG}	PE
Kvarc	2,654	0,499	2,650	1,81
Kalcit	2,710	0,500	2,708	5,08
Dolomit	2,850	0,499	2,864	3,14
Anhidrit	2,960	0,499	2,957	5,05
Gips	2,320	0,511	2,372	3,42
Halit	2,165	0,479	2,074	4,65
Montmorilonit	2,12	0,500	2,12	2,04
Ilit	2,65	0,496	2,63	3,55
Kaolinit	2,44	0,500	2,44	1,84
Barit	4,50	0,446	4,01	267
Voda	1,000	0,555	1,110	0,36
Voda(120000 ppm)	1,086	0,545	1,185	0,81
Nafta	0,850	0,558	0,948	0,12

4.3. Zvučna karotaža

Zvučna karotaža temelji se na mjerenjima vremena koje je potrebno da bi zvuk prošao kroz stijenu koja se ispituje. Moderne sonde koriste dva odašiljača koji emitiraju impulse elastičnih valova od 20 kHz svakih 50 ms i dva para prijarnika (Telford et al., 1991). Odašiljač u sondi proizvodi primarne (kompresijske) valove koji se rasprostiru kroz isplaku i dolaze do formacije uz zid bušotine. Od granice sa formacijom upadni val se širi kao reflektirani i refraktirani val, a zvučna sonda bilježi samo refraktirani val (Telford et al., 1991). Ako je brzina vala u formaciji (V_2) veća od brzine vala u isplaci (V_1), a upadni val dolazi na granicu pod većim kutom od kritičnog kuta (θ_c), refraktirani val će se rasprostirati paralelno s granicom i putovati brzinom formacije do dva para prijarnika.

Na granici dolazi do stvaranja sekundarnog vala koji prolazi kroz formaciju i dolazi do prijarnika. Omjer razlike vremena prolaska primarnog i sekundarnog vala do dva para prijarnika (Δt) i udaljenosti od odašiljača do prijarnika rezultira sporošću formacije. Ako

je poznata litologija, mineralni sastav, a mjeren je Δt , može se odrediti poroznost $\emptyset$ pa je osnovna namjena ove karotaže određivanje poroznosti stijena (Šumanovac, 2012). Poroznost je izražena empirijskom formulom koja je razvijena od Wyllie et al. (1956):

$$\frac{1}{V_f} = \frac{\emptyset}{V_t} + \frac{1-\emptyset}{V_m} \quad \text{ili} \quad \emptyset = (\Delta t - \Delta t_m) / (\Delta t_f - \Delta t_m)$$

gdje su:

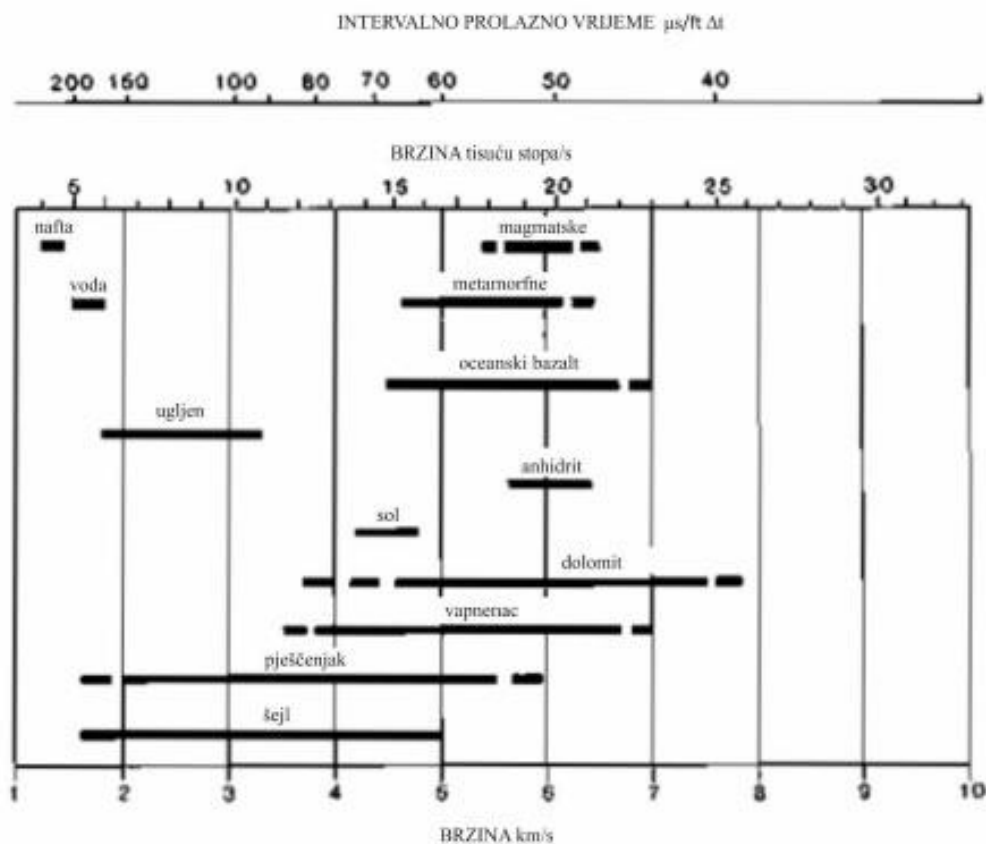
- V_f – brzina prostiranja valova u sredini
- V_t – brzina prostiranja u tekućini koja zasićuje stijenu
- V_m – brzina prostiranja kroz mineralna zrna (i/ili bioklaste) stijene
- $\emptyset$ - poroznost
- Δt – intervalno vrijeme prolaska kroz sredinu (sporst)
- Δt_f – intervalno vrijeme prolaska kroz tekućinu koja zasićuje stijenu
- Δt_m – intervalno vrijeme prolaska kroz mineralna zrna (i/ili bioklaste) stijene

Formula daje najpouzdanije rezultate za vodom ispunjene, kompaktne, porozne stijene, posebice pješčenjake. Loše konsolidirane stijene rezultiraju visokim vrijednostima sporosti vala kroz formaciju (vrijednost recipročna brzini), stoga mogu pokazivati precijenjene poroznosti koje se stoga trebaju korigirati (Schön, 2015). Wylliejeva formula se također može primjeniti za karbonate s međuzrnskom poroznosti. Prosječno intervalno vrijeme prolaska za tekućinu koja se sastoji od vode s 20% NaCl je 189 $\mu\text{s}/\text{ft}$, a za vodu 218 $\mu\text{s}/\text{ft}$. Nafta obično ima intervalno vrijeme od 238 $\mu\text{s}/\text{ft}$, dok metan ima izrazito visoku vrijednost jednaku 626 $\mu\text{s}/\text{ft}$ i može dati pogrešne rezultate. Intervalno vrijeme koje varira o području nastanka, za nekonsolidirane pješčenjake iznosi 58,8 $\mu\text{s}/\text{ft}$, konsolidirane pješčenjake 52,6 $\mu\text{s}/\text{ft}$, vapnenac 47,6 $\mu\text{s}/\text{ft}$, dolomit 43,5 $\mu\text{s}/\text{ft}$ i šejl 167 $\mu\text{s}/\text{ft}$ (Rider, 1996; Slika 4-2).

Dizajn sonde za zvučnu karotažu sprječava prelazak energije od odašiljača do prijamnika kroz samu sondu, a centralizatori ju drže u centru bušotine (Telford et al., 1991). Dubina prodiranja je oko 15 cm i ona ovisi o valnoj duljini, a ne udaljenosti odašiljača i prijamnika (Schön, 2015). Što je veća valna duljina, veće je i prodiranje, odnosno dubinski zahvat mjerenja. Preciznost mjerenja iznosi 3,28 $\mu\text{s}/\text{m}$, a brzina karotažnih mjerenja 18 m/min.

Uz izračun poroznosti preko Wylliejeve formule ili drugih empirijskih formula, podaci zvučne karotaže temelj su za izradu sintetskog seizmograma kako bi se povezali bušotinski podaci u dubinskom mjerilu i seizmički podaci u vremenskom brojilu. U kombinaciji s

karotažom gustoće i/ili neutronsom karotažom se koristi kako bi se procijenila poroznost i definirao litološki sastav stijene.

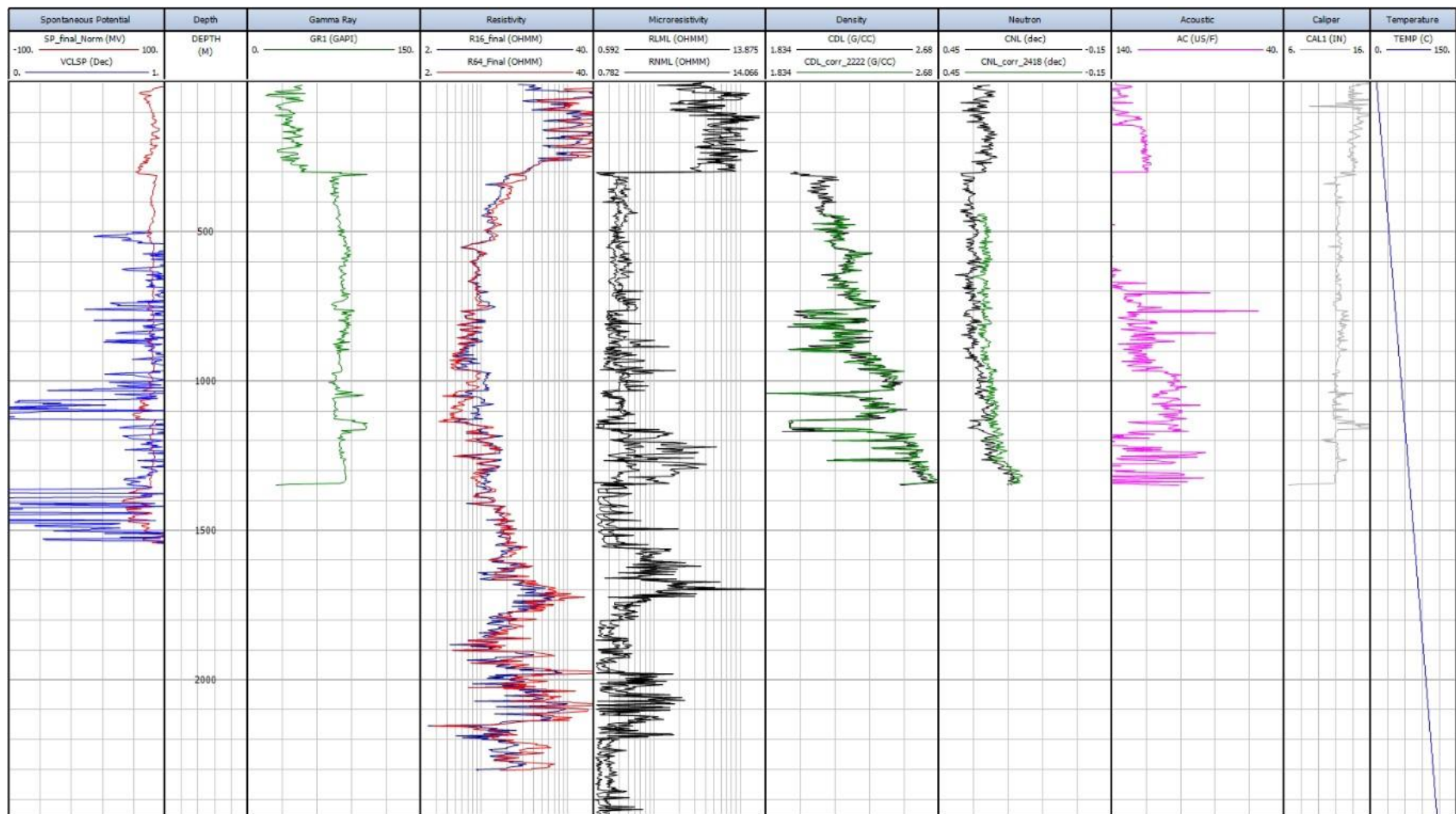


Slika 4-2. Prosječne brzine rasprostiranja valova u stijenama u $\mu\text{s/ft}$ (Δt) (Rider, 1996)

4.4. Softver *Interactive petrophysics*

Interactive petrophysics je računalni program koji se u ovom diplomskom radu koristio za procjenu poroznosti iz karotažnih mjerenja. Geoznanstvenici ga koriste kao programsko rješenje pri analiziranju bušotinskih podataka. *Interactive petrophysics* pomaže geolozima za razumijevanje svojstava stijena, a petrofizičarima služi za procjenu petrofizičkih parametara formacije. Ovaj alat prvenstveno se koristi za procjene poroznosti i zasićenja, ali i pornog tlaka te produktivnosti ležišta. Također, služi za upravljanje podacima, izračun i interpretaciju karotažnih mjerenja i mnogih drugih vrsta podataka.

U ovom diplomskom radu korišteni su podatci iz 20 bušotina čije su lokacije prikazane na slici 2-1. Početni korak bio je unošenje karotažnih krivulja za svaku bušotinu (Slika 4-3). Uz prethodno zadanu konačnu dubinu pojedine bušotine, unesene su krivulje: spontanog potencijala, prirodne radioaktivnosti, otpornosti, neutronske karotaže, karotaže gustoće, zvučne karotaže i kalipera.



Slika 4-3. Primjer ulaznih bušotinskih podataka

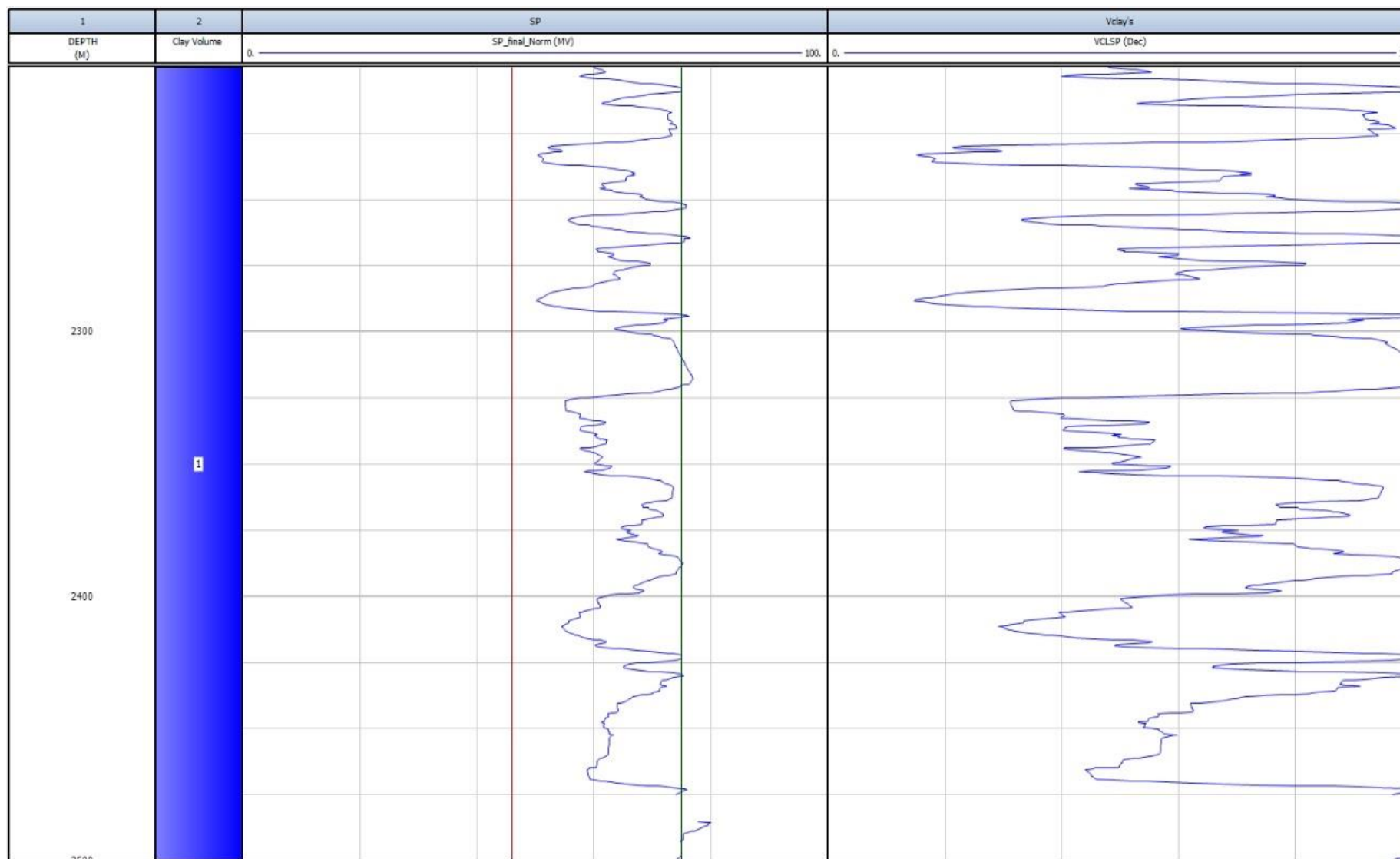
Podatci karotaže temperature postoje samo za bušotinu B-18, stoga je za sve ostale bušotine temperaturni gradijent izračunat. Pretpostavljen je nepromjenjivi geotermalni gradijent, što je generalizacija.. U stvarnosti u podzemlju geotermalni gradijent ovisi građi, odnosno o svojstvima stijena, prvenstveno toplinskoj vodljivosti. Također, preuzeta je vrijednost srednje godišnje temperature od 10,7°C na području Savske depresije (izračunato u Kolenković, 2012). Prva metoda izračuna geotermalnog gradijenta je iz podataka DST-a (*Drill stem test*), gdje je uzeta vrijednost izmjerene temperature i dubine na kojoj je izmjerena te zajedno s pretpostavljenom temperaturom na površini unesena u *Interactive petrophysics*. Za izračun gradijenta iz DST-a u *Interactive petrophysics* koristio se alat *Calculation – Temperature Gradient* (Slika 4-4). Gledala se najviša vrijednost temperature jer je ona najsličnija statičkoj temperaturi formacije, te da je ostvaren dotok ležišnog fluida u bušaće šipke. Vrijednost temperature izmjerena tijekom DST-a ne može se uvijek smatrati pouzdanom, zbog brojnih mogućih problema tijekom mjerenja, kao što su: propuštanje pakera, slaba manifestacija dotoka u bušaće šipke, dotok fluida u DST aparat ali ne i u bušaće šipke i slično. Odnosno, DST-mjerenja daju pouzdane podatke o temperaturi formacije dok na fluid ne utječu toplinski poremećaji oko bušotine (Peters i Nelson, 2012). Druga metoda izračuna je iz podataka zapisnika o radu gdje su zabilježena višestruka mjerenja temperature. Višestruka mjerenja temperature su uzeta zajedno s vremenima kada su izmjerena, a koja su izražena kao vremenski intervali nakon prestanka cirkulacije i te se vrijednosti uvrštavaju u Hornerovu korekciju za temperaturu na dnu bušotine - BHT (*Bottom hole temperature*) kako bi se dobila korigirana vrijednost temperature na dubini mjerenja. Korigirana vrijednost temperature iz Hornerove korekcije za BHT na određenoj dubini i pretpostavljena temperatura na površini su unesene u *Interactive petrophysics*. Za izračun gradijenta temperature u *Interactive petrophysics* ponovno se koristio alat *Calculation – Temperature Gradient*. Za svaku bušotinu su primijenjene obe metode izračuna gradijenta temperature. Metoda izračuna iz podataka DST-a je kod većine bušotina pokazivala nešto veći temperaturni gradijent, što je bio glavni kriterij pri odabiru metode izračuna. Kod bušotina B-19 i B-11 nije bilo podataka iz DST-a, te su za BHT korekciju uzeta mjerenja temperature s dna bušotine, čiji gradijent pokazuje nešto više vrijednosti nego mjerenja temperature na plićim dubinama bušotina.

