

Seizmička interpretacija plinskog polja Katarina u računalnom programu Petrel 2014

Makarun, Valerije

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:169:095301>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-16**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO–GEOLOŠKO–NAFTNI FAKULTET

Studij geologije

**SEIZMIČKA INTERPRETACIJA PLINSKOG POLJA KATARINA U
RAČUNALNOM PROGRAMU PETREL 2014**

Diplomski rad

Valerije Makarun

G 201

Zagreb, 2017.

**SEIZMIČKA INTERPRETACIJA PLINSKOG POLJA KATARINA U RAČUNALNOM
PROGRAMU PETREL 2014**

VALERIJE MAKARUN

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko–geološko–naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U ovom diplomskom radu napravljena je interpretacija seizmičkih horizonata na plinskom polju Katarina u računalnom programu Petrel 2014. Plinsko polje Katarina smješteno je u podmorju središnjeg dijela Jadrana, u istraživačkom bloku Aiza–Laura zajedno s eksploatacijskim poljem Marica. Svrha ovog rada bila je interpretacija krovine ležišta na ovom polju kako bi se dobile vremenske i dubinske karte koje mogu biti korištene u strukturno–tektonskoj interpretaciji samih ležišta. Interpretirane su četiri krovine ležišta: PLQ1–A, PLQ1–D, PLQ1–D1 i PLQ–A. Također je interpretirana krovina formacije Santerno te pretpliocenska diskordancija. Izrađeni su sintetski seizmogrami za bušotine Katarina–1 i Katarina–2 koji su služili povezivanju podataka o dubinama ležišta i podacima sa seizmičkih profila u vremenskom mjerilu. Na temelju mjerenih seizmičkih podataka izračunati su i seizmički atributi koji su pomogli u interpretaciji: trenutna faza, kosinus trenutne faze, trenutna amplituda, trenutna frekvencija i atributi kontinuiteta.

Ključne riječi: seizmička interpretacija, Katarina, Petrel, seizmički atributi, sintetski seizmogram, dubinske karte, vremenske karte.

Diplomski rad sadrži: 60 stranica, 37 slika i 19 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko–geološko–naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Voditelj: Prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, RGNF

Pomoć pri izradi: Nataša Balaško, mag. ing. geol., RGNF

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, RGNF
Doc. dr. sc. Jasna Orešković, RGNF
Prof. dr. sc. Davor Pavelić, RGNF

Datum obrane: 27.09.2017.

**SEISMIC INTERPRETATION OF KATARINA GAS FIELD IN THE PETREL 2014
SOFTWARE PLATFORM**

VALERIJE MAKARUN

Thesis completed in: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko–geološko–naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

In this graduate thesis, the interpretation of seismic horizons on the gas field of Katarina was compiled in computer software Petrel 2014. The gas field of Katarina is located in the subsoil of the central part of the Adriatic sea, in the research block Aiza–Laura together with the exploitation field Marica. The purpose of this paper was to interpret the enclosure in this field in order to obtain time and depth maps that can be used in the structural–tectonic interpretation of the bases. Four enclosures of PLQ1–A, PLQ1–D, PLQ1–D1 and PLQ–A were interpreted. The top of the Santerno formation and the prepliocene discordance were also interpreted. Synthetic seismograms for Katarina–1 and Katarina–2 boreholes were used, which used to link data on depth and data from seismic profiles at time scale. Based on the measured seismic data, the seismic attributes that have helped in the interpretation are calculated: instantaneous phase, instantaneous phase cosine, instantaneous amplitude, instantaneous frequency and the attributes of the continuity.

Keywords: seismic interpretation, Katarina, Petrel, seismic attributes, synthetic seismogram, depth maps, timestamps.

Thesis contains: 60 pages, 37 figures and 19 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD, Franjo Šumanovac, Full Professor RGNF

Technical support and assistance: Nataša Balaško, mag. ing. geol., RGNF

Reviewers: PhD, Franjo Šumanovac, Full Professor RGNF
PhD, Jasna Orešković, Docent RGNF
PhD, Davor Pavelić, Full Professor RGNF

