Strukturna interpretacija seizmičkih podataka na području Karlovačke depresije

Šarc, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:631450

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Filip Šarc

STRUKTURNA INTERPRETACIJA SEIZMIČKIH PODATAKA NA PODRUČJU KARLOVAČKE DEPRESIJE

Diplomski rad

Zagreb, 2020. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

Filip Šarc

STRUKTURNA INTERPRETACIJA SEIZMIČKIH PODATAKA NA PODRUČJU KARLOVAČKE DEPRESIJE

Diplomski rad
predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistar geologije

Mentori:
Borna Lužar-Oberiter, Bojan Matoš

Zagreb, 2020. godina.

Zahvaljujem svojim mentorima doc.dr.sc. Borni Lužaru-Oberiteru i doc.dr.sc. Bojanu Matošu na ukazanom povjerenju i pomoći oko izrade rada.

Posebna zahvala docentu Bojanu Matošu i asistentu Davidu Rukavini na pomoći oko modeliranja u računalnom programu Petrel™ 2018.

Zahvala i Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na ustupljenom prostoru i računalu korištenom za modeliranje te tvrtki Schlumberger na doniranom računalnom progamu Petrel™ 2018.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Diplomski rad

STRUKTURNA INTERPRETACIJA SEIZMIČKIH PODATAKA NA PODRUČJU KARLOVAČKE DEPRESIJE

Filip Šarc

Rad je izrađen: Geološko-paleontološki zavod, PMF, Zagreb, Horvatovac 102a
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, RGNF, Zagreb, Pierottijeva 6

Sažetak:

U ovom diplomskom radu provedena je strukturna interpretacija seizmičkih i bušotinskih podataka u svrhu podpovršinskog kartiranja i izrade trodimenzionalnog strukturnog modela područja Karlovačke depresije. Obrada i interpretacija 2D seizmičkih refleksijskih profila i bušotinskih podataka ustupljenih od strane Agencije za ugljikovodike izvršena je u računalnom programu Petrel™ 2018 na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Na temelju strukturne interpretacije izrađen je 3D strukturni model iz kojeg su generirane strukturne karte po plohama podloge paleogenskih naslaga, krovine paleogenskih naslaga te podloge panonskih naslaga. Dominantni strukturni elementi područja istraživanja su strukturna uzvišenja Lasinja–Golinjsko Brdo te Dubranec, dok strukturna udubljenja Domagović–Mandić Selo i Cvetković Brdo–Opatija čine depozicijske centre. U radu je interpretirano ukupno 14 normalnih i 6 reversnih rasjeda od kojih su izdvojene 3 rasjedne plohe: rasjed Popović Brdo, rasjed Koritinja i rasjed Pisarovina. Ekstenzijskom tektonikom i normalnim pomacima čiji je raspon od 20 do 1196 m formirani su glavni depozicijski centri. Na temelju strukturnih odnosa između ploha napravljene su karte debljina koje prikazuju prostorni raspored te debljine predpanonskih i paleogenskih naslaga. Prema izrađenom modelu maksimalna debljina paleogenskih naslaga iznosi 1200 m, a debljina predpanonskih naslaga iznosi 1720 m.

Ključne riječi: strukturna interpretacija, 3D modeliranje, Karlovačka depresija, paleogen
Rad sadrži: 44+V stranica, 32 slike, 2 tablica, 25 literaturnih navoda
Jezik izvornika: hrvatski
Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica, Geološki odsjek, PMF

Mentori: doc.dr.sc. Borna Lužar-Oberiter, PMF
doc.dr.sc. Bojan Matoš, RGNF

Ocjenjivači: doc.dr.sc. Borna Lužar-Oberiter, PMF
doc.dr.sc. Bojan Matoš, RGNF
doc.dr.sc. Katarina Gobo, PMF

Datum završnog ispita: 29.10.2020.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Master's thesis

STRUCTURAL INTERPRETATION OF SEISMIC DATA IN THE AREA OF THE KARLOVAC DEPRESSION

Filip Šarc

Thesis completed in: Department of Geology, Faculty of Science, Zagreb, Horvatovac 102a;
Department of Geology and Geological Engineering, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb, Pierottijeva 6

Abstract:

In this thesis, a structural interpretation of seismic and well data was performed for the purpose of subsurface mapping and construction of a three-dimensional structural model of the Karlovac Depression. Structural interpretation of 2D seismic reflection profiles and well data provided by the Croatian Hydrocarbons Agency was performed using Petrel™ 2018 software at the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering. Based on the structural interpretation, a 3D structural model was constructed, with structural maps of the base Paleogene deposits, the top Paleogene deposits and the base of Pannonian deposits. The dominant structural elements of the research area are the structural highs of Lasinja – Golinjsko Brdo and Dubranec and the structural depressions of Domagović – Mandić Selo and Cvetković Brdo – Opatija that form depocentres. In this work a total of 14 normal and 6 reverse faults were interpreted, of which 3 fault planes were modeled: Popović Brdo fault, Koritinja fault and Pisarovina fault. Extension tectonics and normal displacements ranging between 20 and 1196 m formed the main depocentres. Based on the structural relations, thickness maps were constructed showing the spatial distribution and thickness of pre-Pannonian and Paleogene deposits. Acording to constructed model maximum thickness od Paleogene deposits is 1200 m and thickness of pre-Panonian deposits is 1720 m.

Keywords: structural interpretation, 3D modelling, Karlovac depression, Paleogene
Thesis contains: 44+V pages, 32 figures, 2 tables, 25 references
Original in: croatian
Thesis deposited in: Central library, Geology department, Faculty of science, Zagreb
Supervisor: Assist. Prof. Borna Lužar-Oberiter, PhD (Faculty of Science)
Assist. Prof. Bojan Matoš, PhD (Faculy of Mining, Geology and Petroleum Engineering)
Reviewers: Assist. Prof. Borna Lužar-Oberiter, PhD (Faculty of Science)
Assist. Prof. Bojan Matoš, PhD (Faculy of Mining, Geology and Petroleum Engineering)
Assist. Prof. Katarina Gobo, PhD (Faculty of Science)

Date of the final exam: 29 October 2020

Sadržaj

1. Uvod ... 1

2. Geografski smještaj Karlovačke depresije ... 2

3. Geološka građa područja Karlovačke depresije ... 3

3.1 Pregled dosadašnjih istraživanja ... 3

3.2 Opis tektonskog i paleogeografskog razvoja šireg područja Karlovačke depresije ... 4

3.2.1. Nastanak i razvoj Panonskog bazena ... 9

3.2.2. Litostratigrafski slijed naslaga na širem području Karlovačke depresije ... 13

4. Ulazni podatci i metode istraživanja ... 17

4.1 Unos i organizacija podataka ... 19

4.2 Interpretacija ... 21

4.2.1 Stratigrafski horizonti ... 22

4.2.2 Rasjedi i rasjedne plohe ... 25

5. Rezultati istraživanja ... 28

5.1 Strukturne karte po plohama PPg, KPg i PPn ... 28

5.2 Karte debljina između PPg-KPg i KPg-PPn ... 34

6. Rasprava ... 38

7. Zaključak ... 39

8. Literatura ... 40

9. Popis slika u tekstu ... 43

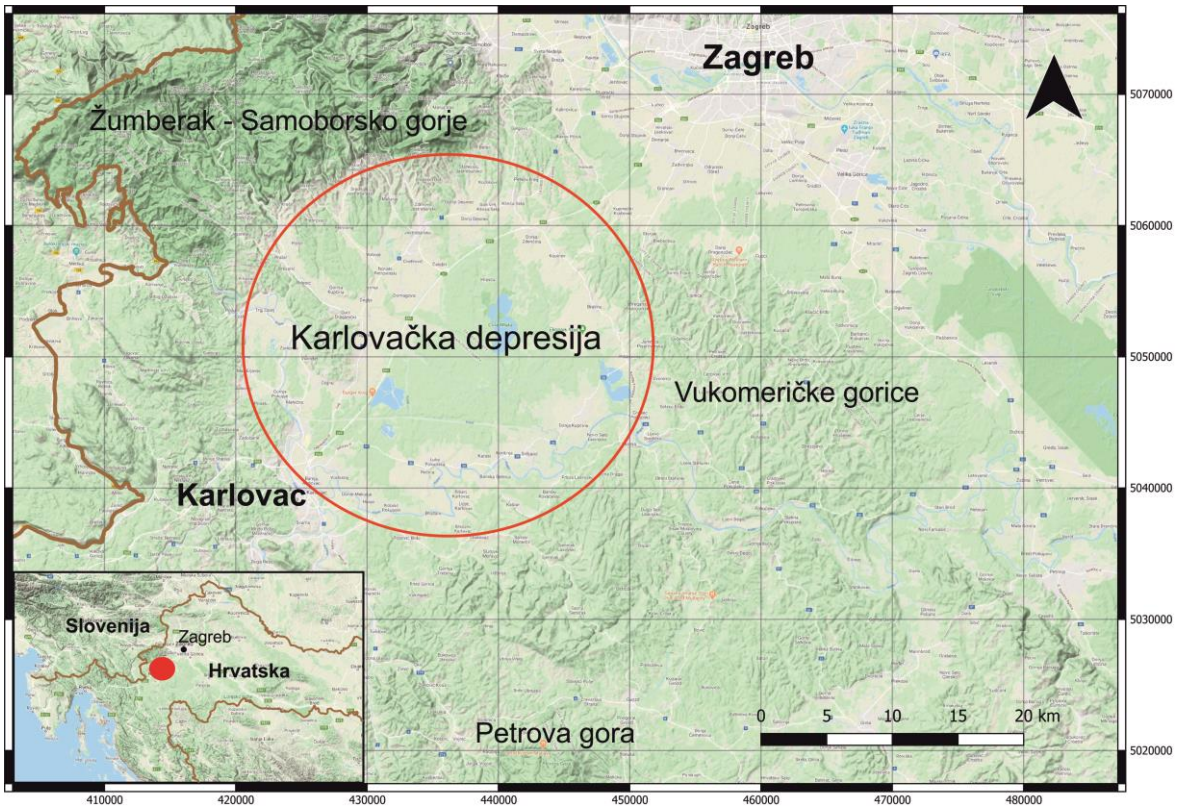
1. Uvod

U ovom diplomskom radu cilj istraživanja bio je definirati strukturne dubinske odnose na području Karlovačke depresije (KD) i to s posebnim naglaskom na odnose i tektonski razvoj područja istraživanja tijekom paleogena te početkom neogena. U tu svrhu korišteni su bušotinski i seizmički podaci za područje istraživanja koji su ustupljeni od Agencije za ugljikovodike te su isti korišteni u izradi trodimenzionalnog strukturnog modela Karlovačke depresije u računalnom programu Petrel™ 2018 doniranom Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu (SuZ) od tvrtke Schlumberger.

Odredba strukturnih odnosa temeljila se na dubinskom kartiranju Karlovačke depresije te izradi strukturnih karata i karata debljina za tri korelacijska horizonta: podlogu panonskih naslaga (PPn), krovinu paleogenskih naslaga (PPg) te podlogu paleogenskih naslaga (PPg). Navedeni horizonti odabrani su kako bi se odredila debljina i prostorna distribucija paleogenskih naslaga na području KD. Korelacijski horizonti dobiveni su interpretacijom seizmičkih refleksijskih profila odnosno seizmičkih refleksa temeljem poznatih vremensko-dubinskih odnosa litostratigrafskih jedinica koje su nabušene u dubokim istražnim bušotinama na području depresije. Modeliranjem navedenih horizonata dobiven je bolji uvid u strukturno-geološku građu Karlovačke depresije kao i paleogeografski razvoj područja s naglaskom na paleogenske naslage.

2. Geografski smještaj Karlovačke depresije

Karlovačka depresija nizinsko je područje ukupne površine otprilike 900 km^2 koje se nalazi između Zagreba i Karlovca (slika 1). Administrativno, sjeveroistočni dio područja pripada Zagrebačkoj županiji dok jugozapadni dio pripada Karlovačkoj županiji. Najveće naseljeno mjesto područja je Jastrebarsko. Omeđeno je Žumberkom i Samoborskim gorjem na sjeveru, Vukomeričkim goricama na istoku te Petrovom gorom na jugu. Na južnom dijelu područja protječe rijeka Kupa, a u njezinom središnjem dijelu nalazi se umjetno jezero Crna Mlaka koje je uz Jastrebarske Lugove zaštićeno kategorijom posebnog rezervata. Klima područja je umjereno topla kišna sa srednjom temperaturom najhladnijeg mjeseca između -3 i 18 °C te najmanje oborina tijekom hladnog dijela godine. Prema Köppenovoj klasifikaciji ovaj tip klime označen je sa oznakom Cfwbx (www.meteo.hr 2020).

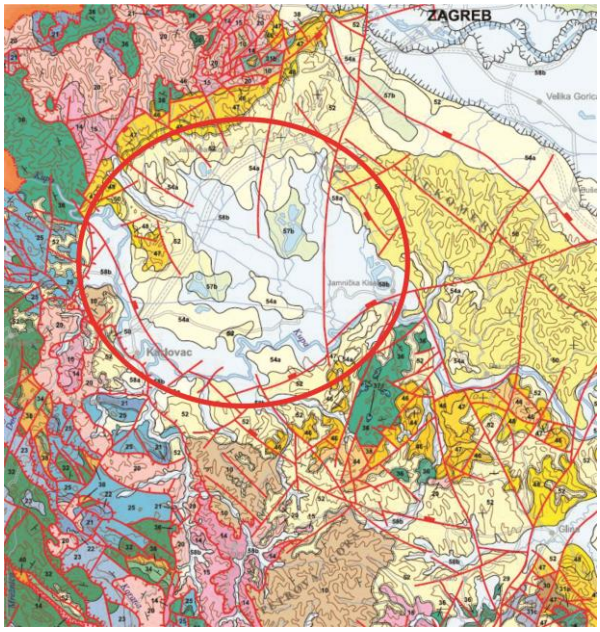


Slika 1: Područje Karlovačke depresije nalazi se unutar crvene elipse (izvor karte: Google Maps)

3. Geološka građa područja Karlovačke depresije

3.1 Pregled dosadašnjih istraživanja

Istraživanja na području Karlovačke depresije u početku bila su vezana uglavnom uz izradu geoloških karata navedenog područja, ali i naftnogeološka istraživanja. Geološko kartiranje sjeverozapadog dijela Hrvatske između rijeke Save i Drave započeo je Foetterle 1861. godine (Gorjanović-Kramberger, 1908). Nakon njega, početkom 20. stoljeća Dragutin Gorjanović-Kramberger i njegov suradnik Ferdinand Koch također kartiraju šire područje sjeverozapadne Hrvatske u sklopu izrade *„Geologijske prijegledne karte Kraljevine Hrvatske i Slavonije“*. Rezultat sustavnog kartiranja teritorija SFRJ 70-tih godina prošog stoljeća je i izrada osnovnih geoloških karata (OGK) SFRJ, među kojima je i nikada objavljeni List Karlovac koji uključuje područje Karlovačke depresije. Geološka karta Republike Hrvatske u mjerilu 1:300 000 izdana od strane Hrvatskog geološkog instituta 2009. godine najnovija je karta koja obuhvaća istraživano područje (slika 2). Na njoj je vidljiva prekrivenost područja istraživanja pretežito neogenskim i kvartarnim naslagama.

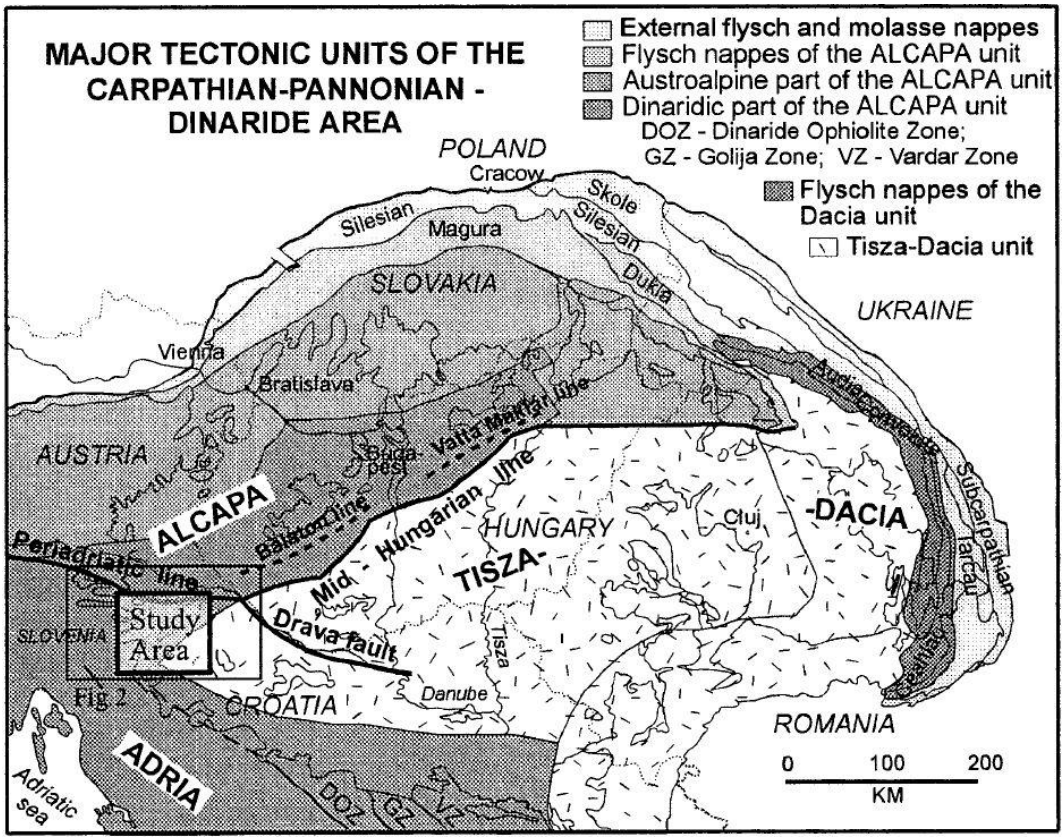


Slika 2: Isječak Geološke karte Republike Hrvatske u mjerilu 1:300 000 šireg područja Karlovačke depresije. Neogenske i kvartarne naslage na karti su prikazane bijelim i svjetlo plavim bojama (područje Karlovačke depresije nalazi se unutar crvene elipse; modificirano prema HGI, 2009)