Slika 4-4. Alat za izračun geotermalnog gradijenta u softveru *Interactive petrophysics*

4.4.1. Procjena sadržaja (volumena) gline

Procjena volumena gline idući je i najvažniji korak u analizi, koji omogućuje izdvajanje intervala s kolektorskim svojstvima. Jedan je od ključnih parametara koji se koristi za korekciju efektivne poroznosti i efektivnog zasićenja vodom. Iako je procjena volumena gline bitna u analizi glinovitih pješčenjaka, ne postoji pojedinačna ili kombinacija karotažnih mjerenja koje bi točno odredile volumen gline u formaciji (Dewan, 1983). Standardne metode za procjenu volumena gline su izvedene upotrebom sedam različitih karotažnih mjerenja: karotaža prirodne radioaktivnosti (gama karotaža i spektralna gama karotaža), zvučna karotaža, karotaža spontanog potencijala, karotaža gustoće, neutronska karotaža i karotaža otpornosti. Osnovna pretpostavka je da većina procjena precjenjuje vrijednosti volumena gline, ali on ponekad može biti i prenizak (Dewan, 1983). Podcjenjivanje volumena gline ovisi o mineralnom sastavu formacije, tipu gline, porijeklu gline, uvjetima bušotine, itd. Ove uvjete je potrebno poznavati kako bi se odabrala ispravna metoda i na pouzdan način korigirala prije izračuna volumena gline.

U ovom diplomskom radu, procjena volumena gline je provedena na temelju karotažnog mjerenja spontanog potencijala. Razlog odabira karotaže spontanog potencijala, a ne gama karotaže, koja je standardna metoda za procjenu volumena gline, je taj što pješčenjaci Okoli, poput ostalih gornjomiocenskih pješčenjaka hrvatskoga dijela Panonskog bazena, nisu kvarcni areniti te sadrže dosta alkalijskih feldspata kojima kalij daje određenu prirodnu radioaktivnost. Volumen gline se koristio kako bi se raščlanio kolektor od izolatora, i kasnije lakše definirala efektivna debljina pješčenjaka. Prvi korak pri procjeni volumena gline bio je provjera podataka karotažnih mjerenja prije same interpretacije. Pojedine krivulje spontanog potencijala bile su obrnute, stoga ih je trebalo korigirati. To je napravljeno pomoću alata Edit – Curve rescale. Nadalje, kako bi se povezale dvije ulazne krivulje spontanog potencijala i dobila rezultirajuća krivulja koja će se normalizirati, koristio se alat Edit – Interactive curve splice. Takva korigirana krivulja spontanog potencijala se normalizirala primjenom alata Edit – interactive baseline shift, gdje se linija šejla poravnala duž cijelog intervala od interesa. Za samu procjenu volumena gline iz završne krivulje spontanog potencijala upotrebljavao se alat Interpretation – clay volume. U tom alatu definirala se granica pijeska i gline, i prag koji je granica između slabo propusnih lapora i propusnijih pješčenjaka (Slika 4-5). Granična vrijednost volumena gline između kolektora i izolatora je za svaku bušotinu određena prema podacima iz geološkog izvještaja i interpretacije krivulje. Pri postavljanju granične vrijednosti uzimani su u obzir i podatci propusnosti s jezgara koji su pokazivali radi li se o propusnijem ili nepropusnom sloju. Granična vrijednost volumena gline je za sve analizirane bušotine iznosila od 0,4 do 0,6 (Tablica 4-2). Ukupni podatci volumena gline za svaku bušotinu su prenešeni u Microsoft Excel gdje je jednostavnom analizom određena efektivna debljina pješčenjaka.



Slika 4-5. Alat iz softvera *Interactive petrophysics* za procjenu volumena gline

Tablica 4.2. Bušotine i procijenjeni volumen gline intervala pješčenjaka Okoli

Bušotina	Dubina intervala (m)	Granična vrijednost volumena gline
B-1	866 – 995	0,5
B-2	1509 – 1534	0,6
B-3	1150 – 1360	0,6
B-4	1434 – 1601	0,4
B-5	2147 – 2493	0,6
B-6	2125 – 2162	0,5
B-7	2211 – 2470	0,6
B-8	1936 – 1995	0,5
B-9	2149 – 2318	0,6
B-10	2088 – 2108	0,5
B-11	2318 – 2430	0,5
B-12	2227 – 2440	0,5
B-13	2225 – 2470	0,6
B-14	2343 – 2375	0,4
B-15	2816 – 2906	0,5
B-16	2595 – 2966	0,6
B-17	3071 – 3430	0,6
B-18	2388 – 2825	0,5
B-19	2933 – 3321	0,6
B-20	2870 – 3275	0,6

4.4.2. Procjena poroznosti

Poroznost ($\emptyset$) je bitno svojstvo stijena koje predstavlja udio volumena pora u ukupnom volumenu stijene. Niz čimbenika utječe na poroznost stijene, kao što su oblik zrna, veličina zrna, način slaganja zrna, sortiranost i dijagenetski procesi. Poroznost se iskazuje u postocima, a definira se prema formuli:

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} = \frac{V_b - V_{ma}}{V_b}$$

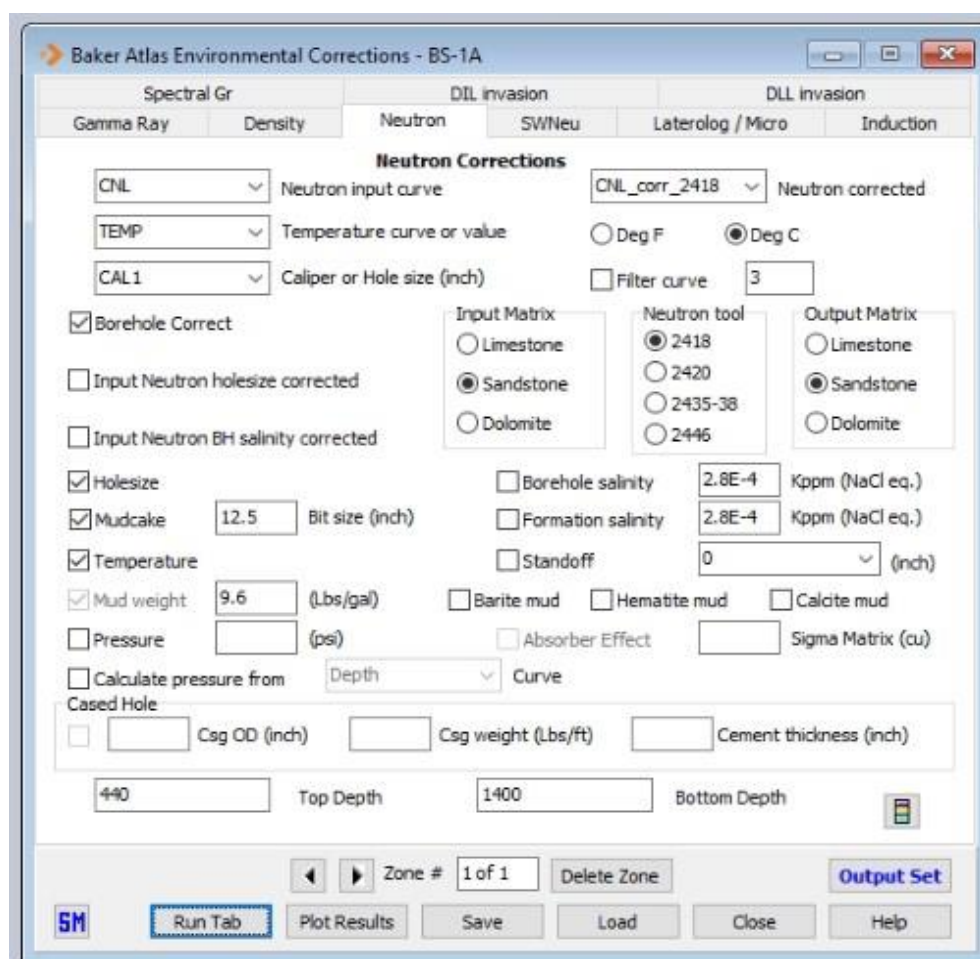
gdje su: ϕ – poroznost

V_p – volumen pora u stijeni

V_b – ukupni volumen stijene

V_{ma} – volumen zrna, čvrsti dio stijene

Procjenjivanje poroznosti se u ovom diplomskom radu određivalo na temelju analize karotažnih mjerenja za 20 bušotina (Tablica 4-1). Analizirale su se krivulje zvučne karotaže, karotaže gustoće i neutronske karotaže, koje su opisane u prethodnim poglavljima (3.1., 3.2. i 3.3.). Prvi korak je zahtijevao korekciju krivulja karotaže gustoće i neutronske karotaže, čije se snimanje izvršilo opremom Baker Atlas. Za korekciju krivulja koristio se alat *Calculation – Environmental corrections – Baker Atlas corrections* (Slika 4-6).



Slika 4-6. Alat iz softvera *Interactive petrophysics* za korekciju krivulja

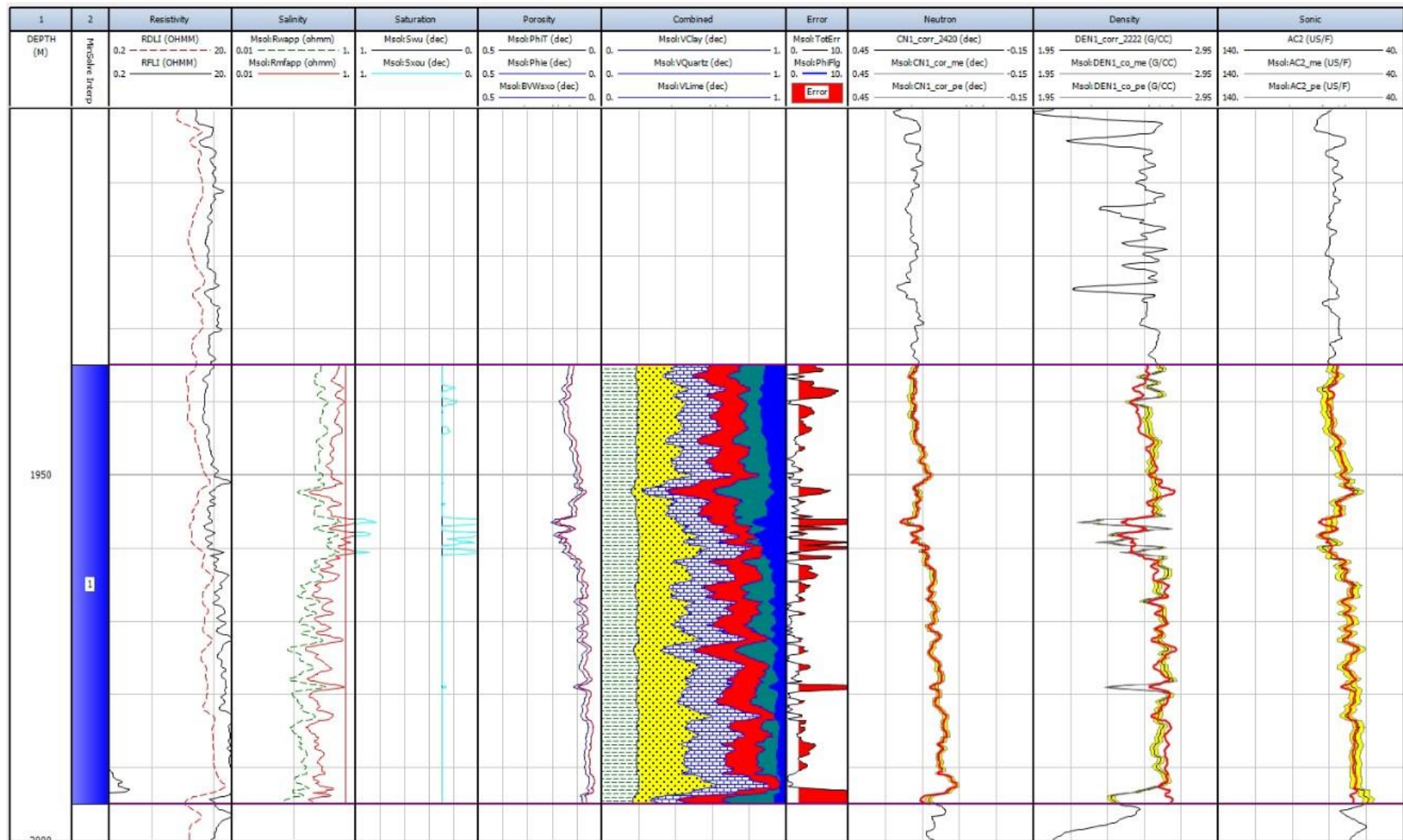
Kod korekcije krivulje gustoće potrebno je unijeti ulazne krivulje karotaže gustoće i kalipera, gustoću isplake, interval bušotine i označiti korekciju za uvjete bušotine. U slučaju više

krivulja kalipera, uzeta je ulazna krivulja kalipera koja se najviše poklapala sa promjenom gustoće na krivulji karotaže gustoće. Razlog tomu je što gustoća najprije reagira na promjenu promjera bušotine, jer je sam uređaj papučicama pričvršćen za stijenu bušotine te svaki pomak od nominalnog promjera bušotine uzrokuje pogreške u mjerenju. Kada je povećanje promjera bušotine veće od 5 cm gdje dolazi do urušavanja kanala bušotine, dolazi do većih pogreški u rezultatima mjerenja, te su podatci gotovo neupotrebljivi. Podatke za stvarni promjer bušotine i gustoću isplake prikupljeni su iz zapisnika o radu bušotine.

Za korekciju neutronske karotaže, u ulaznim podacima unose se krivulje neutronske karotaže, kalipera i temperaturnog gradijenta, promjer bušaćeg dlijeta, gustoća isplake i interval bušotine (Slika 4-5). Kao i kod korekcije krivulje gustoće, u slučaju više krivulja kalipera uzeta je ona za koju je s usporedbom s krivuljom gustoće, pretpostavljeno da najbolje prati promjenu promjera bušotine. Ostali podatci potrebni za korekciju krivulje neutronske karotaže prikupljeni su iz zapisnika o radu.