Date of defense: 27.09.2017.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. GEOGRAFSKI POLOŽAJ	2
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA.....	3
4. GEOLOŠKI ODNOSI	5
4.1. Geologija šireg Jadranskog područja.....	5
4.2. Geologija na polju Katarina.....	5
4.2.1. Naftnogeološke značajke	7
5. 3D SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA	8
5.1. 3D Seizmička mjerenja.....	8
5.2. Obrada snimljenih podataka	8
5.3. Zakoni brzina i sintetski seizmogram.....	10
6. INTERPRETACIJA	13
6.1. Identifikacija horizonata	13
6.2. Strukturno–tektonska interpretacija.....	23
6.3. Analiza seizmičkih atributa	29
6.3.1. Kompleksni seizmički trag	29
6.3.2. Trenutna faza $\theta(t)$ (eng. <i>Instantaneous phase</i>)	32
6.3.3. Trenutna amplituda $A(t)$ (eng. <i>Instantaneous amplitude</i>).....	39
6.3.4. Trenutna frekvencija $\omega(t)$ (eng. <i>Instantaneous frequency</i>)	43
6.3.5. Atributi kontinuiteta	46
6.4. Vremenske i dubinske karte	49
7. ZAKLJUČAK.....	57
8. LITERATURA	59

Popis slika:

Slika 1: Prikaz polja plinskih polja na Jadranu (preuzeto s http://www.offshoreenergytoday.com/).....	2
Slika 2: Litostratigrafski stup srednjeg Jadrana.....	6
Slika 3: Prikaz NMO–korekcije na skupu mjerenih CDP–seizmograma.....	9
Slika 4: Teoretski ulazni valići koji se često koriste u izradi sintetskog seizmograma; prikazani u digitalnom i analognom obliku (SHERIFF, 1978).	11
Slika 5: Skica dobivanja sintetskog seizmograma (SHERIFF, 1978).	12
Slika 6: Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina–1.	15
Slika 7: Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina–2.	16
Slika 8: Trodimenzionalni prikaz interpretiranih horizonata.	17
Slika 9: Uzdužni seizmički profil 11620.	19
Slika 10: Poprečni seizmički profil 1710.	20
Slika 11: Uzdužni seizmički profil 11605.	21
Slika 12: Poprečni seizmički profil 1820.	22
Slika 13: Trodimenzionalni prikaz interpretiranih rasjeda.	23
Slika 14: Poprečni seizmički profil 2060. Prikaz boranja u pretpliocenskim naslagama.....	24
Slika 15: Uzdužni seizmički profil 11650. Prikaz normalnog i reversnog rasjeda.	26
Slika 16: Poprečni seizmički profil 1590. Prikaz normalnog i reversnog rasjeda.....	27
Slika 17: Trodimenzionalni prikaz interpretiranih horizonata i rasjeda.	28
Slika 18: Seizmički trag u polarnim koordinatama; $A(t)$ – trenutna amplituda, $\theta(t)$ – trenutna faza, Re – realna os, Im – imaginarna os (TANNER et al., 1979).	31
Slika 19: Izometrijski prikaz kompleksnog seizmičkog traga (TANNER et al., 1979).	31
Slika 20: Prikaz seizmičkog traga i trenutne faze.....	32
Slika 21: Trenutna faza na uzdužnom profilu 11605.	35
Slika 22: Trenutna faza na poprečnom profilu 1820.	36

Slika 23: Kosinus trenutne faze na uzdužnom profilu 11620.....	37
Slika 24: Kosinus trenutne faze na poprečnom profilu 1710.	38
Slika 25: Trenutna amplituda na uzdužnom profilu 11605.	41
Slika 26: Trenutna amplituda na poprečnom profilu 1820.....	42
Slika 27: Trenutna frekvencija na uzdužnom profilu 11620.	44
Slika 28: Trenutna frekvencija na poprečnom profilu 1710.....	45
Slika 29: Atribut kaosa na uzdužnom profilu 11650.....	47
Slika 30: Atribut kaosa na poprečnom profilu 1590.....	48
Slika 31: Zakoni brzina mjereni na bušotinama Katarina-1 i Katarina-2.....	49
Slika 32: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ1–A.....	51
Slika 33: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ1–D.....	52
Slika 34: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ1–D1.....	53
Slika 35: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ–A.....	54
Slika 36: Vremenska i dubinska karta horizonta “Krovina Santerno”.	55
Slika 37: Vremenska i dubinska karta horizonta “Pretpliocenska diskordancija”.	56

