

# Utjecaj geološke građe na povišeni geotermalni gradijent istočnog dijela Dravske depresije

---

**Mustać, Roko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:169:029355>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-24**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij geologije

UTJECAJ GEOLOŠKE GRAĐE NA POVIŠENI GEOTERMALNI  
GRADIJENT ISTOČNOG DIJELA DRAVSKE DEPRESIJE  
Diplomski rad

Roko Mustać  
G353

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

UTJECAJ GEOLOŠKE GRAĐE NA POVIŠENI GEOTERMALNI GRADIJENT  
ISTOČNOG DIJELA DRAVSKE DEPRESIJE

ROKO MUSTAĆ

Diplomski rad izrađen u: Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U 21. stoljeću Svijet svjedoči velikim klimatskim promjenama te potencijalnim problemima u opskrbi fosilnim gorivima, pa u prvi plan dolaze obnovljivi izvori energije u koje ubrajamo i geotermalnu. U hrvatskom dijelu Panonskog bazena, Dravska depresija ima potencijal za iskorištavanje geotermalne energije zbog povišenog geotermalnog gradijenta koji je iznad svjetskog prosjeka. U ovom radu izrađena je početna procjena geotermalnog potencijala u istočnome dijelu Dravske depresije na temelju karte raspodjele prosječnih geotermalnih gradijenta te interpretacije seizmičkih profila, kako bi se identificirale moguće trase konvekcijske migracije vrućih fluida na prostorima gdje su povišeni geotermalni gradijenti. Također, karta prosječnoga geotermalnog gradijenta uspoređena je s kartom toplinskog toka te su doneseni zaključci o odnosu toplinskoga toka i kartiranog prosječnog geotermalnog gradijenta.

Ključne riječi: Dravska depresija, geotermalni gradijent, seizmički profil, reporni horizont

Diplomski rad sadrži: 46 stranica, 20 slika, 2 tablice i 26 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

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

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

dr. sc. Bruno Saftić, izvanredni profesor, RGNF

dr. sc. Marko Cvetković, docent, RGNF

Datum obrane: 14. veljače 2020.

THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL STRUCTURES ON THE INCREASED  
GEOTHERMAL GRADIENT OF THE EASTERN PART OF THE DRAVA  
DEPRESSION ROKO MUSTAĆ

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

Abstract

In the 21st century, the world is witnessing climate change and potential problems in the supply of fossil fuels, so renewable energy sources, including geothermal energy, are at the forefront. In the Croatian part of the Pannonian Basin, the Drava Depression presents great potential because of the elevated geothermal gradient that is above the world average. In this thesis, an initial estimation of geothermal potential in the eastern part of the Drava Depression is made on the basis of a map of the distribution of average geothermal gradients and interpretation of seismic profiles, in order to identify possible routes of convection migration of hydrothermal fluids in areas with elevated geothermal gradients.

Keywords: Drava depression, geothermal gradient, seismic profile, horizon

Thesis contains: 46 pages, 20 figures, 2 tables and 26 references

Original in: Croatian

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

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

Reviewers: Assistant Professor Iva Kolenković Močilac, Ph.D.  
Associate Professor Bruno Saftić, Ph.D.  
Assistant Professor Marko Cvetković, Ph.D.

Date of defense: 14. February 2020.

*Najviše se želim zahvaliti svojoj mentorici doc. dr.sc Ivi Kolenković Močilac na stručnoj pomoći i podršci pri izradi ovog diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se asistentu Davidu Rukavini na pruženoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.*

*Također, zahvaljujem se svim profesorima, docentima i asistentima za pruženo znanje tijekom svih godina studija.*

*I would like to thank Schlumberger company for providing academic licences for Petrel E&P software platform 2018.*

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

*Na kraju, zahvaljujem se obitelji koji su me podupirali tijekom cijelog fakultetskog obrazovanja.*

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Područje istraživanja .....	2
3. Strukturno-stratigrafski odnosi istraživanog područja .....	3
3.1 Stratigrafski odnosi istraživanog područja.....	4
3.2. Strukturni odnosi istraživanog područja .....	6
4. Metodologija .....	9
4.1 Geotermalni gradijent .....	9
4.2. DRILL-STEM TEST (DST) .....	12
4.3. Konvekcija.....	13
4.3.1. Utjecaj konvekcije na migraciju hidrotermalnih fluida.....	13
4.5. Seizmička istraživanja .....	18
4.5.1 Refleksijska seizmika.....	19
4.5.3. Interpretacija seizmičkih profila.....	19
4.5.4. Sintetski seizmogram i zakon brzina.....	21
5. Rezultati .....	24
5.1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta .....	25
5.2. Karta recentnog toplinskog toka i karta prosječnog geotermalnog gradijenta .....	27
5.3. Izrada sintetskog seizmograma za bušotinu B4 .....	29
5.3. Interpretacija seizmičkih profila .....	31
5.3.1. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 1 – 1' .....	31
5.3.2. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 2 – 2' .....	33
5.3.3. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 3 – 3' .....	35
5.3.4. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 4 – 4' .....	37
5.3.5. Seizmička Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 5 – 5' .....	39
6. Diskusija i zaključci .....	41
7. Popis literature.....	44

7.1. Objavljeni radovi .....	44
7.2. Web izvori.....	46

## Slike:

Slika 2-1. Karta lokacije istraživanog područja (preuzeto s <a href="https://www.google.com/maps">https://www.google.com/maps</a> ).....	2
Slika 3-1. Depresije smještene unutar hrvatskog dijela Panonskog bazena (Malvić i Saftić, 2008).....	3
Slika 3-2. Shematski prikaz rasprostranjenosti formacija, članova, litološkog sastava, elektrokarotaznih markera i repera u istočnom dijelu Dravske depresije (Malvić i Cvetković, 2013).....	6
Slika 3-3. Strukturna karta rasjeda i karta prikaza podloge paleogena i neogenske ispune na području hrvatskog dijela panonskog bazena ( Pavelić i Kovačić, 2018 prema Márton, 2002 i Ustaszewski, 2004).....	8
Slika 4-1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta na području Hrvatske (Jelić i suradnici, 1995).....	12
Slika 4-2. DRILL STEM TEST (Stojanović, 2019, modificirano prema <a href="https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&amp;c_id=">https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&amp;c_id=</a> ).....	13
Slika 4-3. Geometrijski model korišten prilikom računanja Rayleighovog broja u rasjednoj zoni (Turnier et al. , 2000).....	16
Slika 4-4. Geometrija Rayleigh–Brenardove konvekcije (Norris, 2000) .....	17
Slika 4-5. Kritična točka Raylighovog broja kao funkcija valne duljine (Norris, 2000) ....	18
Slika 4-7. Skica izrade sintetskog seizmograma (Šumanovac, 2012 prema Sheriff, 1978)	22
Slika 4-8. Teoretski valići koji se koriste za izradu sintetskog seizmograma (Šumanovac, 2012 prema Sheriff, 1978).....	22
Slika 5-1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta .....	26
Slika 5-2 Karta preklapanja toplinskog toka podine neogena (Cvetković, 2019 modificirana prema Lenkey, 2002.) i karte prosječnog geotermalnog gradijenta, te lokacija seizmičkih profila .....	28
Slika 5-3. Sintetski seizmogram izračunat za bušotinu B4 s pripadajućim horizontom .....	30
Slika 5-4. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 1-1' .....	32
Slika 5-5. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 2 - 2' .....	34

Slika 5-6. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 3 - 3' .....	36
Slika 5-7. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 4 - 4' .....	38
Slika 5-8. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 5 - 5' .....	40

## Tablice:

Tablica 4.1 Toplinska vodljivost geoloških materijala i fluida (Kutasov, 1999) .....	10
Tablica 5.1. Naziv bušotina i njihovi geotermalni gradijenti .....	24



# 1. Uvod

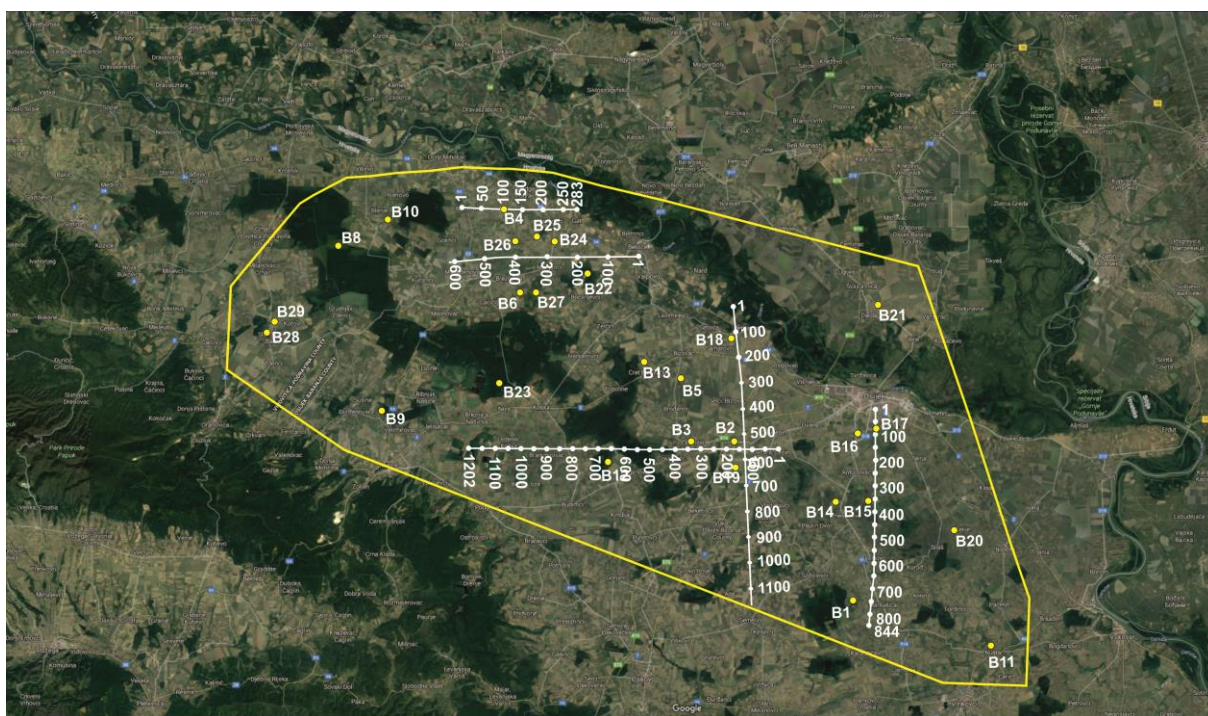
Zbog razvoja tehnologije u 21. stoljeću, porasta potreba za energijom ali i klimatskih promjena, potražnja za obnovljivim izvorima energije i njihovo iskorištavanje sve su veći. Zato u prvi plan istraživanja dolazi geotermalna energija koja ima brojne prednosti u usporedbi s izvorima energije iz fosilnih goriva. Osnovne prednosti su da je to stalni izvor primarne energije koji daje stabilnost opskrbe a uz to ima vrlo mali utjecaj na okoliš. Istraživanja potencijala za iskorištavanje geotermalne energije započinju s prosječnim geotermalnim gradijentom koji opisuje porast temperature po jedinici dubine. Povišeni geotermalni gradijent nekog područja je prvi znak za daljnje istraživanje, jer upućuje na visoke temperature slojnih fluida u potencijalnim ležištima. Prosječni geotermalni gradijent na svjetskoj razini iznosi  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (Jelić et al., 1995). Budući da geotermalni gradijent hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava, točnije Dravske depresije, odskaače od samog prosjeka i iznosi  $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , to predstavlja polaznu točku za izradu ovog diplomskog rada usmjerenog na detaljnije regionalno istraživanje geotermalnog potencijala Dravske depresije.

Cilj rada je identificirati duboke diskontinuitete kao potencijalne putove konvekcijske migracije hidrotermalnih fluida. Također, na seizmičkim profilima interpretiran je reporni horizont „Temeljno gorje (Tg)“ u svrhu utvrđivanja karaktera rasjeda te uvjetno ostvarenih pomaka. Naime, iako je za bušotinu B4 dobiven zakon brzina, nepovoljan položaj trasa seizmičkih profila uvjetovao je nemogućnost konverzije seizmičkih profila iz vremenske u dubinsku domenu. Najprije je izrađena karta prosječnog geotermalnog gradijenta istočnog dijela Dravske depresije (u suradnji s kolegicom Zrinkom Stojanović). Na temelju izrađene karte, u dijelovima gdje se uočava povišeni prosječni geotermalni gradijent, odabrani su seizmički profili na kojima su interpretirani rasjedi i reporni horizont Tg. U svrhu interpretacije podataka korišten je računalni program *Petrel E&P software platform 2018*. Osim toga, karta prosječnog geotermalnog gradijenta uspoređena je s kartom toplinskog toka na istraživanome području prema (Cvetković, 2019 modificirana verzija karte prosječnog toplinskoga toka prema Lenkey, 2002).

## 2. Područje istraživanja

Područje na kojoj su se provodila istraživanja spada u sjeveroistočni dio Republike Hrvatske. U pogledu upravnih jedinica tog prostora, najvećim dijelom obuhvaća područje Osječko-baranjske županije. Granice istraživanog područja prikazane su na slici 2-1 (podatci dobiveni od Agencije za ugljikovodike).

Unutar hrvatskog dijela Panonskog bazena, površinski gledano, Dravska depresija predstavlja najveću jedinicu, koja se proteže istočno od Murske depresije, na sjeveru graniči s državom Mađarskom, na istoku sa Srbijom (slika 2-1). Uže područje istraživanja je dolina Drave od mađarske granice do obronaka Papuka, pa je uglavnom nizinsko s nadmorskim visinama od 50 do 100 m iznad razine mora. Srednja godišnja temperatura je 11,4°C, a prema Koeppenovoj klasifikaciji, radi se o umjereno toploj, kišnoj klimi, bez značajnijih sušnih razdoblja, s oborinama jednoliko raspodijeljenim tijekom godine (<http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=srednjak&Grad=osijek>).



Slika 2-1. Karta lokacije istraživanog područja (preuzeto s <https://www.google.com/maps>)

### 3. Strukturno-stratigrafski odnosi istraživanog područja

Hrvatski dio Panonskog bazena, u kojem je i smještena Dravska depresija, nalazi se na jugozapadu tektonske jedinice najvećeg reda nazvane Panonski bazenski sustav. Taj prostor je smješten između stare Europske ploče na sjeveru, Alpi na zapadu, Jadranske ploče na jugu te Mezijske ploče na istoku. Panonski bazenski sustav pripada skupini zalučnih bazena (Velić, 2007). Njegovo stvaranje započelo je u otnangu subdukcijom i konvergencijom Apulijske ploče pod Dinaride. Tada je započelo i stvaranje 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 (Velić, 2007; Malvić i Saftić, 2008). Unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava, koji je smješten u Sjevernoj Hrvatskoj, razlikujemo četiri depresije i to od sjeverozapada prema jugoistoku Mursku, Dravsku, Savsku te Slavonsko-srijemsku (Malvić i Saftić, 2008) (slika 3-1).



Slika 3-1. Depresije smještene unutar hrvatskog dijela Panonskog bazena (Malvić i Saftić, 2008)

### 3.1 Stratigrafski odnosi istraživanog područja

Ispuna Dravske depresije građena je od neogenskih i kvartarnih stijena koje u središnjem dijelu dosežu dubine i do 7000 m, dok podinu depresije čine stijene bitno drugačijeg litološkog sastava i stratigrafske pripadnosti. Radi se većinom o metamorfiziranim (amfibolitima, škriljavcima i gnajsevima) i magmatitima (granitima i gabrima) mezozojske i paleozojske starosti u naftnogeološkoj literaturi poznatima pod imenom "temeljno gorje" (Malvić i Cvetković, 2013).

Ako se između neogensko-kvartarne ispune i spomenutih magmatskih i metamorfnih stijena nalaze mezozojske karbonatne stijene ili bilo koje formacije starije od neogena, tada se one nazivaju "podlogom tercijara" (Pt, P.T. ili PTC). Taj interval karbonatnih stijena se pretežito sastoji od vapnenaca i dolomita, često kataklaziranih i/ili trošenih pa se mjestimice mogu naći breče i konglomerati (Malvić i Saftić, 2008; Malvić i Cvetković, 2013).