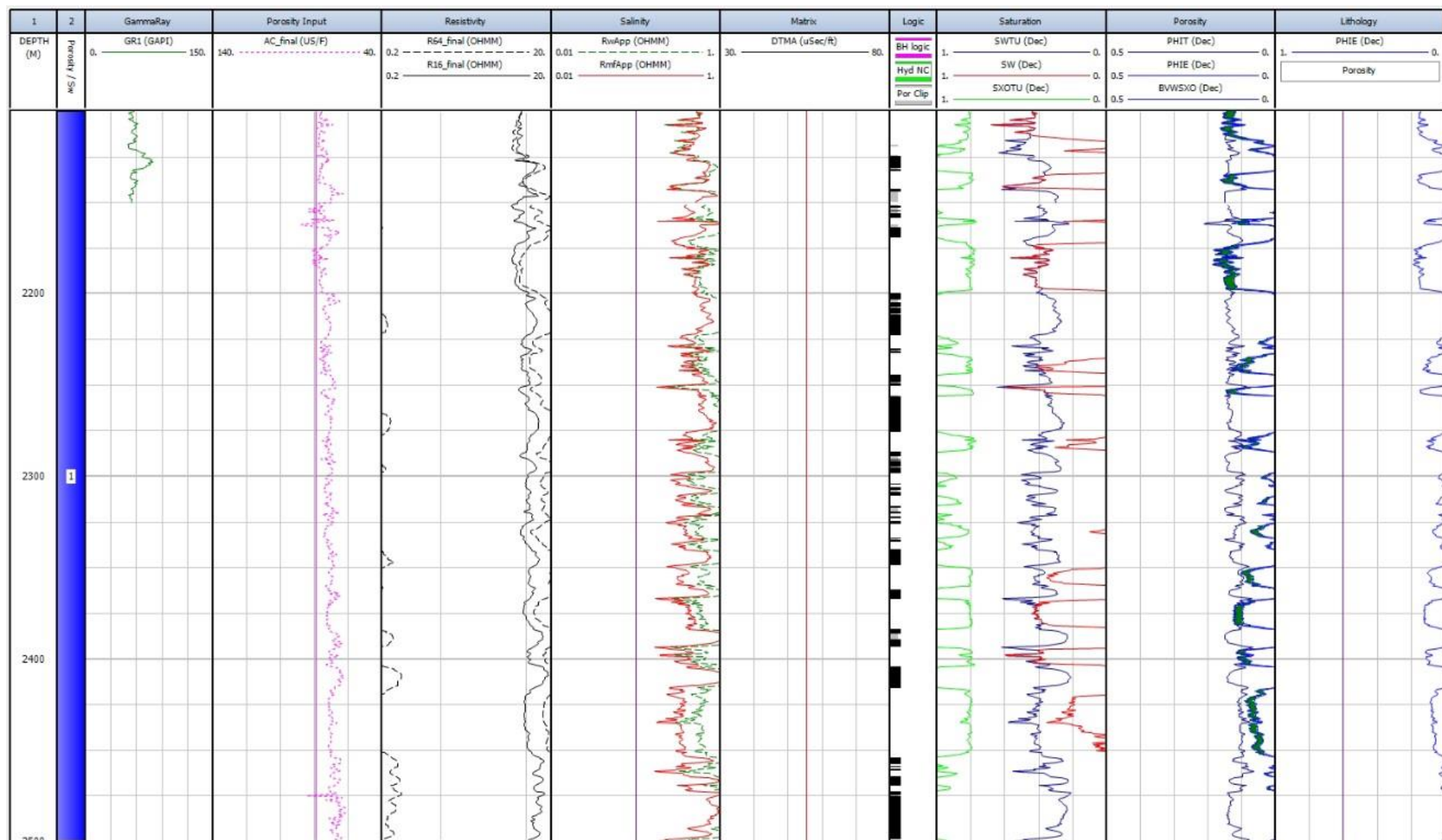
Nakon korekcije krivulja potrebnih za procjenjivanje poroznosti, odabire se metoda za izračun poroznosti. Kada su dostupne 2 ili sve 3 krivulje koristila se probabilistička metoda *Mineral Solver*. U slučaju samo jedne karotažne krivulje potrebne za procjenu poroznosti, koristila se jednostavnija metoda *Porosity and water saturation*. Rezultati analize poroznosti kod obe metode pokazuju vrijednosti izražene s obzirom na dubinu, na intervalima od 10 cm. Vrijednosti ukupne i efektivne poroznosti koriste se za daljnju analizu i korelaciju podataka.

Za probabilističku metodu *Mineral Solvera* koristio se alat Advanced interpretation – *Mineral Solver* (Slika 4-7). U njemu se na temelju pretpostavljenog mineralnog sastava iz geoloških izvješća i operativnog geološkog dijagrama napravio model mineralnog sastava za određeni interval. Pretpostavljeni model se sastojao od minerala kvarca, kalcita, gline, ortoklasa, biotita, muskovita i zasićenja vodom isprane zone. Osim pretpostavljenog mineralnog sastava i karotažnih krivulja gustoće, neutrona i zvuka, potrebno je unijeti krivulje gradijenta temperature te otpornosti. Iz analize modela mineralnog sastava i unesenih karotažnih krivulja dobiven je model najvjerojatnije poroznosti. Nadalje, krivulja procijenjenog volumena gline služi za usporedbu s krivuljom poroznosti, što dođe kao kontrolni faktor. Vrijednosti poroznosti se uspoređuju sa granicama pješčenjaka i lapora iz krivulje volumena gline, ali ne samo za granicu propusne i nepropusne zone, već i za uspješnost same analize.



Slika 4-7. Primjer modela mineralnog sastava i procijenjene poroznosti korištenjem alata *Mineral Solver*

Druga i jednostavnija metoda *Porosity and water saturation* izvedena je pomoću alata Interpretation – *Porosity and water saturation* (Slika 4-8). Za ulazne podatke se unosi jedna od karotažnih krivulja (karotaža gustoća, neutronska karotaža ili zvučna karotaža) potrebnih za procjenjivanje poroznosti. Također, unose se i krivulje gradijenta temperature, analiza volumena gline i krivulja otpornosti. Potrebno je odabrati ispravnu jedinicu temperature i model poroznosti s obzirom na karotažna mjerenja s Kojima se raspolaže. Sam alat koristi jednostavne izraze za izračun poroznosti, navedene u potpoglavljima 4.1.-4.3. za izračun poroznosti, ovisno o dostupnim karotažnim mjerenjima.



Slika 4-8. Primjer modela poroznosti za krivulju zvučne karotaže korištenjem alata *Porosity and water saturation*

Popis bušotina i karotažnih krivulja na temelju kojih su izvršene analize za pojedinu bušotinu nalazi se u tablici 4-3. Uočava se da su sve krivulje bile dostupne samo za dvije bušotine (B-3 i B-8) duž čitavog intervala pješčenjaka Okoli, dok su za još tri bušotine sva mjerenja bila dostupna za dio intervala pješčenjaka Okoli (bušotine B-9, B-15 i B-20). Za ostale bušotine procjena vrijednosti poroznosti provedena je temeljem interpretacije zvučne karotaže.

Tablica 4.3. Popis bušotina i krivulja karotažnih mjerenja koje su analizirane u svrhu određivanja poroznosti

Bušotina	Zvučna karotaža	Karotaža gustoće	Neutronska karotaža
B-1	+	-	-
B-2	+	-	-
B-3	+	+	+
B-4	+	-	-
B-5	+	-	-
B-6	+	-	-
B-7	+	-	-
B-8	+	+	+
B-9	+	+/-	+/-
B-10	-	-	-
B-11	+	-	-
B-12	+	-	-
B-13	+	-	-
B-14	+	-	-
B-15	+	+/-	+/-
B-16	+	-	-
B-17	+	-	-
B-18	+	-	-
B-19	+	-	-
B-20	+	+/-	+/-

4.5. Poroznosti i propusnosti iz laboratorijskih mjerenja na jezgrama

Propusnost je svojstvo stijena koje prikazuje sposobnost poroznih stijena da omogućuju protjecanje fluida kroz međusobno povezane pore. Propusnost ovisi o efektivnoj poroznosti, odnosno udjelu međusobno povezanih pora, jer izolirane pore ne omogućuju protok fluida. Protjecanje fluida ovisi o svojstvima stijene, kao što su oblik i veličina zrna, način slaganja zrna, sortiranost, cementacija, prisutnost pukotina i otapanje i rekristalizacija, ali i o svojstvima fluida. Do protjecanja fluida dolazi uslijed tlačnog gradijenta, a smjer protoka je od većeg prema manjem tlaku. Darcyjeva jednadžba za horizontalni protok fluida kroz porozni medij glasi:

$$q = -\frac{k A}{\mu L} \Delta p$$

gdje su:

- q – protok fluida
- k – propusnost
- μ – viskoznost
- A – površina presjeka
- L – duljina protoka
- Δp – razlika tlaka

Standardna jedinica za propusnost osmišljena u CGS sustavu jedinica je 1 darcy (D). Kako većina stijena ima propusnost manju od 1 D, u uporabi je češće jedinica za propusnost millidarcy (mD):

$$1 \text{ mD} = 0,986923 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 = 0,986923 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$$

Kakvoća propusnosti stijena se ocjenjuje 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 (Velić, 2007).

Vrijednosti poroznosti i propusnosti za 20 istraživanih bušotina preuzete su iz izvještaja o rezultatima fizikalnog ispitivanja na jezgrama i prikazane su u tablici 4-4.

Tablica 4.4. Poroznosti i propusnosti iz laboratorijskih mjerenja na mehaničkim jezgrama za 20 istraživanih bušotina

Bušotina	Dubina intervala jezgre (m)	Poroznost (%)	Propusnost (mD)
B-1*	-	-	-
B-2*	-	-	-
B-3*	-	-	-
B-4**	1576,0 – 1582,0	-	-
B-5	2176,0 – 2182,0 2352,0 – 2359,0	12,1 – 16,5 6,4 – 12,8	0,31 – 8,1 0,12 – 1,3
B-6*	-	-	-
B-7	2254,0 – 2260,0 2254,0 – 2260,0	16,5 – 19,2 5,8 – 17,2	3,4 – 7,1 0 – 3,2
B-8*	-	-	-
B-9	2156,0 – 2161,0	13,4 – 28,5	0,14 – 32,25
B-10	-	-	-
B-11	2324,7 – 2328,0 2423,5 – 2428,0	13,3 – 18,8 14,2 – 19,6	0 – 14,2 0 – 5,5
B-12	2228,6 – 2233,2 2312,3 – 2319,3	13,3 – 15,4 7,3 – 17,5	0,2 – 8,4 0,2 – 8,4
B-13**	2228,5 – 2233,2	-	-
B-14*	-	-	-
B-15*	-	-	-
B-16	2676,2 – 2679,0 2856,4 – 2860,2	10,3 – 10,9 7,8 – 10,2	0
B-17	3098,6 – 3102,0 3195,0 – 3198,4 3264,3 – 3267,4 3392,7 – 3396,5	8,3 – 14,3 2,7 – 5,7 6,1 – 8,7 1,8 – 5,5	0
B-18	-	-	-
B-19	2955,6 – 2957,1 3143,7 – 3147,3 3266,0 – 3270,0	3,1 – 8,4 5,4 – 11,5 2,6 – 6,3	0
B-20	3100,0 – 3103,0	2,9 – 11,3	0,2 – 0,3

* U intervalu pješčenjaka Okoli jezgra ne postoji

** Nedostaju podatci jezgre

5. REZULTATI POROZNOSTI IZ ANALIZA KAROTAŽNIH MJERENJA

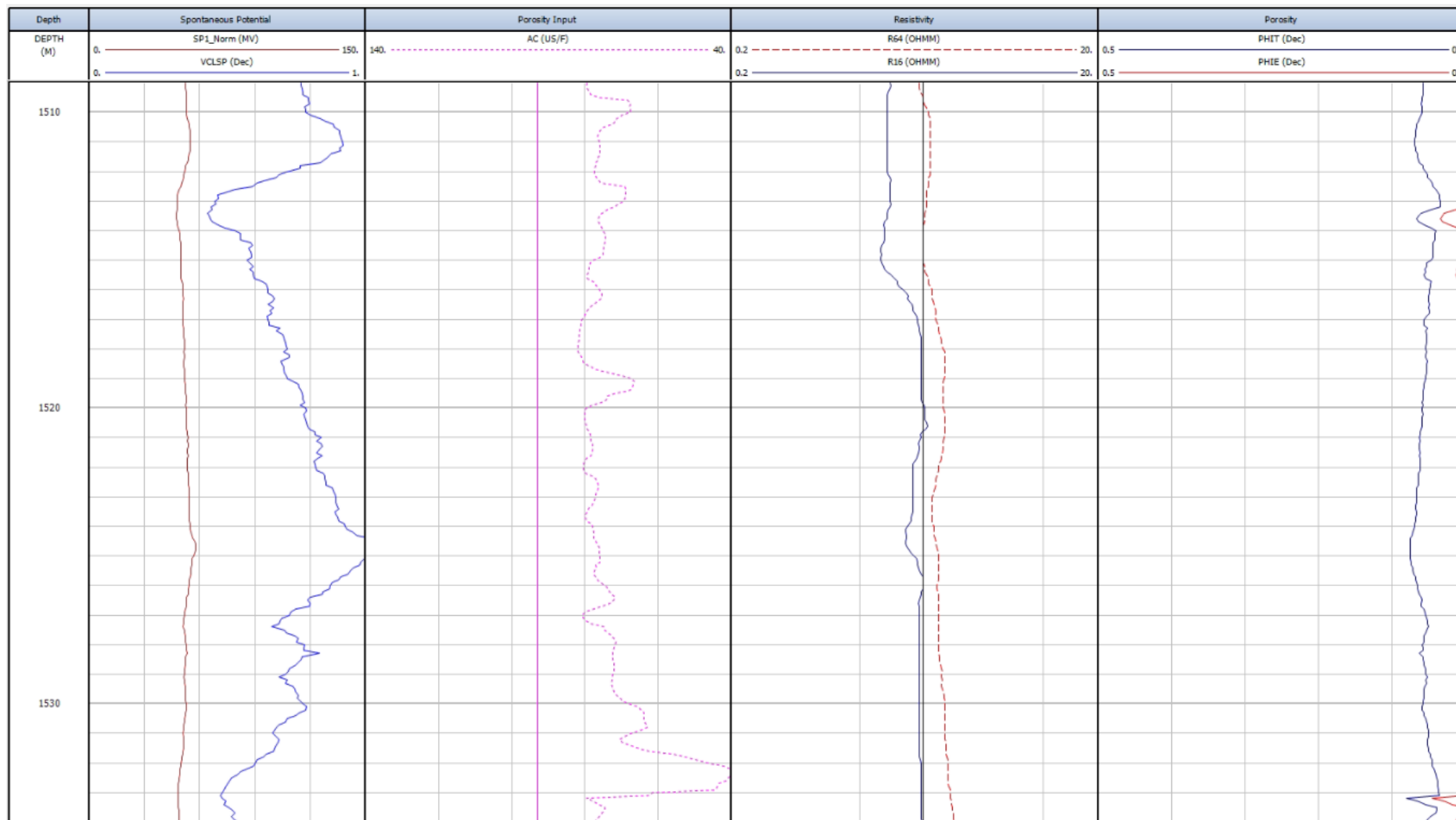
Rezultati najvjerojatnije ukupne i efektivne poroznosti za 20 istraživanih bušotina dobiveni su iz jedne od dvije opisane metode: *Mineral Solver* ili *Porosity and water saturation* (4.4.2.).

Bušotina B-10 nema podataka karotažnih krivulja (Tablica 4-3) za formaciju Okoli koja je u toj bušotini svega 30 m debljine (Tablica 4-2) te nije analizirana u daljnjem tekstu. Također, iz tablice 5-1 se vidi da pješčenjaci Okoli izostaju u bušotinama B-1, B-3, B-6, B-8 i B-14. U bušotini B-18 debljina pješčenjaka Okoli iznosi 437 m te u krovinskom intervalu od 2388 - 2600 m efektivna debljina pješčenjaka iznosi 26,7 m, ali ne postoje karotažna mjerenja kojima bi se odredila poroznost. U podinskom intervalu od 2600 – 2825 gdje postoji krivulja zvučne karotaže, efektivna debljina pješčenjaka iznosi 0 m te bušotina B-18 nije analizirana. Iz navedenih razloga, sveukupno je analizirana poroznost za 13 bušotina i rezultati su dani u nastavku.

5.1. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-2

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-2 nalaze u intervalu 1509 – 1534 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 5,2 m (Tablica 5-3). Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2). Na temelju geološkog izvještaja, član Okoli izgrađen je od svijetlosivog sitnozrnog do srednjezrnog srednje vezanog kvarc tinjčastog pješčenjaka i tamnosivog srednje tvrdog lapora.

Ukupna poroznost pješčenjaka kroz cijeli interval iznosi oko 4 – 5%, a ne mogu se izdvojiti značajniji slojevi efektivne poroznosti (Slika 5-1). U istraživanom intervalu nije uzeta mehanička jezgra (Tablica 4-4).



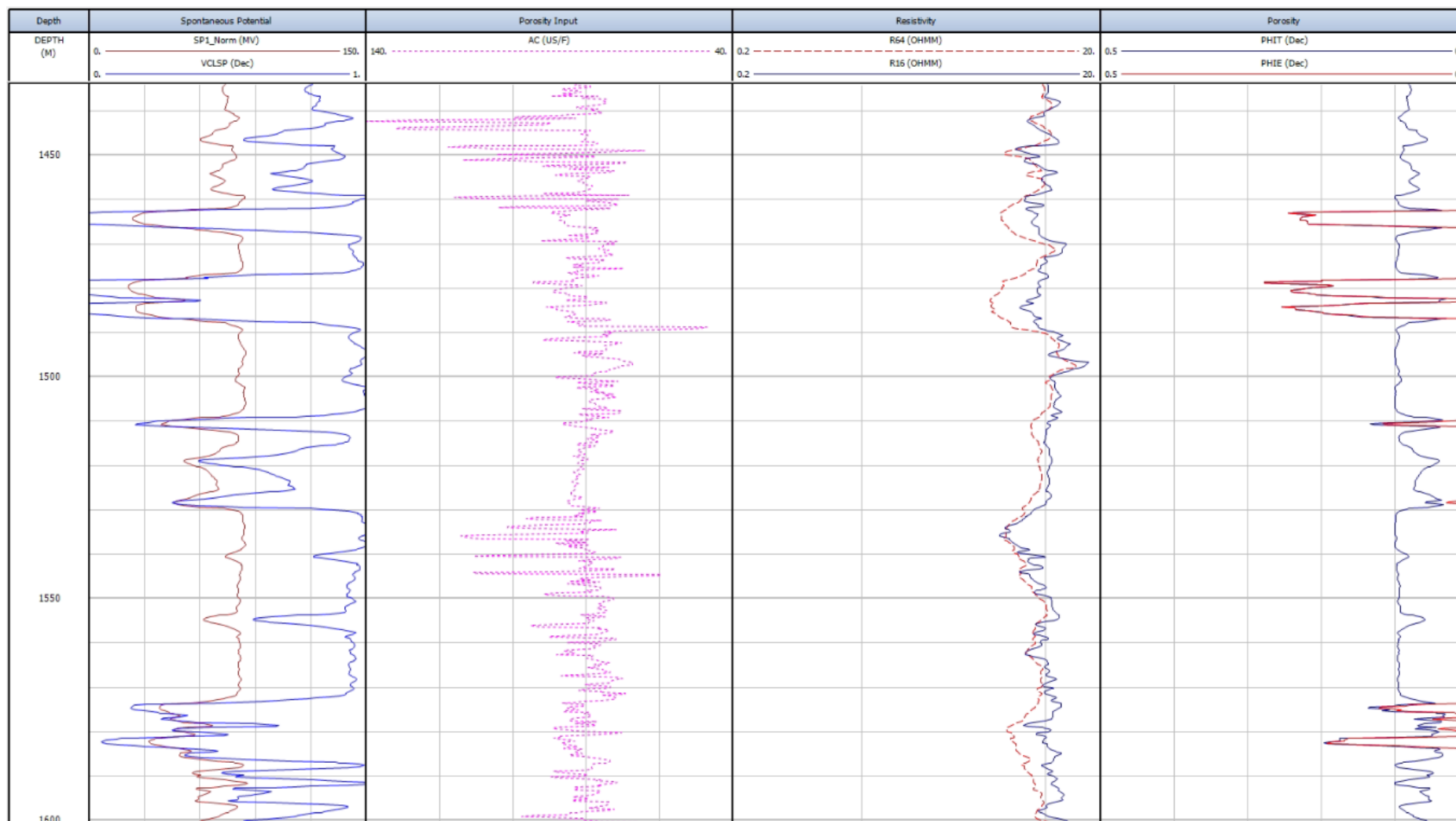
Slika 5-1. Procjena poroznosti za bušotinu B-2

5.2. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-4

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-4 nalaze u intervalu 1434 – 1601 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 26,1 m (Tablica 5-3). Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,4 (Tablica 4-2). Na temelju geološkog izvještaja, pješčenjaci su sitno do srednjezrnati, tinjčasti i srednje tvrdoće. Dok su lapori vapneni, dosta tvrdi, mjestimice pjeskoviti, s postotkom vapnenca od 47,5%.