1. UVOD

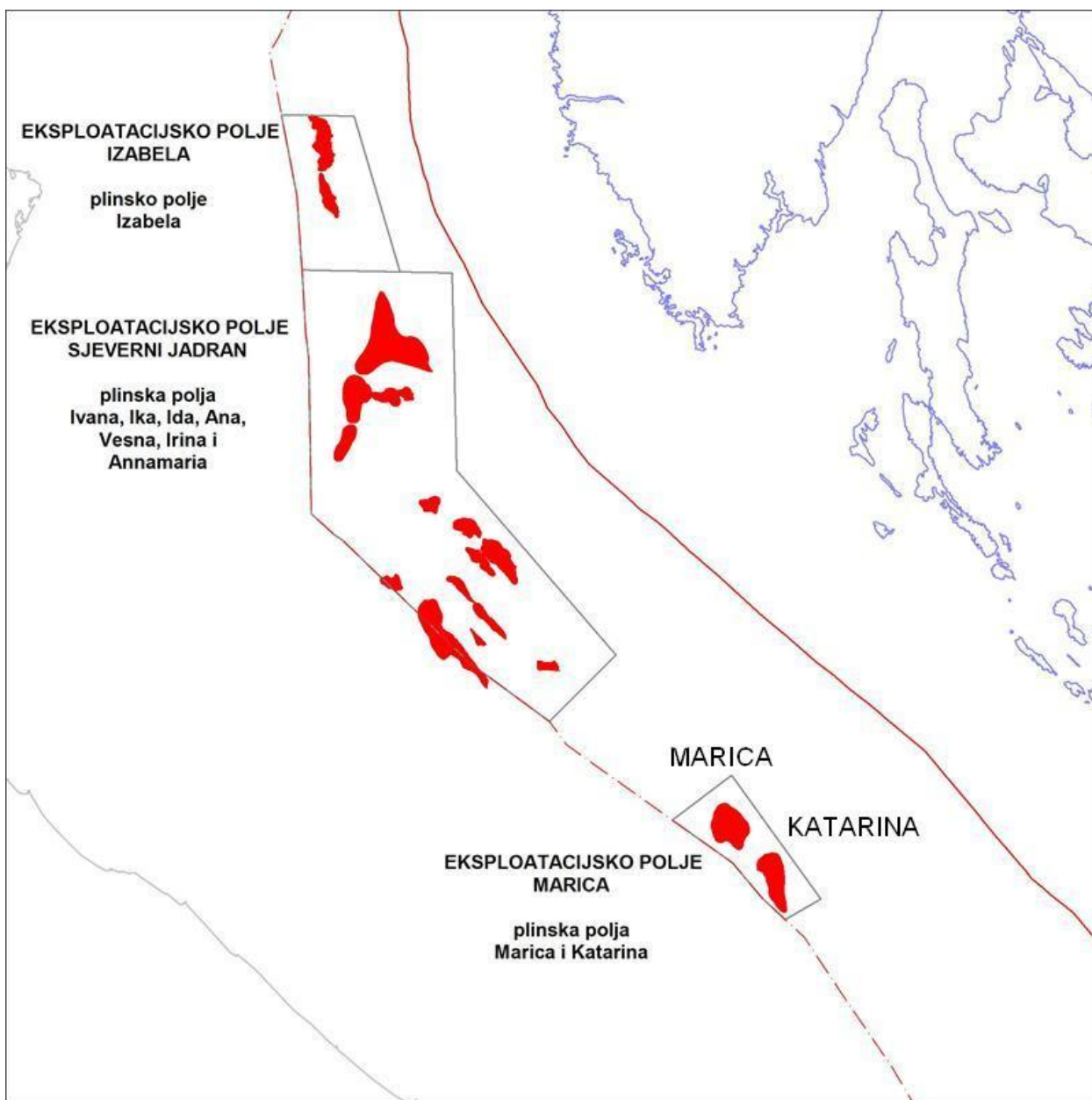
Plinsko polje Katarina nalazi se u središnjem Jadranu, unutar eksploatacijskog polja Marica. Istraživanje područja na tom polju počelo je 1989. g. izradom istraživačke bušotine Katarina–1. Trodimenzionalni seizmički podaci koji su korišteni u interpretaciji snimljeni su 2000. godine. Na njima je uočeno postojanje bijelih mrlja što je dovelo do izrade bušotine Katarina–2 koja je utvrdila postojanje plinskih ležišta.