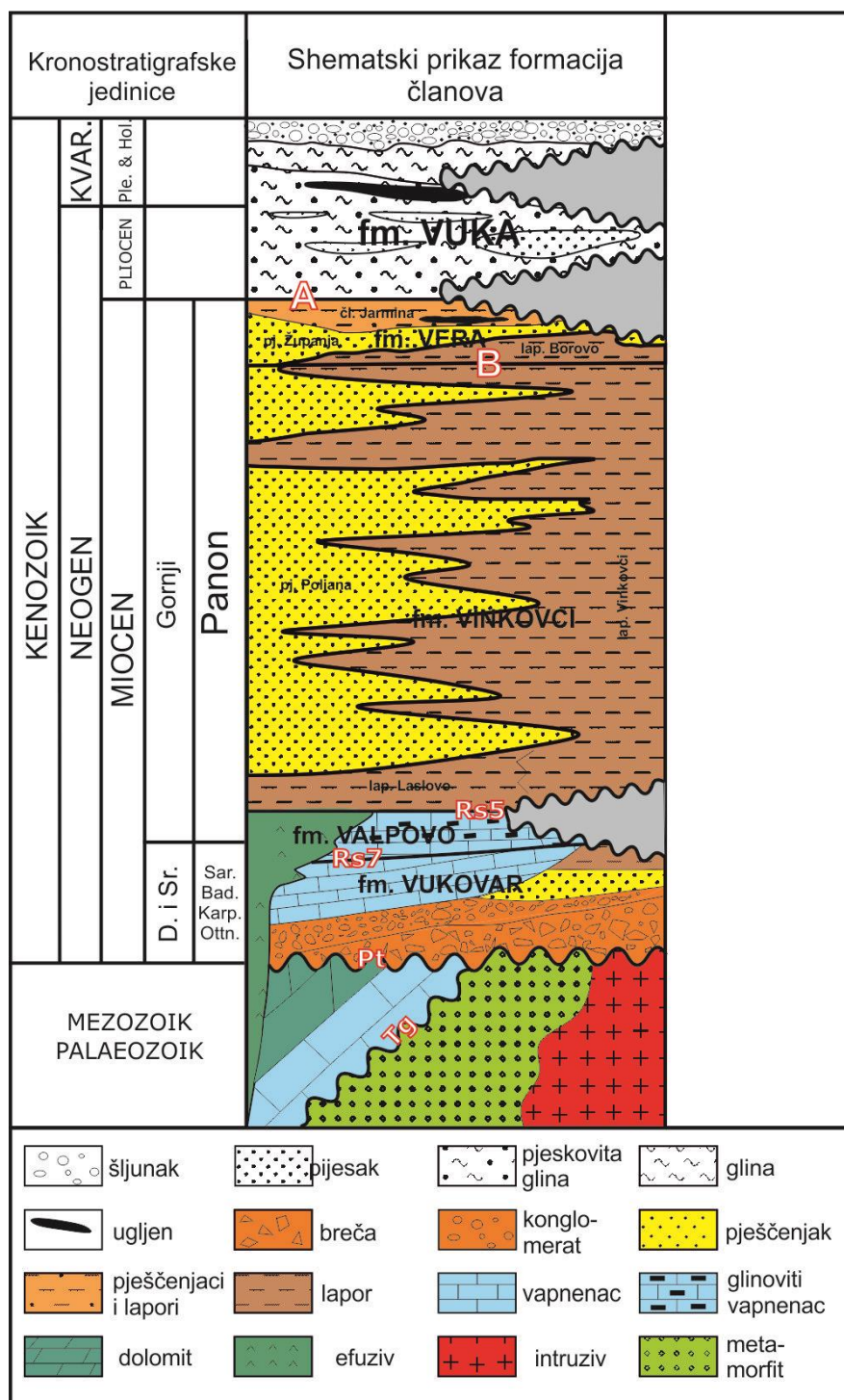
Većinu Dravske depresije čine uglavnom stijene neogena i kvartara, odnosno sastoji se od srednjomiocenskih, gornjomiocenskih, pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih klastičnih i biogenih sedimenata, a mjestimice se mogu naći i pojave efuzivnih stijena srednjomiocenske starosti te fluvijalnih i jezerskih sedimenata donjeg miocena (Malvić i Cvetković, 2013).

U istočnome dijelu Dravske depresije naslage miocena završno s najstarijim panonom mogu se podijeliti na dvije formacije: formaciju Vukovar i formaciju Valpovo koje odvaja EK-marker Rs7. Kao i u zapadnome dijelu, granica sa stijenama podloge definirana je horizont „Tg“ ili „Pt“, a EK-marker Rs5 odvaja formaciju Valpovo od mlađe formacije Vinkovci. Formacija Vukovar sastoji se od krupnoklastičnih sedimenata (breče i konglomerati) u svom baznom dijelu te pješčenjaka i vapnenaca u gornjem dijelu koji približno pripadaju sarmatu. Transgresivne naslage Vukovarske formacije odlikuju se neujednačenim litološkim sastavom. Najdublji je član Bizovac koji se sastoji od andezita, riolita, bazalta, dacita. Sljedeći član je Karašica kojeg čine lapori, pjeskoviti kalkareniti, kvarcni konglomerati i vapnenačke breče. Iznad člana Karašica slijedi član Beničanci, koji je karakteriziran dolomitno vapnenačkim brečama (Hernitz, 1983). Formacija Valpovo slična je članu Križevci u zapadnome dijelu Dravske depresije i većinom se sastoji od glinovitih vapnenaca, te sivih i žućkastih, čvrstih homogenih lapora (Hernitz, 1983; Malvić i Cvetković, 2013) (slika 3-2).

Krajem miocena dolazi do produbljanja depresije, što se odrazilo na sedimentaciju Vinkovačke formacije. Bazni dio te formacije, koja je neposredno iznad EK-markera Rs5, izgrađuju sitnozrnasti i srednjezrnati klastiti. Na pojedinim dijelovima prisutan je pješčano-laporoviti razvoj, dok je na ostalom prostoru Vinkovačka formacija zastupljena isključivo laporima te se taj bočni ekvivalent naziva Vinkovačkim laporom. Ovu formaciju čine Laslovo lapor i Osječki pješčenjaci (Hernitz, 1983) (slika 3-2).

Iznad Vinkovačke formacije slijedi formacija Vera, koja je u krovini Vinkovačke formacije odvojena markerom B (Hernitz, 1983). Prema litološkim značajkama, formacija Vera podijeljena je na tri jedinice nižeg reda, članove: u baznom dijelu je lapor Borovo, zatim slijede Županjski pješčenjaci i u vršnom dijelu član Jarmina. U krovini je formacija Vera čije naslage završavaju EK-markerom A (slika 3-2).

U sedimentnom slijedu litostratigrafski najmlađa i najplića formacija je formacija Vuka (Hernitz, 1983). Pliocensko-kvartarne naslage Vuka formacije obuhvaćaju prostor iznad EK-markera A pa do današnje površine terena. Litološki se može podijeliti na tri dijela. Najdublji dio sastoji se od glina, pjeskovitih glina te većim dijelom od sitnozrnatih pijesaka. Središnji dio karakteriziran je izmjenom sitnozrnastih glinovitih pijesaka s proslojcima sive slaboplastične gline. Najplići dijelovi građeni su od sivih i žutih glina, prahova, nevezanih pijesaka, šljunaka, prapora i humusa (Hernitz, 1983) (slika 3-2).



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

### 3.2. Strukturni odnosi istraživanog područja



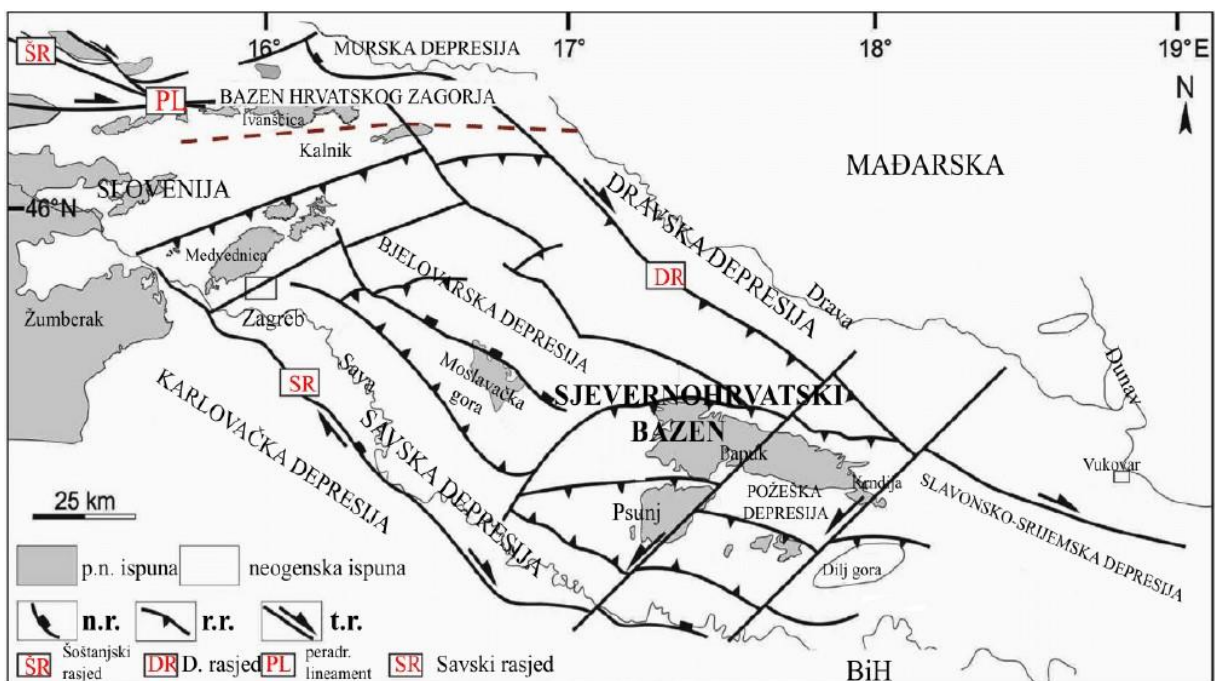
Hrvatski dio Panonskog bazenskog sustava, poznat još kao Sjevernohrvatski bazen, nastao je kroz dvije sukcesivne faze: sin-riftnu fazu i post-riftnu fazu. Za vrijeme prve faze razvoj bazena bio je popraćen podizanjem astenosfere, stanjivanjem kore uzrokovane ekstenzijskom tektonikom i izostatičkim slijeganjem. U drugoj fazi došlo je do termalne supsidencije bazena zbog hlađenja litosfere (Pavelić i Kovačić, 2018).

Nakon separacije zapadnog Tethys-a na središnji Paratethys i Sredozemno more (granica eocena-oligocena), veliko područje Sjeverne Hrvatske je postalo kopno (Pavelić i Kovačić, 2018). Glavnina taloženja odvijala se u fluvijalnim i jezerskim okolišima, a glavni mehanizam taloženja bile su aluvijalne lepeze. Na području Panonskog bazenskog sustava, ekstenzija je započela za vrijeme otnanga i karpata, te se smatra da je bila potaknuta ekstruzijom Alpi prema istoku (Malvić, 2003; Malvić i Cvetković, 2013). Ekstenzija je praćena lokalnim marinskim transgresijama (baden) i vulkanskom aktivnošću. Raspadanje središnjeg Paratethysa započeto je za vrijeme najkasnijeg badena, kada je ovo paleo-more izgubilo vezu s Indopacifikom i paleoMediterranom, a kasnije, za vrijeme panona, se pretvorilo u brakično jezero Panon. Na kraju sarmata došlo je do velikog pada svjetske razine mora i to je jedan od glavnih faktora koji su utjecali na izolaciju Panonskog jezera (Horvath, 1995). Smatra se da se jezero kasnije raspalo na nekoliko manjih regionalnih slatkovodnih jezera, koja se podudaraju s današnjim depresijama Panonskog bazenskog sustava (Malvić i Cvetković, 2013).

Zbog složene dinamike razvoja cijelog Panonskog bazenskog sustava i višefaznih promjena u navlačnoj zoni Karpata, te posljedične promjene orijentacije osi najvećeg horizontalnog naprezanja, u južnom se dijelu PBS-a razvio tektonski režim s pomacima po pružanju i izraženom rotacijom struktura, pa tako imamo nekoliko transtenzijskih i transpresijskih faza koje nisu sve bile jednako izražene u cijelom području istraživanja. Prva transtenzijska faza započela je za vrijeme badena kada je tektonska aktivnost bila najaktivnija i formirala većinu struktura. Nakon opetovanih ciklusa transgresije i regresije u badenu, u sarmatu je započela regresijska faza, što je tipično za središnji dio Paratethysa (Rögl i Steininger, 1984). Prema Herntizu (1983) dolazi do pojava regresivnih tendencija, uz lokalne prekide sedimentacije i lokalne diskordancije donjosarmatskih naslaga. Regresija je jako utjecala na korita koja su bila ispunjena sin-riftnim naslagama. Zbog prethodnog pada razine mora došlo je do emerzije gornjih dijelova bazenske ispune, na koje je jako utjecala erozija (Horvath, 1995). Razdoblje srednjeg miocena i gornjem miocenu označavalo je kraj ekstenzije (Lučić et al., 2001), i početak post-ekstenzijske faze koja je

uzrokovala tonjenje stanjene kore plaštnim dijapirizmom (Stegena et al., 1975), i tako je polje naprezanja iz ekstenzijskog prešlo u kompresijsko, tj. u prvu transpresijsku fazu (Malvić i Velić, 2011).

Druga transtenzijska faza započela je u ranom panonu (Malvić i Velić, 2011). Lapori Valpovo formacije sadržavaju povećanu količinu organske tvari (Malvić i Velić, 2011). Kada se lapor litificiro pa sve do kraja kasnog panona, Dravska depresija je bila veliko izduženo brakično jezero, puno turbidita koji su predstavljali prepreke i prekide za pelitnu bazensku sedimentaciju. Smatra se da je zapravo istočni dio bio rubno područje u kojem su na sedimentaciju utjecali turbiditni događaji dominantni u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava (Malvić i Cvetković, 2013). Na slici 3-3 prikazane su najvažnije strukture na području Sjevernohrvatskog bazena.



Slika 3-3. Strukturna karta rasjeda i karta prikaza podloge paleogena i neogenske ispune na području hrvatskog dijela panonskog bazena ( Pavelić i Kovačić, 2018 prema Márton, 2002 i Ustaszewski, 2004)

Pliocen i kvartar bili su obilježeni drugom transpresijskom fazom, gdje je većina negativnih struktura, a pod time smatramo spuštene, bile uzdignute, što je rezultiralo nastankom velikog broja antiklinala koje se smatraju najpovoljnijim zamkama za



nakupljanje ugljikovodika u ležištima (Malvić i Cvetković, 2013). U rubnim dijelovima Dravske depresije nalaze se eolske, fluvijalne, lakustrinske i paludalne taložine za koje je evidentno da su i dalje pod utjecajem recentne tektonike (Lučić et al., 2001). Prema Paveliću i Kovačiću (2018), razdoblje kvartara predstavlja novu epizodu evolucije Sjevernohrvatskog bazena u kojoj dolazi do napredovanja prema kompresiji koja je aktivirala reversne i reaktivirala normalne rasjede s reversnim karakterom pomaka uslijed kontrakcije tog područja .

## 4. Metodologija

Glavna zadaća ovog diplomskog rada je otkriti duboke diskontinuitete koji bi mogli predstavljati puteve migracije hidrotermalnih fluida. U tu svrhu interpretirani su seizmički profili na kojima je interpretiran reporni horizont „Tg“ radi definiranja karaktera rasjeda i njihovih pomaka. Također, na temelju rezultata DST (engl. Drill Stem Test) mjerenja izdvojene su one bušotine na istražnom prostoru u kojima je bilo provedeno ispitivanje za potrebu izrade karte prosječnog geotermalnog gradijenta. Za interpretaciju profila i izradu karte korišten je bio *Petrel E&P software platform 2018*.

### 4.1 Geotermalni gradijent

Temelj svakog istraživanja geotermalnog potencijala nekog područja je prostorna raspodjela vrijednosti prosječnoga geotermalnog gradijenta. Kao što je već navedeno, on predstavlja porast temperature s dubinom, ali dakako on ovisi i o mnogo čimbenika. On je zapravo vektorska veličina, što govori da ovisi o raspodjeli temperature u tri dimenzije, odnosno ukoliko se želi utvrditi iznos i smjer geotermijskog toplinskog toka mora biti poznata raspodjela temperature u prostoru. Budući da je detaljno definiranje raspodjele temperature u podzemlju praktički nemoguće, polazi se od pretpostavke da je maksimalni gradijent u Zemljinoj kori vertikalalan, ali u tom slučaju površina Zemlje mora predstavljati granicu stalne temperature, bez ikakvih promjena i zato se koristi srednja godišnja temperatura (Kutasov, 1999).