Za analizu bušotine B-4 je korištena krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3).

U plićem dijelu formacije pješčenjaka Okoli, na dubinama 1462,1 – 1466,2 m, 1478 – 1482,5 m i 1483,7 – 1486,3 m se izdvajaju slojevi pješčenjaka efektivne poroznosti 22,8%, 24,1% i 23,8% (Slika 5-1). Nadalje, na slici 5-2 se može vidjeti da dublji slojevi pješčenjaka pokazuju niže vrijednosti poroznosti, vjerojatno zbog većeg udjela lapora. Zbog nedostatka podataka (Tablica 4-4) ne može se napraviti usporedba između laboratorijskih mjerenja na jezgri i analize modela poroznosti.



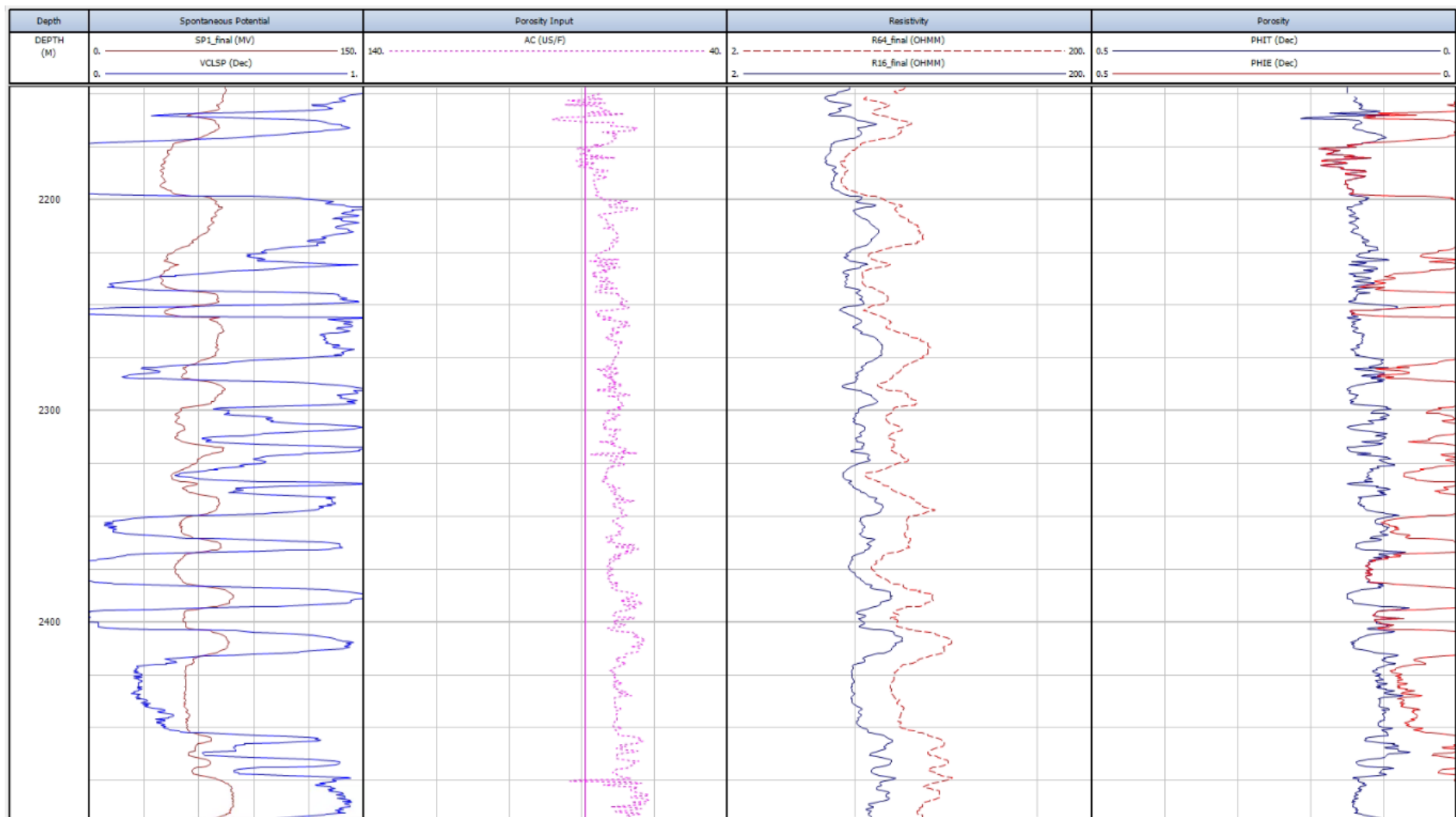
Slika 5-2. Procjena poroznosti za bušotinu B-4

5.3. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-5

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-5 nalaze u intervalu 2147 – 2493 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 170 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja, kvarc-tinčasti pješčenjaci su svjetlosivi, sitnozrnasti, srednje do čvrsto vezani, dok su lapori tamnosivi, srednje tvrdi do tvrdi. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2).

Za analizu bušotine B-5 korištena je krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3).

Kroz cijeli interval člana pješčenjaka Okoli se izdvajaju slojevi pješčenjaka (Slika 5-3). Prvi značajni sloj nalazi se u plićem dijelu intervala na dubini od 2171,5 – 2200 m te drugi, dublji sloj u intervalu od 2416,4 – 2453 m (Slika 5-3). Efektivne poroznosti im iznose oko 15% i 8% (Slika 5-3). Mehaničke jezgre su uzete na dubinama od 2176 - 2182 m i 2352 – 2359 m (Tablica 4-4). Podatci poroznosti mehaničke jezgre iznose 12,1 – 16,5% i 6,4 – 12,8%, a propusnosti 0,31 – 8,1 mD te 0,12 – 1,3 mD (Tablica 4-4). Procjena ukupne poroznosti iz analize modela poroznosti za taj dio intervala iznosi od 11,1 – 18,8% i od 8,9 – 11,2%. Efektivna poroznost za dio intervala mehaničkih jezgri iz analize modela poroznosti iznosi od 11,1 – 18,8% i 6,2 – 10,4%. Usporedbom podataka vrijednosti poroznosti dobivenih interpretacijom zvučne karotaže i vrijednosti poroznosti iz laboratorijskih mjerenja uočava se da se one razmjerno dobro podudaraju.



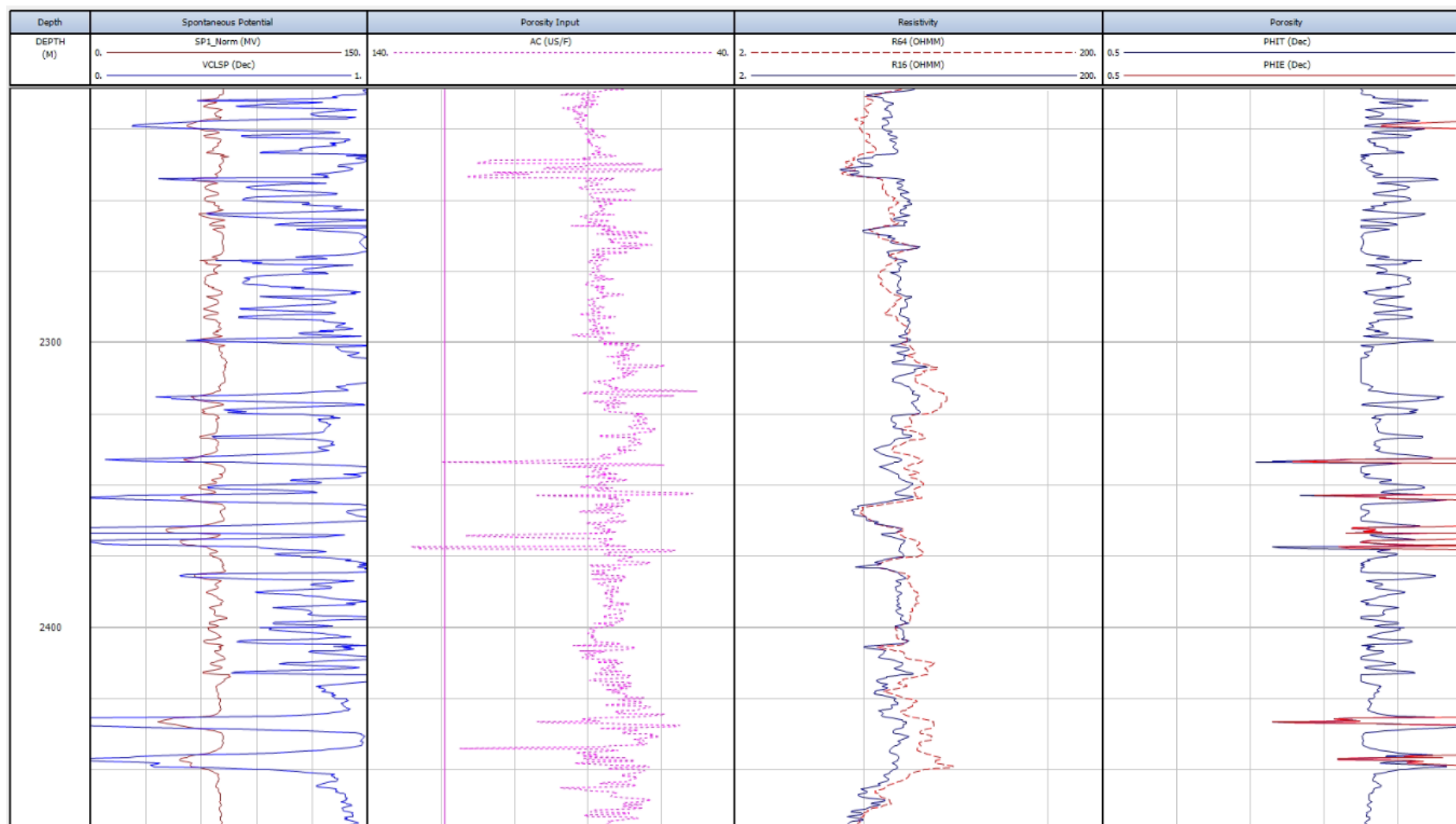
Slika 5-3. Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-5

5.4. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-7

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-7 nalaze u intervalu 2933 – 3321 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 52,3 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja, pješčenjaci su sive do svijetlo sive boje, sitnozrnasti do srednjezrnasti, slabo do srednje vezani i lako drobljivi. Mineralni sastav je sljedeći: kvarc, kalcit, tinjci i glinovito-laporovite komponente. Vezivo je vjerojatno glinovito-vapnovito. Laporu su sive do tamno sive boje, dobro uslojeni, male tvrdoće koja se s porastom dubine povećava, neravnog loma te udjela vapnenca od 19,6 – 29%. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2).

Za analizu bušotine B-7 je korištena krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3).

Cijeli interval pješčenjaka Okoli pokazuje ukupnu poroznost od 7 – 15% (Slika 5-4). U donjoj polovici člana pješčenjaka Okoli izdvaja se sedam slojeva pješčenjaka debljine od 1,5 – 4 m te efektivne poroznosti od 5 – 30% (Slika 5-4). Mehaničke jezgre su uzete na dubinama od 2254 – 2260 m i 2347,7 – 2353,7 m (Tablica 4-4). Podatci poroznosti mehaničke jezgre iznose 16,5 – 19,2% i 5,8 – 17,2% (Tablica 4-4). Procjena ukupne poroznosti iz interpretacije zvučne karotaže za taj dio intervala iznosi od 6,4 – 9% i od 6,6 – 30%. Efektivna poroznost za dio intervala mehaničkih jezgri iz analize modela poroznosti iznosi 0% i 0 – 25%. Mehaničkom jezgrom u interval od 2347,7 – 2353,7 zahvaćen je sloj pješčenjaka od 0,5 m s iznimno velikim vrijednostima poroznosti. Izuzevši ekstremne vrijednosti poroznosti, može se reći da se vrijednosti poroznosti iz analize modela podudaraju s vrijednostima poroznosti iz laboratorijskih mjerenja.

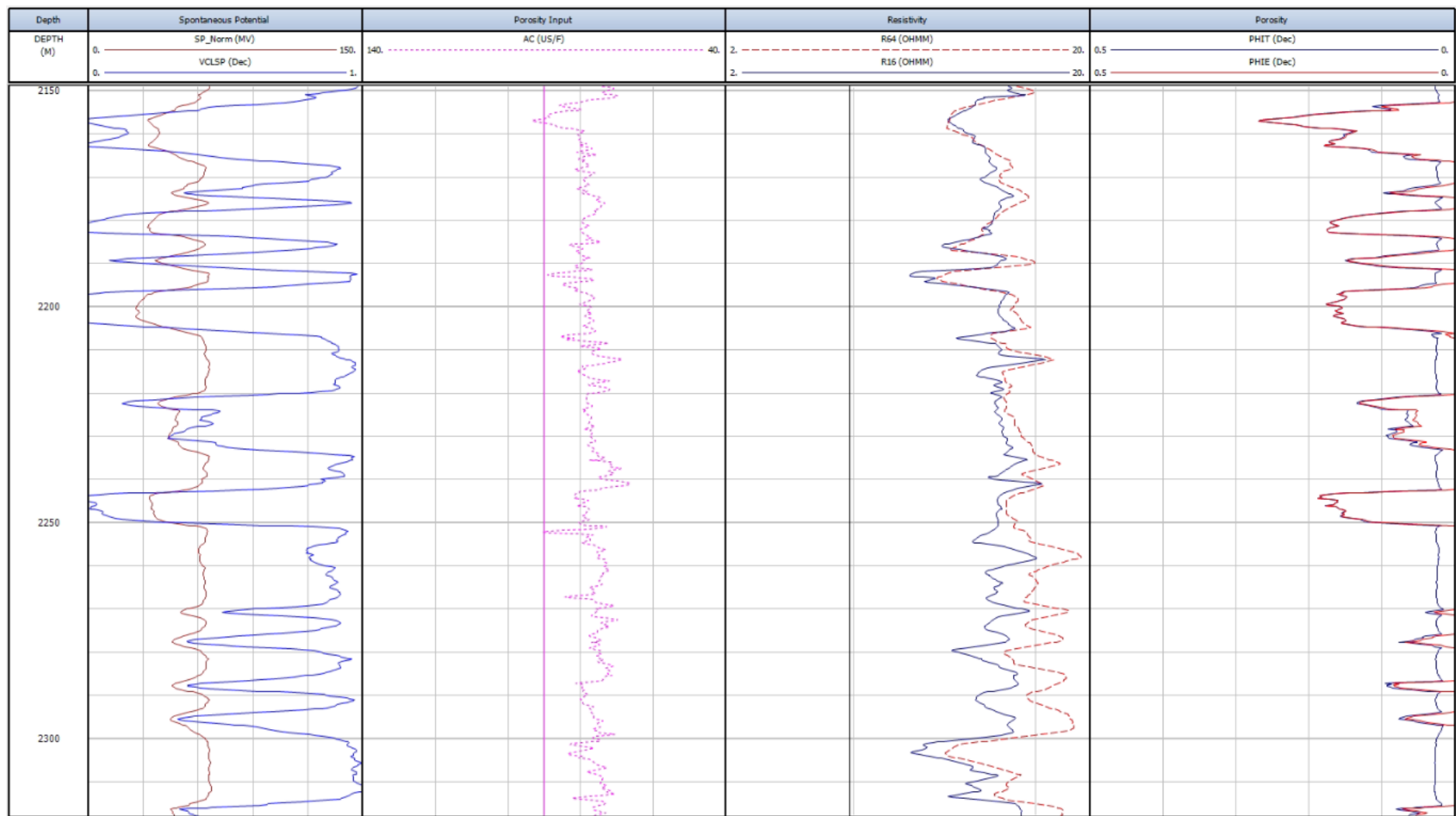


Slika 5-4. Procjena poroznosti za bušotinu B-7

5.5. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-9

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-9 nalaze u intervalu 2149 – 2318 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 69,6 m (Tablica 5-3). Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2). Na temelju geološkog izvještaja, pješčenjaci su sive, slabo vezane subgrauvake s proslojcima tinjčastog silita i siltoznog lapora. Analizom mehaničke jezgre ustanovljeno je da ih karakterizira dobra sortiranost detritusa, koji je izgrađen od kvarca, listića tinjaca, malo klorita i feldspata. Cement je mikrokristalni do zrnati kalcit.