Svrha rada je trodimenzionalna seizmička interpretacija krovina plinskih ležišta radi dobivanja strukturno–tektonske slike polja. Interpretacija je rađena u računalnom programu Petrel 2014. To je Schlumbergerov računalni program koji omogućuje interpretaciju seizmičkih podataka dobivenih geofizičkim mjerenjima, korelaciju bušotina, izradu modela ležišta, simulaciju ležišta, izradu karakterističnih karata i dr.

Kako bi interpretacija bila točna, nužno je dobro povezivanje podataka u dubinskom i seizmičkih podataka u vremenskom mjerilu pomoću sintetskog seizmograma. Nakon tog prvog koraka identifikacije horizonata slijedi strukturno–tektonska interpretacija. Struktura plinskog polja Katarina im oblik izdužene antiklinale nastale zbog povremenih kompresijskih naprezanja. Strukturno–tektonska rješenja prikazana su kao vremenske i dubinske karte svakog interpretiranog horizonata. Radi pouzdanije i točnije interpretacije izrađeni su i analizirani seizmički atributi: trenutna faza, kosinus trenutne faze, trenutna amplituda, trenutna frekvencija i atributi kontinuiteta.

2. GEOGRAFSKI POLOŽAJ

Plinsko polje Katarina nalazi se u središnjem dijelu podmorja srednjeg Jadrana uz liniju razgraničenja s Italijom, na dubini mora od oko 70 m. Udaljeno je 105 km zapadno od Zadra i 66 km od talijanske obale (Slika 1). Smješteno je u istraživačkom bloku Aiza–Laura, unutar zajedničkog eksploatacijskog polja s plinskim poljem Maricom (SAHADŽIĆ et al., 2003).



Slika 1: Prikaz plinskih polja na Jadranu (preuzeto s <http://www.offshoreenergytoday.com/>).

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Istraživanje hrvatskog dijela Jadrana započelo je 1964. godine magnetometrijskim mjerenjima, a nastavljeno 1968. godine refleksijskim seizmičkim mjerenjima. Većinu jadranskog područja istraživala je nacionalna kompanija INA–Naftaplin iz Zagreba. U razdoblju od 1982. do 1989. godine na površini od 17 000 km² provedena su istraživanja u suradnji sa stranim partnerima – tvrtkama kao što su AGIP, Chevron, Texaco i Hispanoil. Tijekom tih skupnih projekata izrađeno je 13 bušotina; u 10 nije bilo znakova ugljikovodika, u dvije su pronađene nekomercijalne količine plina a u jednoj je bilo tragova nafte unutar krednih vapnenaca. Glavni objekti istraživanja bili su vapnenci i dolomiti gornje krede i paleogena, naslage iznad očekivanih matičnih stijena gornjokredne, donjokredne i trijaskne starosti (VELIĆ, 2007).

Istražno područje sjevernog Jadrana podijeljeno je u dva bloka: Ivana i Aiza Laura. Istraživanjima INA–Naftaplina kasnih 70-ih i ranih 80-ih otkrivena su sva plinska polja bloka Ivana, ali tek su puštena u proizvodnju 1997. godine nakon osnivanje zajedničke tvrtke INAGIP. Većina istraživačkih bušotina na bloku Ivana postavljena je na temelju dobivenih 2D refleksijskih istraživanja. Nakon osnivanja zajedničke kompanije INAGIP, snimljena je 3D refleksijska seizmika na bloku Aiza–Laura kojom je obuhvaćen i prostor sadašnjeg plinskog polja Katarine (CHIRI et al., 1997).

Istraživačka bušenja započela su bušotinom Jadran–1 čiji je glavni cilj bio istražiti stijene Srednjojadranskog praga, koji je otkriven gravimetrijskim i magnetometrijskim istraživanjima, a kasnije bolje definiran 2D seizmičkom interpretacijom. Bušotinom su otkriveni plinonosni kvartarni pješčenjaci. Na temelju interpretacije 2D seizmike, utvrđeno je strukturno zatvaranje na području Katarine u sedimentima donjeg pleistocena i više amplitudnih anomalija (eng. *Bright spot*) u plicim naslagama. Istraživačko bušenje na području polja Katarine započelo je 1989. godine izradom bušotine Katarine–1. Bušotina je smještena na rubu strukture, a utvrđena je prisutnost nekonsolidiranih pijesaka. Bušotinom nisu otkrivene značajnije pojave ugljikovodika pa je napuštena kao negativna. Reinterpretacijom seizmičkih podataka 2000. godine utvrđeno je postojanje bijelih mrlja sjeveroistočno od bušotine Katarina–1 te je izrađena bušotina Katarina–2. Novom bušotinom je utvrđena prisutnost pet plinom zasićenih ležišta koja se nalaze unutar srednjeg pleistocena u

formaciji Carola, na dubinama između 650 i 1020 m. U procesu razrade ležišta izrađene su bušotine Katarina–1 dir, Katarina–2 dir i Katarina–3 dir (VALENTE, 2002; VIDAČEK, 2005; VIDAČEK et al. 2006).