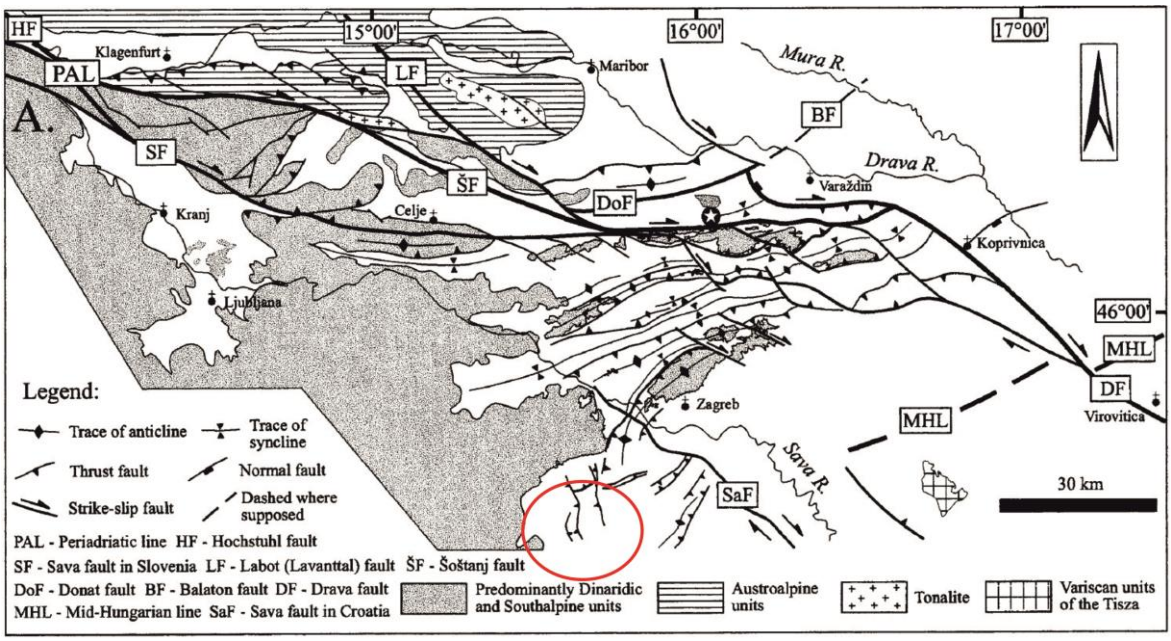
Detaljnija geološka istraživanja Savske, Dravske kao i Karlovačke depresije od strane INA d.d. kompanije bila su vezana uz otkrivanje potencijalnih ležišta ugljikovodika. Jedno od važnijih istraživanja je izrada strukturnih karata u sklopu doktorske disertacije pod naslovom „Geološka građa zapadnog dijela Savske depresije“ (Velić, 1980) koja je bila ujedno i glavni izvor podataka za izradu diplomskog rada Paškov (2016) u kojem je izrađen potpovršinski model Karlovačke depresije u računalnom programu za trodimenziomalno modeliranje. Recentniji znanstveni radovi koji su se bavili tektonskim i strukturnim razvojem šireg područja istraživanja, odnosno razvojem Dinarida i Panonskog bazena, područje Karlovačke depresije smještaju na samu granicu Savske suturne zone te domene Unutrašnjih Dinarida (Schmid, 2008; Ustaszewski et al., 2010). Značajni strukturni rad koji je dao detaljniji uvid u strukturni razvoj Karlovačke depresije tijekom neogena i kvartara je rad Tomljenović & Csontos (2001) koji su na temelju seizmičkih profila i bušotinskih podataka identificirali kogenetske strukture na području Karlovačkog bazena te tektonske faze koji su se odvile u periodu od neogena do kvartara, a bili su ključni za geološki razvoj ovog područja. Lučić et al. (2001), Saftić et al. (2003) i Pavelić & Kovačić (2018) definiraju tektonski i litostratigrafski razvoj Panonskog bazena, a time i razvoj Karlovačke depresije.

3.2 Opis tektonskog i paleogeografskog razvoja šireg područja Karlovačke depresije

U kontekstu regionalne geologije, Karlovačka depresija nalazi se u graničnoj kontaktnoj zoni Jadranske mikroploče i Tisije koje su na svojim sjevernim djelovima u kontaktu s jedinicama južnih odnosno istočnih Alpi. Ove geotektonske jedinice su kroz svoju geološku prošlost imale dinamičan razvoj što je rezultiralo kompleksnom geološkom građom područja i razvojem Panonskog bazenskog sustava koji sačinjava više zasebnih depresija i subdepresija od kojih je jedna i Karlovačka depresija (Saftić et al., 2003). Zbog intenzivne tektonike šireg područja osim visokih ulančanih gorja nastale su i regionalne rasjedne zone od kojih su najvažnije: Periadrijatska rasjedna linija (engl. Periadriatic line – PAL), Srednje - Mađarska rasjedna zona (engl. Middle Hungarian Zone – MHZ) te Dravski rasjed. Periadrijatska rasjedna linija i Srednje - Mađarska rasjedna zona tektonski odvajaju Alpe i Karpate (ALCAPA blok; vidi Schmid et al., 2008) na sjeveru od Tisija - Dacija blokova na jugu (slika 3). Za geologiju užeg područja također je bitna Medvednička rasjeda zona, Savska rasjedna zona te Južni rubni rasjed Panonskog bazena koji zapravo označava zapadni rubni rasjed Karlovačke depesije (slika 4).

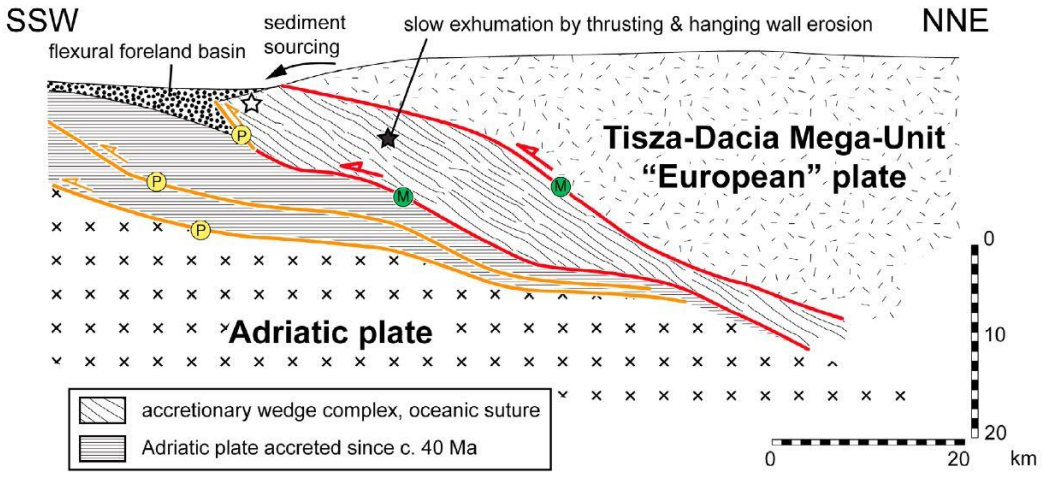


Slika 3: Glavne tektonske jedinice i rasjedne zone Karpatsko-Panonsko-Dinarskog područja (preuzeto iz Tomljenović & Csontos, 2001)



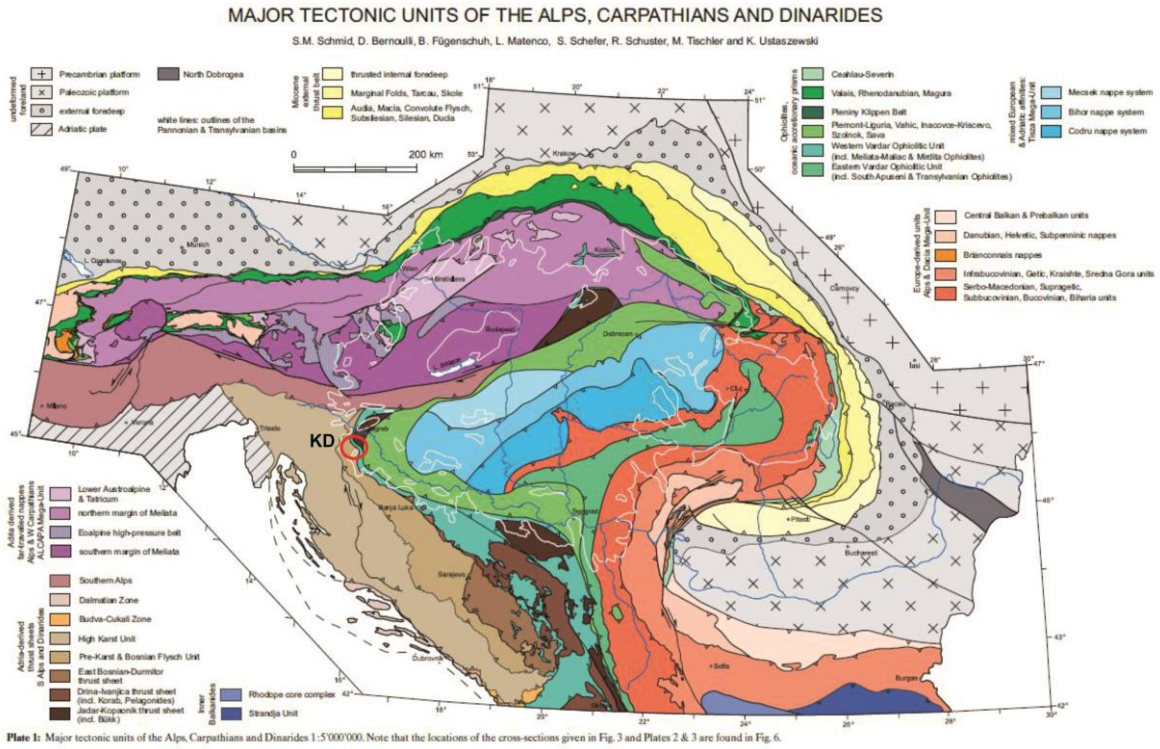
Slika 4: Glavni rasjedi koji su utjecali na geotektonski razvoj šireg područja Karlovačke depresije (područje KD nalazi se unutar crvene elipse; modificirano prema Tomljenović & Csontos, 2001)

Jadranska karbonatna platforma *„sensu lato“* koja je nastala na Jadranskoj mikroploči započela je svoju evoluciju krajem paleozoika na sjevernom rubu Gondwane. Jadranska mikroploča odvojena je početkom trijasa tektonskim silama od matičnog kontinenta te se pomicala s područja ekvatora u smjeru sjevera-sjeveroistoka. Tijekom većeg dijela mezozoika, a u pravom smislu riječi od rane jure (Vlahović et al., 2005), Jadranska karbonatna platforma egzistira kao izolirana platforma na kojoj se odvija plitkomorska karbonatna sedimentacija koja je rezultirala nastankom od najmanje 3500 do 5000 m debelog slijeda karbonatnih naslaga (Vlahović et al., 2005). Između Jadranske mikroploče i Europskog kontinenta tj. Tisija bloka tijekom kasne jure počinje intraoceanska subdukcija koja je rezultirala obdukcijom ofiolita na istočni pasivni rub Jadranske mikroploče i nastankom ofilitnog melanža Centralne Dinaridske ofiolitne zone (krat. CDOZ; vidi Babić et al., 2002). Tijekom krede u ovom dubokomorskom okolišu taložene su jedinice „Pre-Karst“ i „Bosnian Flysch“ sastavljene dominantno od naslaga fliškog tipa (Schmid et al., 2008). Krajem krede dolazi do postupnog zatvaranja oceanskog prostora Neotethysa što dovodi do kolizijskih procesa (Schmid et al., 2008). Cijeli taj događaj naziva se Dinaridska deformacijska faza (Tomljenović et al., 2008). Kolizijom i subdukcijom Jadranske mikroploče pod Tisijski blok stvara se predgorski bazen u kojem su krajem krede taloženi pelagički *Scaglia* vapnenci, dok u paleogenu siliciklastične fliške naslage, i na kraju paleogena krupnozrnati klastiti (npr. Promina naslage) kao rezultat zapunjavanja bazena molasnim materijalom (slika 5; vidi Babić & Zupanič 1976; Jelaska et al., 1969; Ustaszewski et al., 2010).



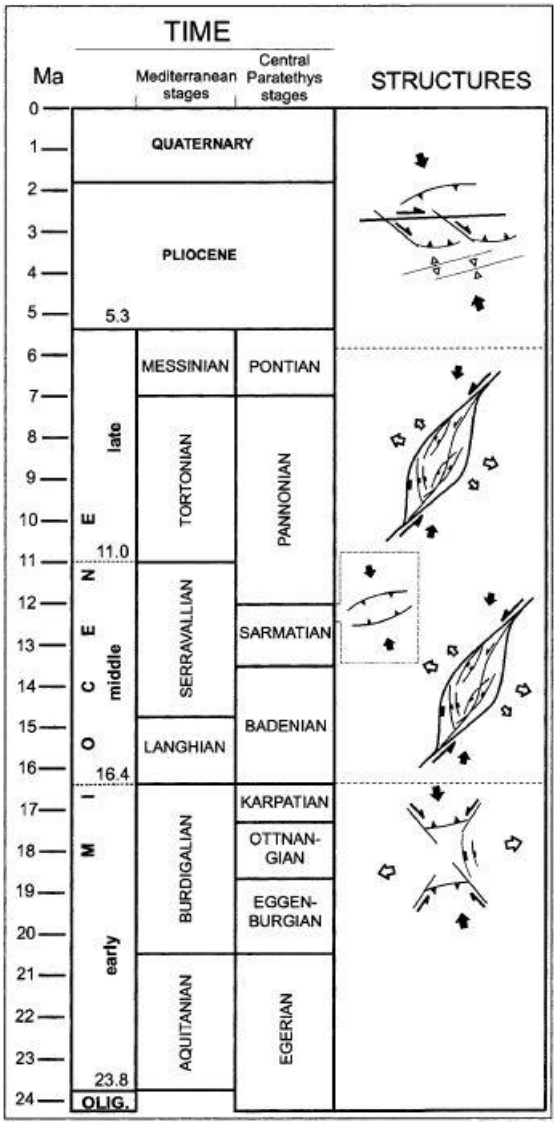
Slika 5: Prikaz kredno-paleogenskog predgorskog bazena u koji su taloženi paleogenski siliciklastiti (preuzeto iz Ustaszewski et al., 2010)

Subdukcijom pod Tisijski blok dijelovi oceanske kore bivaju obducirani na pasivni rub Jadranske mikroploče, a konačnim zatvaranjem oceana stvara se Savska tektonska zona koja predstavlja suturnu zonu između ova dva bloka (Ustaszewski et al., 2010). Kolizijom je također započela i Alpska orogeneza kojom je stvoren planinski lanac Dinarida karakterističnog pružanja sjeverozapad-jugoistok koji se dijeli na Vanjske i Unutarnje Dinaride. Vanjski Dinaridi građeni su od plitkomorskih platformskih karbonata zapadnog dijela Jadranske karbonatne platforme (Tomljenović et al., 2008), a prema Schmid et al. (2008) svrstani su u „High Karst" jedinicu ili Zonu navlake visokog krša. Unutarnji Dinaridi građeni su od već prije spominjanih „Bosnian Flysch" jedinice, Sava zone, prijelazne „Pre-Karst" jedinice (Schmid et al., 2008; slika 6) te jedinica Centralne Dinaridske ofiolitne zone. Tisijski blok koji je na proučavanom području navučen na Jadransku ploču zajedno s prileležećim Dacija blokom nastao je odvajanjem od Europske ploče tijekom jure (Ustaszewski et al., 2010).



Slika 6: Glavne tektonske jedinice Alpa, Karpata i Dinarida (područje KD nalazi se unutar crvene elipse; Schmid et al., 2008)

Nakon kompresije kreće intenzivna faza ekstenzijske tektonike krajem paleogena tj. u oligocenu koja traje tijekom velikog dijela neogena (Prelogović et al., 1998). Prema Tomljenović & Csontos (2001) ekstenzija se ciklički odvija u periodu od neogena pa sve do danas (slika 7). Prvi događaj obilježen je normalnim rasjedanjem tijekom starijeg miocena (egenburg?-otnang; 20-18 mil. god.) nakon njega uslijedila je faza kompresije u kasnom otnangu (18 mil. god.). U srednjem miocenu (karpat?-baden-sarmat; 17-12 mil. god.) strukture ukazuju na strike-slip i normalno rasjedanje. Krajem srednjeg miocena (kasni sarmat-panon; 12-11 mil. god.) ponovo se odvija kompresija i nakon njega normalno rasjedanje u mlađem miocenu (panon-mlađi pont; 11-7 mil. god.). Reaktivacijom rasjeda u mlađem miocenu počinje kompresijska faza koja traje do danas (pont-pliokvartar; 6-0 mil. god.). Ovim ekstenzijskim događajima dolazi do dezintegracije postojećih struktura koje tonu i stvaraju Panonski bazenski sustav, na čijem se jugozapadnom rubu nalazi Karlovačka depresija (Pavelić & Kovačić, 2018). Panonski bazen pa tako i Karlovačka depresija ispunjeni su neogenskim sedimentima u tri sedimentacijska megaciklusa. Nastanak Panonskog bazenskog sustava i sedimentacijski megaciklusi opisani su u idućem potpoglavlju. Posljednji događaj na ovom području bilo je taloženje pliokvartarnih aluvijalnih sedimenata.



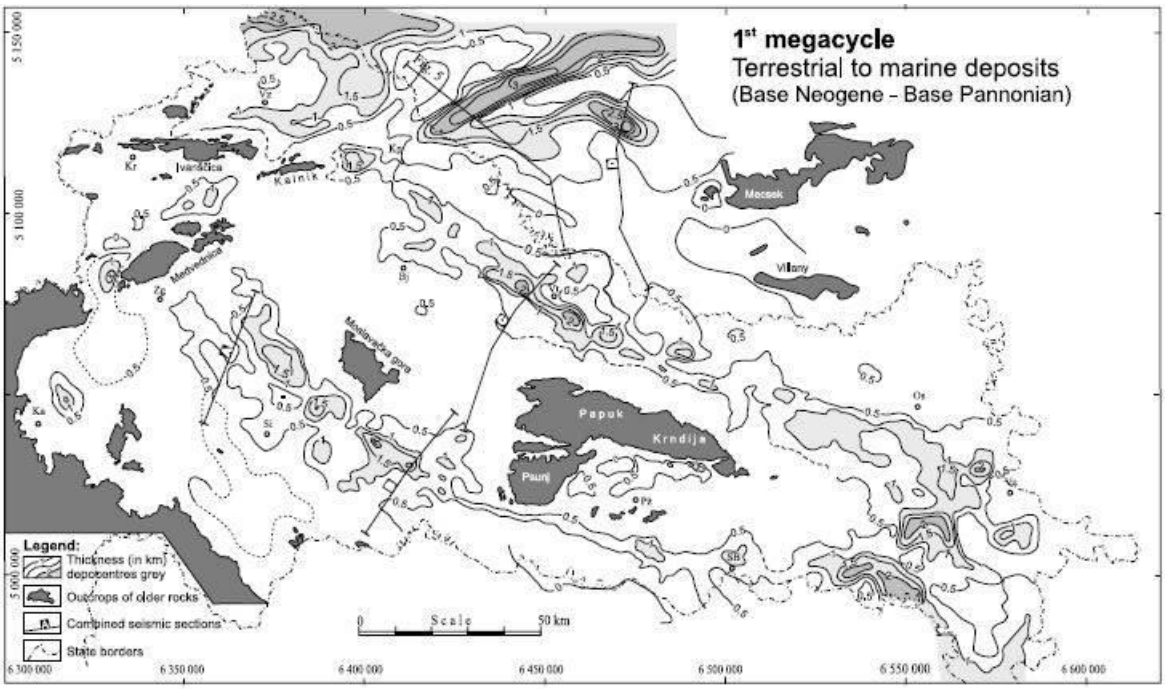
Slika 7: Geokronološka skala Mediterana i centralnog Paratetisa s pripadajućim strukturnim obrascima (Tomljenović & Csontos, 2001)

3.2.1. Nastanak i razvoj Panonskog bazena

Karlovačka depresija dio je većeg Panonskog bazenskog sustava (skraćeno: Panonski bazen) koji se smatra najvećim taložnim bazenom centralnog Paratetisa. Kolizijom i podvlačenjem Jadranske ploče pod Tisiju te pomicanjem Tisije i ALCAPA bloka po prije spominjanoj Periadrijatskoj rasjednoj liniji i Srednje - Mađarskoj rasjednoj zoni rezultiralo je stvaranjem zalučnog (engl. back-arc) bazena, tj. Panonskog bazena u kojem se tijekom neogena i kvartara nataložio debeli slijed naslaga, konkretno u Karlovačkoj depresiji oko 3000 metara (Pavelić & Kovačić, 2018). Dvije glavne faze koje su obilježile tektonski i

sedimentacijski razvoj bazena bile su: sinriftna i postriftna faza. Sinriftna faza označava izostatsku subsidenciju bazena pod utjecajem ekstenzijske tektonike i stanjivanja kore uslijed izdizanja astenosfere dok postriftna faza predstavlja subsidenciju bazena zbog hlađenja litosfere (Pavelić & Kovačić, 2018). Budući da je u sedimentima Panonskog bazena primjećena ciklička izmjena koja je najvećom mjerom uvjetovana tektonikom, taloženje neogenskih i kvartarnih naslaga podijeljeno je u 3 megaciklusa (Velić et al., 2002) koji su redom trajali 6,8, 5,9 i 5,6 milijuna godina (Saftić et al., 2003).