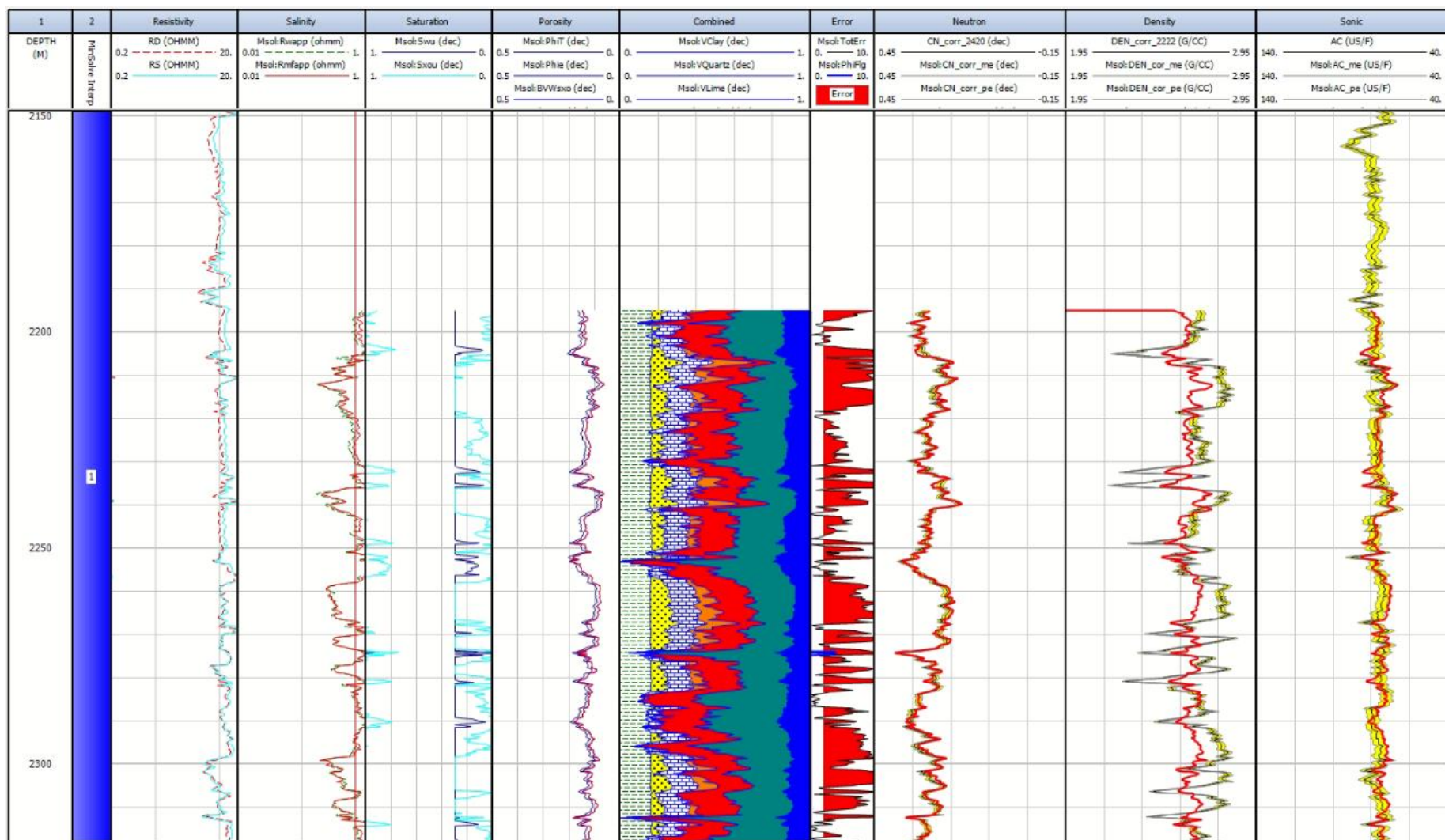
Analiza bušotine B-9 je napravljena u dva modela za intervale 2149 – 2318 m i 2195 – 2318 m. Za analizu modela *Porosity and water saturation*, potpunog intervala pješčenjaka Okoli od 2149 – 2318 m korištena je krivulja zvučne karotaže (Tablica 4-3). Duž cijelog intervala formacije pješčenjaka Okoli, a posebice u gornjoj polovici ističu se slojevi pješčenjaka s visokom efektivnom poroznosti do 27% (Slika 5-5). Model poroznosti prikazuje prosječnu efektivnu poroznost pješčenjaka od 10,3% i prosječnu ukupnu poroznost pješčenjaka od 11%.



Slika 5-5. Procjena poroznosti za bušotinu B-9 korištenjem alata *Porosity and water saturation*

Za analizu drugog modela intervala 2195 – 2318 m korištene su korigirane krivulje neutronske karotaže i karotaže gustoće te zvučna karotaža. Model poroznosti dobiven je preko alata *Mineral Solver*, gdje je postavljeno da u mineralnom sastavu sadrži kvarc, ortoklas, muskovit, biotit, kalcit, glinu i klorit. Krivulji neutronske karotaže daje se indeks pouzdanosti 0,01, krivulji karotaže gustoće 0,02 te krivulji zvučne karotaže 3. Pri tome valja naglasiti da alat *Mineral Solver* pri interpretaciji veći težinski faktor daje krivulji s nižom vrijednosti indeksa pouzdanosti. Na slici 5-6 se vidi da modelirana krivulja odlično prati krivulju neutronske karotaže i krivulju zvučne karotaže. Model poroznosti prikazuje prosječnu efektivnu poroznost pješčenjaka od 12,95% i prosječnu ukupnu poroznost pješčenjaka od 14,17% (Tablica 5-3). Poroznosti su veće nego kod prvog modela što se može pripisati krivulji karotaže gustoće. Niže vrijednosti karotaže gustoće se pojavljuju na dijelovima gdje promjer kalipera odstupa od nominalnog promjera bušotine. Pikovi i intervali koji pokazuju povećane vrijednosti poroznosti sa 12 – 13% na 17 – 18% podudaraju se s povećanim promjerom do 9,9" koji odstupa od promjera bušotine koji je u tom intervalu 8,5".

Mehanička jezgra je uzeta na dubini intervala 2156 – 2161 m (Tablica 4-4). Podatci poroznosti mehaničke jezgre iznose 13,4 – 28,5% (Tablica 4-4), dok procjena ukupne poroznosti temeljem interpretacije zvučne karotaže alatom *Porosity and water saturation*, za taj dio intervala iznosi 13,8 – 26,9%. Efektivna poroznost za dio intervala mehaničke jezgre iz analize modela poroznosti iznosi 13,4 – 26,9%. Zaključno, vrijednosti poroznosti iz analize modela *Porosity and water saturation* odlično se slažu s vrijednostima poroznosti dobivenih iz laboratorijskih mjerenja.



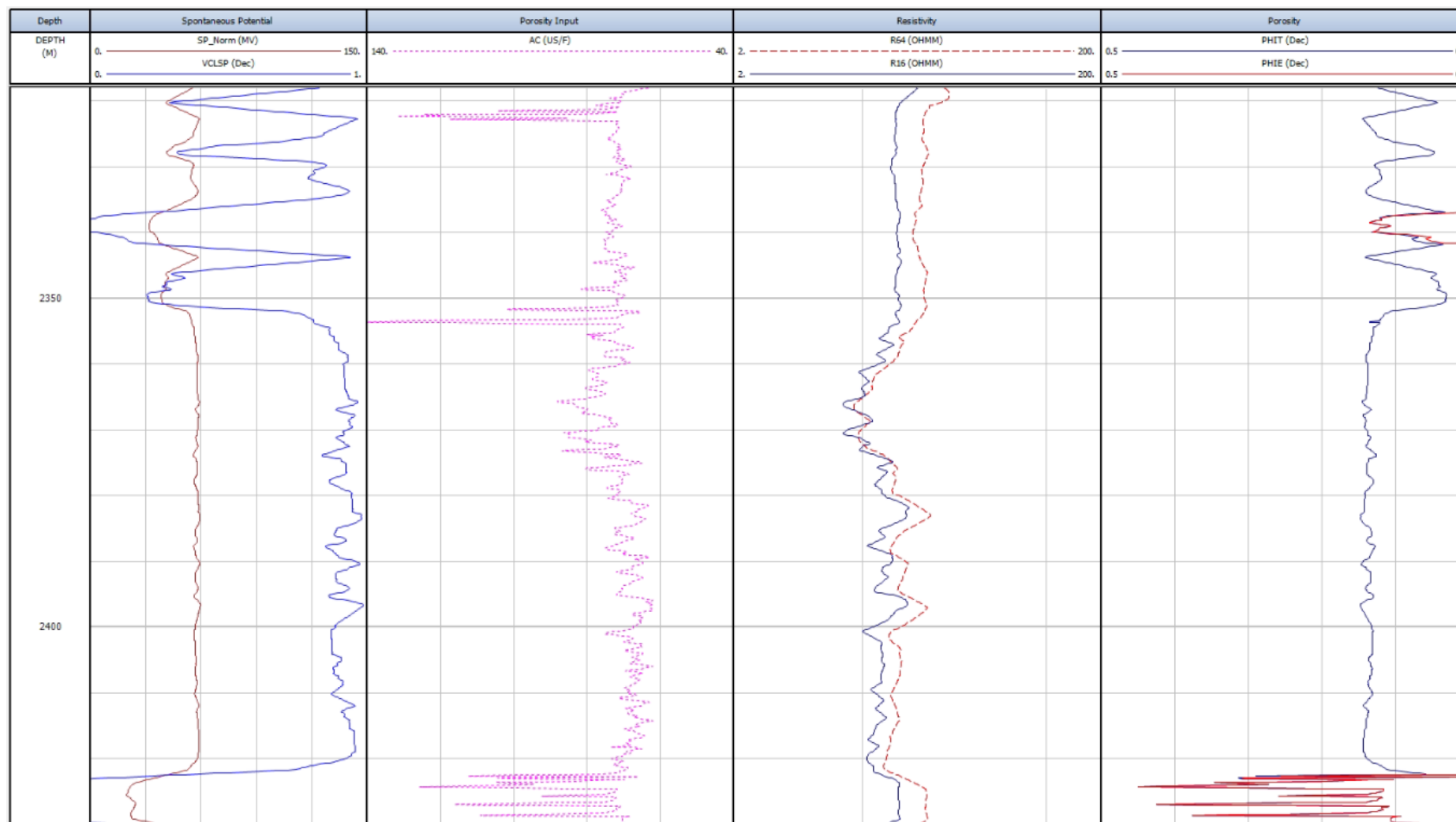
Slika 5-6. . Procjena poroznosti intervala 2195 – 2318 m za bušotinu B-9 korištenjem alata *Mineral Solver*

5.6. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-11

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-11 nalaze u intervalu od 2318 – 2430 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 24,3 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja i opisa mehaničke jezgre, član je u litološkom pogledu predstavljen svijetlosivim do sivim tinjčastim pješčenjakom. Pored pješčenjaka, član izgrađuju i tamnosivi lapori koji se izmjenjuju sa sivim pjeskovitim laporima. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,5 (Tablica 4-2).

Za analizu bušotine B-11 korištena je krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3).

U cijelom intervalu pješčenjaka Okoli ukupna poroznost se kreće između 5 – 13%. Izdvajaju se dva sloja pješčenjaka na dubini intervala 2337 – 2341,8 m i 2442,4 – 2430 m, koji imaju značajnije efektivne poroznosti do 13,1% i 33% (Slika 5-7). Mehaničke jezgre su uzete na dubinama od 2324,7 - 2328 m i 2423,5 – 2428 m (Tablica 4-4). Vrijednosti poroznosti dobivenih laboratorijskim mjerenjima na jezgri iznose 13,3 – 18,8% i 14,2 – 19,6% (Tablica 4-4). Procjena ukupne poroznosti iz interpretacije zvučne karotaže za taj dio intervala iznosi od 4,7 – 13,6% i od 11,7 – 33%. Efektivna poroznost za dio intervala mehaničkih jezgri iz analize modela poroznosti iznosi 0% i 11,7 – 33%. Vrijednosti poroznosti iz analize modela se približno podudaraju s vrijednostima poroznosti iz laboratorijskih mjerenja za plići jezgrovani interval, dok dublji jezgrovani interval pokazuje veće vrijednosti poroznosti iz analize modela uzrokovane pikom krivulje.



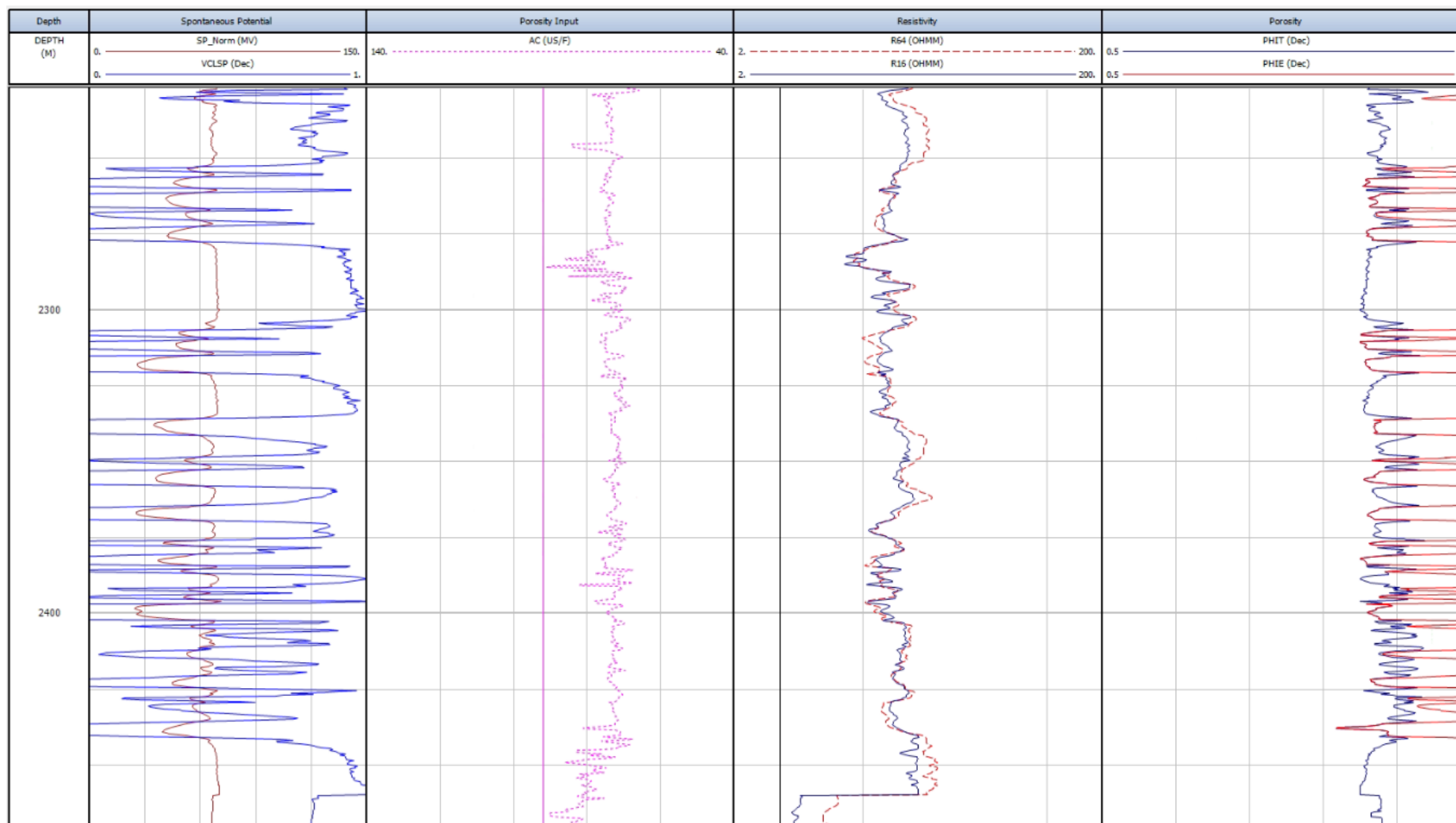
Slika 5-7. Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-11

5.7. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-12

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-12 nalaze u intervalu 2227 – 2470 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 91,9 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja, iz analize jezgre, radi se o kvarc-tinčastom pješčenjaku sive i svijetlosive boje, sitnozrnastom i siltoznom, mjestimično čvrsto vezanome. Pješčenjak je proslojen milimetarskim proslojcima tamnosivog pjeskovitog lapora. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,5 (Tablica 4-2).

Za analizu bušotine B-12 je korištena krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3).

Kroz cijeli interval pješčenjaka Okoli se izdvajaju slojevi pješčenjaka debljine od 1,5 – 6 m te maksimalne efektivne poroznosti do 18,9% (Slika 5-8). Mehaničke jezgre su uzete na dubinama od 2228,6 – 2233,2 m i 2312,3 – 2319,3 m (Tablica 4-4). Podatci poroznosti mehaničke jezgre iznose 13,3 – 15,4% i 7,3 – 17,5% (Tablica 4-4). Procjena ukupne poroznosti iz analize karotaže za taj dio intervala iznosi od 5,8 – 11,2% i od 6,8 – 14,5%. Efektivna poroznost za dio intervala mehaničkih jezgri iz analize modela poroznosti iznosi 0 – 7,11% i 1,5 – 14,5% (Slika 5-8). Vrijednosti poroznosti iz analize karotaže niže su u odnosu na vrijednosti poroznosti iz laboratorijskih mjerenja, što je osobito naglašeno za plići interval. Granice pješčenjaka i lapora u geološkom izvješću bušotine, a koje su postavljene interpretacijom litološkog sastava mehaničke jezgre na dubini od 2228,6 – 2233,2 odgovaraju granicama pješčenjaka i lapora iz analize karotaže, odnosno temeljem procjene sadržaja gline uz postavljenu graničnu vrijednost od 0,5.