Pri izradi karte i izračunu podataka za kartiranje prosječnog geotermalnog gradijenta koristila se sljedeća jednadžba:

$$Gg = \frac{T_h - T_s}{z} \times 100 \quad (4.1)$$

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

Geotermalni gradijent je prirodna pojava koja može značajno varirati na relativno malom prostoru, pogotovo ako postoji toplinsko strujanje fluida povišene temperature (Kutasov, 1999).

Osim spomenutog, vrlo važan faktor kod geotermalnog gradijenta je i toplinski tok kojeg se treba procijeniti na ispitivanom području. On predstavlja umnožak prosječne toplinske vodljivosti i geotermalnog gradijenta, prema Fourierovom zakonu koji glasi:

$$q = -\lambda G_t \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (4.2)$$

gdje q označava toplinski tok, Gt vertikalni geotermalni gradijent,  $\lambda$  koeficijent toplinske vodljivosti,  $\Delta T$  razliku u temperaturi, a  $\Delta x$  debljinu ispitivanog medija (Kutasov, 1999).

Uz toplinski tok, usko je povezan koeficijent toplinske vodljivosti materijala ( $\lambda$ ), koji opisuje sposobnost prijenosa topline ispitivanog materijala. Prema Fourierovoj jednadžbi (4.2) negativni predznak predstavlja smjer topline prema nižoj temperaturi. Toplinska vodljivost formacije ovisi o temperaturi, tlaku i petrofizikalnim svojstvima te fluidima prisutnima u porama (Kutasov, 1999). U tablici 4.1 prikazane su određene vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti nekih materijala i pornih fluida.

Tablica 4.1 Toplinska vodljivost geoloških materijala i fluida (Kutasov, 1999)

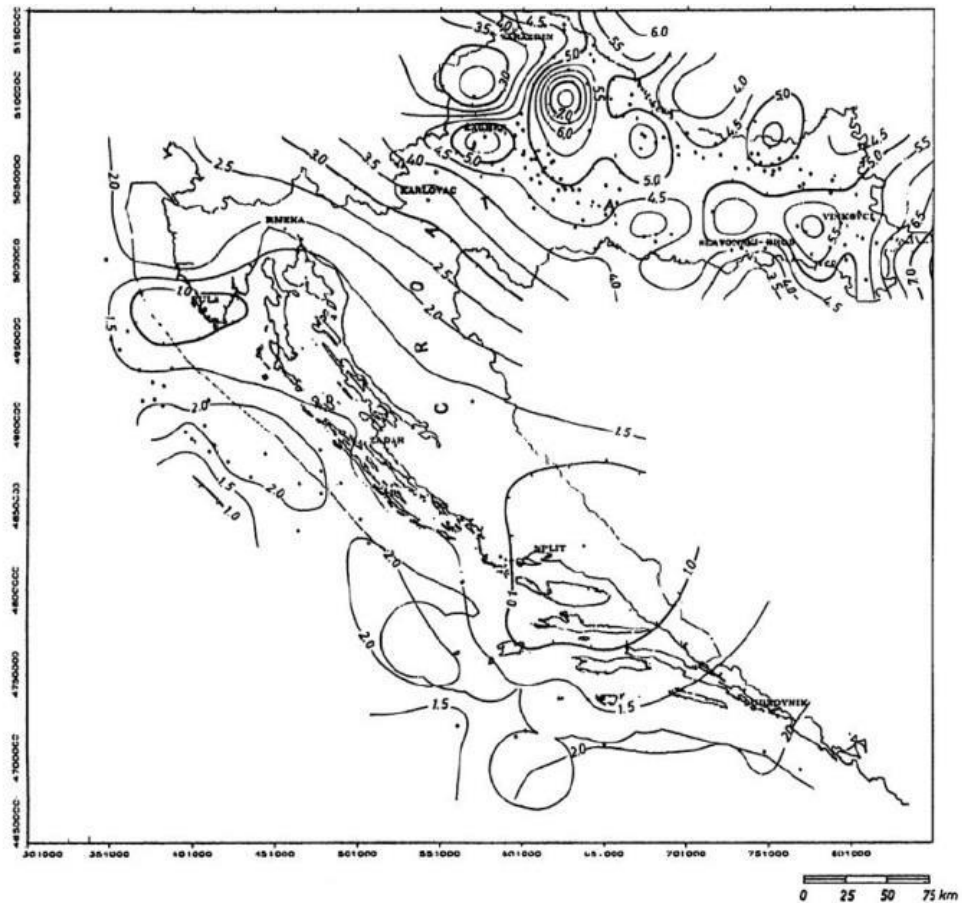
	Toplinska vodljivost [W/mK]
Voda	0,6
Nafta	0,15
Vapnenac	2,5-3
Ugljen	0,3
Šejlovi	1,1-2,1
Pješčenjaci	2,5
Stijene	1,2-5,9
Zemljina kora	2,0-2,5

Geotermalni gradijent proporcionalan je toplinskom toku, a obrnuto proporcionalan toplinskoj vodljivosti, koja se mijenja s dubinom, jer s dubinom se mijenja i gustoća stijene koja najviše ovisi o stupnju kompakcije.

Srednja vrijednost geotermalnog gradijenta za Europu iznosi  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , dok prema Jeliću et al. za Republiku Hrvatsku postoje dva različita područja geotermalnog gradijenta: prvi dio obuhvaća južni dio Hrvatske, uključujući dinarski dio i jadransko područje, gdje je geotermalni gradijent manji od  $2,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , a drugo područje koje se nalazi u sjevernom dijelu Hrvatske, koje je znatno perspektivnije, gdje je gradijent viši od  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  i prosječno iznosi oko  $4,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . Dravska i Slavonsko-srijemska depresija imaju najviše gradijente, gdje je za Dravsku  $4,5-5,7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , a Slavonsko-srijemsku iznosi  $4,5-5,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (slika 4-1).

Na karti se mogu uočiti pozitivne anomalije koje nastaju kao posljedica toplinskog strujanja i velike vertikalne propusnosti, gdje se uz visoke temperature i povišeni geotermalni gradijent može očekivati i povoljna petrofizikalna svojstva ležišnih stijena (Jelić i suradnici, 1995).

Vrlo bitan čimbenik je i središnja godišnja temperatura. Područje istraživanja nalazi se u hrvatskom dijelu Dravske depresije. Na tom dijelu prevladava srednja umjerena kontinentalna klima sa srednjom godišnjom temperaturom od  $11,4^{\circ}\text{C}$ . Podatak je preuzet sa stranica Državnog hidrometeorološkog zavoda (<http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=srednjak&Grad=osijek>), odnosno vrijednost je izračunata kao aritmetička sredina prosječnih mjesečnih temperatura grada Osijeka od 1899.-2016.

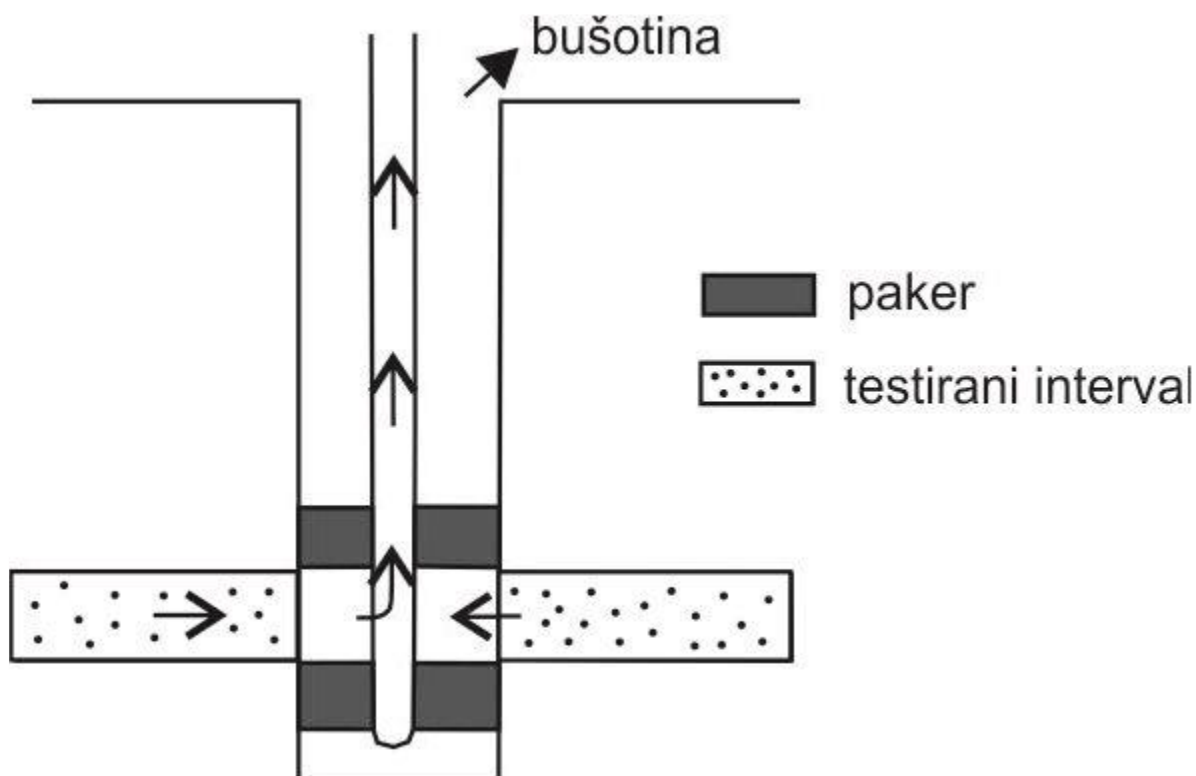


Slika 4-1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta na području Hrvatske (Jelić et al., 1995)

#### 4.2. DRILL-STEM TEST (DST)

Proces testiranja ležišnih fluida na određenoj dubini u bušotini poznat je pod engleskim nazivom *Drill Stem Test*. Njegova funkcija je višestruka, jer uzimanjem uzorka za analizu može se odrediti temperatura formacije, te procjenu propusnosti mjerenjem protoka (uzimajući u obzir razlike u izmjerenim tlakovima). Kada je u pitanju geotermalni gradijent, temperatura formacije predstavlja ključni podatak, jer omogućuje pouzdanu procjenu temperature na određenoj dubini na ispitivanom području. Mjerenje se izvodi tako da se pakeri postave iznad i ispod ispitivanog intervala, kako bi ga se izoliralo te se nakon toga aparat otvara prema bušačim šipkama, što uvjetuje pad tlaka unutar samog aparata. Kad se vanjske perforacije otvore, razlika u tlaku između bušotine i aparata dovodi do dotoka fluida iz ispitivane formacije u aparat. Na taj način interval je spreman za glavno testiranje i iz njega se može uzeti uzorak pornih fluida za analizu ([https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight\\_id=318&c\\_id=](https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&c_id=)) (slika 4-2).

Važno je napomenuti da je prema Petersonu i Nelsonu (2012) određivanje temperature formacije pouzdano samo ako je volumen ležišnog fluida koji se ispituje veći od 100 bbl, jer se jedino tada temperatura ispitivanog uzorka može izjednačiti s temperaturom formacije. Uglavnom DST mjerenja daju točne podatke, ali nekad znaju biti pod utjecajem toplinskih faktora oko bušotine.



Slika 4-2. DRILL STEM TEST (modificirano prema [https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight\\_id=318&c\\_id=](https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&c_id=))

### 4.3. Konvekcija

Konvekcija topline ili poznato još kao strujanje topline je proces u kojem se topline prenosi u tvarima koje mogu strujati, tj. u fluidima. Taj proces se upravo događa zbog razlike u gustoći hladnijih i toplijih dijelova fluida, odnosno strujanje nastaje zbog promjene gustoće zagrijavanjem (Tournier et al., 2000). Na isti takav način konvekcija utječe na prijenos hidrotermalnih fluida u podzemlju, pa ju je bitno spomenuti.

#### 4.3.1. Utjecaj konvekcije na migraciju hidrotermalnih fluida

Što se tiče utjecaja konvekcije na migraciju fluida u raspucanim zonama, veoma je mali broj istraživačkih radova koji se bave tim problemom. Općenito, za opisivanje prirodne konvekcije koristi se Rayleighov broj. Prema Murphyu (1979) prirodna konvekcija započinje kada kritična točka, koja označava početak slobodne konvekcije duž pukotina, uvelike premašuje  $4\pi^2$  što je kritični Rayleighov broj za beskonačni horizontalni porozni medij.

U mehanici fluida, Rayleighov broj (Ra) je usko povezan sa strujanjem fluida na koje utječe sila uzgona. To je bezdimenzijska veličina pomoću koje opisujemo kretanje fluida uzrokovano neujednačenom gustoćom unutar cijele mase. Razlog neujednačene gustoće je upravo temperaturna razlika, koja je nastala zbog utjecaja vanjskog čimbenika zbog kojeg je došlo do povećanja temperature unutar sistema. Prilikom zagrijavanja fluid se širi i manje je gustoće. Pod utjecajem sile uzgona, gušći, hladniji dijelovi fluida tonu, a topliji se dižu iznad njih. Također, postoje sile koje se protive konvekciji, odnosno suprotnog su djelovanja: trenje, koje nastaje zbog viskoznosti fluida, i toplinska kondukcija, odnosno difuzija koja pokušava ujednačiti temperaturu mase. Kada uzgon, uzrokovan temperaturnom razlikom u donjem i gornjem dijelu fluida, nadmaši utjecaj viskoznosti i difuzije, dolazi do pojave konvekcije (Pirobloc, S.A., 2020).

Na temelju dobivenog rezultata lakše se opisuje režim protoka fluida. Ovisno o njegovoj vrijednosti gibanje fluida može biti laminarno ili turbulentno. Za vertikalnu površinu, prijelaz između turbulentnog i laminarnog gibanja odvija se kada je  $Ra \approx 10^9$ . Kada je vrijednost manja od granične, fluid se giba laminarno, a ako je veća fluid se giba turbulentno. Ako je veličina Rayleighovog broja manja od određene kritične vrijednosti gibanja nema, te se prijenos topline tada odvija kondukcijom, a ne konvekcijom (Hewitt, 1994).

Rayleighov broj je definiran kao produkt Grashofovog broja (Gr), koji opisuje odnos između sile uzgona i viskoznosti u nekoj tekućini, i Prandtlovog broja (Pr), koji opisuje odnos između difuznosti momenta i toplinske difuzivnosti (Hewitt, 1994).