Nakon završetka bušenja i interpretacije dobivenih podataka odlučeno je da će se plin pridobivati iz još jednog novo otkrivenog ležišta PLQ1–D1, što znači da se pridobivanje vrši iz šest plinskih ležišta. Iz horizontalne bušotine Katarina–1 dir pridobiva se plin iz najblićeg ležišta PLQ1–A. Iz bušotine Katarina–2 dir pridobiva se plin iz sljedećih ležišta: PLQ1–A, PLQ1–C, PLQ1–C1, PLQ1–D i PLQ1–D1. Bušotina Katarina–3 dir služi za pridobivanje plina iz ležišta PLQ1–A i PLQ–A.

4. GEOLOŠKI ODNOSI

4.1. Geologija šireg Jadranskog područja

Tijekom geološke povijesti sedimentacijske okolnosti i tektonski pokreti u području koje danas pripada jadranskom podmorju značajno su se mijenjali. Tijekom perma taloženi su klastiti i evaporiti, a u starijem trijasu klastiti i karbonati, mjestimice u sabkha uvjetima s pravim evaporitima. Tijekom srednjeg trijasa zabilježeni su značajni tektonski pokreti uz duboke rasjede koji su presijecali cijelu Zemljinu koru, što je uzrokovalo širenje bazena i pojavu vulkanizma. Od mlađeg trijasa pa do paleogena (srednjeg eocena) i u jadranskom području prevladava plitkovodna karbonatna sedimentacija u okolišima karbonatne platforma, što je rezultiralo debljinom karbonata većom od 5 000 m. Prema kraju krede, prostrana se karbonatna platforma postupno dezintegrira (VELIĆ, 2007).

Prema PRELOGOVIĆU i KRANJECU (1983) prostor današnjeg Jadranskog bazena nastao je tektonskim pokretima u srednjem, a naročito u mlađem eocenu i starijem oligocenu. Tektonske pokrete je pratila intenzivna klastična sedimentacija. Vrijeme nastanka depresija Jadranskog bazena je različito, a u miocenu su se izdvojile tri depresije: Dugootočka, Južnojadranska–albanska i Moliška. Kasnije, u pliocenu, spuštanjem nastaju i ostale depresije: Venecijanska, Padska, Marche–Abruzzi, Srednjojadranska, Bradanska i Jadransko–jonska.