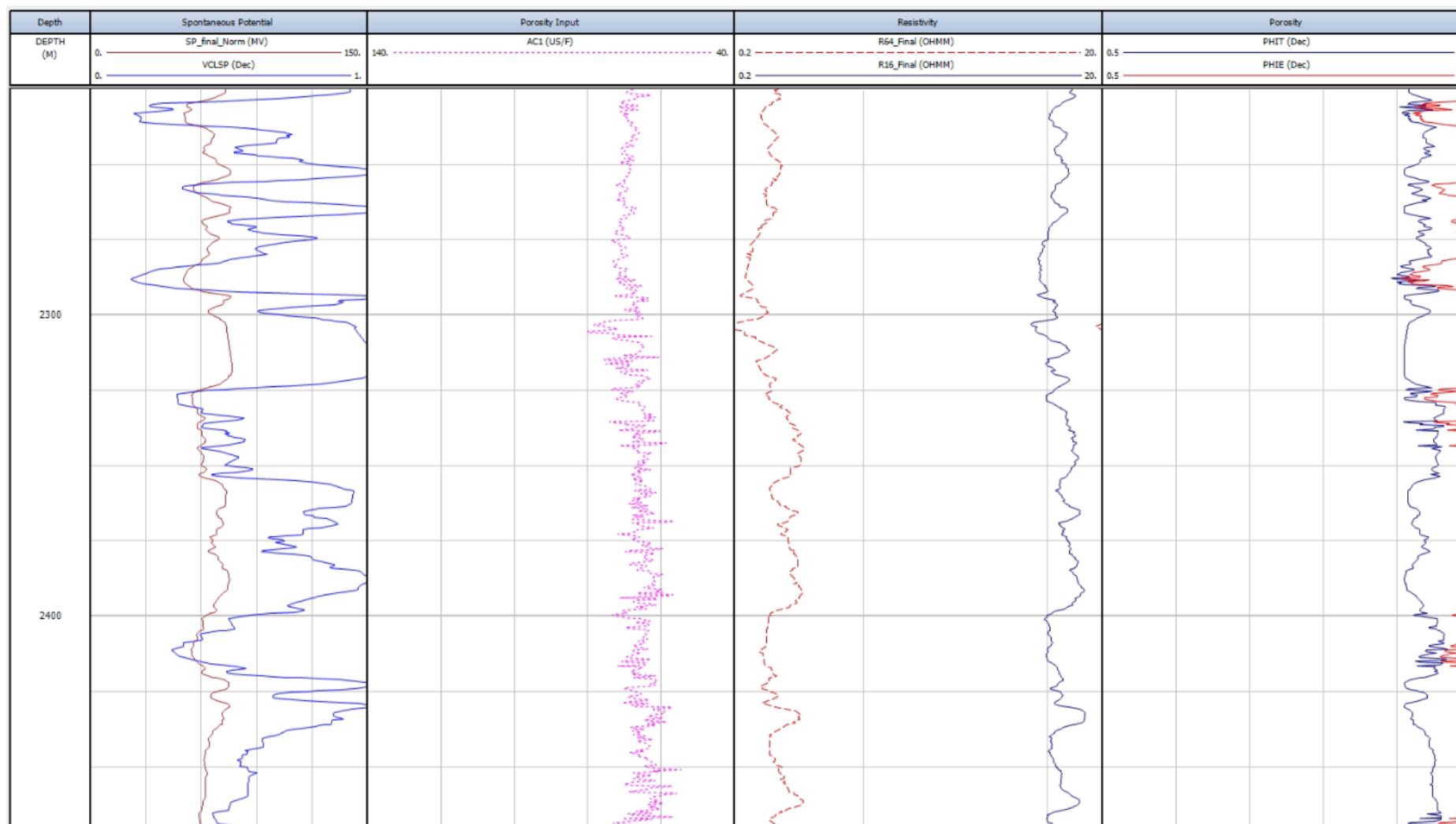
Slika 5-8 Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-12

5.8. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-13

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-13 nalaze u intervalu 2225 – 2470 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka unutar člana iznosi 112,2 m (Tablica 5-3). Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2). Na temelju geološkog izvještaja, zastupljeni su kvarc-tinčasti pješčenjaci sive boje, sitno do srednjeznasti, srednje vezani, dok su lapori tamosivi i tvrdi. Uspoređujući s drugim bušotinama, bušotina B-13 pokazuje najveći udio efektivne debljine pješčenjaka u formaciji pješčenjaka Okoli od 46%

Za analizu bušotine B-13 je korištena krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3).

Kroz cijeli interval se izdvajaju slojevi pješčenjaka u kojima je analizom karotaže utvrđena efektivna poroznost. Dva značajnija intervala nalaze se u plićem dijelu člana pješčenjaka Okoli, na dubinama 2228,5 – 2237,3 m i 2281,4 – 2292,1 m s efektivnom poroznošću do 7,7% i 9% (Slika 5-9). Te su poroznosti višestruko veće nego prosječna efektivna poroznost pješčenjaka iz cjelovitog intervala. Mehanička jezgra je uzeta na dubini intervala 2228,5 – 2233,2 m (Tablica 4-4) te se dubinski podudara s jednim od dva značajnija intervala pješčenjaka iz analize modela poroznosti. Zbog nedostatka podataka ne može se napraviti usporedba između laboratorijskih mjerenja na jezgri i analize modela poroznosti.



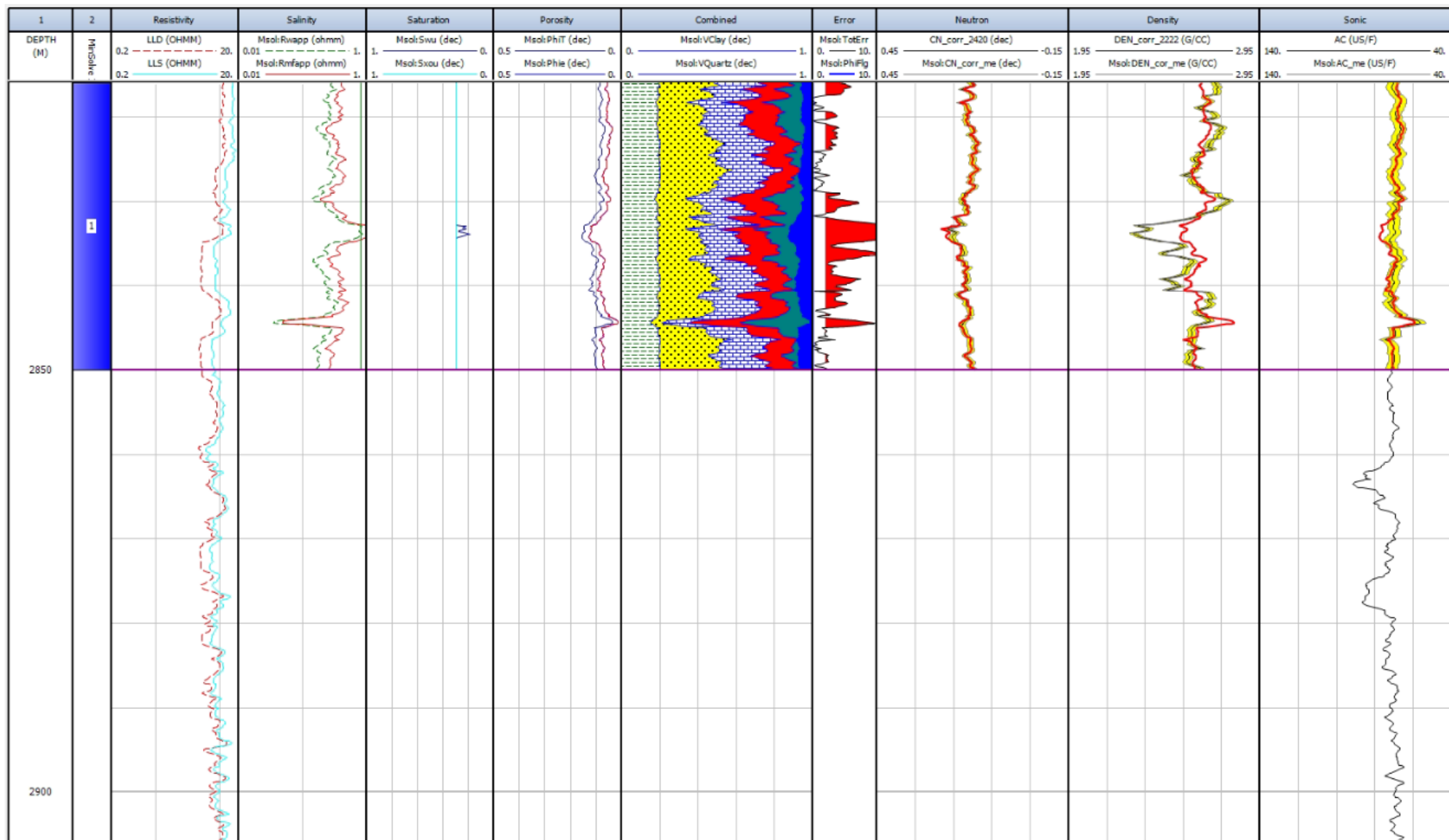
Slika 5-9. Procjena poroznosti za bušotinu B-13

5.9. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-15

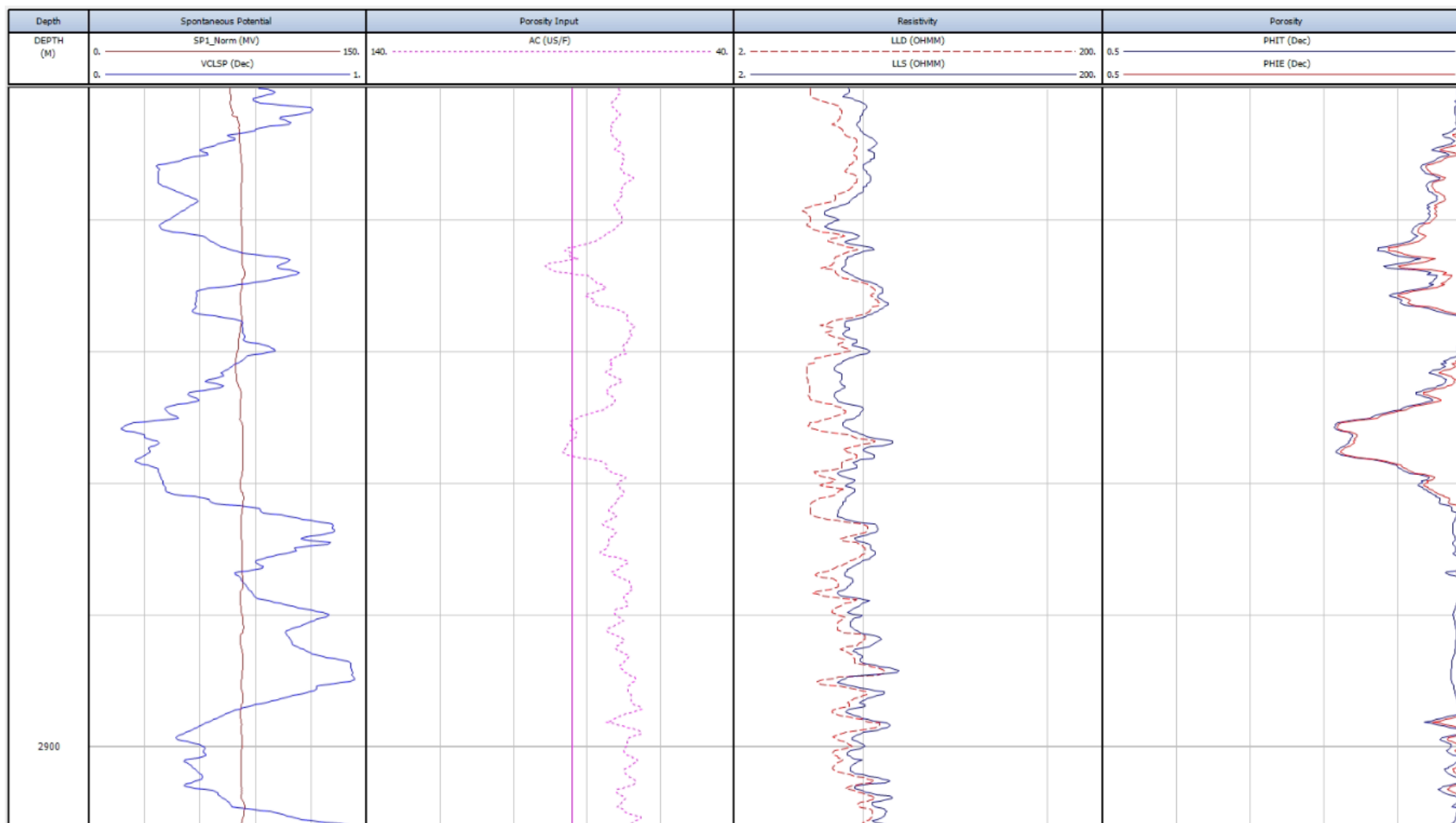
Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-15 nalaze u intervalu 2816 – 2906 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 34,9 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja, pješčenjaci Okoli izgrađeni su od svjetlosivih srednje zrnastih kvarc-tinčastih pješčenjaka i tamnosivih srednje tvrdih lapora s kalcitnim žilama. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,5 (Tablica 4-2).

Analiza poroznosti pješčenjaka Okoli u bušotini B-15 je provedena korištenjem dva modela za dva različita intervala 2816 – 2850 m i 2850 – 2906 m. Za analizu prvog intervala 2816 – 2850 m korištene su korigirane krivulje neutronske karotaže i karotaže gustoće te zvučna karotaža (Tablica 4-3). Model poroznosti dobiven je preko alata *Mineral Solver*, gdje je postavljeno da u mineralnom sastavu sadrži kvarc, muskovit, biotit, kalcit i glinu. Krivulji neutronske karotaže dana je najveća pouzdanost, krivulji karotaže gustoće manja pouzdanost, dok je najniža pouzdanost dana krivulji zvučne karotaže 3. Unutar analiziranog intervala efektivna debljina pješčenjaka iznosi 7,3 m, a model poroznosti prikazuje prosječnu ukupnu poroznost pješčenjaka od 4 – 15% dok se vrijednost efektivne poroznosti kreće između 1 i 12% (Slika 5-10).

Za analizu drugog modela *Porosity and water saturation*, intervala 2850 – 2906 m korištena je krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala (Tablica 4-3). Izdvajaju se dva sloja pješčenjaka na dubini intervala 2853,4 – 2867,5 m i 2870,7 – 2881,8 m (Slika 5-11), koji imaju značajnije efektivne poroznosti do 11,2% i 17,8% (Slika 5-11). U bušotini B-15 nije uzeta jezgra iz člana pješčenjaka Okoli.



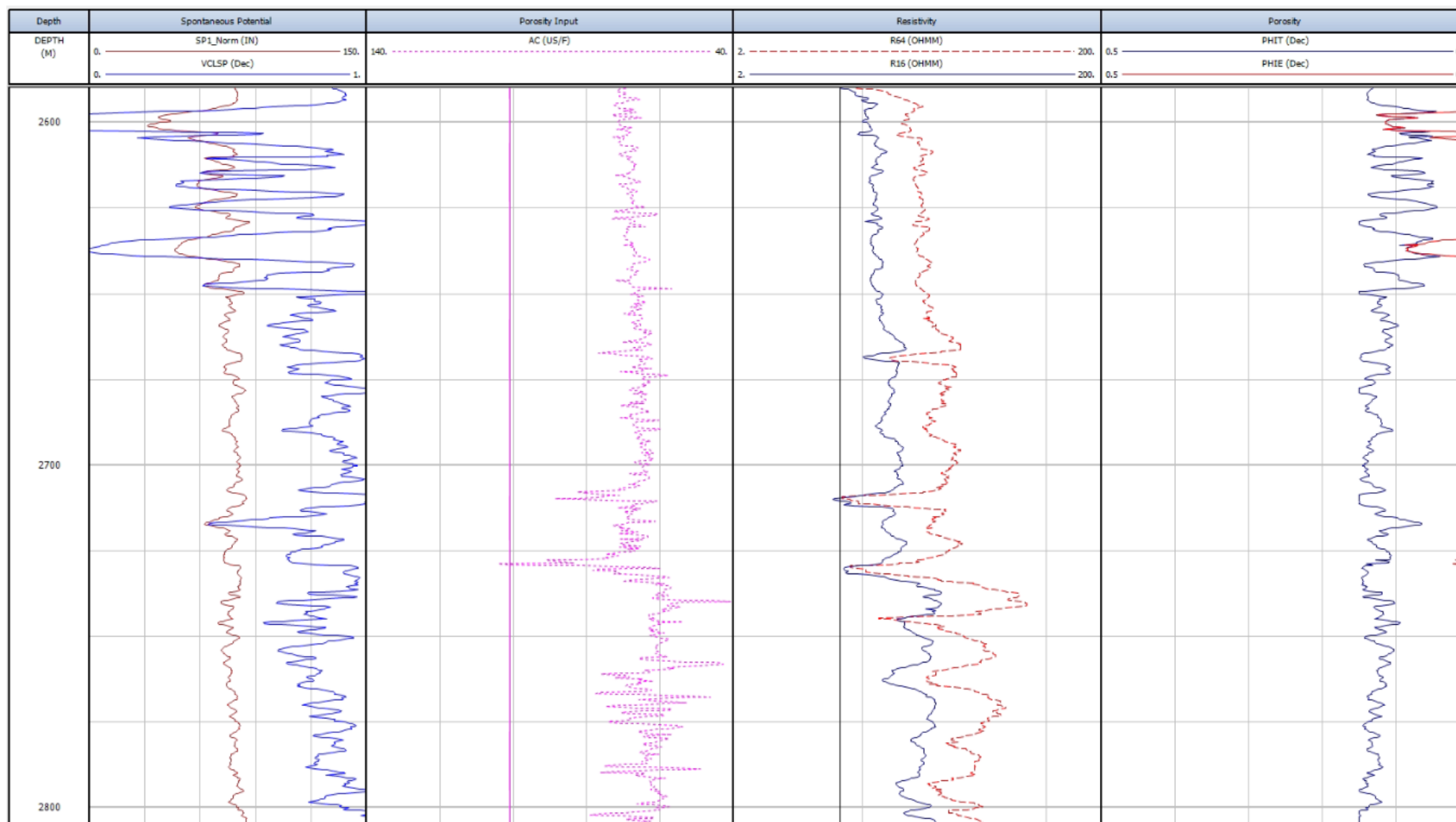
Slika 5-10. Procjena poroznosti intervala 2816 – 2850 m za bušotinu B-15 korištenjem alata *Mineral Solver*