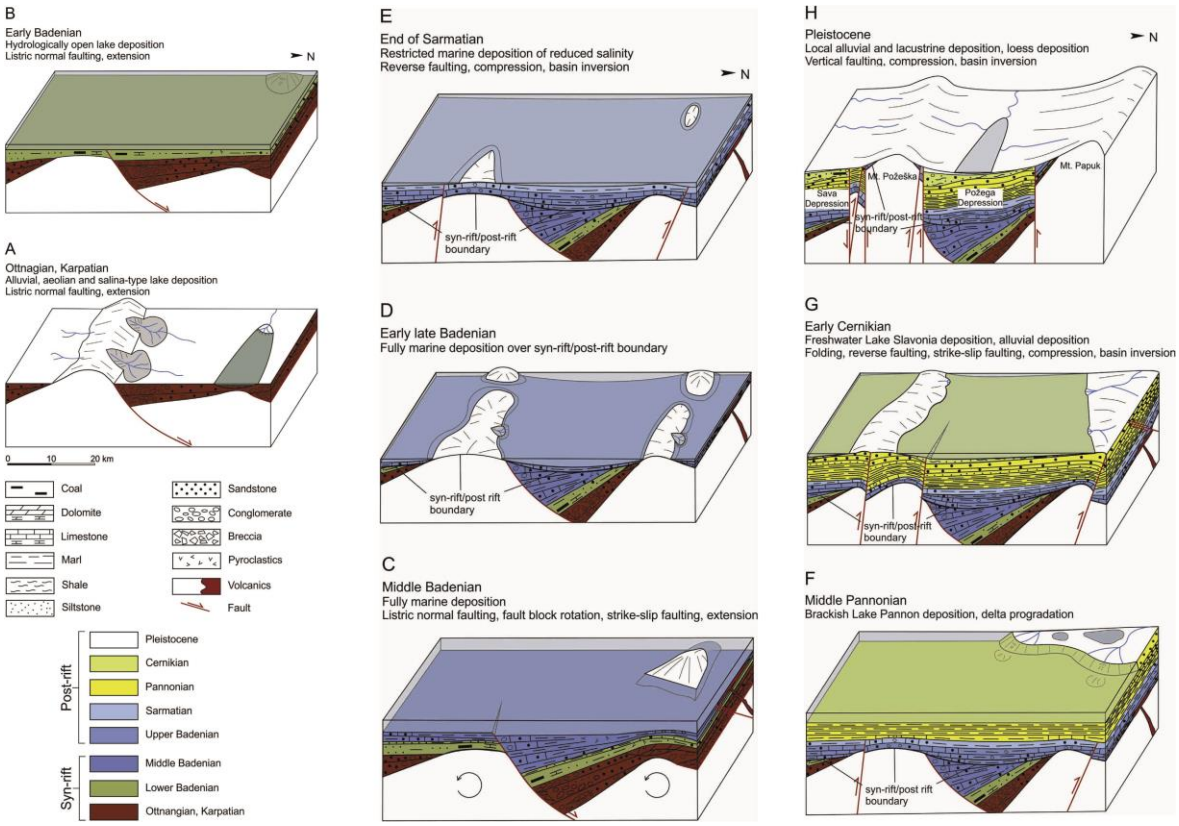
Početci riftinga u ranom miocenu tj. egenburgu obilježeni su andezitnim vulkanizmom na području sjeverno od Zagreba. Ovaj događaj označava početak sinriftne faze pa tako i prvog megaciklusa (slika 8).



Slika 8: Karta debljine sedimenta taloženih tijekom prvog sedimentacijskog megaciklusa (Saftić et al., 2003)

Daljnim riftingom stvoreni su manji taložni bazeni na jugozapadnom rubu Panonskog bazena u kojima se odvijalo taloženje sa značajnim terigenim utjecajem budući da je veći dio područja tijekom egenburga bilo kopno. Glavnom ekstenzijskom fazom koja je uslijedila u periodu od otnanga do badena aktivirani su rasjedi i stvorene glavne ekstenzijske zone (Lučić et al., 2001). Pomakom duž normalnih listričkih rasjeda prema istoku i ekstenzijom bazena istok-zapad nastale su tektonske polugrabe/depresije: Dravska

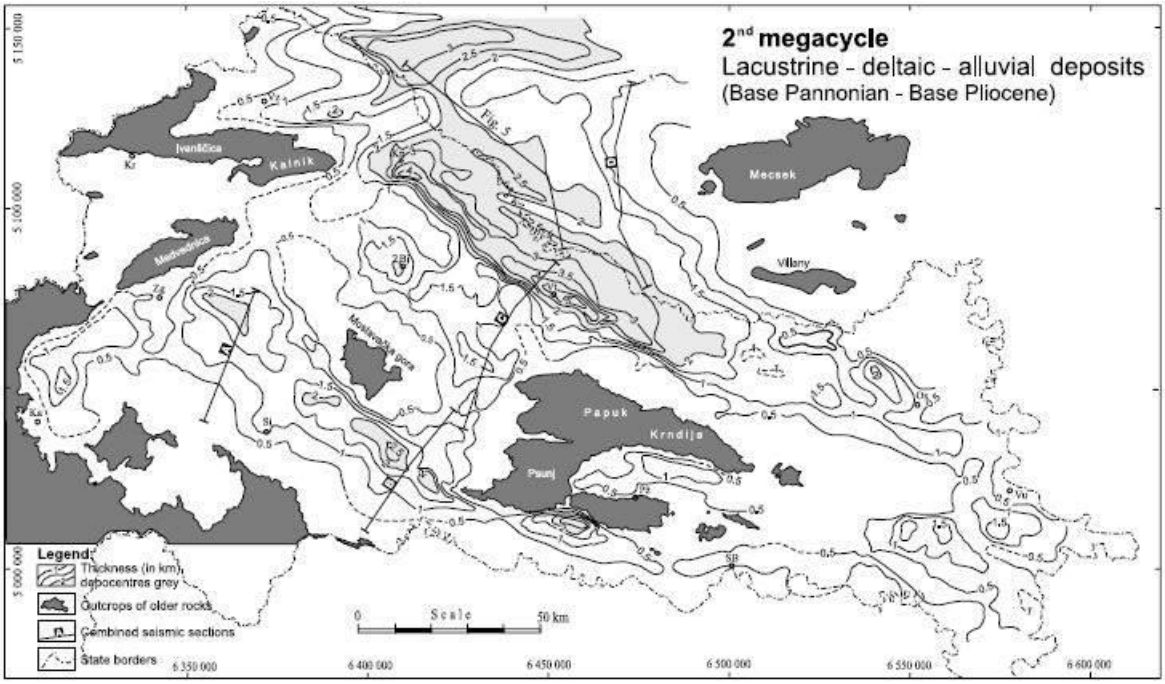
depresija i njena Bjelovarska subdepresija, Murska depresija, Požeška depresija, Savska depresija, Karlovačka depresija te Slavonsko-Srijemska depresija (Pavelić, 2001; VELIĆ et al., 2002; Saftić et al., 2003; slika 9). Kako je paralelno s ekstenzijskom fazom uspostavljena veza Paratetisa s Mediteranskim i Indopacifičkim morem tijekom badena, nastupila je transgresija te je velik dio područja prekriven morem. Tako nakon kratke terestričke faze počinje taloženje marinskih sedimenata koji dominiraju u badenskom slijedu naslaga. Ovaj period koji se smatra vrhuncem riftinga završava kompresijom u kasnom badenu (Lučić et al., 2001). Završetkom sinriftne faze tijekom sarmata počinje post riftna faza koja je obilježena intenzivnom termalnom subsidencijom zbog čega su sarmatske naslage vrlo tanke.



Slika 9: Sedimentološko-tektonska evolucija jugoistočnog dijela Panonskog bazena po modelu Požeške depresije (modificirano prema Pavelić & Kovačić, 2018)

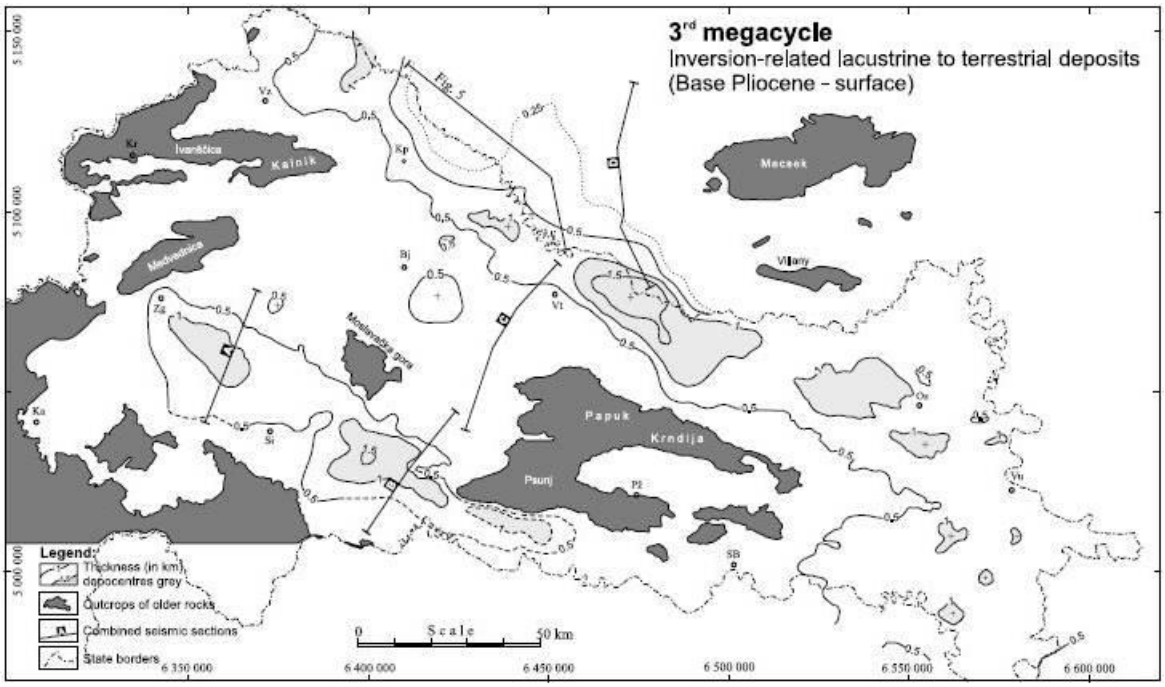
Potpunom izolacijom Paratetisa od mora u sarmatu nastaje Panonsko jezero u koje se od panona, što se smatra početkom drugog megaciklusa (slika 10), pa sve do kraja ponta

talože jezerske, deltne i aluvijalne naslage velike debljine koje su unatoč intenzivnoj subsidenciji zabilježene na širem području, a nastale su taloženjem materijala nastalog erozijom okolnih planinskih lanaca (Saftić et al., 2003). Zbog revizije stratigrafskog raspona vrste mekušca *Paradacna abichi* koji je bio provodni fosil za početak ponta, pont je kao termin izbačen iz regionalne stratigrafske nomenklature (Pavelić & Kovačić, 2018).



Slika 10: Karta debljine sedimenta taloženih tijekom drugog sedimentacijskog megaciklusa (Saftić et al., 2003)

Treći i posljednji megaciklus obilježila je kompresija, rektivacija postojećih rasjeda za vrijeme pliocena te inverzija bazena (Slika 11). Taloženje u ovom razdoblju počelo je u jezerima koja su predstavljala ostatke Panonskog jezera poput jezera Slavonija koje je egzistiralo od sredine pliocena do starijeg pleistocena (Pavelić & Kovačić, 2018). Nakon toga uslijedilo je taloženje barskih sedimenata koji su prekriveni riječnim sedimentima rijeka Save i Drave.



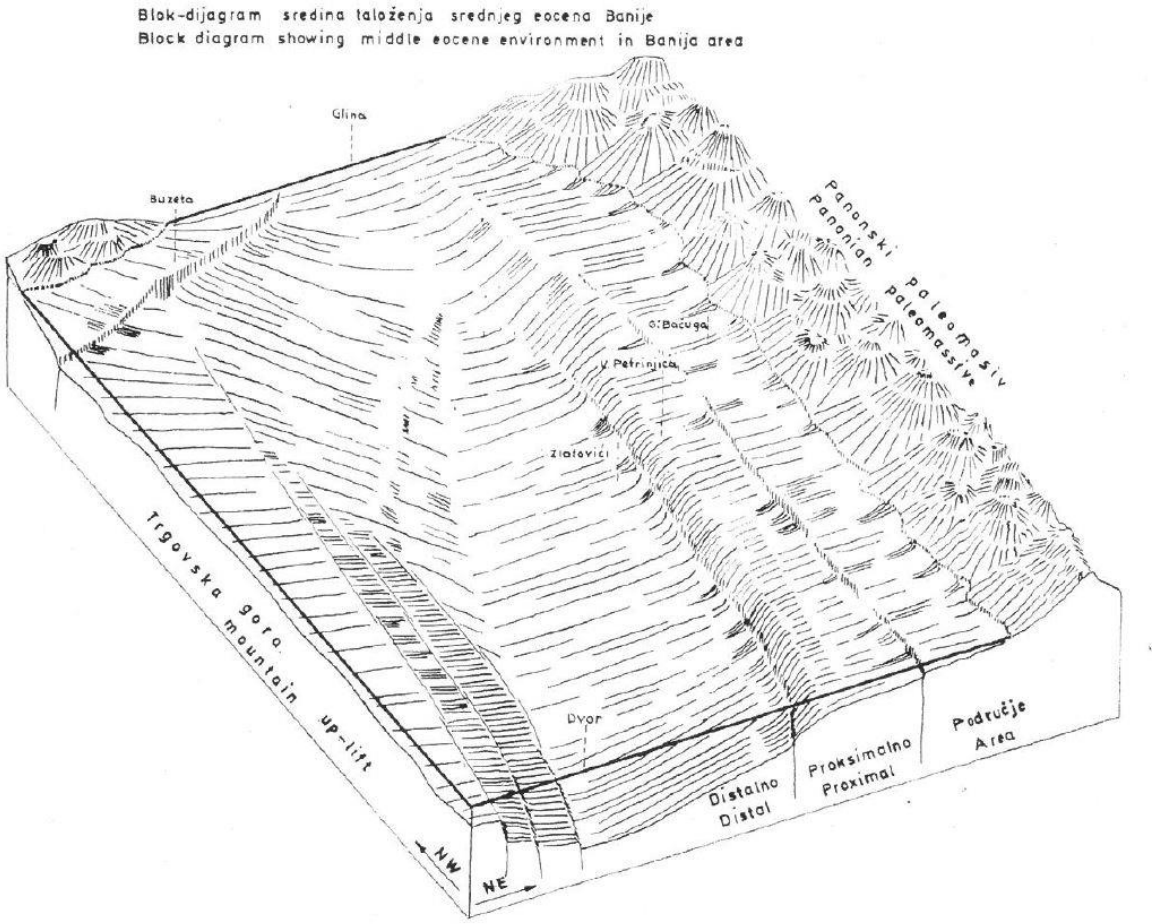
Slika 11: Karta debljine sedimenta taloženih tijekom trćeg sedimentacijskog megaciklusa (Saftić et al., 2003)

3.2.2. Litostratigrafski slijed naslaga na širem području Karlovačke depresije

3.2.2.1. Stijenske jedinice baze Panonskog bazena

Najstarije stijene Panonskog bazena koje ujedno predstavljaju i bazu taložnog bazena su paleozojske stijene kristalina, različite vrste mezozojskih stijena te najmlađe kredno-paleogenske naslage (Jelaska et al., 1969; Saftić et al., 2003). Paleogenske naslage koje su rezultat taloženja u predgorskom bazenu izdanjuju na područjima Zrinske gore i Kozare (Jovanović et al., 1986; Šikić et al., 2014). Jelaska i suradnici (1969) su na temelju sedimentoloških istraživanja u eocenskim naslagama, čija je starost utvrđena na temelju zajednica bentičkih i planktonskih foraminifera, napravili stratigrafski model i paleogeografsku interpretaciju taložnog bazena (slika 12). Ove stijene litološki su sastavljene dominantno od pješčenjaka i konglomerata nastalih gravitacijskim tokovima unutar dubokomorskih bazenskih prostora pa sve do plitkomorskih i kopnenih okoliša. Generalni smjer paleotransporta bio je u smjeru jugozapada što znači da je distributivno područje bilo sa sjevera-sjeveroistoka. Taložni bazen predgorskog tipa pokazuje tipično

dinaridsko pružanje (Jelaska et al., 1969). Prema najnovijem listu OGK Bosanski Novi (Šikić et al., 2014) starost navedenih naslaga proširena je i na razdoblje paleocena. U paleogenskim naslagama Zrinske gore također se javljaju siltiti, šejlovi, lapori, pojave ugljena i plitkomorski vapnenci (Babić & Zupanič, 1976; Jovanović et al., 1986; Šikić et al., 2014). Na polimiktnim eocenskim konglomeratima Banije napravljena je opsežna mineraloška analiza valutica čiji je zaključak da bi s obzirom na mineraloški sastav podrijetlo materijala moglo biti od trijaskih magmatskih stijena ofiolita (Majer, 1983). Na naslage paleogena transgresivno naliježu naslage neogena pa ova granica (baza neogena) predstavlja sinriftnu diskordanciju.