Tada vrijednost broja glasi:

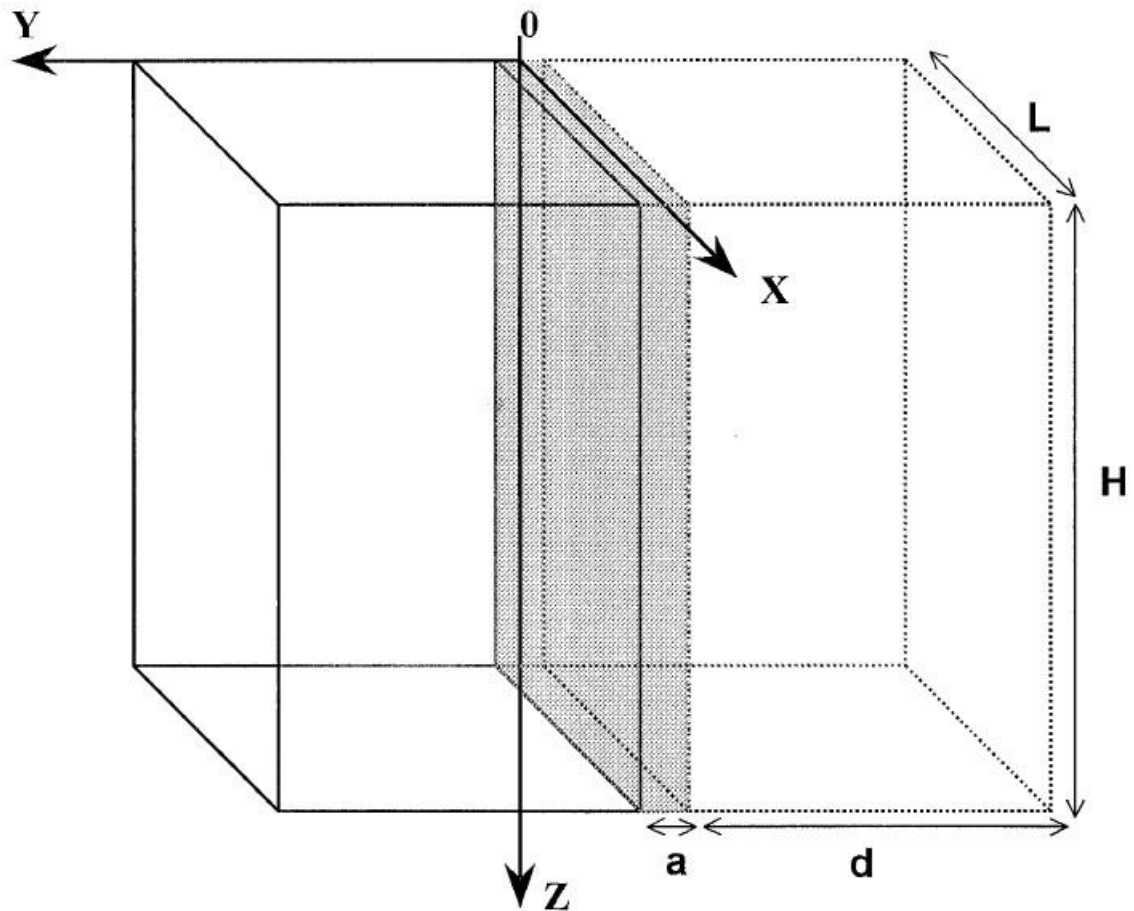
$$R = \frac{\rho g \alpha k H^2 G}{\mu \kappa} = GrPr \quad (4.1)$$

gdje  $\rho$  označava gustoću,  $g$  gravitaciju,  $\alpha$  koeficijent ekspanzije,  $k$  propusnost,  $\kappa$  termalnu difuziju,  $H$  visinu,  $\mu$  viskoznost fluida, i  $G$  je vertikalni geotermalni gradijent (Tournier et al., 2000). Na temelju ove formule možemo zaključiti da konvekcija ovisi o poroznom materijalu, koji je okružen provodnim medijem i pod stalnim utjecajem vertikalnog geotermalnog gradijenta.

Istraživanja su pokazala da temperaturne anomalije mogu biti objašnjene pomoću konveksijskih sustava unutar rasjednih zona, odnosno da regionalni tokovi unutar područja istraživanja jesu pod utjecajem konveksijskih toplinskih tokova (Bachler, 2003).

Kod konveksijskog prijenosa topline kroz vertikalni rasjed, veliki utjecaj ima odnos širine ( $a$  na slici 4-4) i visine ( $H$  na slici 4-4) rasjeda (Tournier et al., 2000; Zhao et al., 2008). Ukoliko je visina pukotine ili rasjeda manja u odnosu na širinu pukotine, pa veći utjecaj ima lateralni transfer topline, snaga konvekcije može se opisati pomoću modificiranog Rayleighovog broja prema Tournieru et al., (2000):

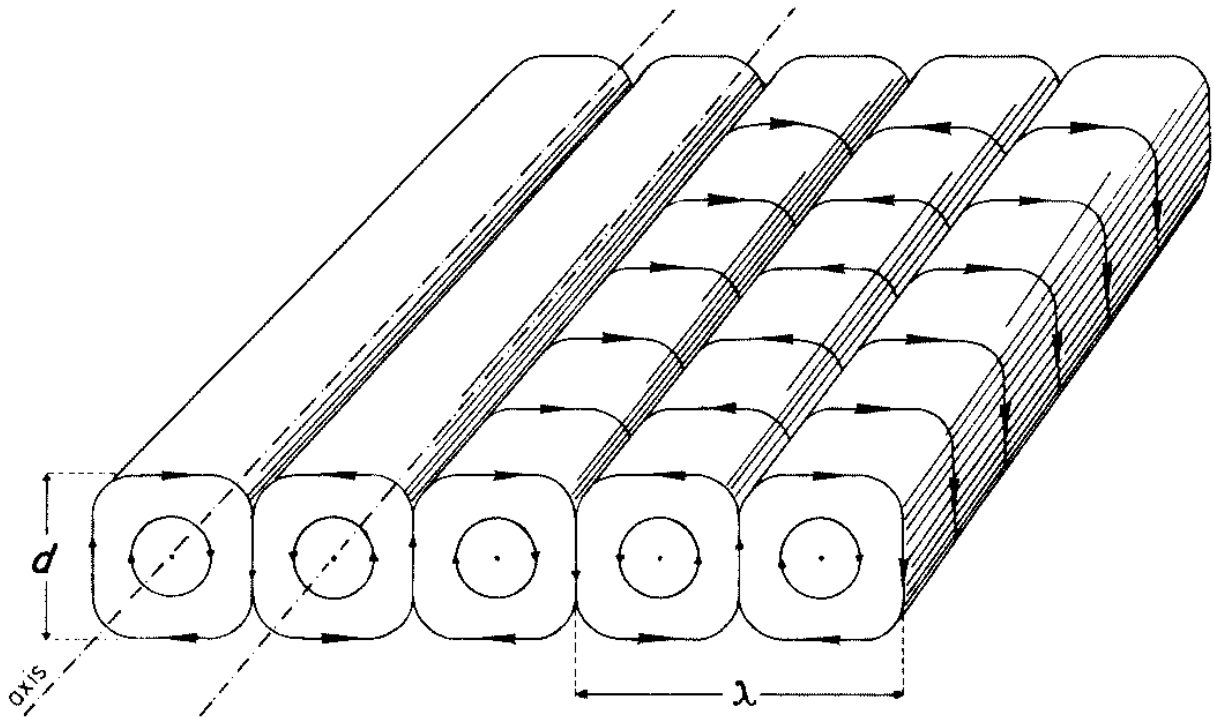
$$R = Ra^2 / H^2 \quad (4.2)$$



Slika 4-3. Geometrijski model korišten prilikom računanja Rayleighovog broja u rasjednoj zoni (Turnier et al. , 2000)

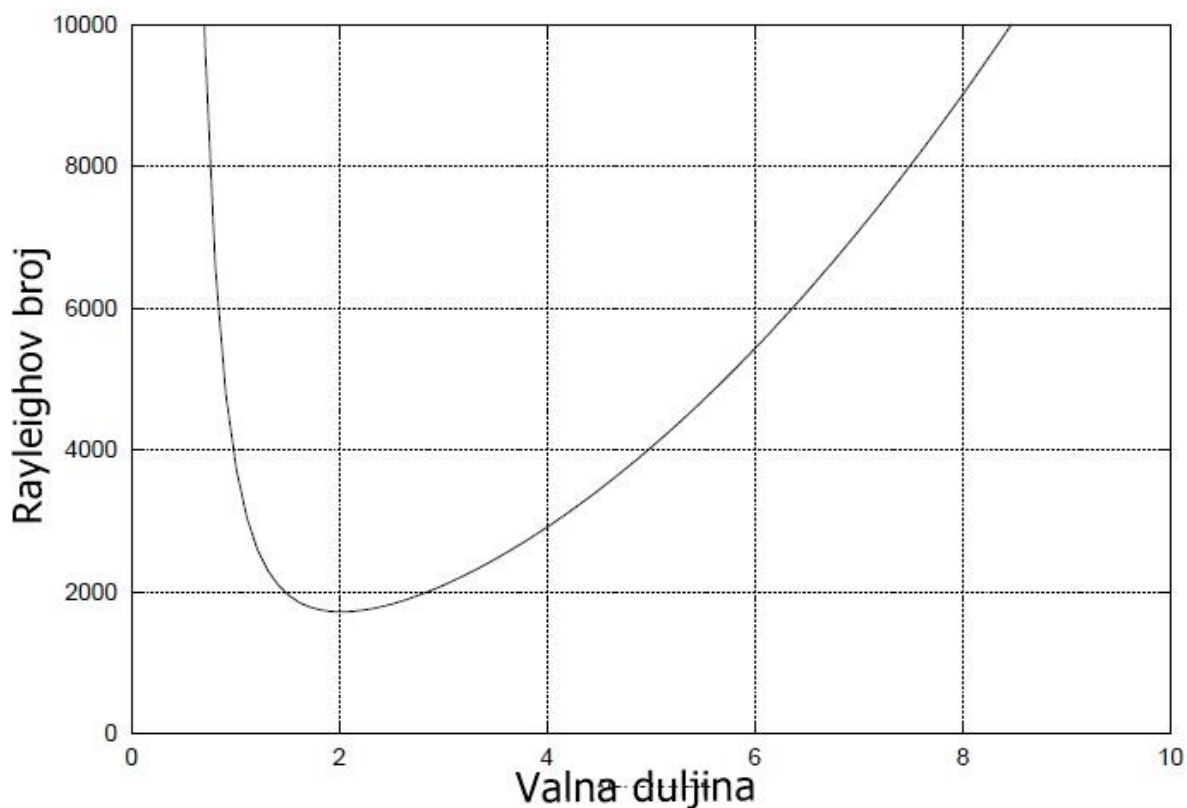
Pojam "prirodna konvekcija" u literaturi zna biti poznat i pod imenom Rayleigh – Benardova konvekcija. Oni su razmatrali slučaj kada se fluid nalazi između dva izotermalna kruta sloja. Ako je gornji sloj topliji od donjeg, ne dolazi do konvekcije. Ukoliko se donji sloj zagrije i topliji je od gornjeg, utjecaj konvekcije na fluid između njih započinje. Kretanje konvekcije unutar fluida, koji se nalazi između dviju izotermalnih ploča, je u obliku kontra-rotirajućih paralelnih valjaka, koje se može opisati valnom duljinom " $\lambda$ " i debljinom sloja "d" (Norris, 2000) (slika 4-4).





Slika 4-4. Geometrija Rayleigh–Brenardove konvekcije (Norris, 2000)

Za male vrijednosti Rayleighovog broja viskoznost fluida nadmašuje silu uzgona, i tada je fluid u stanju mirovanja. Ukoliko dođe do promjene, gdje je sila uzgona jednaka viskoznosti, ili je premašuje, tada dolazi do pojave prirodne konvekcije. Na slici 4-5 uočavaju se ograničene vrijednosti Rayleighovog broja. Prema Norrisu (2000), koji je opisao Rayleighov broj kao funkciju valne duljine rotirajućih valjaka, sve ispod linije predstavlja fluid u mirovanju, a iznad linije dolazi do pojave konvekcije. Na temelju toga izračunao je kritični broj koji predstavlja pojavu konvekcije. Kritični Rayleighov broj iznosi  $Ra_c = 1707,8$  za valnu duljinu  $\lambda_c = 2,016$ , i to se odnosi samo na slučaj između dva kruta sloja.



Slika 4-5. Kritična točka Rayleighovog broja kao funkcija valne duljine (Norris, 2000)

#### 4.5. Seizmička istraživanja

Seizmička istraživanja su skup geofizičkih metoda koje se temelje na registriranju umjetno izazvanih potresnih valova nakon njihovog povratka iz podzemlja. Svojstva snimljenih seizmičkih valova mijenjaju se pod utjecajem elastičnih svojstava stijena u podzemlju koja ovise o poroznosti, propusnosti, litološkom sastavu i kompakciji stijena, te prisutnosti i vrsti fluida u njima. Upravo zbog toga, elastični valovi putuju različitim brzinama kroz različite stijene pa se u većini slučajeva granica koja označava promjene brzina podudara i s geološkim granicama (Šumanovac, 2012).

Istraživanje se temelji na izazivanju elastičnih titraja blizu površine Zemlje. Ti titraji se šire različitim brzinama kroz stijene i pri povratku prema površini registriraju se na seizmometrima i geofonima, uređajima raspoređenim po površini koji bilježe titraje koji se odbijaju od granica u podzemlju. Na geološkim granicama valovi se reflektiraju i refraktiraju, tj. mijenjanju smjer svog širenja te prelaze iz P u S valove i obratno, zatim se vraćaju do površine gdje su registrirani na prijammnicima kao zapisi amplitude primljenog signala tijekom vremena, odnosno kao seizmički tragovi (Šumanovac, 2012).

Seizmički val može biti longitudinalni ili P-val i transverzalni ili S-val. Kod P-vala čestice titraju u smjeru rasprostiranja vala, što uzrokuje promjenu volumena u materijalu, stezanje i rastezanje. S-val je vrsta vala gdje čestice titraju okomito na smjer širenja vala te dolazi do promjene oblika, a ne volumena kao kod P-vala (Šumanovac, 2007).

Prilikom istraživanja ležišta fluida, posebno se istaknula refleksijska seizmika koja upravo zbog velike moći razlučivanja daje razmjerno puno više podataka u usporedbi s ostalim metodama. Metoda može registrirati niz diskontinuiteta u podzemlju, dok ostale metode spoje djelovanje niza diskontinuiteta u jednu anomaliju (Šumanovac, 2012).

#### 4.5.1 Refleksijska seizmika

Refleksijska seizmika temelji se na mjerenju vremena širenja elastičnih seizmičkih valova. Od refrakcijske seizmike razlikuje se po tome što se ovdje mjeri vrijeme valova koji se približno vertikalno reflektiraju na površini različite gustoće i putuju do geofona. Svojstva tih valova izmijenjena su pod utjecajem elastičnih svojstava stijena kroz koje putuju od izvora pa sve do geofona na površini, pa upravo ta promjena na ulaznom valu koji je generiran na izvoru omogućuje određivanje strukturno-tektonskih odnosa, kompakcije stijena te sadržaja i vrste fluida u njima (Šumanovac, 2012). Dobivena seizmička slika je zapravo privid petrofizikalnih svojstava stijena zbog čijih se razlika i stvaraju refleksi. Najveći razlog uspjeha ove metode upravo leži u činjenici da se podatci dobiveni mjerenjima obradom mogu pretvoriti u seizmičke profile koji služe kao prikaz geoloških struktura u podzemlju (Sheriff, 1995).

#### 4.5.3. Interpretacija seizmičkih profila

Temelj određivanja strukturno-stratigrafskih odnosa, migracije fluida, ili sama njihova prisutnost na lokaciji istraživanja je seizmički profil. On predstavlja skup obrađenih seizmičkih podataka, na kojem su na vodoravnu os uneseni položaji CDP-točaka (engl.

Common Depth Point; zajednička dubinska točka) na profilu, a udaljeni su u metrima i predstavljaju podatke u dubinskom mjerilu. Na okomitoj ravnini nalaze se vremena nailazaka odbijenih valova, još poznato kao dvostruko vrijeme (engl. Two Way Time), a predstavljaju seizmičke podatke u vremenskom mjerilu. Pomoću dinamičke korekcije vrijednost dvostrukog vremena, koje se označava s  $2t$ , je svedena na vrijednost kada se geofon i točka paljenja nalaze u istoj točki kako bi se dobio okomiti put zrake, jer u tom slučaju krivulja bi bila zakrivljena. Svaki seizmički profil sastoji se od refleksa, odnosno pozitivnih polariteta i negativnih polariteta. U trobojnom prikazu, tzv. plavo-bijelo-crvenom (engl. *blue-white-red*), pozitivne amplitude su označene plavom bojom a negativne crvenom bojom (Šumanovac, 2012).

Interpretacija seizmičkih profila sastavni je dio svakog seizmičkog istraživanja. Budući da se temelji na refleksijskoj seizmici, koja ima najveću moć razlučivanja, ona nam daje najbolji prikaz i najpreciznije podatke o podzemnoj geološkoj građi istraživanog područja. Problem seizmičkog profila je da se ne može jednoznačno interpretirati, jer refleksi ne dolaze samo s granica koje predstavljaju litološku promjenu, nego i s granica unutar slojeva, zato su vrlo bitni bušotinski podatci, kako bi se refleksi mogli geološki interpretirati. Pomoću geofizičkih mjerenja u bušotini, a misli se na karotažu, određuju se granice litostratigrafskih jedinica koje se nazivaju korelacijskim horizontima. Oni se prenose na seizmički profil i prate dalje pomoću refleksa. Oni se najčešće prate po negativnim polaritetima, crveno obojenim, koji upućuju na promjene facijesa, litološke promjene, razlomljenost stijena i tako dalje. Prilikom praćenja, možemo naići na mnogobrojne poteškoće, a jedni od njih su diskontinuiteti. Rasjedi predstavljaju prekid refleksa što izaziva veliki problem, jer je teško odrediti nastavak refleksa poslije rasjeda, a samim time i iznos skoka i hoda rasjeda. Zato je vrlo bitno imati što gušći raspored seizmičkih profila i istražnih bušotina kako bi se granice mogle prenositi s jednog profila na profile koji ih sijeku (Šumanovac, 2012). Na profilu je teško odrediti položaj rasjeda. Grupa refleksa može prikazivati slabiji kontinuitet u blizini rasjeda, i oni mogu slično izgledati te se ne može odrediti iznos pomaka. Rasjed također otežava praćenje horizonata s jednog profila na drugi. Zato je interpretacija često subjektivna i ponekad su potrebna dodatna istraživanja kako bi se dobili što pouzdaniji podatci o području istraživanja.