Slika 5-11. Procjena poroznosti intervala 2850 – 2906 m za bušotinu B-15 korištenjem alata *Porosity and water saturation*

5.10. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-16

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-16 nalaze u intervalu 2595 – 2966 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka je zbog nedostatka podataka izračunata za interval 2595 – 2805 m te iznosi 31,7 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja, pješčenjaci su čvrsti, s jasno izraženom slojevitošću i zalaporeni. U geološkom izvještaju bušotine navodi se da je na EK dijagramu vidljivo 8 intervala pješčenjaka, čija je ukupna debljina 320,5 m. Iako je efektivna debljina pješčenjaka izračunata za 161 m kraći interval zbog nedostatka mjerenja karotaže spontanog potencijal, uspoređujući razliku između izračunate efektivne debljine od 31,7 m i procijenjene ukupne debljine pješčenjaka iz EK dijagrama od 320,5 m vidljiva je velika razlika. Razlog je u interpretaciji krivulje spontanog potencijala za procjenu volumena gline, gdje je ostatak intervala u ovom radu interpretiran kao pjeskoviti lapor, a ne kao pješčenjak iz geološkog izvještaja. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2). Za analizu bušotine B-16 je korištena krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3). U plićem dijelu člana pješčenjaka Okoli, na dubinama 2597 – 2603 m i 2634,2 – 2639,8 m se izdvajaju slojevi pješčenjaka efektivne poroznosti 11% i 7,6% (Slika 5-12). Dublji slojevi pješčenjaka, kao i ostatak intervala pješčenjaka Okoli pokazuju stalnu ukupnu poroznost od oko 12%, dok efektivne poroznosti praktički nema (Slika 5-12). Mehanička jezgra je uzeta na dubini intervala 2676,2 – 2679 m (Tablica 4-4). Podatci poroznosti dobiveni laboratorijskim mjerenjima na jezgrama iznose 10,2 – 10,9% (Tablica 4-4), dok procjena ukupne poroznosti iz analize modela poroznosti za taj dio intervala iznosi 13,1 – 15%. Efektivna poroznost za dio intervala mehaničke jezgre iz analize modela poroznosti iznosi 0%. Razlog izostanka efektivne poroznosti najvjerojatnije je vezan za krivulju spontanog potencijala, temeljem koje je izračunat volumen gline, jer krivulja zvučne karotaže ukazuje na intervale usporavanja (dublje od 2700 m na slici 5-12) koji indiciraju porozniju sredinu. Naime, krivulja SP-a u intervalu dubljem od 2650 m pokazuje vrlo male otklone prema negativnome potencijalu. Ovo je primjer kako pogreška u mjerenju može dovesti do pogreške u interpretaciji. Naime, dok se korekcije krivulja koje se odnose na njihovu inverziju razmjerno lako provode, nije lako provesti rekaliibraciju krivulje, jer nema podataka koji bi upućivali na razmjer potrebne rekaliibracije. Zaključno, cjelokupni rezultati i analize volumena gline te posljedično izračunate efektivne debljine, kao i vrijednosti poroznosti dobivene interpretacijom karotaže ne mogu se smatrati pouzdanima.



Slika 5-12. Procjena poroznosti za bušotinu B-16

5.11. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-17

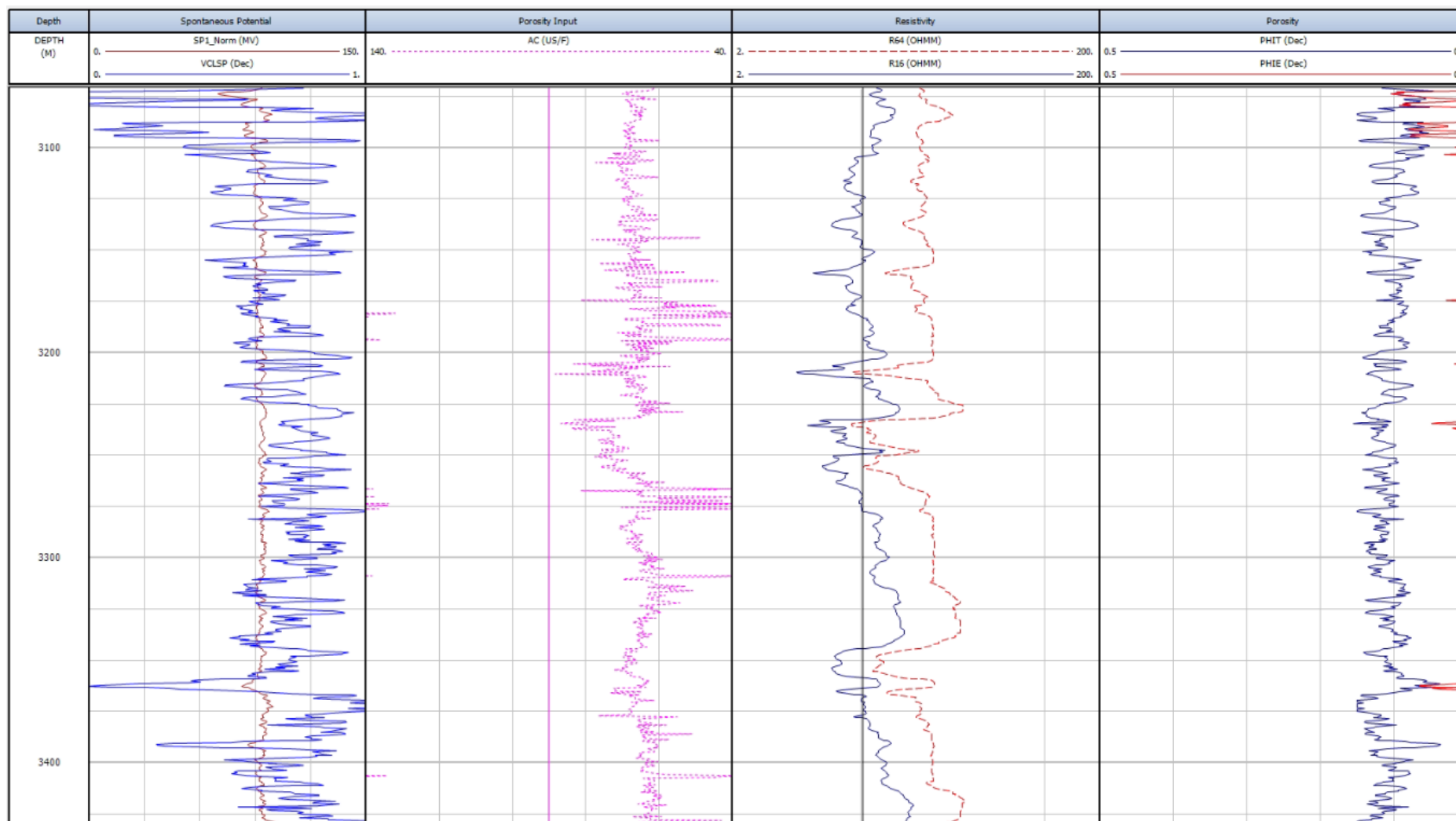
Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-17 nalaze u intervalu 3071 – 3430 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka iznosi 86,3 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja, pješčenjaci su svijetlo sive boje, sitno do srednjeznasti, tvrdi te sadrže tinjce. Pješčenjak sadrži proslojke lapora, debljine od par milimetara do nekoliko centimetara. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2).

Za analizu bušotine B-17 je korištena krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3).

U plićem dijelu formacije pješčenjaka Okoli, u intervalu 3072 – 3095 m nalaze se slojevi pješčenjaka od 2-3 m, koji imaju najviše vrijednosti efektivne poroznosti 4 – 8%. Dublji slojevi pješčenjaka pokazuju manje-više ujednačenu ukupnu poroznost od oko 12%, bez značajne efektivne poroznosti (Slika 5-13). Mehaničke jezgre su uzete na dubinama intervala 3098,6 – 3102 m, 3195 – 3198,4 m, 3264,3 – 3267, 4 m i 3392,7 – 3396,5 m (Tablica 4-4). Podatci poroznosti mjerene na jezgrama i procijenjene ukupne i efektivne poroznosti iz analize modela poroznosti prikazani su u tablici 5-1. Uspoređeni podatci pretežito pokazuju veće vrijednosti procijenjene poroznosti iz analize modela poroznosti nego iz mjerenja na jezgrama. Efektivna poroznost za analizirane intervale uglavnom iznosi 0%. Svi intervali s kojih je uzeta mehanička jezgra su ispod granične vrijednosti volumena gline od 0,6, što ukazuje da je riječ o laporovitim pješčenjacima.

Tablica 5.1. Podatci poroznosti mehaničkih jezgri i procijenjene ukupne i efektivne poroznosti iz analize modela poroznosti

Dubina intervala (m)	Poroznost jezgre (%)	Ukupna poroznost analize (%)	Efektivna poroznost analize (%)
3098,6 – 3102,0	8,3 – 14,3	5,4 – 9,8	0
3195,0 – 3198,4	2,7 – 5,7	7,8 – 10,1	0
3264,3 – 3267,4	6,1 – 8,7	10,4 – 14,1	0
3392,7 – 3396,5	1,8 – 5,5	7,6 – 12,6	0



Slika 5-13. Procjena poroznosti za bušotinu B-17

5.12. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-19

Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-19 nalaze u intervalu 3071 – 3430 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka iznosi 172,3 m (Tablica 5-3). Na temelju geološkog izvještaja, pješčenjaci su svijetlo sive boje, u sebi sadrže tinjce čija količina varira. Dosta su tvrdi i neravnog loma a u iznimnim slučajevima pločastog. Prema fizičkim osobinama pješčenjaci su nepropusni i slabog poroziteta. Granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu iznosi 0,6 (Tablica 4-2). Za analizu bušotine B-19 je korištena krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala od interesa (Tablica 4-3). Model poroznosti je izračunat u intervalu od 3071 – 3350 m, jer dublje od toga nedostaje karotaža spontanog potencijala i zvučna karotaža.

Cijeli interval pješčenjaka Okoli pokazuje ukupnu poroznost od 3 – 15%. U plićem dijelu formacije pješčenjaka Okoli na dubini od 3077,5 – 3080 m, te u dubljim slojevima pješčenjaka debljine slojeva od 3 – 6 m, ističu se pješčenjaci značajnije efektivne poroznosti od 4 – 10% (Slika 5-14). Ostatak intervala ima efektivnu poroznost pješčenjaka 0%. Mehaničke jezgre su uzete na dubinama intervala 2955,6 – 2957,1 m, 3143,7 – 3147,3 m, i 3266 – 3270 m (Tablica 4-4). Rezultati laboratorijskih mjerenja na mehaničkim jezgrama ukazuju na njihovu nepropusnost te iznose 0 mD. Podatci laboratorijskih mjerenja poroznosti na jezgrama i procijenjene ukupne i efektivne poroznosti iz analize modela poroznosti prikazani su u tablici 5-2. Uspoređeni podatci pokazuju slične vrijednosti procijenjene ukupne poroznosti iz analize karotaže i mjerenja na jezgrama za dva plića jezgrovana intervala. Za najdublji jezgrovani interval ukupna poroznost prikazuje nešto veće vrijednosti nego poroznost izmjerena na jezgrama. Veliki dio jezgre prema interpretaciji sadržaja gline ima vrijednost sadržaja gline iznad granične vrijednosti od 0,6, što ukazuje da je riječ o pjeskovitim laporima. Posljedično, efektivna poroznost za analizirane intervale iznosi 0%, što je u raskoraku s mjerenjima na jezgrama.

Tablica 5.2. Podatci poroznosti mehaničkih jezgri i procijenjene ukupne i efektivne poroznosti iz analize modela poroznosti

Dubina intervala (m)	Poroznost jezgre (%)	Ukupna poroznost analize (%)	Efektivna poroznost analize (%)
2955,6 – 2957,1	3,1 – 8,4	5,9 – 8,3	0
3143,7 – 3147,3	5,4 – 11,5	9,9 – 12,2	0
3266,0 – 3270,0	2,6 – 6,3	8,5 – 12,5	0



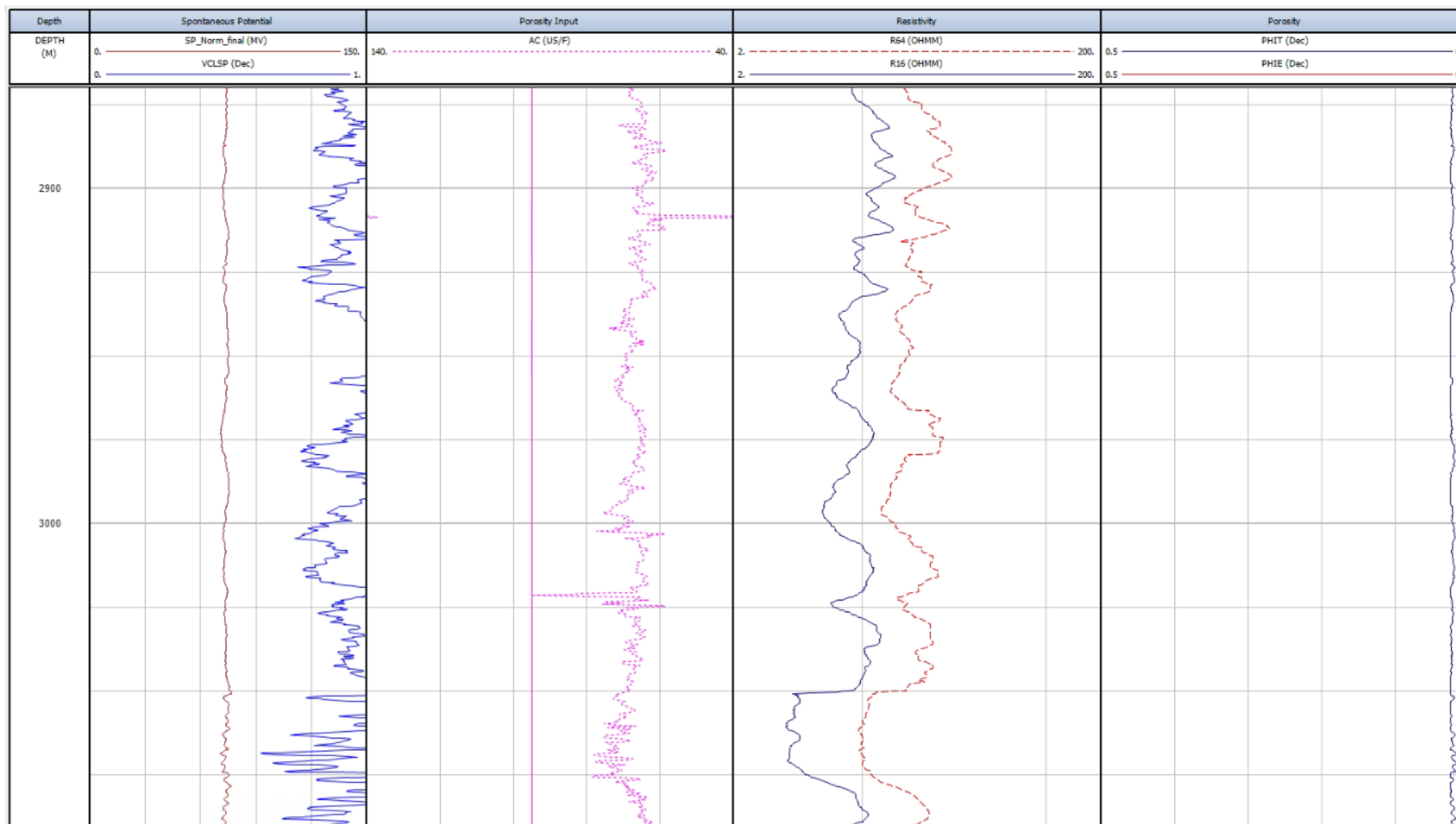
Slika 5-14. Procjena poroznosti intervala za bušotinu B-19