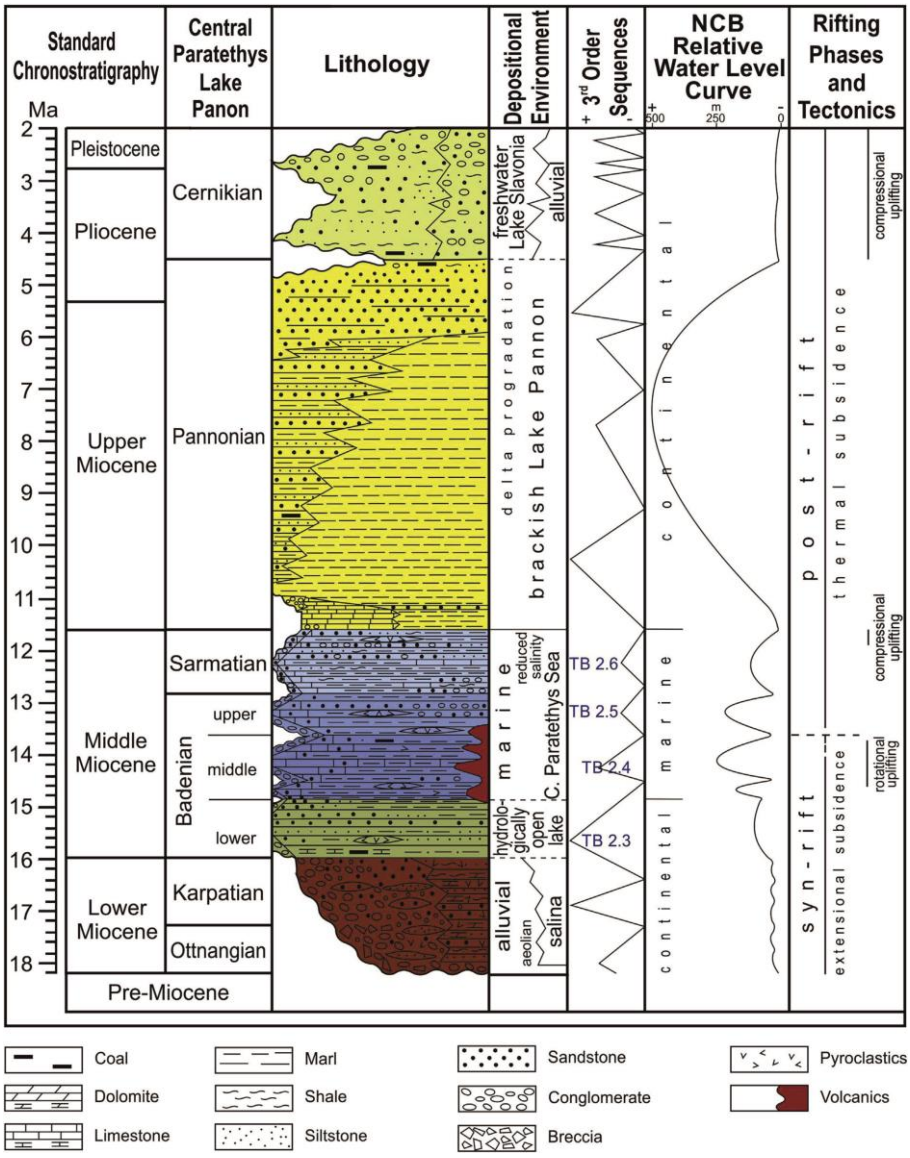
Slika 12: Paleogeografska interpretacija paleogenskog taložnog bazena (preuzeto iz Jelaska et al., 1976)

3.2.2.2. Litostratigrafski slijed naslaga Panonskog bazena

Početak taloženja u Panonskom bazenu obilježen je oligo-miocenskim i ranomiocenskim klastičnim naslagama (Tomljenović & Csontos, 2001). Ove naslage sastavljene su od krupnozrnastih klastita, pješčenjaka, glina i ugljena iz razdoblja od egera do egenburga koji su taloženi u uvjetima s jakim terestričkim utjecajem isključivo na zapadnom rubu Panonskog bazena (Lučić et al., 2001). Za razdoblje otnanga karakteristični su krupnozrnasti klastiti molasnog podrijetla sa piroklastičnom komponentom taloženi u riječnim i jezerskim uvjetima. Prostorno su rašireniji od starijih naslaga pa tako prekrivaju i južni dio bazena (Saftić et al., 2003). Probojem mora sa sjeverozapada u karpatu došlo je do transgresije i postupnog prijelaza iz slatkovodnih u brakične uvjete, a kasnije u badenu i do uspostave marinskih uvjeta. Tijekom karpata talože se pjeskoviti i glinoviti lapori s proslojcima tufa. Kako je transgresija nastavila, u badenu je velik dio područja bio prekriven morem, a samo su neka uzvišenja ostala kao otoci. Između naslaga karpata i badena vidljiva je diskordancija koja je rezultat izrazite subsidencije. U ovakvim pravim marinskim uvjetima talože se kalkareniti i biogeni litotamnijski vapnenci u plićim djelovima uz rub bazena te oko uzvišenja koja predstavljaju otoke (Saftić et al., 2003). U dubljim djelovima bazena talože se turbiditne naslage plavo-sivih i smeđih lapora.

Tijekom srednjeg badena stvara se diskordancija koja se smatra granicom sinriftne i postriftne faze (Pavelić, 2001). Kontinuirana sedimentacija nastavlja se u sarmatu u kojem dominira sedimentacija horizontalno laminiranih masivnih lapora (slika 13; Pavelić & Kovačić, 2018). Potpunom izolacijom bazena od mora u sarmatu nastaje Panonsko jezero u kojem se odvija sedimentacija naslaga sa endemskom faunom mekušaca po kojoj su naslage panona podijeljene. Prve naslage taložene u ovom nizu su pločasti, tanko uslojeni vapnenci s proslojcima lapora, pješčenjaka i konglomerata nazvani croatica naslage po fosilnom ostatku mekušca *Radix croatica*. Produbljavanjem jezera taloženi su lapori nazvani banatica i abichi naslage također prema vrstama mekušaca *Congeria banatica* i *Paradacna abichi*. Banatica i abichi naslage stratigrafski su pripadale pontu ali je taj pojam izbačen iz regionalne stratigrafske nomenklature nakon revizije raspona vrste *Congeria banatica* pa sada pripadaju gornjem dijelu panona (slika 13; Pavelić & Kovačić, 2018).

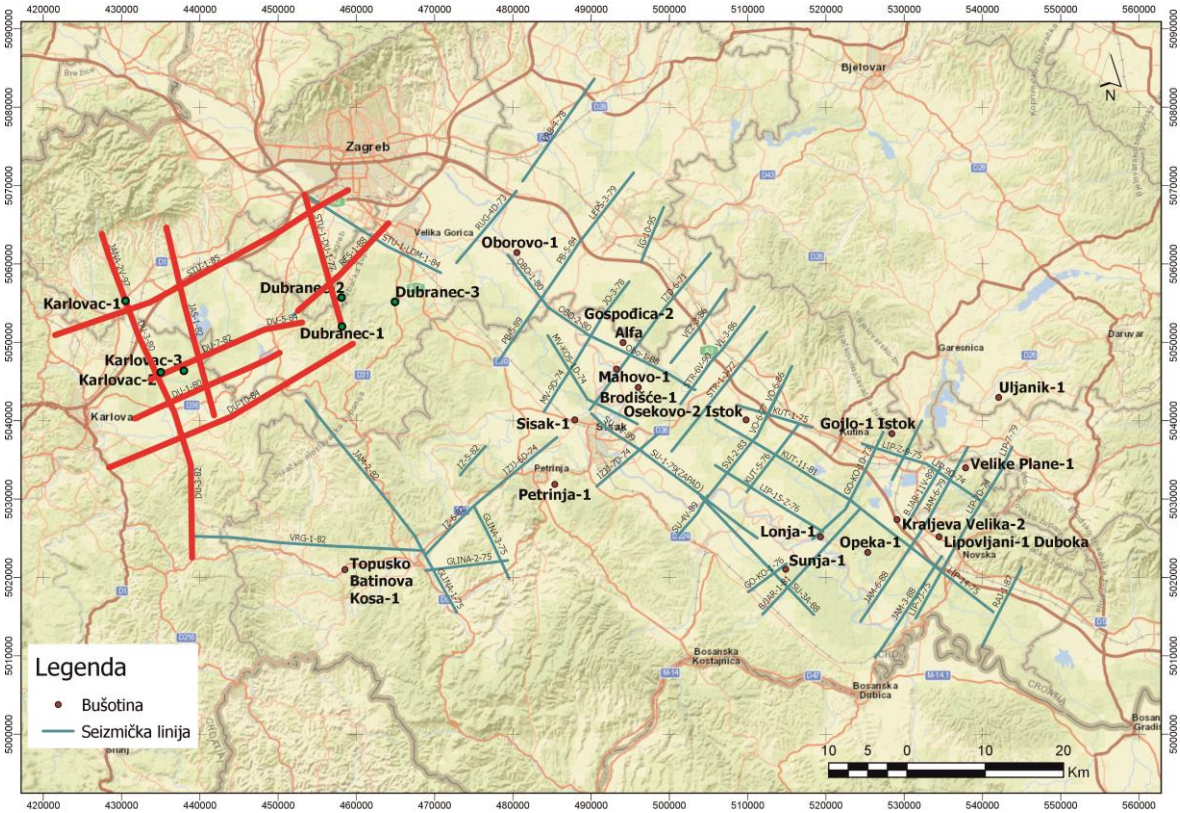
Panonsko jezero do kraja zapunjavaju pijesci s proslojcima šljunka i ugljena nazvani rhomboidea naslage koji su dobili ime po mekušcu *Congeria rhomboidea*. Nakon panona dolazi do dezintegracije Panonskog jezera u sustav više manjih jezera u kojima se sedimentacija nastavila u cerniku. Jedno od tih jezera bilo je i jezero Slavonija u kojem se odvijala sedimentacija siliciklastičnih viviparus naslaga (slika 13; Pavelić & Kovačić, 2018). Ove naslage pokazuju trend positnjavanja zrna od starijih prema mlađim. Tijekom kvartara talože se dominantno aluvijalni sedimenti te jezerski sedimenti i les koji je nastao pod utjecajem glacijacija.



Slika 13: Sedimentološka i stratigrafska shema jugoistočnog ruba Panonskog bazena (modificirano prema Pavelić & Kovačić, 2018)

4. Ulazni podatci i metode istraživanja

Strukturna interpretacija područja Karlovačke depresije izvršena je pomoću računalnog programa za trodimenzionalno modeliranje u geologiji Petrel^{TM} 2018 na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Kao ulazni podaci za interpretaciju i modeliranje korišteni su bušotinski podaci i 2D seizmički refleksijski profili (slika 14).



Slika 14: Karta prikazuje geografski položaj bušotina i seizmičkih profila (crno-zelenim točkama označeni su korištene bušotine, a crvenim linijama 2D seizmički profili)

Bušotinski podaci uključuju koordinate lokacija bušotina te izvještaje sa dubinama nabušenih stratigrafaskih jedinica koje služe za definiranje dubina odabranih stratigrafskih horizonata. Duboke istražne bušotine korištene za strukturnu interpretaciju su: Karlovac-1 (Ka-1), Karlovac-2 (Ka-2), Karlovac-3 (Ka-3), Dubranec-1 (Du-1), Dubranec-2 (Du-2) i Dubranec-3 (Du-3) (tablica 1a). Najdublja od korištenih je bušotina Karlovac-2 koja je izbušena do dubine od 4145 m te obuhvaća podlogu taložnog bazena sastavljenu od mezozojskih naslaga. Najstarije naslage ove bušotine su dolomiti gornjeg tirjasa koji su na temelju mikrofosila *Involutina sinuosa sinuosa*, *Involutina* cf. *communis* i *Dasycladaceae* stratigrafski određene na norik. Ove naslage prisutne su do dubine od 4074 m. Od naslaga

gornjeg trijasa do dubine 2912 m proteţe se heterogena jedinica koja je na temelju litologije i korelacije kronostratigrafski određena na mezozojsku starost. Sastoji se od fliške serije, dolomita s anhidritom, šejla, heterogenih breča i anhidrita u izmjeni s pješčenjacima i šejlovima, breča, dolomita te flišolikog kompleksa siltoznih lapora i pješčenjaka. U rasponu od 2912 do 2236 m dubine nalaze se naslage paleogena koje su podjeljene na jedinicu paleocen-eocen i oligocen. Paleocensko-eocenske naslage (2475–2912 m) određene su mikropaleontološki na temelju nanofosila i palinomorfa. Od nanofosila utvrđeni su paleogenske vrste kololitoforida: *Discoaster* sp., *Sphenolitus* cf. *primus, Cruciplacolithus tenuis, Faciculithus* sp. i *Helicosphaera* sp. Na temelju velikog postotka polena palmi utvrđena je topla suptropska klima kakva je postojala na kraju paleocena i početku eocena. Litologije prisutne na ovom intervalu su konglomeratični pješčenjaci, pješčenjaci, siltozni lapori i siltiti. Oligocen je utvrđen na temelju litologije i superpozicije zbog paleontološke sterilnosti uzoraka. Od litologija su prisutni siltozni lapori i siltiti s proslojcima ugljena. Na oligocenskim naslagama istaloţen je slijed neogenskih i kvartarnih naslaga debljine gotovo dva kilometra.

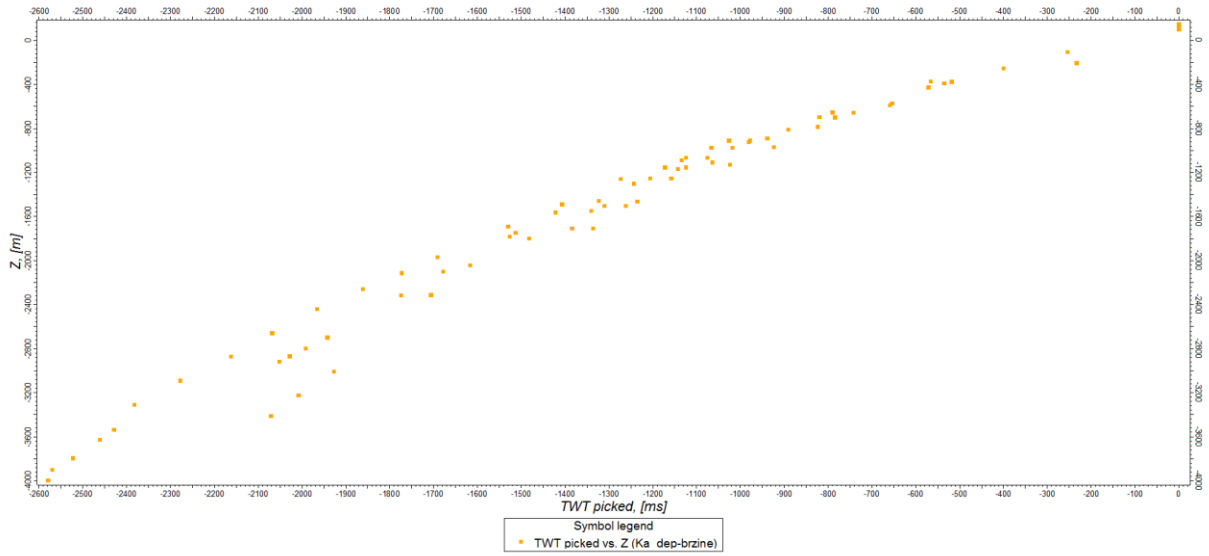
Dvodimenzionalni seizmički refleksijski profili sadrže reflekse koji su odraz unutarnje geološke strukture odnosno diskontinuiteta, a definirani su dvostrukim vremenskim mjerilom (engl. *Two Way Time* – TWT). Odabrani su profili različitih orijentacija na užem području istraživanja (tablica 1b).

Tablica 1: popis korištenih bušotina i 2D seizmičkih profila

a) Bušotine	
1	KARLOVAC-1
2	KARLOVAC-2
3	KARLOVAC-3
4	DUBRANEC-1
5	DUBRANEC-2
6	DUBRANEC-3

b) Seizmički profili	
1	DU-10-84
2	DU-1-80
3	DU-3-80
4	DU-3-82
5	DU-5-84
6	DU-7-82
7	JANA-2V-97
8	JAS-1-82
9	RES-1-88
10	STU-1-85
11	STU-1-DU-1-77

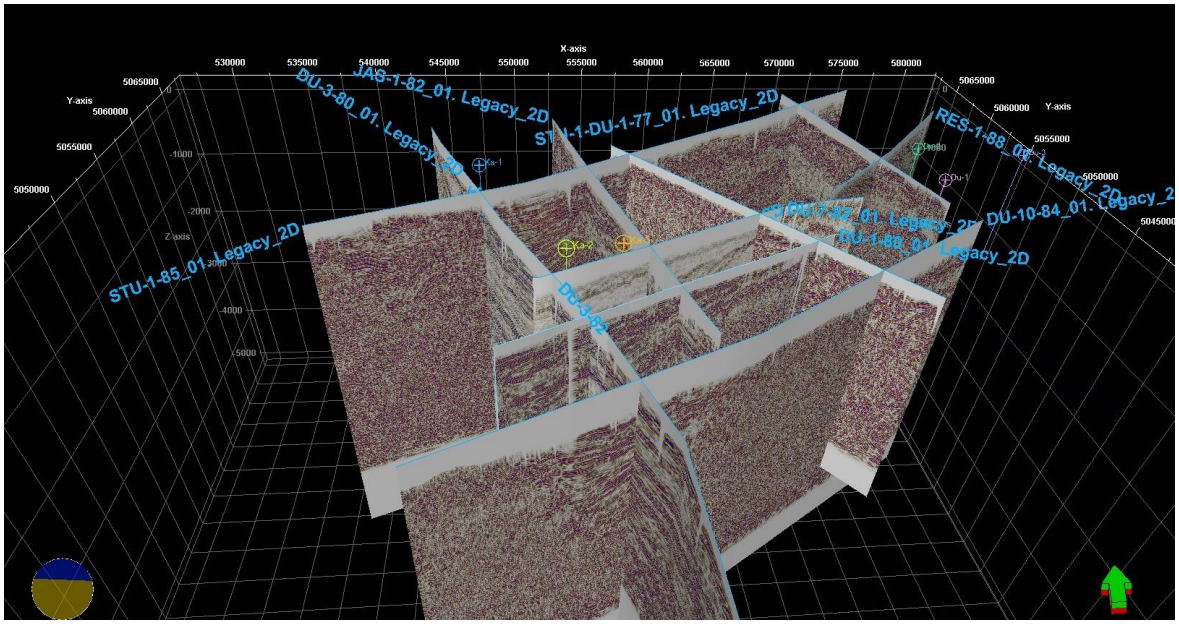
Set bušotinskih podataka također sadrži tablice s izmjerenim brzinama širenja seizmičkih valova u pojedinim bušotinama kako bi se podaci iz bušotina u dubinskom mjerilu uskladili sa seizmičkim refleksijskim profilima u dvostrukom vremenskom mjerilu. Pomoću tablica brzina konstruiran je graf ovisnosti brzine širenja seizmičkih valova o dubini za područje Karlovačke depresije koji se u daljnjem radu koristio za sve vremensko-dubinske konverzije (slika 15). Za izradu modela korišten je i računalni program QGIS u kojem su pripremljeni listovi OGK SFRJ te isječak topografske karte područja u mjerilu 1:25 000 na temelju kojih je napravljena površinsko-podpovršinska korelacija i prostorni smještaj geoloških struktura.