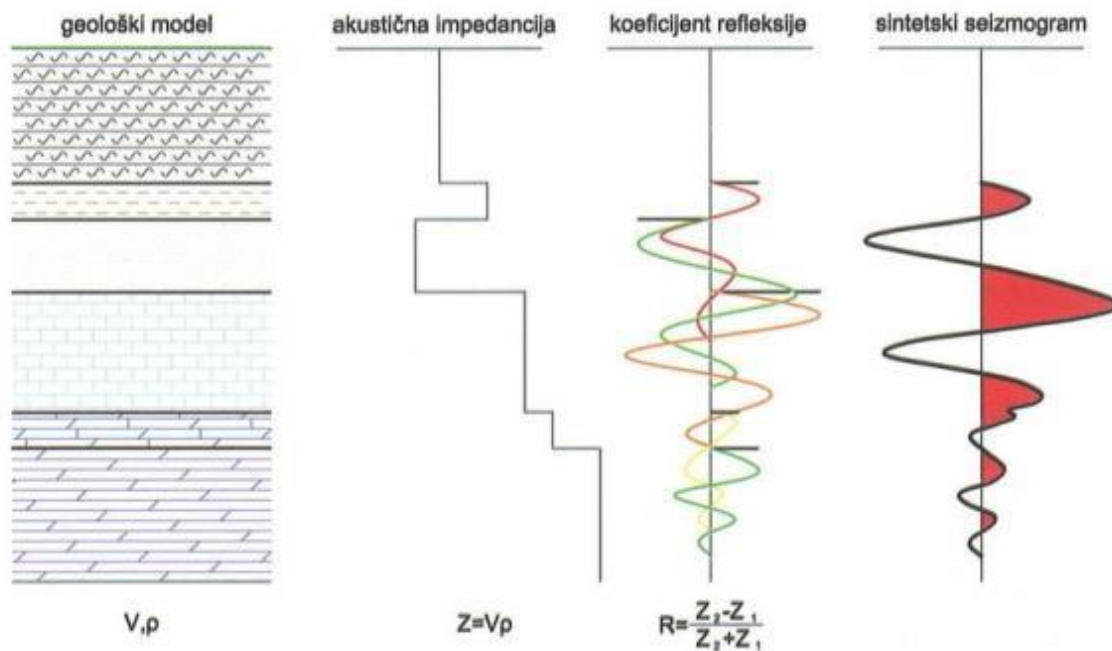
#### 4.5.4. Sintetski seizmogram i zakon brzina

Sintetski seizmogram je izračunati seizmički model određenog dijela podzemlja. Možemo reći da je izrada sintetskog seizmograma zapravo seizmičko modeliranje, koje može biti jednodimenzionalno (1D), dvodimenzionalno (2D) i trodimenzionalno (3D) (Šumanovac, 2012). Glavna zadaća mu je povezivanje bušotinskih podataka u dubinskom mjerilu i seizmičkih podataka u vremenskom mjerilu, odnosno usporedba seizmičkih podataka kako bi se refleksima na seizmičkom profilu pridružile litološke granice koje su određene u bušotini, pomoću jezgrovanja ili karotaže (Šumanovac, 2012).

Ulazni podatci za izradu sintetskog seizmograma dobivaju se iz karotažnih mjerenja, gdje se gustoće slojeva dobivaju karotažom gustoće, a brzine seizmičkih valova kroz stijene zvučnom karotažom. Njihov umnožak predstavlja akustičnu impedanciju ( $Z$ ) pomoću koje se opisuju svojstva svakog sloja. Iz akustične impedancije mogu se izračunati koeficijenti refleksije za svaku granicu slojeva, prema izrazu:

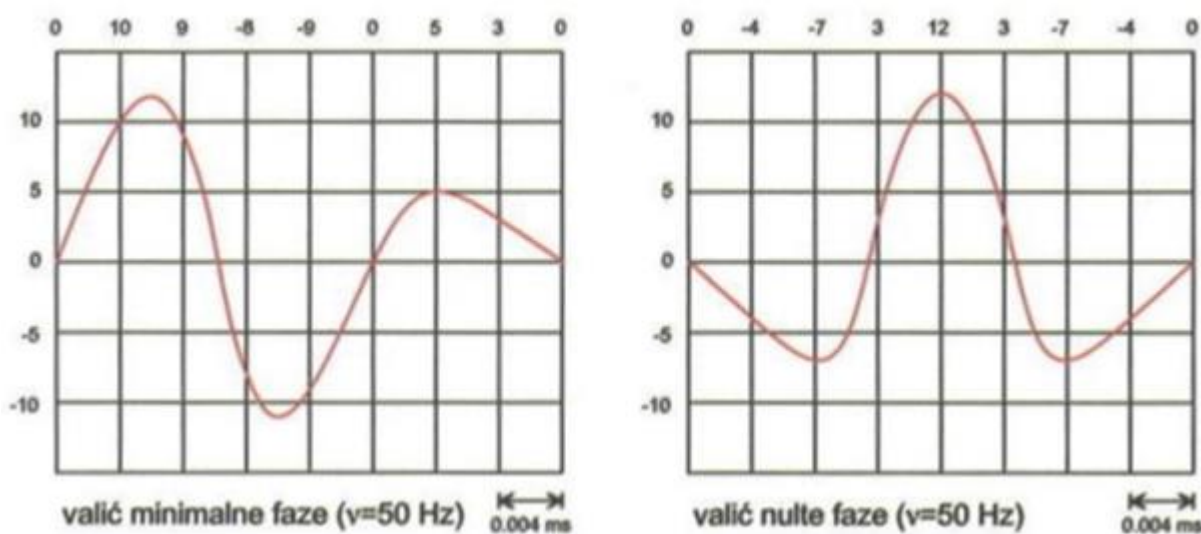
$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{V_2 \rho_2 - V_1 \rho_1}{V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1} \quad (4.3)$$

gdje  $V_1$  i  $V_2$  predstavljaju brzine seizmičkih valova ispod i iznad granice slojeva a  $\rho_1$  i  $\rho_2$  gustoće gornjeg i donjeg sloja (slika 4-6) (Šumanovac, 2012).



Slika 4-6. Skica izrade sintetskog seizmograma (Šumanovac, 2012 prema Sheriff, 1978)

Kod izračuna podešava se polaritet i frekvencija valića čiji oblik uvijek ostaje isti tijekom širenja kroz sloj. Množenjem ulaznog vala s koeficijentom refleksije dobiva se pojedinačni refleksi sa svake granice u podzemlju, a taj proces je poznat kao konvolucija. Kod ulaznih valića koristi se uglavnom neki od teoretskih valića: minimalne faze, nulte faze, Rickerov i tako dalje (slika 4-7) (Šumanovac, 2012).



Slika 4-7. Teoretski valići koji se koriste za izradu sintetskog seizmograma (Šumanovac, 2012 prema Sheriff, 1978)

Jedna od bitnih stavki sintetskog seizmograma je ta da nam omogućuje provjeru interpretacije, tj. ako seizmogram odstupa od dobivenog seizmičkog profila, interpretacija nije valjana. Osim toga služi također za odvajanje višestrukih refleksa, kako bi dobiveni rezultati bili jasniji, ali i služi za određivanje polariteta i pomaka faza. Oni ukazuju na litološke promjene i na pojave različitih vrsta fluida (Šumanovac, 2012).

## 5. Rezultati

Na temelju vrijednosti temperatura izmjerenih tijekom testiranja bušotine (DST-a) izračunati su prosječni geotermalni gradijenti u istočnom dijelu Dravske depresije, a korišteni su podaci iz sveukupno 29 bušotina. Prosječni geotermalni gradijent varira u dosta širokome rasponu, od 3,33 °C/100 m koliko je izračunato u bušotini B21, pa do maksimalne vrijednosti od 6,03 °C/100 m koja je izračunata u bušotini B4.

Tablica 5.1. Naziv bušotina i njihovi geotermalni gradijenti

BUŠOTINA	DUBINA (m)	TEMPERATURA (°C)	GEOTERMALNI GRADIJENT (°C/100m)
B1	739,00	52,7	5,64
B2	1537,67	97,0	5,59
B3	1552,00	91,0	5,15
B4	1077,00	76,0	6,03
B5	1825,00	104,0	5,09
B6	1916,00	121,0	5,74
B7	2637,50	148,8	5,22
B8	2625,50	149,0	5,25
B9	1228,50	73,9	5,12
B10	2561,00	149,0	5,39
B11	1925,80	119,3	5,62
B12	1285,00	65,0	4,20
B13	2000,00	110,5	4,97
B14	2526,00	129,0	4,66
B15	2601,00	132,2	4,66
B16	1346,50	65,0	4,01
B17	1077,90	50,0	3,61
B18	2410,00	115,0	4,31
B19	1526,45	77,8	4,37
B20	1976,70	107,0	4,85
B21	961,00	43,0	3,33
B22	2788,00	146,1	4,84
B23	3707,00	176,6	4,47
B24	1736,00	98,9	5,06
B25	1670,00	79,4	4,09
B26	2243,00	121,0	4,90
B27	2868,00	149,0	5,21
B28	1610,00	95,0	5,21
B29	2982,50	123,0	3,75

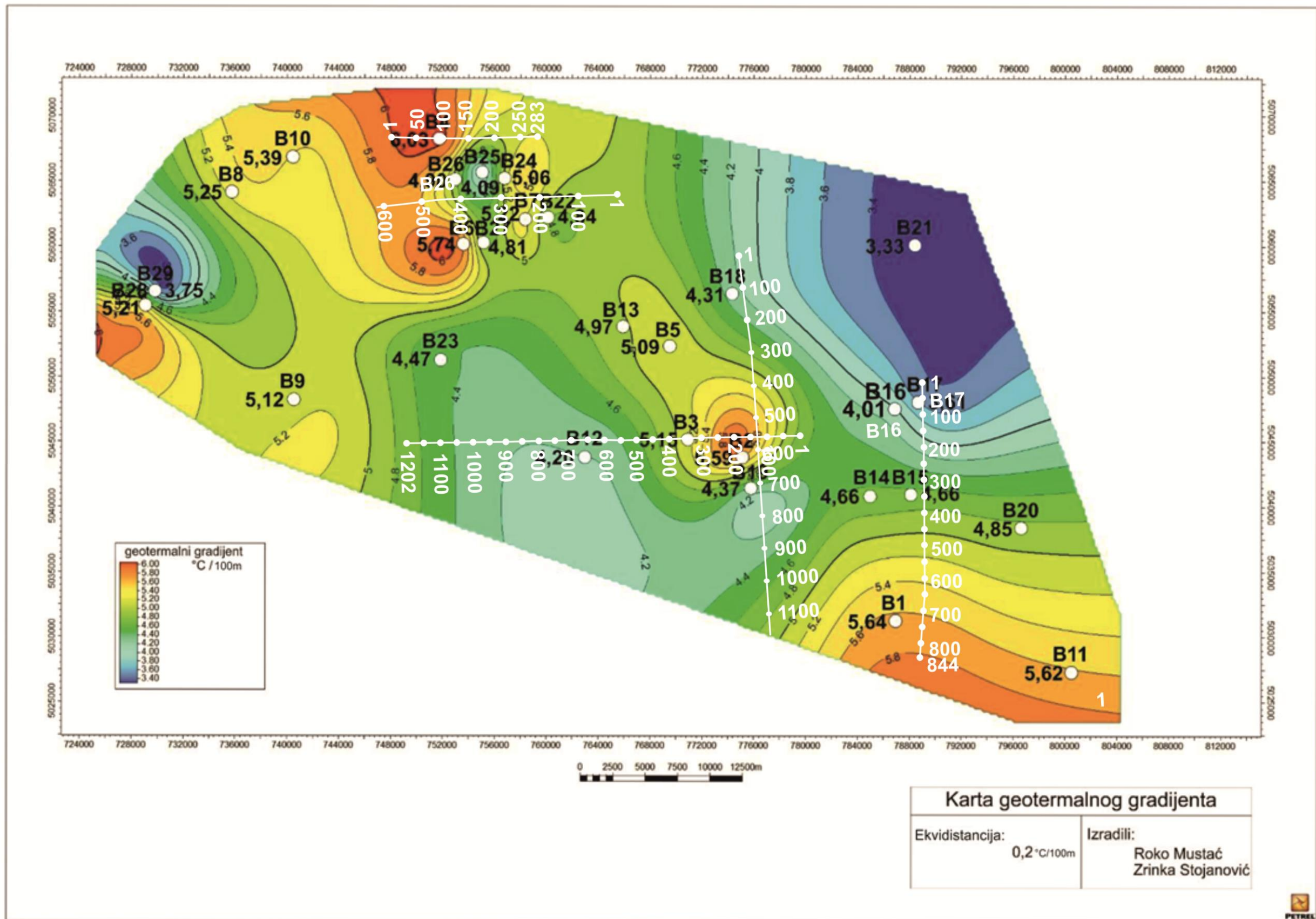


## 5.1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta

Karta prosječnog geotermalnog gradijenta (slika 5-1) predstavlja grafički prikaz raspodjele prosječnoga geotermalnog gradijenta u istočnome dijelu Dravske depresije. Na karti se uočava raspon boja od plave pa sve do žarko crvene boje. Boje predstavljaju vrijednosti geotermalnog gradijenta na istraživanom području, gdje plava predstavlja najniže, a crvena predstavlja najviše procijenjene geotermalne gradijente. Korištena je ekvidistancija  $0,2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . Na karti su označene lokacije 29 bušotina na kojima su provedena DST-mjerenja, te je određena temperatura formacije. Iz tablice 5.1 vidi se da je prosječni geotermalni gradijent istraživanog područja veći od svjetskog prosjeka koji je  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (Jelić et al., 1995).

Odstupanja, obojena plavom bojom, su vidljiva na sjeveroistočnom dijelu karte i zapadnom dijelu karte, gdje je gradijent manji od 4. Za bušotinu B21 koja se nalazi u sjeveroistočnom dijelu procijenjeni geotermalni gradijent iznosi  $3,33^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , i predstavlja najmanju zabilježenu vrijednost na istraživanome području, a za bušotinu B29 koja je locirana uz sami rub istraživanoga područja na zapadu iznosi  $3,75^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ .

Povišeni gradijenti nalaze se u sjevernom dijelu i jugoistočnom dijelu istraživanoga područja. Jasno su označeni crvenom bojom i kreću se od  $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  pa sve do  $6,03^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  zabilježenom u bušotini B4, a ta vrijednost ujedno predstavlja najveći geotermalni gradijent na istraživanome području.