5.13. Rezultati analiza poroznosti za bušotinu B-20

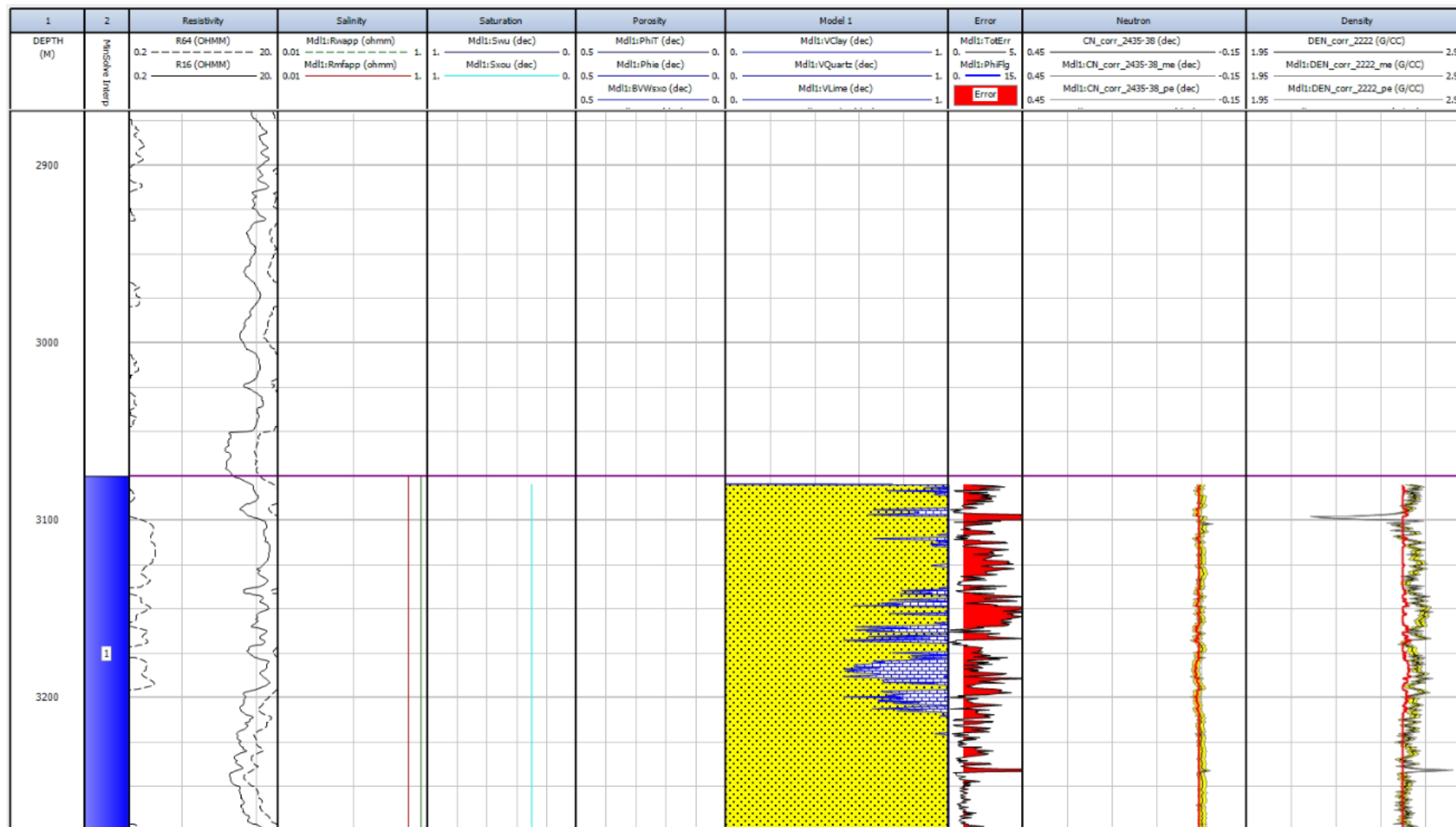
Pješčenjaci Okoli se u bušotini B-20 nalaze u intervalu 2870 – 3275 m (Tablica 4-2), a sama efektivna debljina pješčenjaka u intervalu iznosi 37,7 m (Tablica 5-3). Uzeta je granična vrijednost volumena gline za analiziranu bušotinu od 0,6 (Tablica 4-2). Na temelju geološkog izvještaja, krovinski dio pješčenjaka Okoli je zalaporen tamnosivim i sivim srednjjetvrđim do tvrdim laporima. Kvarc-tinčasti pješčenjak je sitnozrnast, gust i nepropustan, što je utvrđeno jezgrovanjem.

Analiza bušotine B-20 je napravljena korištenjem dviju metoda za dva različita intervala 2870 – 3090 m i 3090 – 3275 m. Za analizu prvog intervala 2870 – 3090 m korištena je krivulja zvučne karotaže, dok karotaža gustoće i neutronska karotaža nisu mjerene unutar intervala (Tablica 4-3). U njemu nisu interpretirani pješčenjaci, što odgovara geološkom opisu krovinskog dijela člana pješčenjaka Okoli, a model poroznosti prikazuje prosječnu ukupnu poroznost člana od 2% dok efektivne poroznosti nema (Slika 5-15). Svrha ove analize je bila potvrda interpretacije efektivne debljine pješčenjaka temeljem sadržaja gline. Naime, navedenom analizom u promatranome intervalu nisu utvrđeni pješčenjaci, što je potvrđeno i analizom poroznosti (navedeni interval nema izraženu efektivnu poroznost).

Za analizu drugog intervala 3090 – 3275 m korištene su korigirane krivulje neutronske karotaže i karotaže gustoće, dok zvučna karotaža nije mjerena unutar toga intervala. Unutar ovog intervala pješčenjak je prisutan s ukupnom efektivnom debljinom od 37,7 m. Model poroznosti dobiven je preko alata *Mineral Solver*, gdje je postavljeno da u mineralnom sastavu sadrži kvarc, ortoklas, muskovit, biotit, kalcit i glinu. Krivulji neutronske karotaže dana je veća pouzdanost nego krivulji karotaže gustoće. Na slici 5-16 vidi se da modelirana krivulja bolje prati krivulju neutronske karotaže, nego krivulju karotaže gustoće. Model poroznosti prikazuje prosječnu efektivnu poroznost pješčenjaka od 0,01% i prosječnu ukupnu poroznost pješčenjaka od 0,05% (Tablica 5-3). Izrazito male poroznosti duž cijelog intervala ukazuju na visoki stupanj zalaporenosti pješčenjaka. Mehanička jezgra je uzeta na dubini intervala 3100 – 3103 m (Tablica 4-4). Podatci laboratorijskog mjerenja poroznosti mehaničke jezgre iznose 2,9 – 11,3% (Tablica 4-4), dok procjena ukupne poroznosti iz analize karotaže za taj dio intervala iznosi 0,5 – 1,4%. Efektivna poroznost za dio intervala mehaničke jezgre iz analize modela poroznosti postoji samo na dubini 3101,6 m i iznosi 0,1%. Vrijednosti poroznosti iz analize modela su znatno niže nego vrijednosti poroznosti iz laboratorijskih mjerenja.



Slika 5-15. Procjena poroznosti intervala 2870 – 3090 m za bušotinu B-20



Slika 5-16. Procjena poroznosti intervala 3090 – 3275 m za bušotinu B-20

5.14. Sažetak rezultata

Ukupni proračunski podatci su obrađeni i analizirani u računalnom programu Microsoft Excel. Dobivena je efektivna debljina pješčenjaka, prosječna efektivna poroznost i prosječna ukupna poroznost pješčenjaka, na temelju analize modela poroznosti te su prikazani u tablici 5-3.

Tablica 5.3. Efektivna debljina pješčenjaka, prosječna efektivna poroznost i prosječna ukupna poroznost pješčenjaka procijenjenih interpretacijom karotažnih mjerenja za 20 istraživanih bušotina

Bušotina	Efektivna debljina pješčenjaka (m)	Prosječna efektivna poroznost (%)	Prosječna ukupna poroznost (%)
B-1	0	-	-
B-2	5,2	0,70	4,6
B-3	0	-	-
B-4	26,1	11,44	13,04
B-5	170,0	7,92	11,42
B-6	0	-	-
B-7	52,3	4,15	9,48
B-8	0	-	-
B-9	69,9	12,95	14,17
B-10	0	-	-
B-11	24,3	7,45	10,16
B-12	91,9	9,89	11,68
B-13	112,2	1,7	5,7
B-14	0	-	-
B-15	34,9	6,53	7,88
B-16	31,7	2,96	7,44
B-17	86,3	1,09	7,72
B-18	0	-	-
B-19	172,3	1,63	6,21
B-20	37,7	0,01	0,05

6. DISKUSIJA

Pouzdanost vrijednosti poroznosti iz istraživanih bušotina zapadnog dijela Savske depresije smanjena je zbog nedostatka podataka karotažnih mjerenja. Od 20 istraživanih bušotina, samo dvije istraživane bušotine (B-3 i B-8) (Tablica 4-3) imaju sve krivulje karotažnih mjerenja potrebne za analizu poroznosti alatom *Mineral Solver*, dok jedna bušotina (B-10) nije imala nikakve podatke karotažnih mjerenja u intervalu pješčenjaka Okoli. Kod procjene volumena gline za dvije bušotine (B-3 i B-8) koje su imale sve potrebne krivulje karotažnih mjerenja, analizom sadržaja gline nisu utvrđeni pješčenjaci unutar intervala člana pješčenjaka Okoli, stoga nisu analizirane u ovom radu. Također, efektivne debljine nisu definirane ni u još 4 bušotine (B-1, B-6, B-14 i B-18) zbog čega dalje nisu analizirane. Analiza poroznosti ostalih bušotina se temeljila na uporabi jednostavnijeg alata *Porosity and water saturation* i krivulji zvučne karotaže kao osnovnog ulaznog podatka, zbog čega je pouzdanost rezultata umanjena. Nedostatak krivulja neutronske karotaže i karotaže gustoće utječe na kvalitetu same analize, jer se najbolji rezultati postižu interpretacijom dvije ili svih triju „karotaža poroznosti“.

Kod gotovo svih analiziranih bušotina, efektivne debljine pješčenjaka unutar člana pješčenjaci Okoli su manje nego što su iz geološkog izvješća za svaku od tih bušotina. Razlog izostanka ili smanjene efektivne debljine pješčenjaka je najvjerojatnije vezan uz krivulju spontanog potencijala. Ona se koristila kao metoda procjene sadržaja gline, umjesto standardne gama karotaže, jer pješčenjaci Okoli sadrže dosta alkalijских feldspata kojima kalij daje određenu prirodnu radioaktivnost. U određenim slučajevima krivulja zvučne karotaže ukazivala je na značajniji interval usporavanja koji indicira porozniju sredinu, dok je krivulja SP-a pokazivala visoku vrijednost sadržaja gline što ukazuje na nepropusni sloj. Stoga se cjelokupni rezultati i analize sadržaja gline te posljedično izračunate efektivne debljine, kao i vrijednosti poroznosti dobivene interpretacijom karotaže ne mogu smatrati pouzdanima.

Podatci modela poroznosti za 13 istraživanih bušotina su obrađeni i analizirani te uspoređeni s podacima iz laboratorijskih mjerenja na jezgrama gdje je to bilo moguće (Tablica 4-4). Analizirane bušotine B-5, B-7, B-9, B-11 i B-12 (set 1) pokazuju razmjerno dobru podudaranost između poroznosti dobivenih laboratorijskim mjerenjima na mehaničkim jezgrama (Tablica 4-4) i ukupnih poroznosti iz analize modela. Isto tako, iz laboratorijskih mjerenja na mehaničkim jezgrama se vidi mala do osrednja propusnost (Tablica 4-4), što

također odgovara značajnoj efektivnoj poroznosti iz analize modela (Tablica 5-3). Unatoč manjoj efektivnoj debljini, analizirani slojevi pješčenjaka unutar člana Okoli se mogu pozitivno usporediti s podacima iz laboratorijskih mjerenja na jezgrama. Navedene bušotine pokazuju različite efektivne debljine pješčenjaka od 24,3 – 170 m i sljedeći korak u analizi ovih pješčenjaka bio bi definiranje njihove efektivne debljine na temelju procjene sadržaja gline u ostalim istraživačkim bušotinama na istraživanome području. Kako je fokus ovog rada bio procjena poroznosti, nisu provedene rečene analize, a onda niti konstruirana karta efektivne debljine pješčenjaka Okoli.

Analize bušotina B-16, B-17 i B-19 (set 2) isto ukazuju na razmjerno dobru podudaranost između poroznosti dobivenih laboratorijskim mjerenjima na mehaničkim jezgrama (Tablica 4-4) i ukupnih poroznosti iz analize modela. Ali za razliku od prijašnjih analiziranih bušotina iz seta 1 koje pokazuju znatno veće vrijednosti efektivne poroznosti, bušotine B-16, B-17 i B-19 pokazuju male do nepostojeće efektivne poroznosti. Za intervale mehaničkih jezgri iz seta 2, efektivne poroznosti iz analize modela poroznosti iznose 0% (Bušotina B-16, Tablica 5-1 i Tablica 5-2). Razlog nepropusnosti, tj. smanjene efektivne poroznosti pješčenjaka može biti povezanost s utjecajem dijagenetskih procesa, posebice cementacije. Valja naglasiti i da je prosječna dubina zalijeganja pješčenjaka Okoli u bušotinama seta 2 dubine približno 500 m dublja nego kod bušotina seta 1.

Usporedbom podataka ukupne i efektivne poroznosti u bušotinama gdje se koristio alat *Mineral Solver* i alat *Porosity and water saturation*, vidi se kako su vrijednosti poroznosti s alatom *Mineral Solver* za 1 – 2 % veće. S obzirom da se alat *Mineral solver* za procjenu poroznosti koristi podacima više karotažnih krivulja, može se reći da te procjene imaju veću pouzdanost u usporedbi s vrijednostima iz alata *Porosity and water saturation*. Dakle, može se pretpostaviti da su u bušotinama gdje je poroznost procijenjena korištenjem alata *Porosity and water saturation* dobivene podcijenjene vrijednosti poroznosti. Bilo bi potrebno provesti usporedne analize oba alata za iste intervale, kao i analizu mjerenja na jezgrama, kako bi se eventualno potvrdila ova pretpostavka i možda našao empirijski odnos koji bi omogućio korekcije vrijednosti poroznosti dobivenih alatom *Porosity and water saturation*.

U svakome slučaju, rezultati procjene poroznosti u bušotinama B-5, B-7 i B-9 te B-11 i B-12 (Slika 2-1) zbog nešto viših vrijednosti ukupne poroznosti i prisutne efektivne poroznosti daju poticaj da se za te bušotine provedu detaljnija istraživanja i analize. Kako su u navedenim bušotinama uzete jezgre istraživanog člana pješčenjaka Okoli, moguće je

primijeniti metode istraživanja poroznosti koje se zasnivaju na detekciji radioaktivnog zračenja. Metode mogu biti računalna tomografija (CT scan), tehnologija raspršivanja pod malim kutom i skenirajuća elektronska mikroskopija, a kod ovih metoda se promatra mikroskopska morfologija uzorka prema kojoj se procjenjuje poroznost stijena. S tim da primjena računalne tomografije omogućuje i procjenu propusnosti uzorka.

Istraživanje provedeno u ovome radu ima aplikativnu komponentu u smislu da predstavlja početak istraživanja pješčenjaka Okoli za korištenje u geoenergetske svrhe.

7. ZAKLJUČAK

Temeljem analize geofizičkih mjerenja u bušotinama, u softveru *Interactive petrophysics* se provela procjena poroznosti pješčenjaka Okoli u zapadnome dijelu Savske depresije. Za analizu korištena su dva alata, *Mineral solver* ili *Porosity and water saturation*. Pouzdanost rezultata je umanjena nedostatkom karotažnih mjerenja potrebnih za analizu i samih pogrešaka u mjerenju koje se nisu mogli korigirati. Stoga je analizom podataka iz 20 istraživanih bušotina samo u njih 13 utvrđena efektivna debljina pješčenjaka, odnosno mogli su se izdvojiti slojevi pješčenjaka koji pokazuju određenu ukupnu i efektivnu poroznost. Poroznosti dobivene interpretacijom karotaže su uspoređene s laboratorijskim mjerenjima na jezgrama te je dokazana približna podudaranost između podataka. Najveći potencijal pokazuju bušotine B-5, B-7, B-9, B-11 i B-12, gdje su analizom dobivene najviše vrijednosti ukupne i efektivne poroznosti.

Ovim radom dobiveni su rezultati poroznosti pješčenjaka Okoli za regionalno područje zapadnog dijela Savske depresije. Podatci mogu poslužiti za izgradnju geološkog modela u softveru *Petrel* ili nekom drugom sličnom softveru. Na temelju analize izdvojena su dva manja područja s bušotinama B-5, B-7 i B-9 te bušotinama B-11 i B-12 gdje bi se mogla provesti daljnja detaljnija istraživanja kako bi se bolje procijenio potencijal za geološko skladištenje ugljičnog dioksida, podzemno skladištenje energije, iskorištavanje geotermalne energije i slično.

8. LITERATURA

BOGNAR, A. (1999): Geomorfološka regionalizacija Hrvatske. *Acta geographica Croatica*, Vol. 34. No.1, str. 7-26.

KOLENKOVIĆ, I. (2012): Mogućnosti za geološko skladištenje ugljičnoga dioksida u gornjomiocenskim pješčenjacima zapadnoga dijela Savske depresije. Disertacija, Rudarskogeološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, str. 54.

LUČIĆ, D., SAFTIĆ, B., KRIZMANIĆ, K., PRELOGOVIĆ, E., BRITVIĆ, V., MESIĆ, I., TADEJ, J. (2001): The Neogene evolution and hydrocarbon potential of Pannonian basin. *Marine and Petroleum Geology*, 18, str. 141-142.

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

MALVIĆ, T. (2016): Regional turbidites and turbiditic environments developed during Neogene and Quaternary in Croatia. De Gruyter Open.

PAVELIĆ, D. (2001): Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian sector of the Miocene Pannonian Basin System. *Basin Research*, 13, 3, str. 359–376.

PAVELIĆ, D., KOVAČIĆ, M. (2018): Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia. *Marine and Petroleum Geology*, 91, str. 464.

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.

PRELOGOVIĆ, E., SAFTIĆ, B., KUK, V., VELIĆ, J., DRAGAŠ, M. & LUČIĆ, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 297, 1-4.

SAFTIĆ, B., VELIĆ, J., SZTANO, O., JUHASZ, G., IVKOVIĆ, Ž. (2003): Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and South-Western Hungary). *Geologia Croatica*, Zagreb, 56/1, str. 101-122.

SAFTIĆ, B. & MALVIĆ, T. (2008): Dubinsko kartiranje, Fakultetska skripta. Rudarsko geološko naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 46 str.

SCHÖN J. (2015): Basic Well Logging and Formation Evaluation, str. 78-96.

STEGENA, L., GECZY, B., HORVATH, F. (1975): Late Cenozoic evolution of the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 26, str. 71-90.

ŠIMON, J. (1973): O nekim rezultatima regionalne korelacije litostratigrafskih jedinica u jugozapadnom području Panonskog bazena. *Nafta*, 24/12, 623-630.

ŠUMANOVAC, F. (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 342 str..

TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. (1991): Applied Geophysics, Second Edition, str. 665-681.

TIAB, D., DONALDSON, ERLE C. (2012): Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties. *Petrophysics*, Gulf Professional Publishing, 918 str.

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

WYLLIE, M.R.J., GREGORY, A.R.; GARDNER, L.W. (1956): Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media. *Geophysics*, 21, str. 41-70.