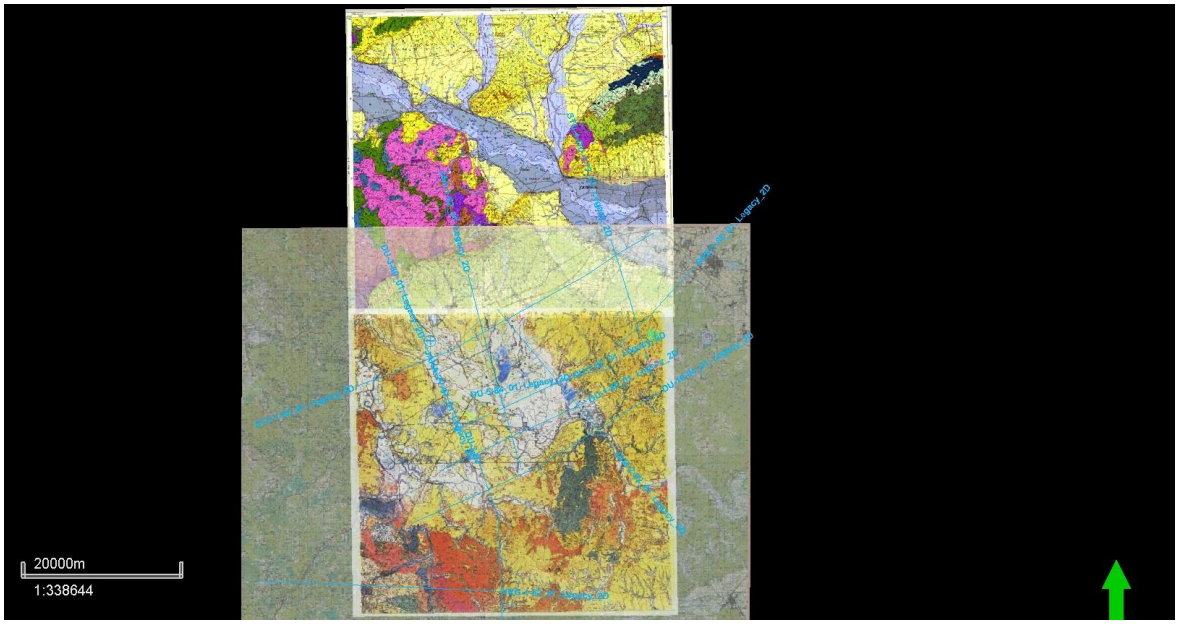
Slika 15: Graf ovisnosti brzine širenja seizmičkih valova o dubini za područje Karlovačke depresije koji se koristi za vremensko-dubinsku konverziju

4.1 Unos i organizacija podataka

Prvi korak u postavljanju Petrel projekta bilo je određivanje njegovog koordinatnog suastava. Odabrani koordinatni sustav je Gauss-Krüger, MGI 5 budući da su svi podaci u toj projekciji. Nakon toga u projekt su dodani 2D seizmički refleksijski profili i bušotine kojima su pridodane dubine stratigrafskih horizonata, dobivene iz bušotinskih izvještaja (slika 16). Kako su podaci u različitim mjerilima napravljena je konverzija bušotinskih podataka iz dubinskog u vremensko mjerilo. Osim toga u Petrel projekt su učitani i listovi osnovne geološke karte koji su predhodno georeferencirani u QGIS-u te isječak topografske karte u mjerilu 1:25 000 (slika 17).



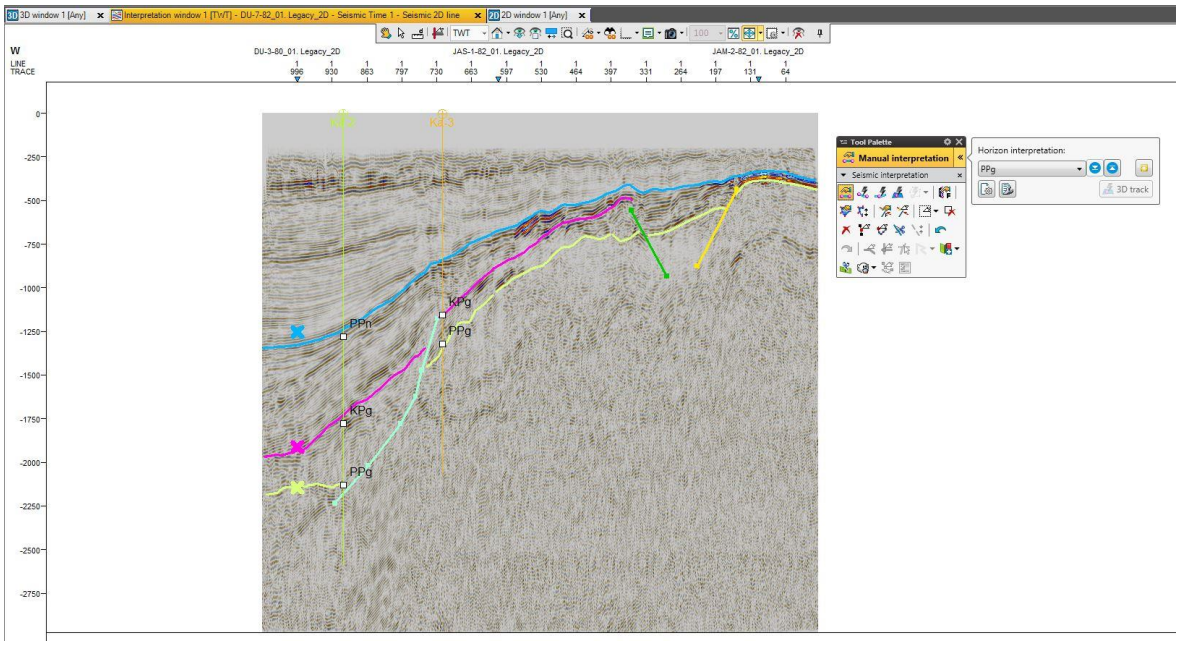
Slika 16: Unos bušotina i 2D seizmičkih profila u Petrel projekt



Slika 17: Unos georeferenciranih listova OGK i isječka topografske karte u mjerilu 1:25000

4.2 Interpretacija

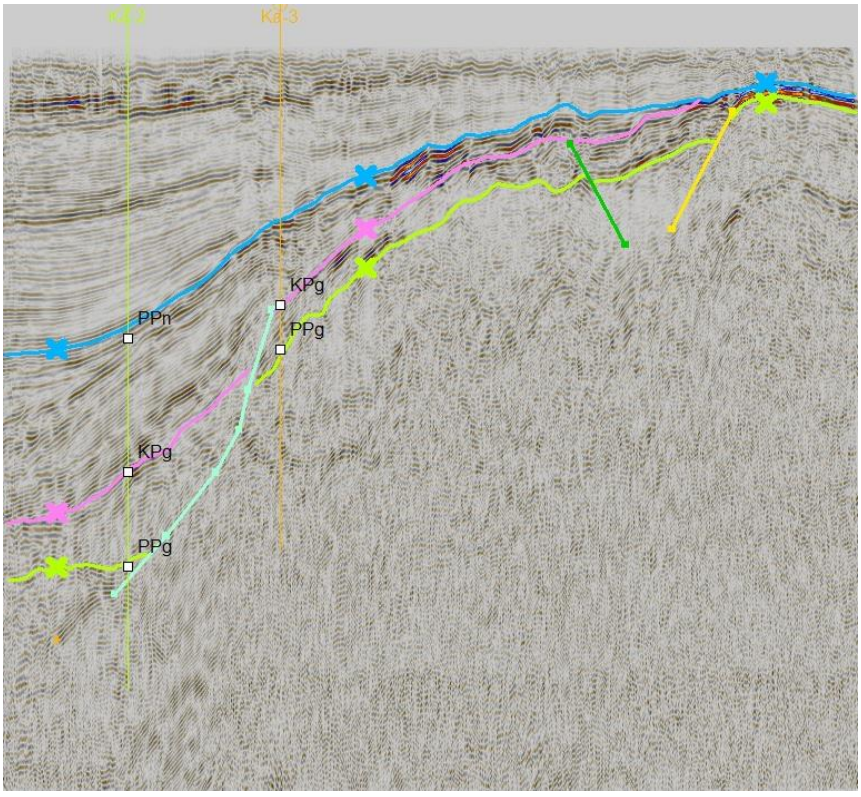
Nakon unosa i organizacije ulaznih podataka izvršena je strukturna interpretacija. Proces strukturne interpretacije odnosio se na iscrtavanje odabranih stratigrafskih horizonata koji koreliraju sa značajnim tektonskim fazama u evoluciji istraživanog područja, a očituju se u specifičnoj geometriji refleksa te izraženosti izdvojenih refleksa koji ujedno predstavljaju tektonostratigrafske granice na seizmičkim profilima. Seizmički refleksi za iscrtavanje stratigrafskih horizonata odabrani su na temelju njihove geometrije i podataka o dubini nabušenih stratigrafskih jedinica u bušotinama. Iz interpretiranih horizonata na svim seizmičkim profilima kasnije su procesom interpolacije metodom najbližeg susjeda (engl. *neighbourhood interpolation*) generirane strukturne karte i karte debljina. Na mjestima naglih promjena u pružanju seizmičkih refleksa interpretirani su rasjedi kojima je određen karakter i vertikalni pomak, a neki od njih spojeni su u rasjedne plohe. Sve ove radnje izvršene su pomoću alata za interpretaciju u softveru Petrel (slika 18).



Slika 18: Sučelje računalnog programa Petrel™ 2018 sa uključenim interpretacijskim alatom u 2D prikazu

4.2.1 Stratigrafski horizonti

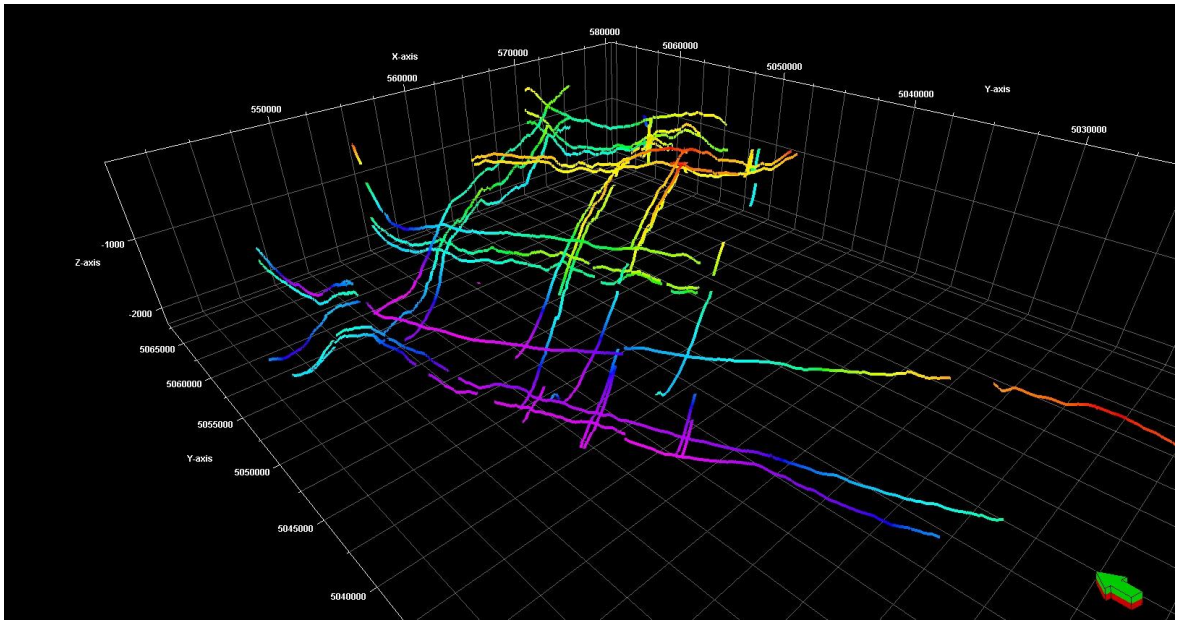
Kako bi se opisala prostorna distribucija i debljina paleogenskih naslaga odabrana su tri stratigrafska horizonta: podloga paleogenskih naslaga (PPg), krovina paleogenskih naslaga (KPg) te podloga panonskih naslaga (PPn) (slika 19). Podlogu paleogenskih naslaga (PPg) predstavljaju paleozojske stijene kristalina i različite vrste mezozojskih stijena (Saftić et al., 2003) koje su u bušotinskim izvještajima prikazane kao stijene temeljnog gorja. Na stijenama temeljnog gorja razvijen je paleoreljef koji na nekim mjestima predstavlja bazu taložnog bazena u kojem je taloženje počelo tijekom paleogena (Lučić et al., 2001). Prema tome stratigrafski horizont podloge paleogena zapravo je ploha diskordancije između stijena temeljnog gorja te naslaga paleogena ili naslaga drugih starosti budući da taloženje u Panonskom bazenu nije bilo ujednačeno. Stratigrafski horizont krovine paleogenskih naslaga (KPg) služi za interpretaciju sedimentnog tijela paleogenskih naslaga. Horizont podloge panonskih naslaga (PPn) je predpanonska diskordancija koja označava prelazak iz sinriftne, ekstenzijske faze u postriftnu fazu termalne subsidencije, tj. prelazak iz marinskih u brakične naslage (Saftić et al., 2003).



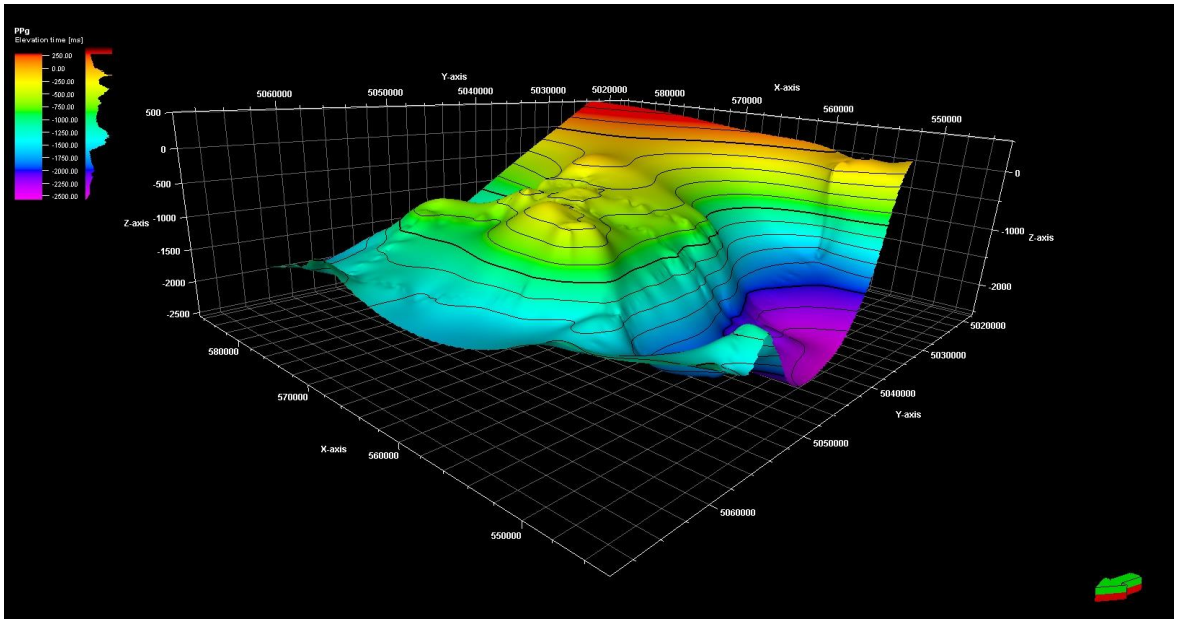
Slika 19: Seizmički profil s interpretiranim stratigrafskim horizontima (zelena linija predsatvlja PPg, ružičasta linija KPg, a plava linija PPn)

Prvi seizmički profili na kojima su interpretirani horizonti bili su profili u neposrednoj blizini bušotina kako bi se za iscrtavanje horizonata odabrali seizmički refleksi koji odgovaraju stvarnoj dubini nabušenih stratigrafskih jedinica. Dubina horizonata ostalih seizmičkih profila određena je temeljem presjecišta s prethodno interpretiranim profilima. Na mjestima gdje pojedine stijenske jedinice nekog od horizonata izdanjuju napravljena je površinska korelacija s podacima s listova Osnovne geološke karte.

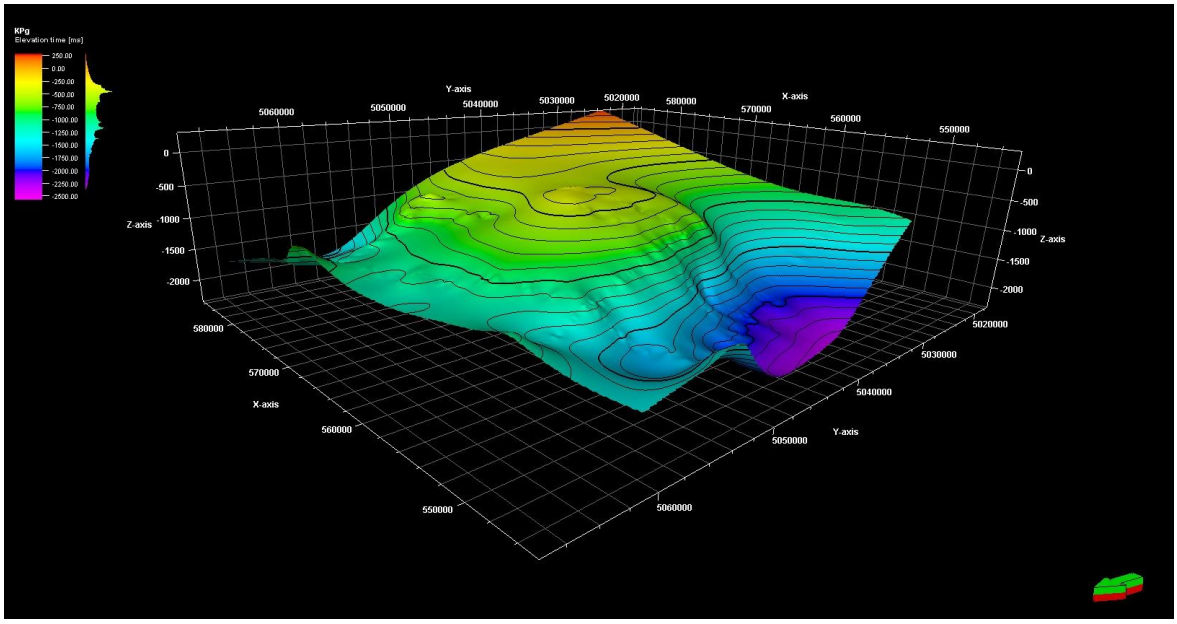
Interpretacijom svih seizmičkih refleksijskih profila (slika 20), interpolacijom podataka te primjenom geoloških zakonitosti i odnosa u procesu strukturnog modeliranja generirani su trodimenzionalni prikazi po plohama sva tri stratigrafska horizonta u dvostrukom vremenskom (TWT) mjerilu (slike 21, 22 i 23).