Slika 5-1. Karta prosječnog geotermalnog gradijenta

## 5.2. Karta recentnog toplinskog toka i karta prosječnog geotermalnog gradijenta

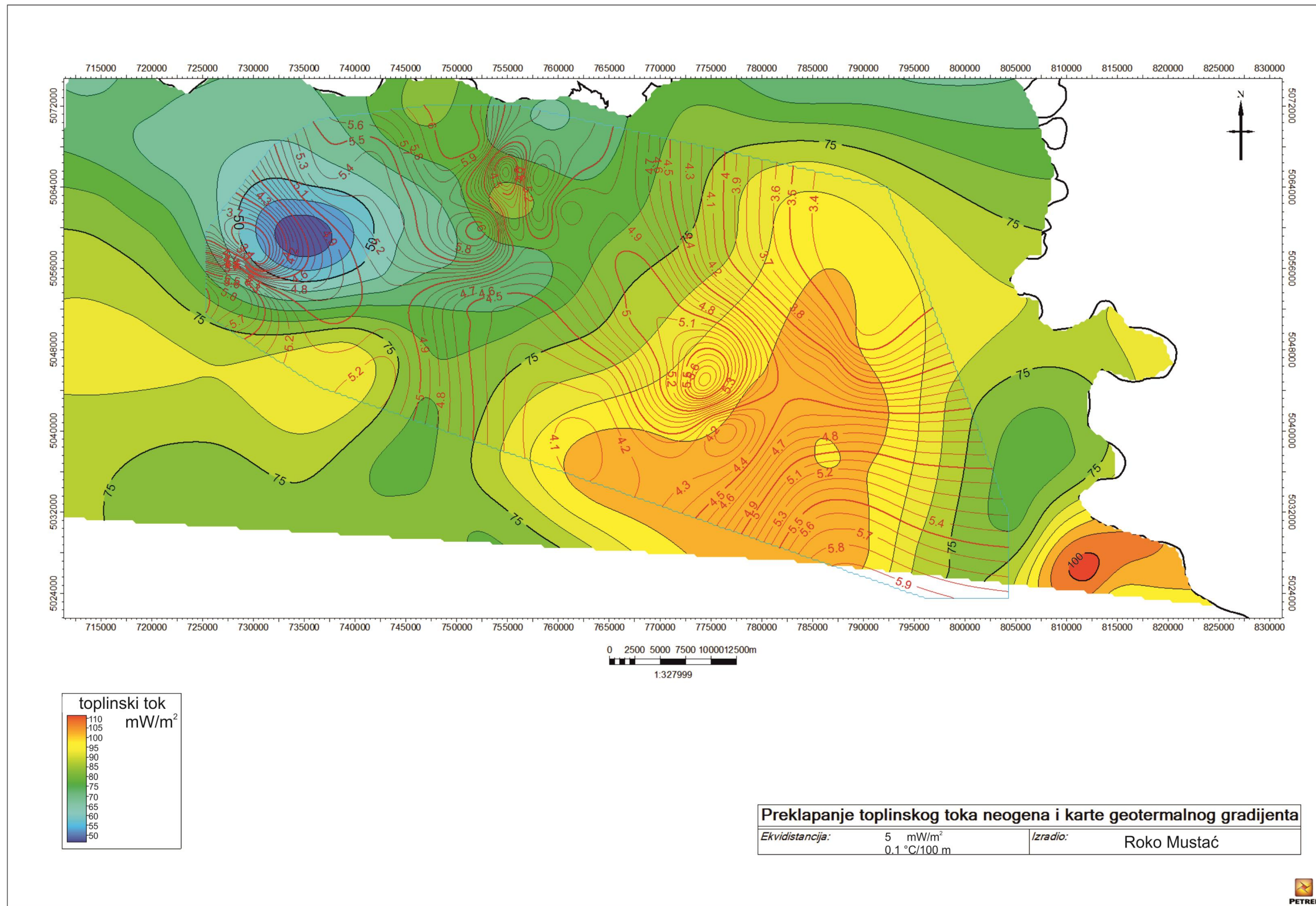
Slika 5-2 predstavlja preklapanje karte prosječnog geotermalnog gradijenta na području istočnog dijela Dravske depresije i karte recentnog toplinskog toka iz Cvetković et al. (2019.). Ovim postupkom pokušavamo utvrditi podudaranje dobivenih rezultata s već utvrđenim toplinskim tokom. Kao što je već spomenuto, geotermalni gradijent je proporcionalan toplinskom toku, te se očekuje da se maksimumi tih vrijednosti prostorno podudaraju.

Korištena ekvidistancija za kartu prosječnog geotermalnog gradijenta crveno obojena je  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , a za kartu recentnog toplinskog toka je  $5\text{ mW}/\text{m}^2$ . Karta toplinskog toka sastoji se od paleta boja koje predstavljaju vrijednost toplinskog toka na istraživanom području. Raspon boja je od plave do žarko crvene. Plava boja predstavlja najmanje vrijednosti toplinskog toka, a crvena najveće. Izolinije karte prosječnog geotermalnog gradijenta predstavljaju varijabilnost procijenjenih vrijednosti geotermalnog gradijenta na istraživanom području.

Na slici 5-2 uočava se poklapanje povišenog geotermalnog gradijenta u jugoistočnom dijelu karte s povišenim vrijednostima toplinskog toka. Vrijednost gradijenta u tom dijelu kreće se u rasponu od  $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , pa do najveće zabilježene vrijednosti od  $5,9\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . Vrijednost toplinskog toka u tom području je od  $105\text{ mW}/\text{m}^2$ , i ide prema višem. To predstavlja znatno povišeni toplinski tok u usporedbi s ostalim područjima na lokaciji istraživanja. U sjevernom dijelu karte gdje je zabilježen najveći geotermalni gradijent od  $6,03\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , vrijednost toplinskog toka je razmjerno niža i kreće se u rasponu od  $75\text{ mW}/\text{m}^2$ , pa do  $87\text{ mW}/\text{m}^2$ . Najniži geotermalni gradijent nalazi se u zapadnom dijelu karte, i to se jasno poklapa s kartom toplinskog toka podloge neogena. Vrijednost toplinskog toka je u rasponu od  $51\text{ mW}/\text{m}^2$ , što predstavlja najmanju vrijednost, pa do  $69\text{ mW}/\text{m}^2$ .

Jedina razlika između dvije karte je u sjeverozapadnom dijelu istraživanog područja, gdje je zabilježen povišeni prosječni geotermalni gradijent od  $5,25\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , unutar područja s minimalnim vrijednostima toplinskog toka na lokaciji istraživanja.





Slika 5-2 Karta preklapanja recentnog toplinskog toka (Cvetković, 2019 modificirana prema Lenkey, 2002.) i karte prosječnog geotermalnog gradijenta, te lokacija seizmičkih profila

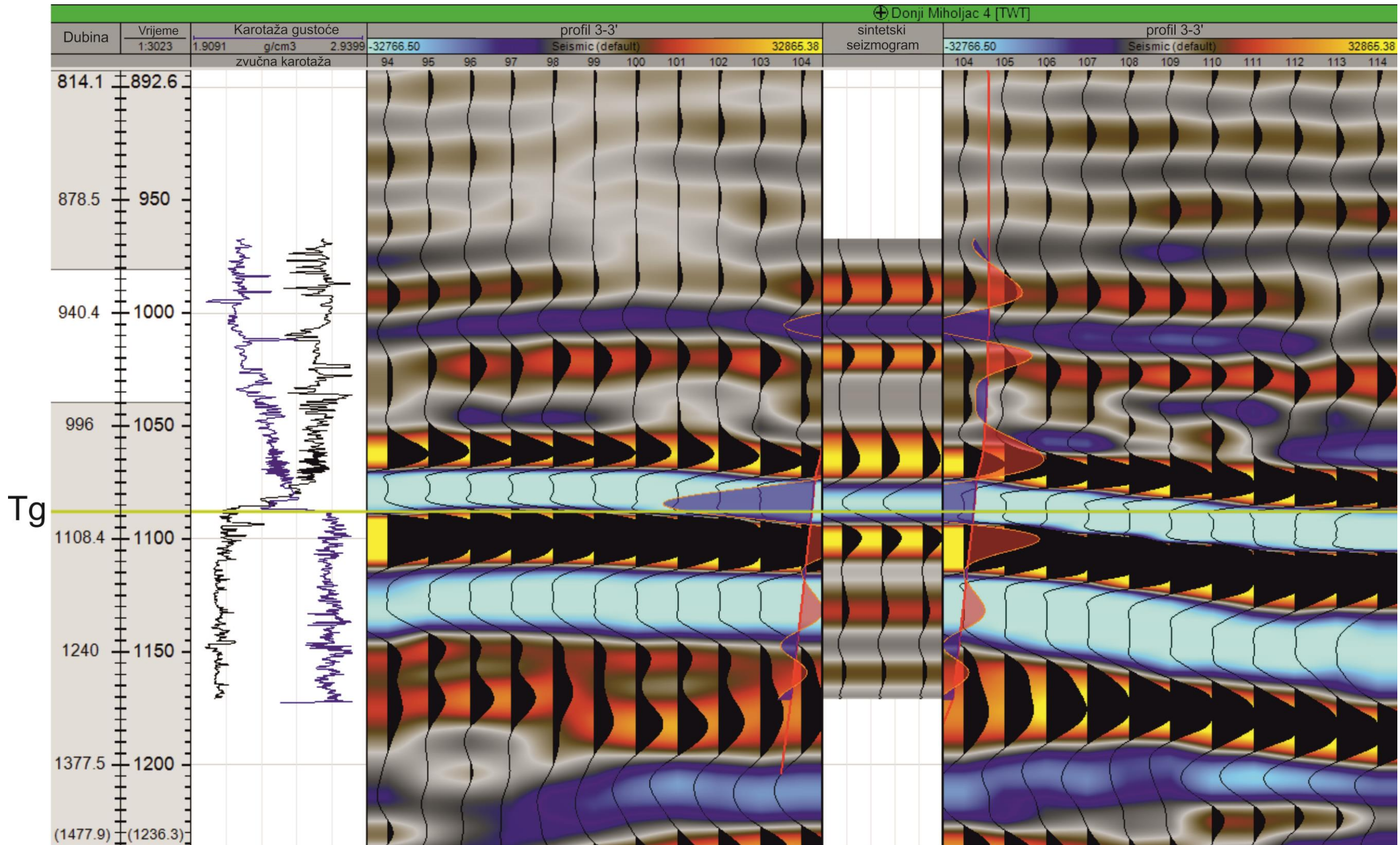
### 5.3. Izrada sintetskog seizmograma za bušotinu B4

Za izradu sintetskog seizmograma koristio se *Petrel E&P software platform 2018*. Sintetski seizmogram (slika 5-3) u ovom diplomskom radu napravljen je za bušotinu B4. Bušotina B4 je izabrana jer nalazi na trasi seizmičkog profila 3-3', kojeg se planiralo koristiti za korelaciju litoloških granica određivanje repnog horizonta „Tg“ kako bi se dalje mogao ispratiti na seizmičkim profilima. Za izradu sintetskog seizmograma osnovni podaci su zvučna karotaža i karotaža gustoće. Karotaže su izmjerene samo u određenom dijelu bušotine, na dubini od 890 m pa sve do 1305 m. Budući da je zvučna karotaža mjerena samo u dijelu bušotine, te interval korelacije odgovara intervalu mjerenja zvučne karotaže, dobivena su donekle dobra podudaranja refleksa. Prvi postupak izrade je kalibracija karotažnih krivulja s mjerenim zakonom brzina. Zatim se birao valić za proces konvolucije. Za izradu koristio se Rickerov valić frekvencije od 25 Hz zbog najboljeg podudaranja. Valić zatim primjenjujemo na akustičnu impedanciju dobivenu iz karotaže gustoće i zvučne karotaže.

Korelacijom sintetskog seizmograma sa snimljenim seizmičkim podacima, uočavaju se djelomična nepreklapanja refleksa zbog povećane vrijednosti zvučne karotaže. Na intervalu od -1108,4 m pa sve do -1310 m uočavaju se neslaganja sintetskog seizmograma i snimljene seizmike. U intervalu od -903,26 m pa do -1074,68 m vrlo dobro je poklapanje podataka, a unutar tog raspona nalazi se reper „Temeljno gorje“ (Tg) (slika 5-3).

Nakon što je završen proces jednodimenzionalnog modeliranja (1D), a odnosi se na izradu sintetskog seizmograma, slijedi postupak praćenja seizmičkog horizonta na snimljenim seizmičkim profilima.





Slika 5-3. Sintetski seizmogram izračunat za bušotinu B4 s pripadajućim horizontom

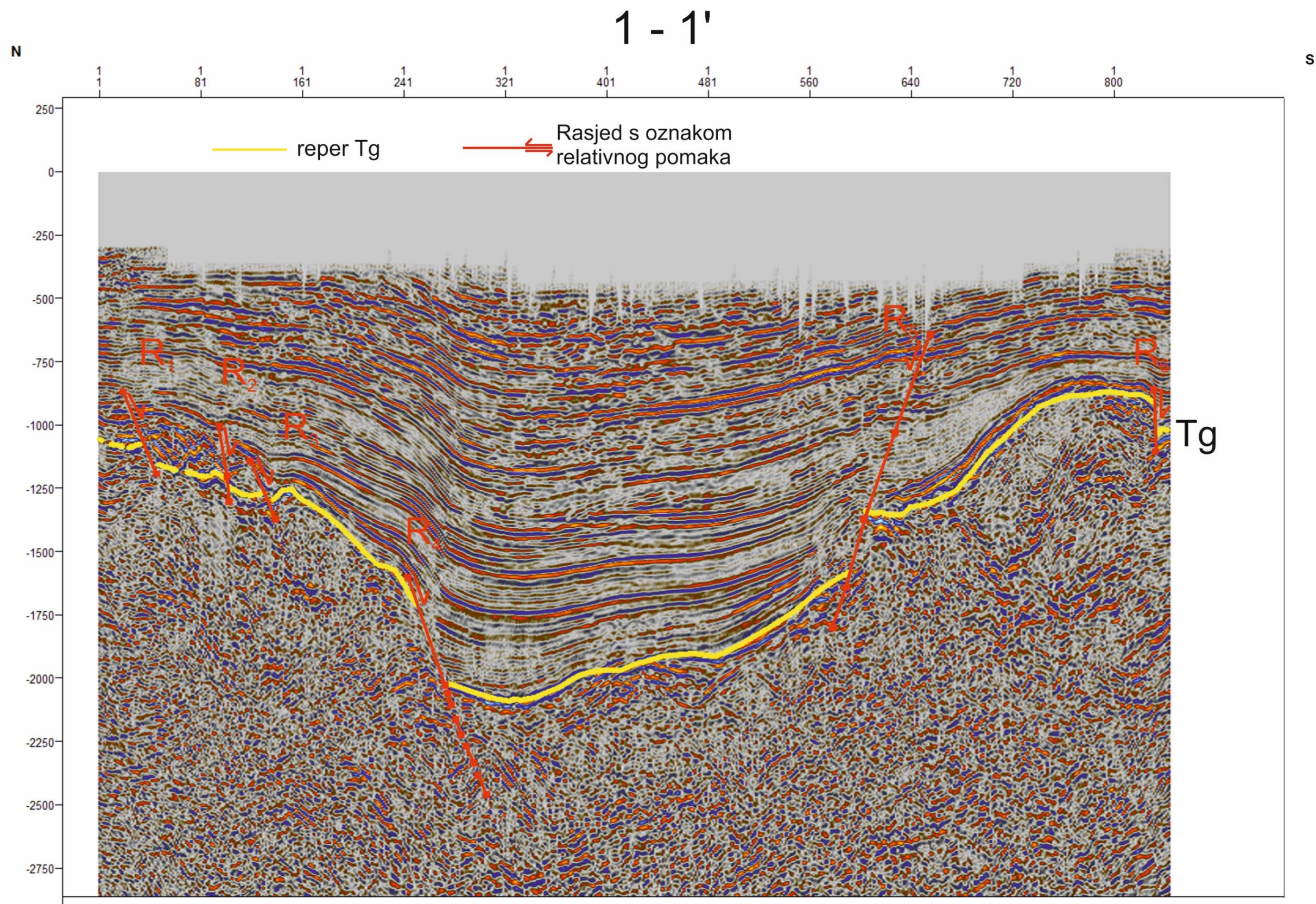
### 5.3. Interpretacija seizmičkih profila

Interpretacija seizmičkih horizonata i rasjeda, kako bi se utvrdila moguća migracija hidrotermalnih fluida, obavljena je u računalnom programu *Petrel E&P software platform 2018*. Program omogućava lakšu izradu i interpretaciju geoloških modela, interpretaciju seizmičkih podataka i bušotinsku korelaciju. Na temelju dobivenih podataka od Agencije za ugljikovodike, te izrađenog sintetskog seizmograma u bušotini B4 određena je i korelirana dubina rasprostiranja repnog horizonta „temeljno gorje“ (Tg), koji je interpretiran na odabranim seizmičkim profilima. Izabrani su oni seizmički profili koji se rasprostiru na dijelovima povišenog geotermalnog gradijenta i toplinskog toka na području istraživanja. Na svakom profilu, osim repnog horizonta Tg, nalaze se i položaji rasjeda.