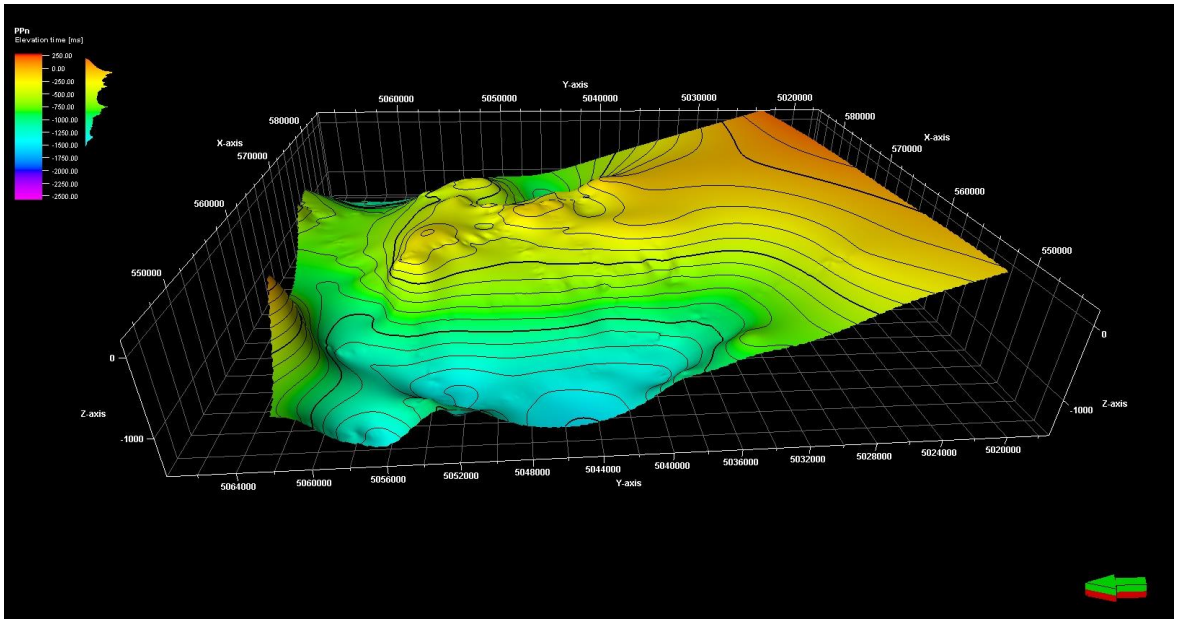
Slika 20: Trodimenzionalni prikaz svih interpretiranih seizmičkih profila, baza za generiranje trodimenzionalnih ploha stratigrafskih horizonata, pogled sa jugozapada



Slika 21: Trodimenzionalni prikaz plohe stratigrafskog horizonta podloge paleogenskih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT), pogled sa sjeverozapada



Slika 22: Trodimenzionalni prikaz plohe stratigrafskog horizonta krovine paleogenskih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT), pogled sa sjeverozapada

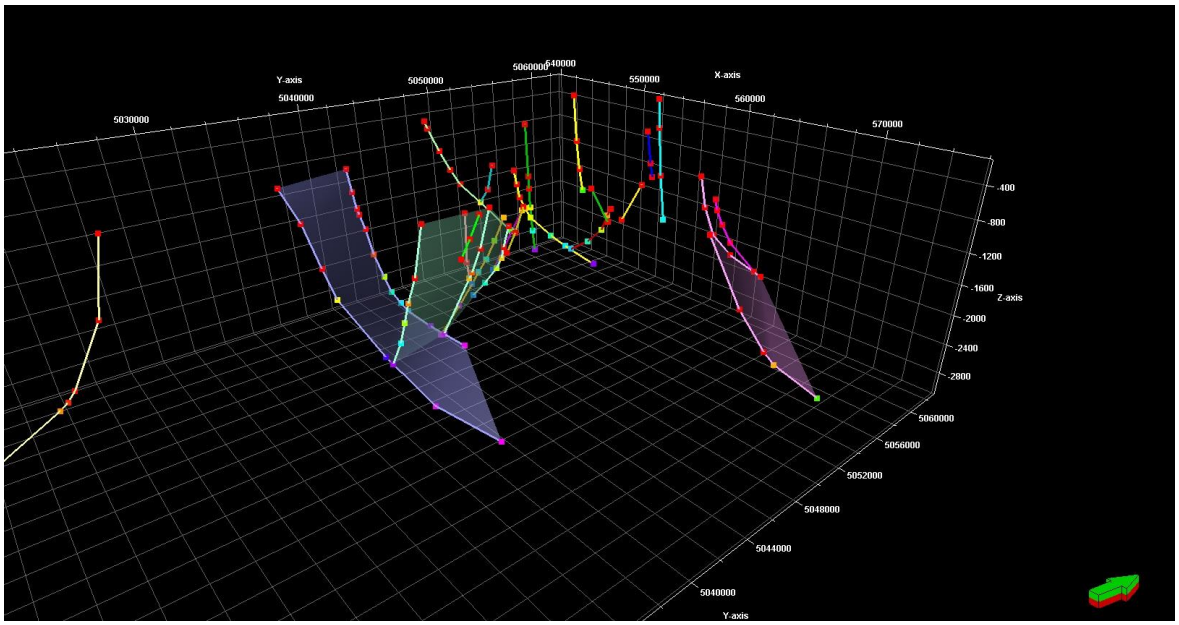


Slika 23: Trodimenzionalni prikaz plohe stratigrafskog horizonta podloge panonskih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT), pogled sa zapada

4.2.2 Rasjedi i rasjedne plohe

Na seizmičkim profilima gdje je primjećen nagib neprirodan za položaj slojeva ili diskontinuitet u pružanju seizmičkih refleksa interpretirani su rasjedi (slika 24). Rasjedima je određen karakter pomaka te iznos vertikalnih pomaka po horizontima u milisekundama (vremenskom mjerilu) koje su prema grafu odnosa dvostrukog vremena i dubine konvertirane u stvarne dubinske vrijednosti, u metre. Neki od rasjeda, za koje je to bilo moguće, sa istim nagibom i karakterom pomaka povezani su u rasjedne plohe. Interpretirano je ukupno 14 normalnih rasjeda od kojih su tri povezane rasjedne plohe (NR1, NR1a, NR2, NR3, NR4, NR5, NR6, NR8, NR10, NR11, NR12, NR13, NR14, NR15). Reversnih rasjeda interpretirano je ukupno šest (RR1, RR2, RR3, RR4, RR5, RR6). Svi rasjedi imenovani su prema toponimima koji se nalaze prikazani u Tablici 2 zajedno sa karakterom pomaka te iznosom vertikalnog pomaka po horizontima izaženog u vremenskom i dubinskom mjerilu.

Vertikalni pomaci normalnih rasjeda u odnosu na plohu PPn u rasponu su vrijednosti od 68 do 311 ms (80–348 m; tablica 2). Pomaci normalnih rasjeda u odnosu na plohu KPg u rasponu su vrijednosti od 20 do 220 ms (40–320 m; tablica 2). Vrijednosti vertikalnih pomaka normalnih rasjeda u odnosu na plohu PPg su u rasponu od 12 do 939 ms (20–1112 m; tablica 2). Vertikalni pomaci reversnih rasjeda u odnosu na plohu PPn su u rasponu vrijednosti od 19 do 233 ms (40–300 m; tablica 2), u odnosu na plohu PPg su u rasponu vrijednosti od 409 do 1504 ms (760–1960 m; tablica 2). Iznosi vertikalnih pomaka reversnih rasjeda u odnosu na plohu KPg nisu poznati.



Slika 24: Interpretirani rasjedi u trodimenzionalnom prikazu, pogled s jugoistoka

Tablica 2: popis imenovanih rasjeda s karakterom pomaka i iznosom vertikalnog pomaka po horizontima u milisekundma (ms) i metrima (m)

Broj rasjeda	Radni naziv	Naziv rasjeda prema toponimu	Karaker pomaka rasjeda	Vertikalni pomak po horizontima					
				PPg		KPg		PPn	
				ms	m	ms	m	ms	m
1	NR1	Koritinja	normalni	673	1112	220	320	144	168
2	NR1a	Blatnica	normalni	–	–	–	–	68	80
3	NR2	Topolnica	normalni	12	20	–	–	–	–
4	NR3	Trstenka	normalni	87	100	–	–	–	–
5	NR4	Išišje	normalni	66	140	78	140	–	–
6	NR5	Pisarovina	normalni	939	1196	–	–	311	348
7	NR6	Popović Brdo	normalni	–	–	–	–	91	140
8	NR8	Zorkovac na Kupi	normalni	–	–	–	–	–	–
9	NR10	Lazina	normalni	98	180	41	80	–	–
10	NR11	Parešnice	normalni	193	344	170	272	249	360
11	NR12	Križančići	normalni	36	80	24	40	–	–
12	NR13	Šišljavski lug	normalni	53	80	47	80	–	–
13	NR14	Cvetkovička šuma	normalni	–	–	–	–	–	–
14	NR15	Gornje polje	normalni	52	80	20	40	–	–
15	RR1	Prelogi	reversni	409	760	–	–	209	300
16	RR2	Sabljići	reversni	1504	1960	–	–	–	–
17	RR3	Jamnica Pisarovinska	reversni	–	–	–	–	–	–
18	RR4	Grofovo	reversni	–	–	–	–	19	40
19	RR5	Breznik Plešivički	reversni	–	–	–	–	233	260
20	RR6	Petrovina	reversni	–	–	–	–	–	–

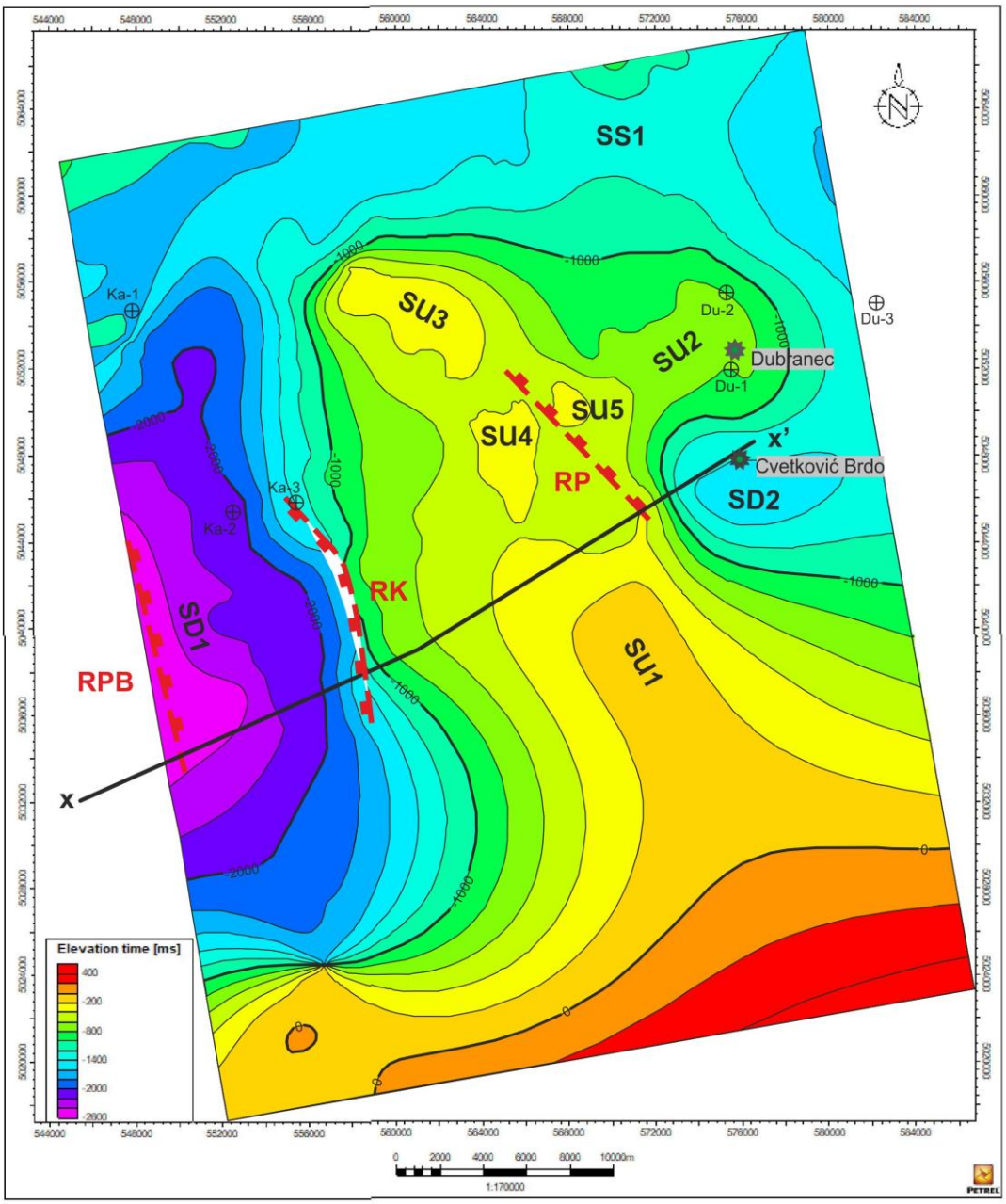
5. Rezultati istraživanja

Rezultat interpretacije 2D seizmičkih profila i bušotinskih podataka područja Karlovačke depresije su strukturne karte po plohama podloge paleogena (PPg), krovine paleogena (KPg) te podloge panona (PPn). Osim strukturnih karata generirane su i karte debljina koje daju uvid u debljinu i prostornu distribuciju paleogenskih i predpanonskih naslaga na što su uvelike utjecali pomaci po glavnim rasjedima. Sve su navedene karte u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) izraženom u milisekundama (ms).

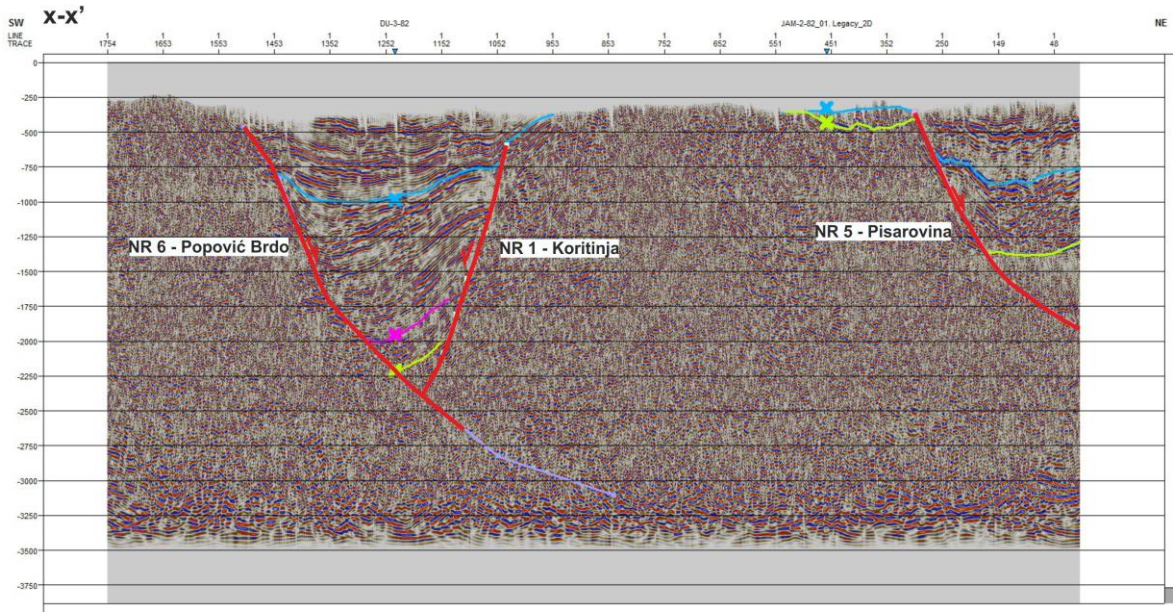
5.1 Strukturne karte po plohama PPg, KPg i PPn

Strukturna karta po **plohi podloge paleogenskih naslaga** (**PPg**; slika 25) ima raspon vrijednosti dubina u dvostrukom vremenskom mjerilu od -2560 ms na zapadnom dijelu do 440 ms na južnom dijelu gdje stijene paleogenske podloge izdanjuju na površinu. Dominantna struktura podloge paleogena omeđena je na svojem sjeveroistočnom rubu rasjedom Pisarovina (RP) te na jugozapadnom rubu rasjedom Koritinja (RK). Rasjedi Pisarovina i Koritinja su normalni, listrički rasjedi s nagibom paraklaza na sjeveroistok odnosno jugozapad, a njihov raspored je vidljiv na profilu x-x' (slika 26). Spuštanjem krovinskih krila navedenih rasjeda zaostalo je strukturno uzvišenje čije je pružanje paralelno pružanju rasjeda u smjeru sjeverozapad-jugoistok (SU1, -70 ms; slika 25). Strukturno uzvišenje se prostire na području između Lasinje i Golinjskog brda. Vrijednost relativnog pomaka po rasjedu Pisarovina iznosi 1196 m dok kod rasjeda Koritinja iznosi 1112 m u odnosu na plohu PPg (tablica 2). Spuštanjem zapadnog, krovinskog krila na već spomenutom rasjedu Koritinja i njegovom konjugiranom paru, rasjedu Popović Brdo (RPB) s nagibom paraklaze na sjeveroistok (slika 26), razvila se depresija na području zapadno od Karlovca. Ova strukturna depresija također ima pružanje smjera sjeverozapad-jugoistok s najvećom dubinom na području između Domagovića i Mandić Sela (SD1, -2500 ms; slika 25) što ujedno predstavlja i maksimalnu dubinu plohe podloge paleogena koja iznosi 3720 m. Vrijednost relativnog pomaka na rasjedu Popović Brdo u odnosu na plohu PPg je nepoznata. Spuštanjem krovinskog krila na rasjedu Pisarovina za 1196 m nastala je strukturna depresija na području Cvetković Brda i Opatije (SD2, -1500 ms; slika 25). Sjeverno od Cvetković Brda nalazi se strukturno uzvišenje Dubranec pružanja sjeveroistok-jugozapad (SU2, -630 ms; slika 25). Ovakav odnos struktura između Cvetković Brda i Dubranca potvrđuju i gravimetrijska mjerenja (Mihaljević & Fürst, 1990;

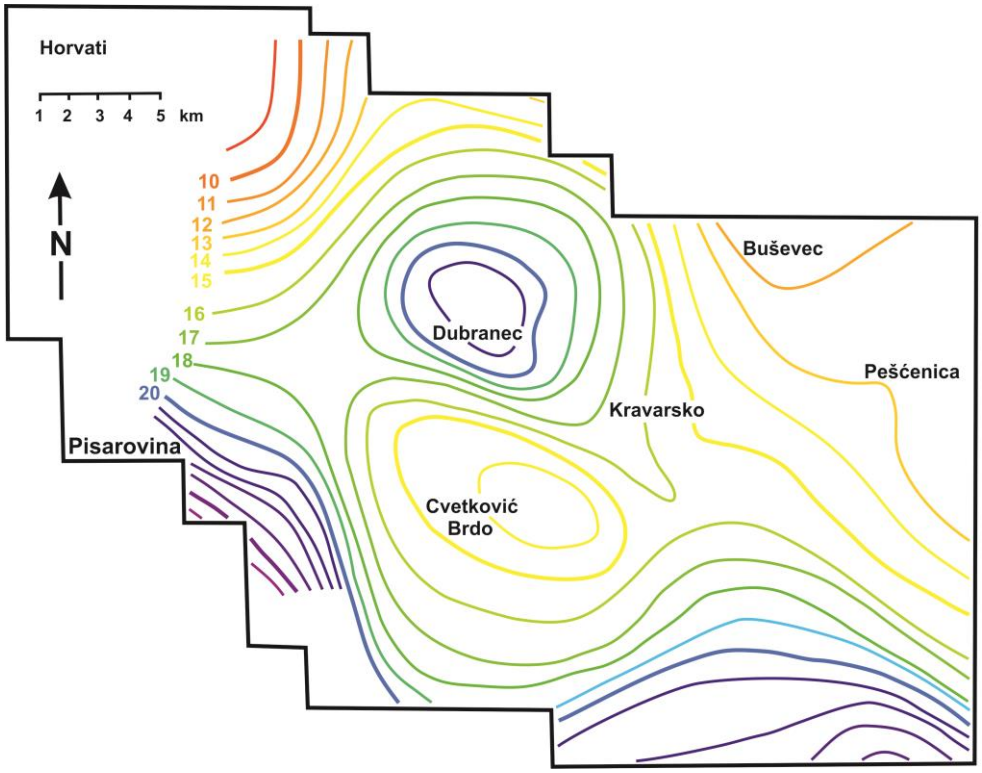
slika 27). U nastavku antiklinale, na samom sjeveru modeliranog područja nalazi se strukturno sedlo Brebernica–Zadrovsko (SS1, -1250 ms; slika 25). Strukturna uzvišenja se nalaze i na području Bratine (SU3, -230 ms) i Pisarovine (SU4, -315 ms i SU5, -340 ms; slika 25).



Slika 25: Strukturna karta po plohi podloge paleogenskih naslaga (PPg) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) s naznačenim strukturnim elementima, rasjedima i položajem profila x-x'.

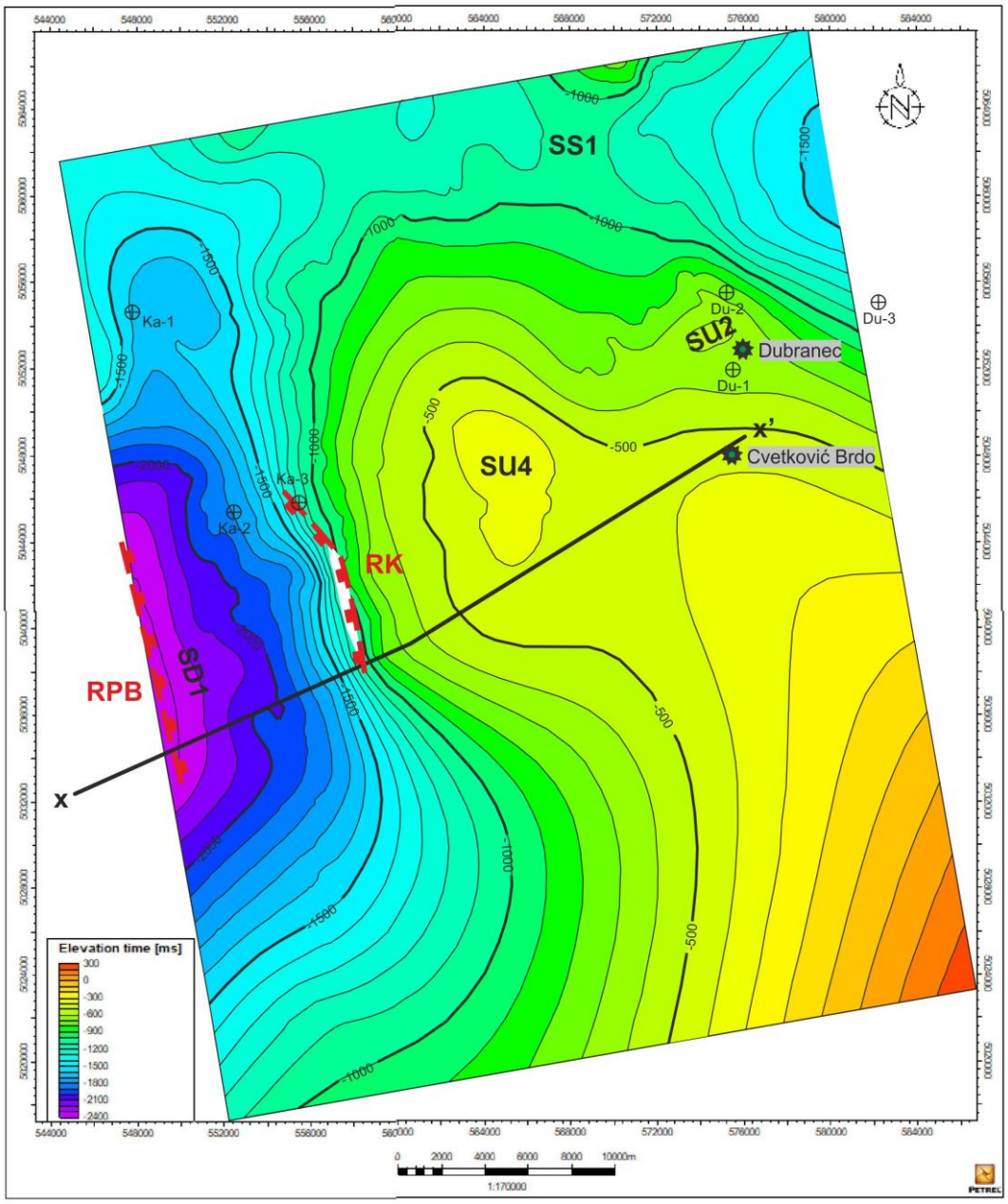


Slika 26: Seizmički refleksijski profil x-x' s naznačenim normalnim, listričkim rasjedima Popović Brdo, Koritinja i Pisarovina u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT)

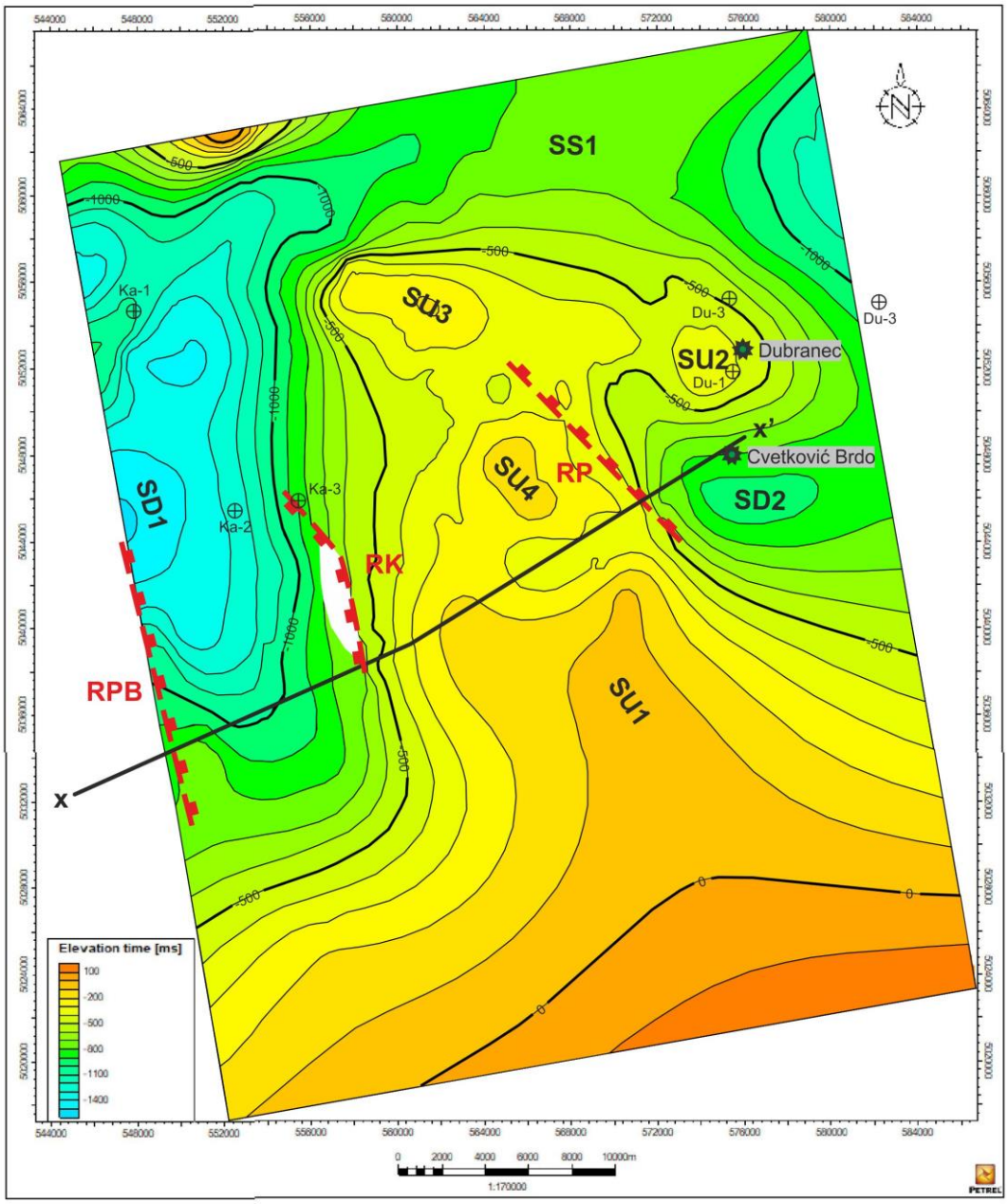


Slika 27: Karta gravimetrijskih anomalija na području Dubranca i Cvetković Brda, vrijednosti izolinija su u miligalima (mGal; modificirano prema Mihaljević & Fürst, 1990)

Strukturna depresija Domagović-Mandić Selo (SD1; slika 28), strukturno uzvišenje Dubranec (SU2, -550 ms; slika 28) i Pisarovina (SU4, -320 ms; slika 28) te strukturno sedlo Brebernica–Zadrovsko (SS1, -1055 ms; slika 28) odražavaju se i na **plohu krovine paleogenskih naslaga** (**KPg**; slika 28) čiji je raspon vrijednosti dubina u dvostrukom vremenskom mjerilu od 0 do 2400 ms. Relativni pomak po rasjedu Koritinja u odnosu na plohu KPg iznosi 220 ms. Za razliku od plohe krovine paleogena na **plohi podloge panonskih naslaga** (**PPn**; slika 29) uz sve nabrojene elemente vidljiva su strukturna uzvišenja Lasinja–Golinjsko brdo (SU1, -80 ms; slika 29) i Bratina (SU3, -190; slika 29) te strukturna depresija Cvetković Brdo-Opatija (SD2, -945; slika 29). Raspon dubina u dvostrukom vremenskom mjerilu na ovoj plohi je od 0 do 1500 ms. Relativni pomak u odnosu na plohu PPn na rasjedu Popović Brdo iznosi 140 m, na rasjedu Koritinja 168 m te na rasjedu Pisarovina 348 m (tablica 2).



Slika 28: Strukturna katrta po plohi krovine paleogenskih naslaga (KPg) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) s naznačenim strukturnim elementima, rasjedima i položajem profila x-x'.

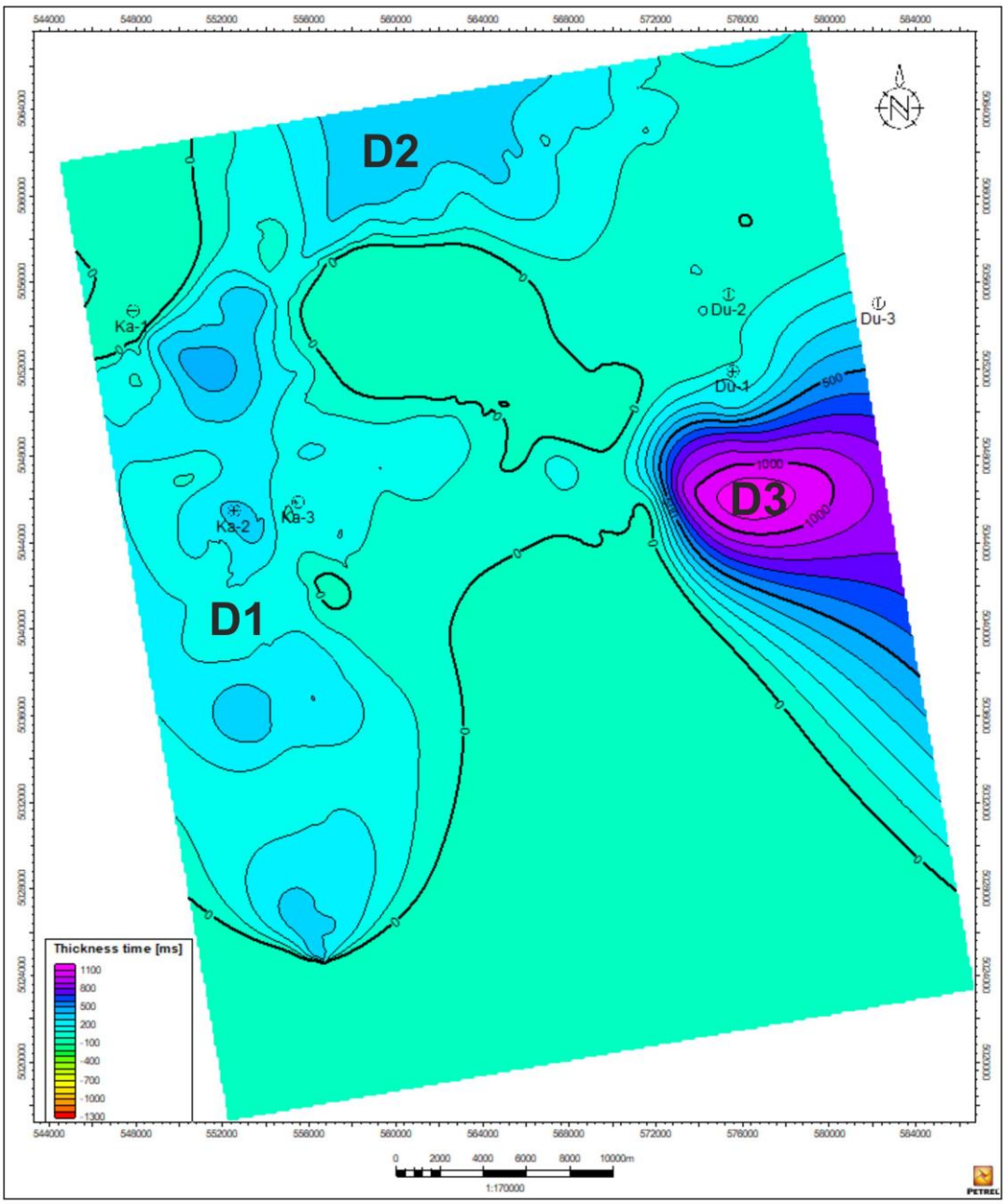


Slika 29: Strukturna katrta po plohi podloge panonskih naslaga (PPn) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) s naznačenim strukturnim elementima, rasjedima i položajem profila x-x'.

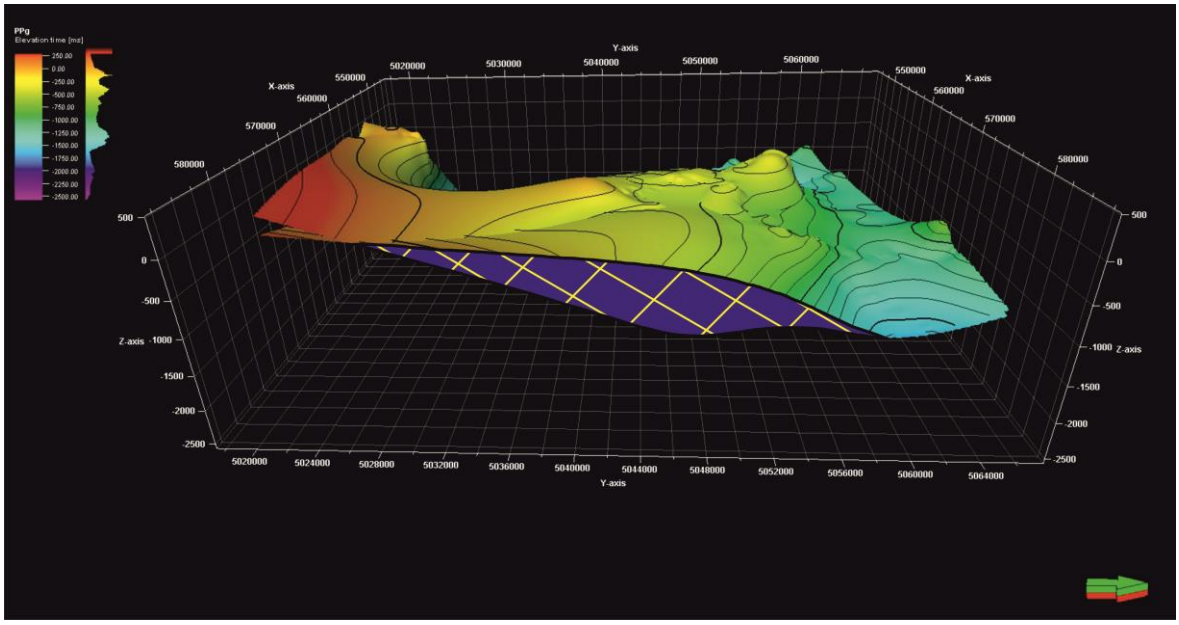
5.2 Karte debljina između PPg-KPg i KPg-PPn

Na prostorni raspored i debljinu naslaga na području istraživanja, u najvećoj je mjeri utjecala ekstenzijska tektonika kojom su stvorene tektonske polugrabe i grabe koje čine glavne depozicijske centre za taloženje paleogenskih, neogenskih i kvartarnih naslaga.

Karta debljina između plohe podine paleogenskih naslaga i plohe krovine paleogenskih naslaga predstavlja prostorni raspored debljina paleogenskih naslaga na modeliranom području (slika 30). Vrijednosti debljina paleogenskih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu su u rasponu od 0 do 1160 ms. Debljine od oko 500 ms pojavljuju se lokalno oko Domagovičke šume, Prekblatnica-šume, Brežana i Kartalije idući od sjevera prema jugu. Pojave ovih lokalnih maksimuma povezane su s taloženjem u depozicijskom centru Domagović–Mandić selo zapadno od Karlovca (D1; slika 30). Debljine istih vrijednosti također se nalaze na području od Klinča Sela do Bencekovića (D2; slika 30). Maksimalna debljina paleogenskih naslaga modeliranog područja zabilježena je na području depozicijskog centra Cvetković Brdo–Opatija i iznosi 1160 ms (D3; slika 30). Sedimentno tijelo paleogena ovog depozicijskog centra vidljivo je na istočnom presjeku trodimenzionalnog modela gdje je na najdebljem dijelu najveća dubina plohe podloge paleogenskih naslaga -1463 ms, a najmanja dubina plohe krovine paleogenskih naslaga -393 ms (slika 31). Na velikom dijelu modeliranog područja paleogenske naslage nisu prisutne.