#### 5.3.1. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 1 – 1'

Na profilu je vidljiv repni horizont „Tg“ te 4 rasjeda koji ga presijecaju R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>4</sub> i R<sub>5</sub>. Rasjed R<sub>3</sub> nije u kontaktu s horizontom Tg, ali je i dalje interpretiran zbog zanimljivog položaja (slika 5-4). Repni horizont „Tg“ predstavlja granicu podine depresije koja je bitno različitog litološkog sastava, i daljnjeg sedimentnog slijeda koji pripada Vukovarskoj formaciji. Podina se sastoji uglavnom od metamorfita i magmatita mezozojske i paleozojske starosti, dok Vukovarsku formaciju čine uglavnom efuzivi, lapori i pijesci (Hernitz, 1983). Horizont „Tg“ interpretiran je po cijelom profilu koji je pružanja sjever – jug, odnosno poprečno na Dravsku depresiju. Označeni su normalni rasjedi R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>4</sub> i R<sub>5</sub>, a rasjed R<sub>2</sub> ima najveći skok u iznosu od 250 ms. Na početku profila refleksi su ispresijecani i zamućeni, zbog moguće pojave efuziva ili razlomljenosti stijena, pa je horizont iscrtan isprekidanom linijom. Horizont „Tg“ označen je po seizmičkom refleksu negativnog polariteta, crvene boje, čija je amplituda povišena uzduž cijelog profila. U rubnim dijelovima, horizont se nalazi pliće u vremenskom intervalu od 1000 ms do 1250 ms, dok u srednjem dijelu profila gdje je zahvaćena struktura tektonske grabe Dravske depresije, omeđena dvama normalnim rasjedima R<sub>2</sub> i R<sub>4</sub>, horizont je interpretiran dublje, u vremenskom intervalu od 1750 ms pa do 2000 ms. U južnom dijelu profila, ploha paleoreljefa pokazuje antiformni oblik. Najjužniji rasjed R<sub>6</sub> interpretiran je na temelju postojanja dublje smještenih kontinuiranih refleksa uz krajnji južni rub profila.





Slika 5-4. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 1-1'

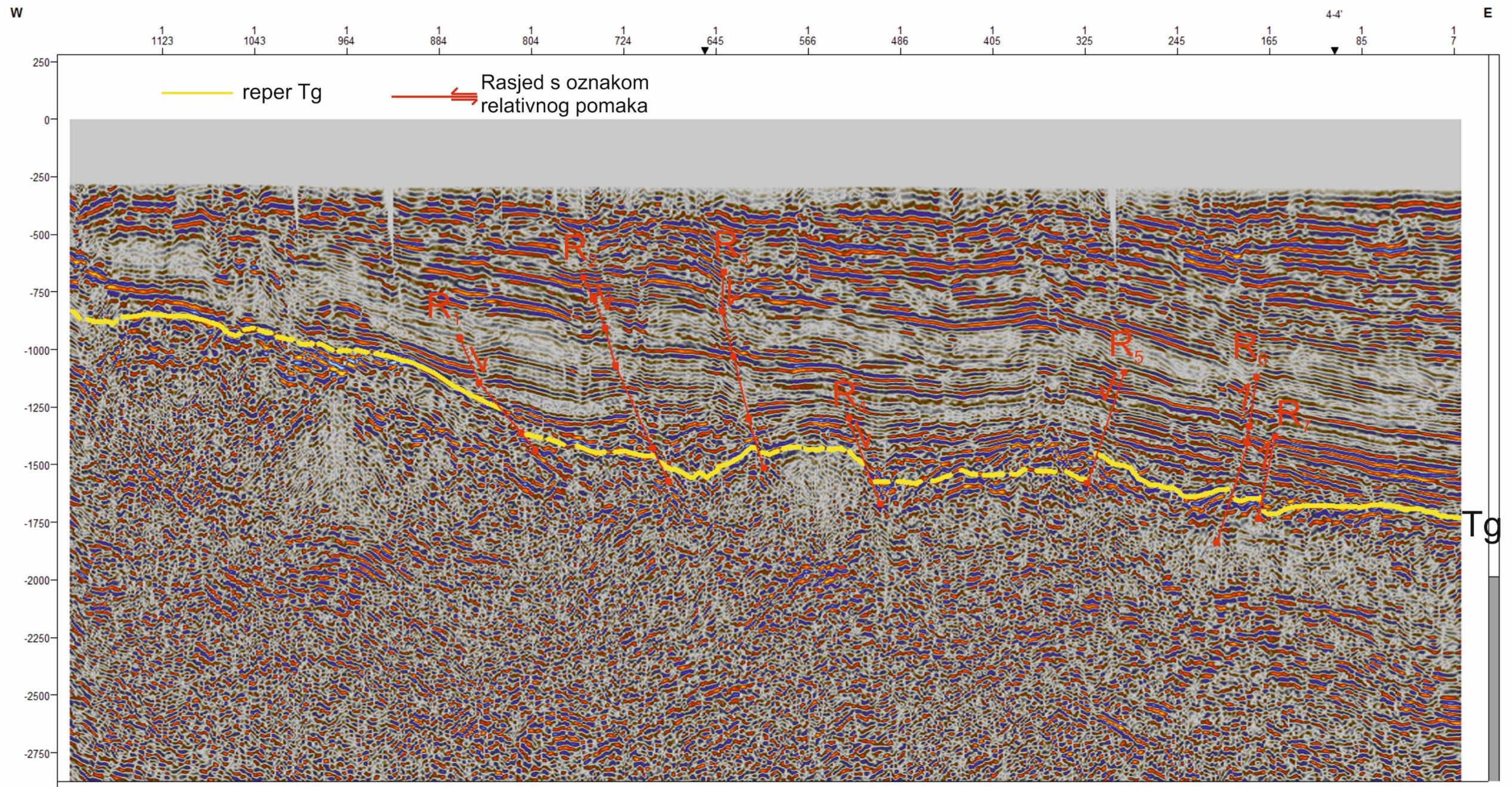


### 5.3.2. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 2 – 2'

Na seizmičkom profilu 2 – 2' trase pružanja zapad – istok interpretiran je reporni horizont „Tg“ (slika 5-5). Na pojedinim dijelovima označen je isprekidanom linijom, zbog otežanog praćenja seizmičkog refleksa. Idući od zapada prema istoku, uočava se da naslage lagano tonu, odnosno u zapadnom dijelu profila naslage se nalaze pliće, u vremenskom intervalu od 750 ms do 1000 ms, a u istočnom dijelu u vremenskom intervalu od 1500 ms do 1750 ms. Refleks je zahvaćen rasjedanjem, i većina ih je normalnog karaktera osim rasjeda R<sub>6</sub> i R<sub>7</sub> koji su reversni. Normalni rasjedi su R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub>, a rasjed R<sub>4</sub> ima najveći skok od 100 ms. Uočava se da bi neki od interpretiranih rasjeda mogli biti potencijalno učinkoviti putevi migracije hidrotermalnih fluida s obzirom na to da zahvaćaju debeli paket sedimentata. Reper „Tg“ ponovno je postavljen na granici podine depresije i mlađih naslaga (pretpostavljeno prvog sedimentnog slijeda, odnosno Vukovarske formacije) koje su dosta izražene kao serija relativno dobro uočljivih refleksa. Iznad repera „Tg“ refleksi su uglavnom paralelni, lako se prate, osim u slučajevima rasjedanja ili mogućih bočnih promjena facijesa.



# 2 - 2'



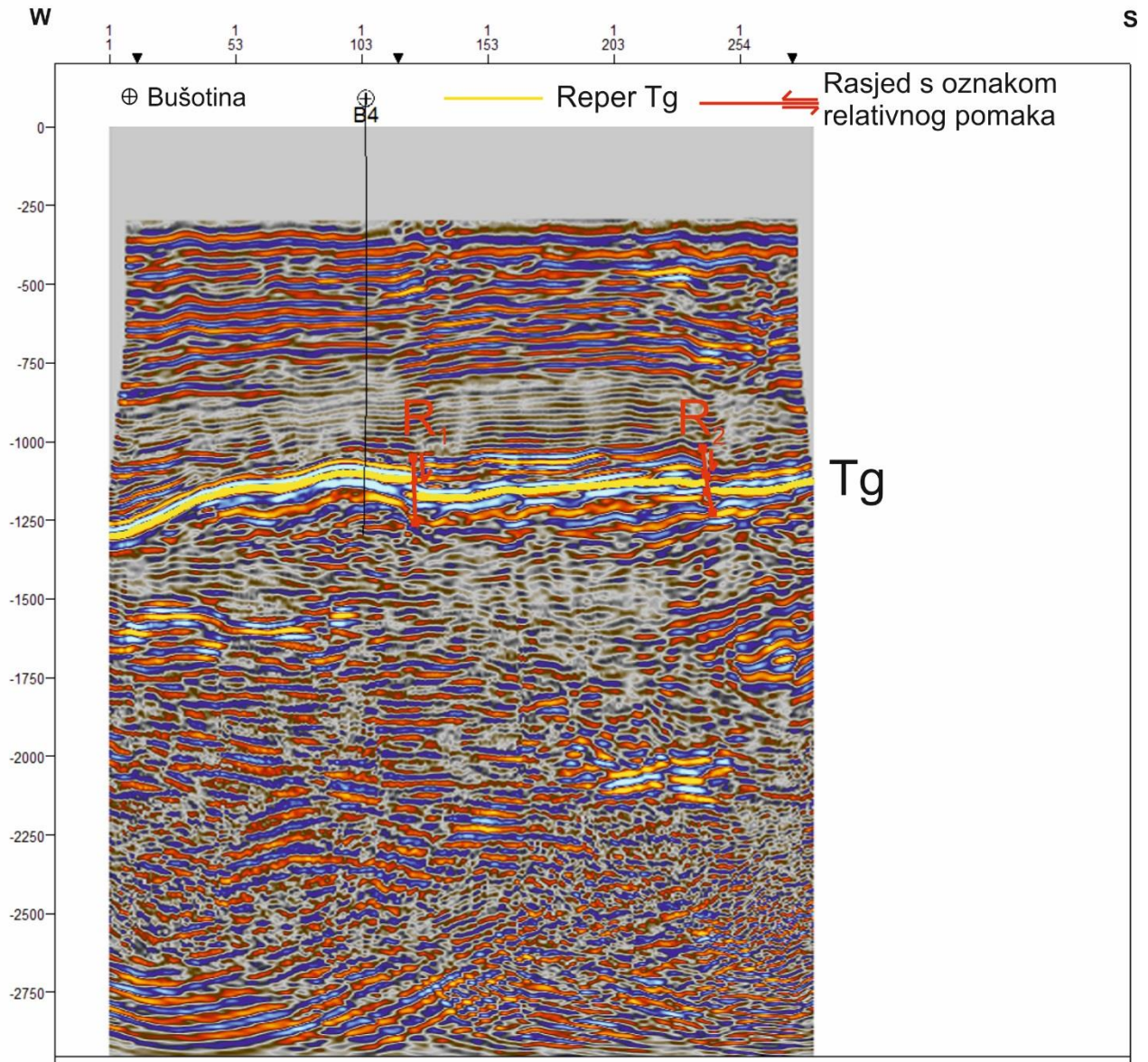
Slika 5-5. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 2 - 2'



### 5.3.3. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 3 – 3'

Slika 5-6 predstavlja seizmički profil 3 – 3' kretanja zapad – istok. Na profilu je vidljiv reporni horizont „Tg“, interpretirani rasjedi i bušotina B4. U bušotini B4 provedena su karotažna mjerenja pomoću kojih je izrađen sintetski seizmogram za povezivanje bušotinskih podataka i seizmičkih podataka za lakše određivanje litološke granice i interpretaciju repernog horizonta „Tg“. Vidljiva su dva normalna rasjeda  $R_1$  i  $R_2$  skoro vertikalnog položaja. Rasjedi su malih skokova, pri čemu je rasjed  $R_1$  većeg skoka u iznosu od 40 ms. Horizont „Tg“ interpretiran je u seriji dobro vidljivih refleksa koji predstavljaju granicu podine depresije i mladih naslaga. Iznad horizonta uočavaju se jasno vidljivi, uglavnom paralelni refleksi. Horizont se na ovom profilu nalazi relativno na istoj dubini, bez ikakvih promjena, u vremenskom intervalu od 1250 ms pa do 1050 ms.

# 3 - 3'



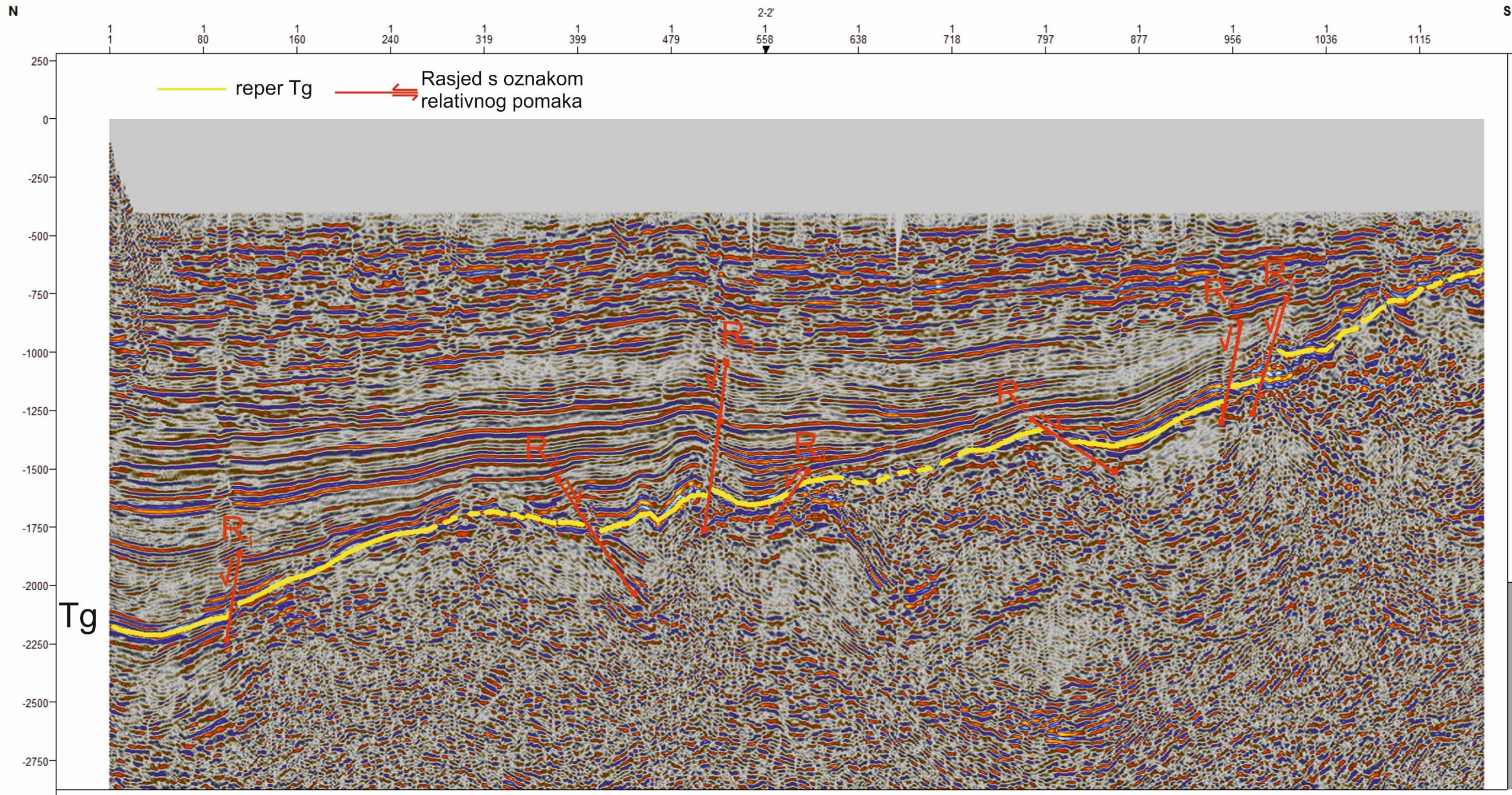
Slika 5-6. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 3 - 3'

#### 5.3.4. Seizmička interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 4 – 4'

Na seizmičkom profilu 4 – 4' prikazanom na slici 5-7, reporni horizont „Tg“ bilo je teže interpretirati jer se na pojedinim dijelovima refleksi „gubio“, odnosno bilo ga je teško pratiti, pa je njegov položaj tek pretpostavljen. Na tim dijelovima profila horizont je iscrtan isprekidanom linijom zbog nejasne slike refleksa. Pružanje profila je od sjevera prema jugu. Interpretirano je 7 potencijalnih rasjeda, R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub>, R<sub>6</sub> i R<sub>7</sub> koji presijecaju horizont „Tg“. Svi rasjedi su normalnog karaktera, a rasjed R<sub>6</sub> ima najveći skok koji iznosi oko 125 ms. Većina rasjeda je skoro vertikalnog položaja osim rasjeda R<sub>2</sub> i R<sub>4</sub>. Ovdje se radi o strukturno zamršenim uvjetima s velikim brojem rasjeda. Osobito je zanimljiv rasjed označen kao R<sub>3</sub>, gdje imamo slučaj rasjednute antiklinale. To predstavlja isto problem prilikom interpretacije horizonta, jer je vrlo teško utvrditi točan skok rasjeda. Na sjevernoj strani profila, reper je interpretiran dublje, u vremenskom intervalu od približno 2250 ms, odnosno uočava se produbljenje depresije. Na južnom dijelu profila reper se nalazi znatno pliće, u intervalu do 1000 ms.