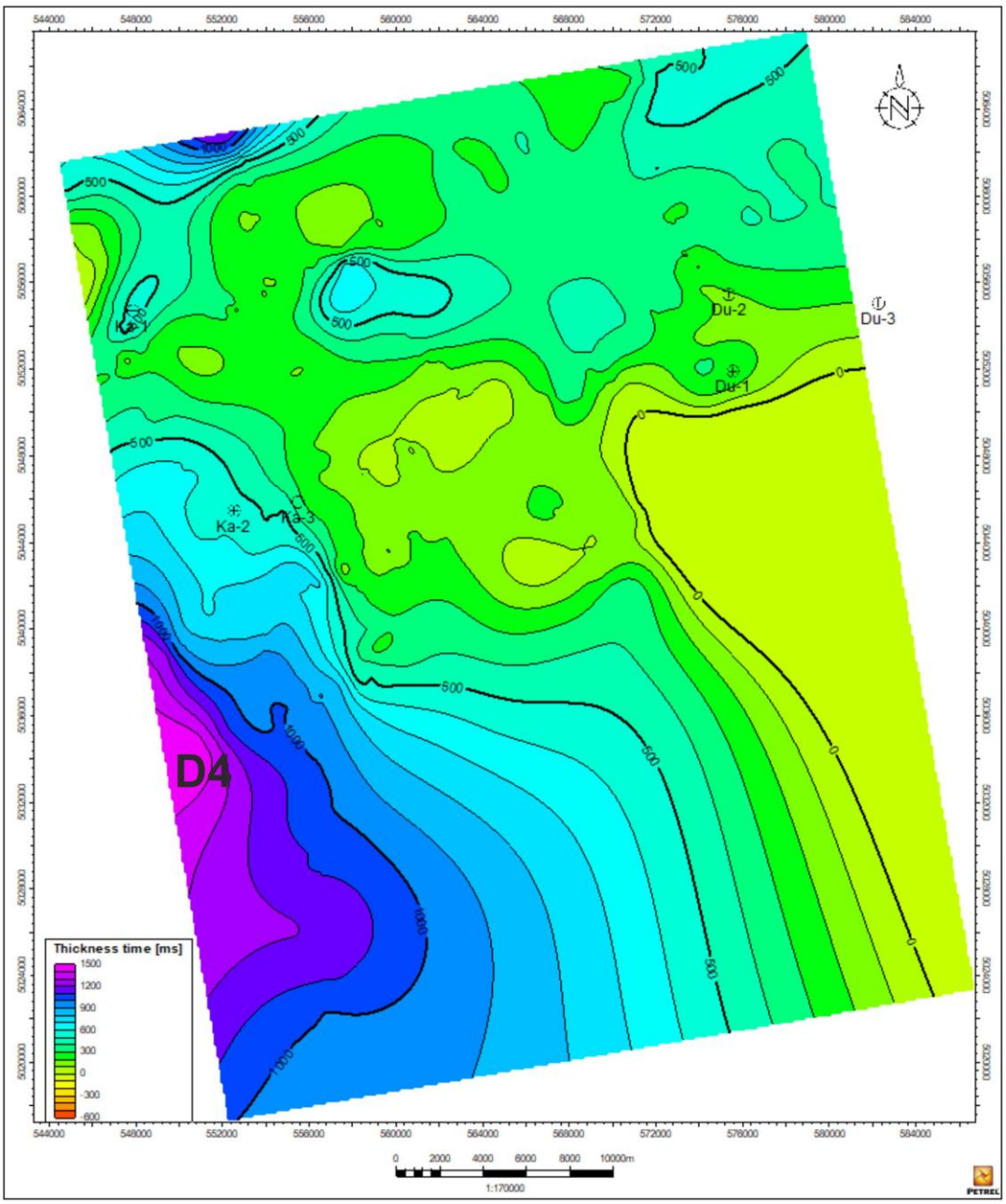


Slika 30: Karta debljina između plohe podine paleogenskih naslaga (PPg) i plohe krovine paleogenskih naslaga (KPg) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT)



Slika 31: Presjek trodimenzionalnog modela s prikazanim plohama PPg i KPg koje omeđuju sedimentno tijelo paleogenskih naslaga prikazane plavim poljem na području depozicijskog centra Cvetković Brdo–Opatija (pogled s istoka)

Karta debljina između ploha krovine paleogena i podine panona prikazuju debljinu predpanonskih naslaga, tj. naslaga sinriftne faze (slika 32). Raspon debljina ovih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu je od 0 do 1500 ms. Najveće debljine predpanonskih naslaga zabilježene su na području od Kobilića Pokupskog na sjeveru, Vojnića na jugu te Utinja Vrela na istoku. Ovo se područje poklapa sa glavnim depozicijskim centrom zapadno od Karlovca (D4; slika 32).



Slika 32: Karta debljina između ploha krovine paleogena (KPg) i plohe podine panona (PPn) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT)

6. Rasprava

Strukturnom interpretacijom 2D seizmičkih refleksijskih profila i bušotinskih podataka na području Karlovačke depresije izrađen je trodimenzionalni model s pripadajućim strukturnim kartama po plohama podloge paleogenskih naslaga, krovine paleogenskih naslaga te podloge panonskih naslaga. Ploha PPg predstavlja površinu paleoreljefa na kojoj su paleogenske, neogenske i kvartarne naslage u diskordantnom odnosu sa starijim paleozojskim i mezozojskim stijenama. Ploha PPn u velikoj se mjeri podudara sa plohom PPg pa su tako na obje plohe prisutna strukturna uzvišenja Lasinja–Golinjsko Brdo (SU1), Dubranec (SU2), Bratina (SU3), Pisarovina (SU4) te strukturne depresije Cvetković Brdo–Opatija i Domagović–Mandić Selo koja se na plohi PPn u odnosu na plohu PPg pomaknula na sjeverozapad. Pomak strukturne depresije Domagović–Mandić Selo upućuje na zapunjavanje depresije donosom materijala iz smjera jugoistoka. Za razliku od ploha PPg i PPn koje su uglavnom podudarne, na plohi KPg postoje određena odstupanja koja se mogu pripisati ograničenju ulaznih podataka i interpretacije. Ovo odstupanje odražava se i na generiranu kartu debljina između ploha PPg i KPg koja predstavlja debljinu paleogenskih naslaga. Zbog tog odstupanja najveća debljina paleogenskih naslaga u modelu na području depozicijskog centra Cvetković Brdo–Opatija, koja iznosi 1160 ms tj. 1200 m, vrlo vjerojatno ne odgovara realnoj situaciji na terenu, pa stoga modeliranu debljinu paleogenskih naslaga treba uzimati s oprezom. Područje maksimalne debljine paleogenskih naslaga na istom je pružanju u odnosu na pojave naslaga iste starosti koje izdanjuju na području Samoborskog gorja i Banije (Šikić et al., 1997; Šikić, 2014). Paleogenske naslage ne izdanjuju na modeliranom području ali su prisutne i opisane u bušotinama. Litološki su zastupljene kao konglomerati, pješčenjaci i pjeskoviti lapori. Najzanimljivija litologija paleogenskih naslaga opisana u bušotinama su polimiktni konglomerati sastavljeni od lećastih valutica dimenzija do 4 cm sastava granita-granodiorita, efuziva, vulkanskog stakla, slejta, kvarcita, niskometamorfnog škriljavca, sitnozrnatih pješčenjaka i mikritnih karbonata koji odgovaraju ranije opisanim klastičnim naslagama koje izdanjuju na području Zrinske gore (MAJER 1983; ŠIKIĆ 2014). Na strukturnu građu terena u najvećoj je mjeri utjecao paleoreljef odnosno nasljeđene strukture koje su ekstenzijskom tektonikom i normalnim rasjedanjem dodatno spuštene i/ili izdignute čime su stvorena strukturna uzvišenja odnosno depresije u kojima su formirani glavni depozicijski centri za taloženje paleogenskih, neogenskih i kvartarnih naslaga. Vrijednosti vertikalnih pomaka po normalnim rasjedima su u rasponu od 20 do 1196 m dok su vrijednosti pomaka po reversnim rasjedima u rasponu od 19 do 1960 m.

7. Zaključak

- Obrađeno je ukupno 11 seizmičkih refleksijskih profila i šest bušotina u računalnom programu Petrel™ 2018
- Uz korelaciju s bušotinskim podacima na seizmičkim refleksijskim profilima su interpretirane tri plohe: podloga paleogenskih naslaga (PPg), krovina paleogenskih naslaga (KPg) i podloga panonskih naslaga (PPn)
- Interpretirano je šest reversnih i 14 normalnih rasjeda od kojih su tri povezana u rasjedne plohe
- Vrijednosti vertikalnih pomaka po normalnim rasjedima su u rasponu od 20 do 1196 m dok su vrijednosti pomaka po reversnim rasjedima u rasponu od 19 do 1960 m
- Za sve rasjede je određen vertikalni pomak u odnosu na plohe PPg, KPg i PPn u vremenskom mjerilu (ms) te preračunat u dubinsko mjerilo (m)
- Za plohe PPg, KPg i PPn generiran je trodimenzionalni model s pripadajućim strukturnim kartama
- Na strukturnim kartama je interpretirano osam strukturnih elemenata: strukturna uzvišenja Lasinja–Golinjsko Brdo (SU1), Dubranec (SU2), Bratina (SU3), Pisarovina (SU4 i SU5), strukturne depresije Domagović–Mandić Selo (SD1), Cvetković Brdo–Opatija (SD2) i strukturno sedlo Brebernica–Zadrovsko (SS1)
- Generirana je karta debljina između ploha PPg i KPg koja predstavlja debljinu paleogenskih naslaga te karta debljina između ploha KPg i PPn koja predstavlja debljinu predpanonskih naslaga
- Na kartama debljina interpretirana su 4 depozicijska centra koja se prostorno poklapaju s glavnim strukturnim depresijama: Domagović–Mandić Selo (D1), Klinča Sela–Bencekovići (D2), Cvetković Brdo–Opatija (D3) na karti debljina paleogenskih naslaga tedepozicijski centar zapadno od Karlovca (D4) na karti debljina predpanonskih naslaga
- Najveća debljina paleogenskih naslaga nalazi se na području depozicijskog centra Cvetković Brdo–Opatija i iznosi 1160 ms, tj. 1200 m
- Najveća debljna predpanonskih naslaga nalazi se na području depozicijskog centra zapadno od Karlovca i iznosi 1500 ms, tj. 1720 m

8. Literatura

Babić, L., Hochuli, P. A., Zupanič, J. (2002): The Jurassic ophiolitic mélange in the NE Dinarides: Dating, internal structure and geotectonic implications. Eclogae Geologicae Helveticae, 95(3), 263–275.

Babić, L., Zupanič, J. (1976): Sedimenti i paleogeografija zone *Globotruncana calcarata* (gornja kreda) u Baniji i Kordunu (središnja Hrvatska). Geološki vjesnik, 29, 49–74.

Gorjanović-Kramberger, D. (1908): Geologijska prijegledna karta Kraljevine Hrvatske–Slavonije. Tumač geologijskoj karti Zagreb. Nakl. Kralj. zemalj. vlade, Odjel za unutar. poslove, Zagreb.

Hrvatski geološki institut (2009): Osnovna geološka karta Republike Hrvatske 1:300 000. Hrvatski geološki institiut, Zavod za geologiju, Zagreb.

Jelaska, V., Bulić, J., Oreški, E. (1969): Stratigrafski model eocenskog fliša Banije. Geološki vjesnik, 6, 81–94.

Jovanović, Č., Magaš, N. (1986): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. List Kostajnica L33-106. Geološki zavod–Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.

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.

Majer, V. (1983): Magmatske stijene „spilit – keratofirske asocijacije“ Zrinske gore u Baniji (Hrvatska, Jugoslavija). Rad JAZU, 404, 27–52.

Mihaljević, D., Fürst, B. (1990): Strukturno-geomorfološka analiza i regionalizacija pobrđa Vukomeričkih gorica. 5. znanstveno posvetovanje geomorfologov Jugoslavije, Zbornik referatov, Ljubljana, 297–304.

Paškov, T. (2016): Potpovršinsko modeliranje područja Karlovačke uleknine, Savska depresija. Diplomski rad. Zagreb, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, 42 str.

Pavelić, D. (2001): Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian sector of the Miocene Pannonian Basin system. Basin research, 13(3), 359–376.

Pavelić, D. & Kovačić, M. (2018): Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia): A review. Marine and petroleum geology, 91, 455–469.

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), 283–293.

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, 56(1), 101–122.

Schmid, S.M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M., Ustaszewski, K., (2008): The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. Swiss Journal of Geosciences, 101(1), 139–183.

Šikić, K., Basch, O., Šimunić, A. (1977): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. List Zagreb L 38-80. Institut za geološka istraživanja Zagreb (1972), Savezni geološki zavod, Beograd.

Šikić, K. (2014): Osnovna geološka karta Republike Hrvatske 1:100 000. List Bosanski Novi L 33-105. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

Tomljenović, B., & Csontos, L. (2001): Neogene–Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac basins, Croatia). International Journal of Earth Sciences, 90(3), 560–578.

Tomljenović, B., Csontos, L., Márton, E., Márton, P. (2008): Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, North Croatia. Geological Society, London, Special Publications, 298(1), 145–167.

Ustaszewski, K., Kounov, A., Schmid, S. M., Schaltegger, U., Krenn, E., Frank, W., Fügenschuh, B. (2010): Evolution of the Adria-Europe plate boundary in the northern Dinarides: From continent-continent collision to back-arc extension. Tectonics, 29(6).

Velić, J. (1980): Geološka građa zapadnog dijela Savske depresije. Doktorska disertacija. Zagreb, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, 137 str.

Velić, J., Weisser, M., Saftić, B., Vrbanac, B., Ivković, Ž. (2002): Petroleum-geological characteristics and exploration level of the three Neogene depositional megacycles in the Croatian part of Panonian Basin. Nafta 53(6-7), 239–249, Zagreb.

Vlahović, I., Tišljar, J., Velić, I., Matičec, D. (2005): Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 220(3-4), 333–360.

Web izvori:

- Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ):

  https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1 (28.9.2020.)

- Bioportal zaštićena područja:

  http://www.bioportal.hr/gis/ (28.9.2020.)

9. Popis slika u tekstu

Slika 1: Područje Karlovačke depresije nalazi se unutar crvene elipse (izvor karte: Google Maps)..... 2

Slika 2: Isječak Geološke karte Republike Hrvatske u mjerilu 1:300 000 šireg područja Karlovačke depresije. Neogenske i kvartarne naslage na karti su prikazane bijelim i svjetlo plavim bojama (područje Karlovačke depresije nalazi se unutar crvene elipse; modificirano prema HGI, 2009)..... 3

Slika 3: Glavne tektonske jedinice i rasjedne zone Karpatsko-Panonsko-Dinarskog područja (preuzeto iz Tomljenović & Csontos, 2001) 5

Slika 4: Glavni rasjedi koji su utjecali na geotektonski razvoj šireg područja Karlovačke depresije (područje KD nalazi se unutar crvene elipse; modificirano prema Tomljenović & Csontos, 2001) 5

Slika 5: Prikaz kredno-paleogenskog predgorskog bazena u koji su taloženi paleogenski siliciklastiti (preuzeto iz Ustaszewski et al., 2010) 6

Slika 6: Glavne tektonske jedinice Alpa, Karpata i Dinarida (područje KD nalazi se unutar crvene elipse; Schmid et al., 2008)..... 7

Slika 7: Geokronološka skala Mediterana i centralnog Paratetisa s pripadajućim strukturnim obrascima (Tomljenović & Csontos, 2001) 9

Slika 8: Karta debljine sedimenta taloženih tijekom prvog sedimentacijskog megaciklusa (Saftić et al., 2003) 10

Slika 9: Sedimentološko-tektonska evolucija jugoistočnog dijela Panonskog bazena po modelu Požeške depresije (modificirano prema Pavelić & Kovačić, 2018)..... 11

Slika 10: Karta debljine sedimenta taloženih tijekom drugog sedimentacijskog megaciklusa (Saftić et al., 2003)..... 12

Slika 11: Karta debljine sedimenta taloženih tijekom trćeg sedimentacijskog megaciklusa (Saftić et al., 2003) 13

Slika 12: Paleogeografska interpretacija paleogenskog taložnog bazena (preuzeto iz Jelaska et al., 1976).... 14

Slika 13: Sedimentološka i stratigrafska shema jugoistočnog ruba Panonskog bazena (modificirano prema Pavelić & Kovačić, 2018)..... 16

Slika 14: Karta prikazuje geografski položaj bušotina i seizmičkih profila (crno-zelenim točkama označeni su korištene bušotine, a crvenim linijama 2D seizmički profili)..... 17

Slika 15: Graf ovisnosti brzine širenja seizmičkih valova o dubini za područje Karlovačke depresije koji se koristi za vremensko-dubinsku konverziju..... 19

Slika 16: Unos bušotina i 2D seizmičkih profila u Petrel projekt..... 20

Slika 17: Unos georeferenciranih listova OGK i isječka topografske karte u mjerilu 1:25000..... 20

Slika 18: Sučelje računalnog programa Petrel™ 2018 sa uključenim interpretacijskim alatom u 2D prikazu 21

Slika 19: Seizmički profil s interpretiranim stratigrafskim horizontima (zelena linija predsatvlja PPg, ružičasta linija KPg, a plava linija PPn) 22

Slika 20: Trodimenzionalni prikaz svih interpretiranih seizmičkih profila, baza za generiranje trodimenzionalnih ploha stratigrafskih horizonata, pogled sa jugozapada 23

Slika 21: Trodimenzionalni prikaz plohe stratigrafskog horizonta podloge paleogenskih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT), pogled sa sjeverozapada 24

Slika 22: Trodimenzionalni prikaz plohe stratigrafskog horizonta krovine paleogenskih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT), pogled sa sjeverozapada 24

Slika 23: Trodimenzionalni prikaz plohe stratigrafskog horizonta podloge panonskih naslaga u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT), pogled sa zapada 25

Slika 24: Interpretirani rasjedi u trodimenzionalnom prikazu, pogled s jugoistoka 26

Slika 25: Strukturna karta po plohi podloge paleogenskih naslaga (PPg) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) s naznačenim strukturnim elementima, rasjedima i položajem profila x-x'. 29

Slika 26: Seizmički refleksijski profil x-x' s naznačenim normalnim, listričkim rasjedima Popović Brdo, Koritinja i Pisarovina u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT)..... 30

Slika 27: Karta gravimetrijskih anomalija na području Dubranca i Cvetković Brda, vrijednosti izolinija su u miligalima (mGal; modificirano prema Mihaljević & Fürst, 1990) 30

Slika 28: Strukturna katrta po plohi krovine paleogenskih naslaga (KPg) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) s naznačenim strukturnim elementima, rasjedima i položajem profila x-x'. 32

Slika 29: Strukturna katrta po plohi podloge panonskih naslaga (PPn) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) s naznačenim strukturnim elementima, rasjedima i položajem profila x-x'. 33

Slika 30: Karta debljina između plohe podine paleogenskih naslaga (PPg) i plohe krovine paleogenskih naslaga (KPg) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT) 35

Slika 31: Presjek trodimenzionalnog modela s prikazanim plohama PPg i KPg koje omeđuju sedimentno tijelo paleogenskih naslaga prikazane plavim poljem na području depozicijskog centra Cvetković Brdo–Opatija (pogled s istoka)..... 36

Slika 32: Karta debljina između ploha krovine paleogena (KPg) i plohe podine panona (PPn) u dvostrukom vremenskom mjerilu (TWT)..... 37