# 4 - 4'



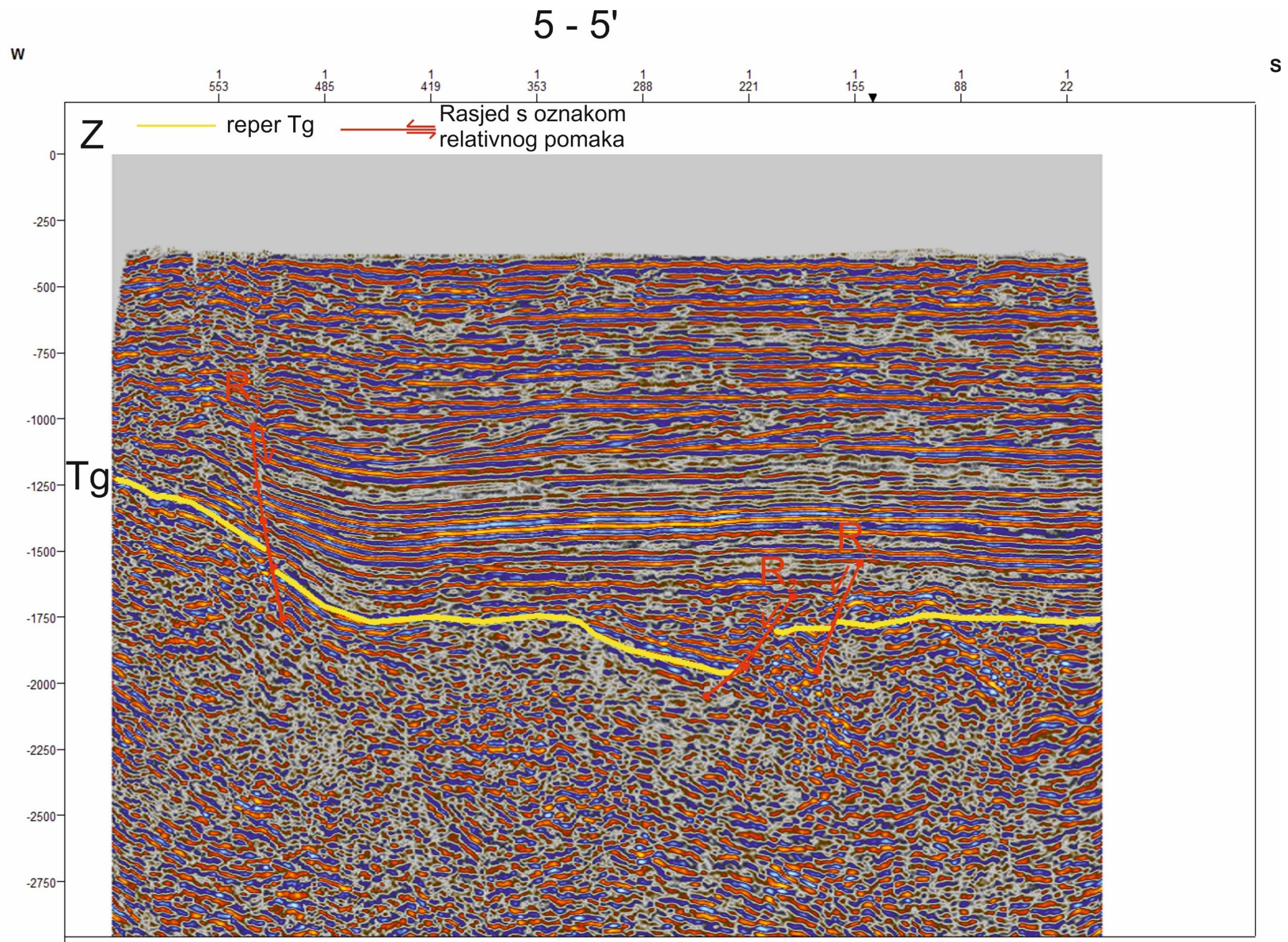
Slika 5-7. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 4 - 4'



### 5.3.5. Seizmička Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 5 – 5'

Seizmički profil 5 – 5' pružanja zapad – istok daje jasnu sliku na kojem reporni horizont „Tg“ žute boje označava litološku granicu između podine depresije i mlađih naslaga Vukovarske formacije. Horizont je rasjednut s 3 normalna rasjeda R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> i R<sub>3</sub>. Rasjed R<sub>1</sub> i R<sub>3</sub> su skoro vertikalnog položaja, dok rasjed R<sub>2</sub> je pod određenim nagibom. Uspoređujući ova tri rasjeda, može se vidjeti da rasjed R<sub>2</sub> ima najveći skok od 200 ms. U središnjem dijelu profila vidi se struktura nalik tektonskoj grabi, omeđena rasjedima R<sub>2</sub> i R<sub>4</sub>. Idući od zapada prema istoku, naslage lagano tonu upravo zbog rasjeda koji presijecaju strukturu u području gdje je postavljen seizmički profil. U zapadnom dijelu horizont je interpretiran pliće u vremenskom intervalu od približno 1250 ms, a u istočnom dijelu prati se dublje u intervalu od 1750 ms. Iznad horizonta seizmički refleksi su uglavnom paralelni i izgledom odgovaraju tektonski neporemećenom sedimentnom slijedu.





Slika 5-8. Interpretacija horizonta „Tg“ i rasjeda na profilu 5 - 5'



## 6. Diskusija i zaključci

Uzimajući u obzir da prosječni geotermalni gradijent na području istraživanja iznosi oko 5 °C/100 m, što je znatno veće od svjetskog prosjeka koji iznosi 3 °C/100 m, istočni dio Dravske depresije definitivno ima potencijal za daljnja istraživanja u svrhu iskorištavanja geotermalne energije. Pri tom se moraju uzeti u obzir ograničenja korištenih metoda istraživanja. Pomoću metode DST-a određene su temperature formacija na određenim dubinama, te je na taj način dobiven prosječni geotermalni gradijent u bušotinama. No, ova metoda nije sasvim pouzdana, te neki autori (Peters i Nelson, 2012) upozoravaju na pouzdanost temperaturnih mjerenja DST-a u odnosu na količinu iscrpljenih slojnih fluida. Crpljeni fluid mora biti određenog volumena kako bi se temperatura mogla izjednačiti s temperaturom formacije. Naravno, u tom smislu vrijednosti temperature dobivene iz DST-a mogu biti podcijenjene, ali ne i precijenjene. Dalje, izrada sintetskog seizmograma, koja služi za povezivanje bušotinskih podataka u dubinskom mjerilu sa seizmičkim podacima u vremenskom mjerilu, također ovisi o kvaliteti karotažnih mjerenja na koje utječe mnogo čimbenika. Jedan od njih je promjer bušotine koji se tijekom bušenja mijenja i to otežava dobivanje stvarnih vrijednosti. Sintetski se seizmogram u nekim situacijama dobro poklapa sa seizmičkim podacima, ali može doći i često do nepodudaranja, zbog utjecaja bušotinskih uvjeta na karotažna mjerenja i pogrešaka u mjerenju.

Sintetski seizmogram u bušotini B4 napravljen je samo za dio bušotine gdje su provedena karotažna mjerenja. U tom dijelu određeni refleksi iz sintetskog seizmograma donekle se podudaraju s refleksima na seizmičkom profilu 3 – 3' (slika 5-6). Poklapanje se dogodilo u vremenskom intervalu od -903,26 m pa do -1074,68 m (slika 5-3) u kojem se nalazi litološka granica između pliocena i kvartara a odvaja ju reporni horizont „Tg“ koji je dalje bio interpretiran na odabranim seizmičkim profilima. Budući da je došlo do relativnog poklapanja podataka, postavlja se pitanje pouzdanosti zakona brzina koji su dobiveni iz modela brzina podzemlja, a potrebni su za izradu sintetskog seizmograma. U sklopu ovog rada, izrada sintetskog seizmograma trebala je omogućiti pouzdanije praćenje horizonta „Tg“ na seizmičkim profilima, što nije ostvareno, jer se profili međusobno ne sijeku.

Općenito je interpretacija seizmičkih profila dosta subjektivna i ovisi o samom interpretatoru, a u slučaju da se ne može „zatvoriti petlja“ seizmičkih profila, kao u ovome radu, taj problem postaje još više izražen. Također, interpretacijom profila mogu se odrediti samo relativni strukturni odnosi, jer refleksi ne dolaze samo s granica koje predstavljaju

litološku promjenu, nego i s granica unutar slojeva. Veliki problem predstavljaju i rasjedi. Oni predstavljaju prekid seizmičkih refleksa i često se ne može pouzdano odrediti njihov nastavak poslije rasjeda, odnosno odrediti njihov skok i hod.

Na interpretiranim profilima se uočavaju moguće pojave dubokih diskontinuiteta koje bi mogli biti putevi migracije hidrotermalnih fluida na području istočnog dijela Dravske depresije. Na profilu 1 - 1' uočava se normalni rasjed  $R_5$  razmjerno velikog pomaka koji zahvaća stijene podloge bazena, kao i debeli paket bazenske sedimentne ispune i moguća je trasa migracije. Na profilu 2 - 2' (slika 5-4) također su prikazane možebitne trase migracija hidrotermalnih fluida, budući da rasjedi ( $R_2$  i  $R_3$ ) zahvaćaju debeli sedimentni slijed naslaga. Problem je jedino taj da njegovu interpretaciju ne možemo smatrati u potpunosti pouzdanom, jer na većem dijelu profila interpretirani horizont „Tg“ iscertan isprekidanom linijom zbog otežanog praćenja refleksa. Kod profila 4 - 4' (slika 5-7) javlja se problem tektonski složenog područja zbog velikog broja rasjeda, pa je dosta teško interpretirati horizont „Tg“, koji bi mogao predstavljati trase migracija, no uočava se postojanje više rasjeda koji predstavljaju potencijalne trase migracije hidrotermalnih fluida. Osobito je zanimljiv rasjed označen s  $R_3$  gdje se vidi primjer rasjednute antiklinale koja bi mogla predstavljati potencijalno ležište hidrotermalnih fluida. Nadalje, u središnjem i južnom dijelu profila interpretirani refleks se počeo "gubiti", pa ga je teško bilo jednoznačno ispratiti. Profil 3 - 3' (slika 5-5) je najviše korišten u svrhe izrade sintetskog seizmograma, te se na njemu ne uočava nikakva jasna slika mogućih migracija.

Interpretacija je izvedena na odabranim seizmičkim profilima, koji prolaze područjima gdje su geotermalni gradijenti povišeni. Na svakom profilu interpretiran je reporni horizont „Tg“ s ciljem određivanja moguće migracije hidrotermalnih fluida. Kako bi interpretacija bila točnija, pomoću uzdužnih i poprečnih profila nastojala se zatvoriti "petlja" kako bi se mogle prenositi litološke granice s jednog seizmičkog profila na drugi, i na taj način dobiti precizniji uvid u geološku građu podzemlja. U ovom slučaju zbog ograničenog vremena i nejasnoće pojedinih seizmičkih profila, nije bilo moguće zatvoriti petlju. Stoga, interpretacije seizmičkih profila koje se vide na slikama 5-3, 5-4, 5-5, 5-6, 5-7 i 5-8 ne možemo smatrati pouzdanima, budući da petlja nije zatvorena a i na profilima je uočljivo da se radi o složenoj geološkoj građi podzemlja, s velikim broj rasjeda, čije postojanje zaista upućuje na mogućnost hidrotermalne cirkulacije fluida konvekcijom.

Usporedbom karte recentnog toplinskog toka i karte prosječnog geotermalnog gradijenta u istočnom dijelu Dravske depresije (slika 5-2), uočava se da se maksimumi prosječnog geotermalnog gradijenta uglavnom nalaze unutar područja s povišenim toplinskim tokom, izuzev maksimuma u SZ dijelu istraživanoga područja. Također, minimum prosječnog geotermalnog gradijenta u zapadnom dijelu istraživanoga područja generalno se podudara s poljem sniženog toplinskog toka ( $<60 \text{ mW/m}^2$ ), no ne i minimum prosječnog geotermalnog gradijenta u SI dijelu karte. Toplinski tok je usko povezan s koeficijentom toplinske vodljivosti koji predstavlja sposobnost materijala da prenosi toplinu, tako da poklapanje s prosječnim geotermalnim gradijentom govori da su varijacije prosječnog geotermalnog gradijenta posljedica razlika u toplinskoj vodljivosti stijena. Ipak, lokalne varijacije (izražene razlike u prosječnom geotermalnom gradijentu zabilježenom u bušotini B4 i B25) su vjerojatno uvjetovane drugim faktorima, pretpostavljeno konvekcijskom cirkulacijom hidrotermalnih fluida.

U ovom radu načinjene su početne točke za daljnja istraživanja geotermalnog potencijala na području istočnog dijela Dravske depresije. Istraživanja bi se sad trebala usmjeriti u one dijelove gdje su zabilježeni povišeni geotermalni gradijenti koji odskaku od prosjeka. Na osnovi novih istraživanja mogli bi se dobiti bolji seizmički podatci iz kojih bi se moglo preciznije odrediti puteve konvekcijskih migracija hidrotermalnih fluida, i tako odrediti mogući položaj potencijalnih geotermalnih ležišta koja bi se mogli koristiti za proizvodnju geotermalne energije.

## 7. Popis literature

### 7.1. Objavljeni radovi

Bachler, D., Kohl, T., Rybach, R. (2003): Impact of graben – parallel faults on hydrothermal convection – Rhine Graben case study. Institute of Geophysics, ETH Honggerberg, 8093 Zurich, Switzerland, 431-441 str.

Cvetković, M., Matoš, B., Rukavina, D., Kolenković Močilac, I., Saftić, B., Baketarić, T., Baketarić, M., Vuić, I., Stopar, A., Jarić, A. Paškov, T.: Geoenery potential of the Croatian part of Pannonian Basin: insights from the reconstruction of the pre-Neogene basement unconformity // Journal of Maps, 15 (2019), 2; doi:10.1080/17445647.2019.1645052, 651-661 str.

Hewitt, G. F., Shires, G. L. and Bott, T. R. (1994): Process Heat Transfer, CRC Press.

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

Horvath, F. (1995): Phases of compression during the evolution of the Pannonian Basin and its bearing on hydrocarbon exploration. Eötvös Loránd University, Budapest, 837-844 str.

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

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

Lučić, D., Saftić, B., Krizmanić, K., Prelogović, E., Britvić, V., Mesić, I., Tadej, J. (2001): The Neogene Evolution and Hydrocarbon Potential of the Pannonian Basin in Croatia. Marine and Petroleum Geology, 18/1, 133-147 str.

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

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

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

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

Murphy, H. D. (1979): Convective instabilities in Vertical Fractures and Faults. Geosciences Division, Los Alamos Scientific Laboratory, New Mexico.

Norris, S. E. (2000): A Parallel Navier – Stokes Solver for Natural Convection and Free Surface Flow. University of Sydney, 239 str.

Peters, K.E., Nelson, P.H. (2012): Criteria to Determine Borehole Formation Temperatures for Calibration of Basin and Petroleum System Models. SEPM Special Publication No. 103, 5-15 str.

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

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

Sheriff, R.E., Geldart, L.P., 1995. Exploration Seismology. Second Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 592 str.

Šumanovac, F., 2007. Geofizička istraživanja podzemnih voda. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb : Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilište u Zagrebu, 244 str.

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

Tournier, C., Genthon, P., Rabinowicz M. (2000): The onset of natural convection in vertical fault planes: consequences for the thermal regime in crystalline basements and for heat recovery experiments. Toulouse, France, 500-508 str.

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

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

## 7.2. Web izvori

Državni hidrometeorološki zavod, 2019. URL:

<http://klima.hr/klima.php?id=k1&param=srednjak&Grad=osijek> (4.12.2019)

Google maps, 2019. URL:

<https://www.google.com/maps> (2.12.2019)

Rigzone, 2019. URL:

[https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight\\_id=318&c\\_id=](https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=318&c_id=) (15.12.2019)

Wikiwand, 2020. URL:

<https://www.wikiwand.com/sh/Konvekcija> (12.1.2020)

Thermopedia, 2020. URL:

<http://thermopedia.com/content/1076/> (8.2.2020)