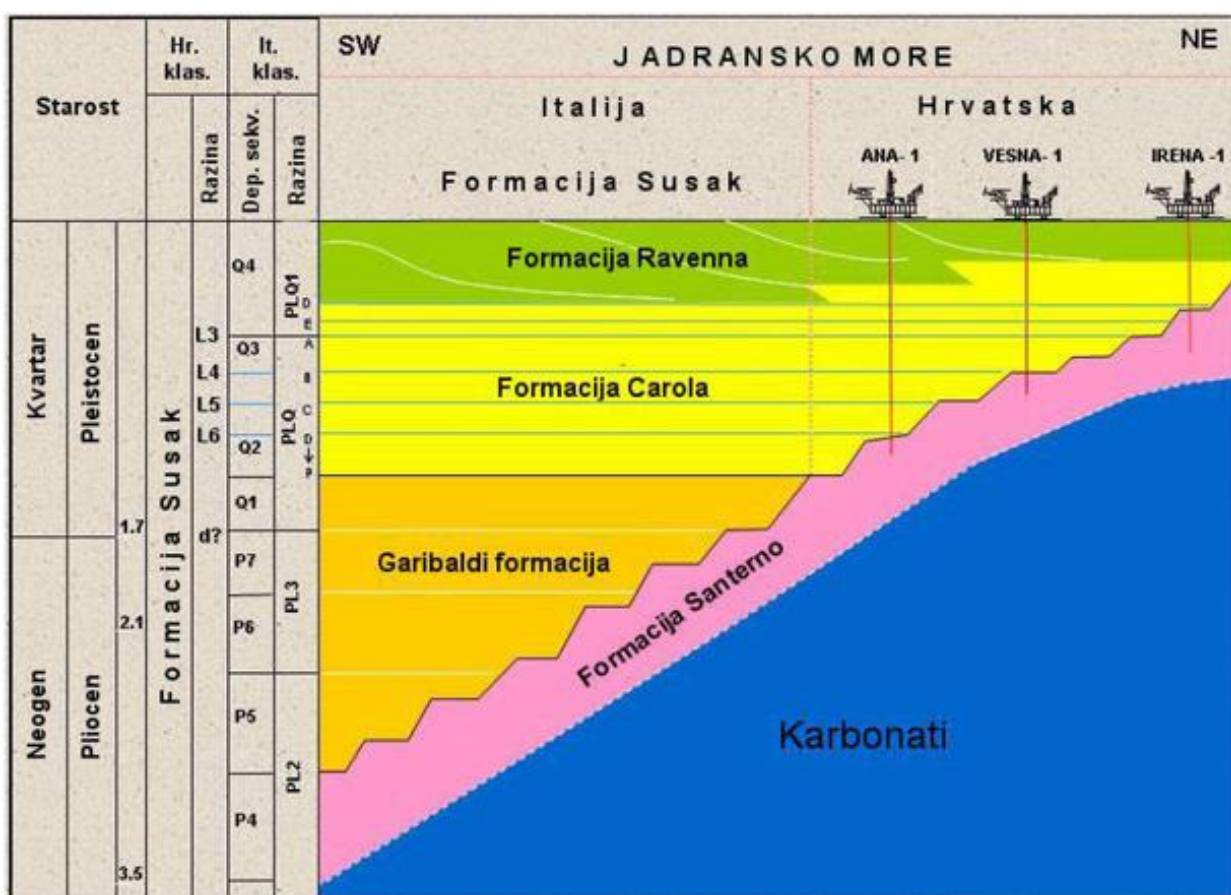
Blok Aiza–Laura nalazi se na području Srednjojadranskog praga i Dugootočke depresije. Rasprostranjenosti i debljinom ističu se starije miocenske i pleistocenske naslage. Tanke, ali plinonosne pliocenske naslage različitog su litofacijesa. U donjem pliocenu utvrđeni su laporoviti siltiti, glinoviti lapori i kalcitični pješčenjaci, a u srednjem pliocenu gline i lapori s proslojcima pješčenjaka. U dubljim dijelovima nalaze se lapori, laporoviti siltiti starijeg miocena s proslojcima pjeskovitih vapnenaca i pješčenjaka dok su ispod njih transgresivne naslage oligocena (CAROTENUTO et al. 2000).

4.2. Geologija na polju Katarina

Strukturni odnosi na području polja Katarina nastali su tektonskim pokretima u sjeverozapadnom dijelu Dugootočke depresije u razdoblju mlađeg eocena, oligocena i

miocena (Slika 2). U vrijeme starijeg mesinijana dolazi do erozije miocenskih sedimenata nakon čega dolazi do transgresije u srednjem pliocenu, došlo je do stvaranja formacije Santerno koja se sastoji od hemipelagičnih glina taloženih u grebenskim uvjetima.

U srednjem pleistocenu dolazi do prijelaza u bazenske uvjete taloženja, nastaju tanki turbiditni slojevi formacije Carola. U višim dijelovima sedimentacijskog ciklusa dolazi do tranzicije u deltni sustav u kojemu su prepoznati riječni turbiditi. Konačnu ispunu depresije čine naslage koje slijede na deltni sustav formacije Ravenna.



Slika 2: Litostratigrafski stup srednjeg Jadrana.

4.2.1. Naftnogeološke značajke

Sva ležišta plinskog polja Katarina nalaze se u formaciji Carola, a predstavljena su facijesom pješćanih turbiditnih sedimenata. Izgrađena su od slabo konsolidiranih pješćenjaka, siltoznih pješćenjaka i silita djelomično proslojenih glina, laporima i glinovitim laporima. Mineralni sastav ležišnih stijena sačinjavaju uglavnom kvarc, muskovit i ilit te tragovi pirita. Također su uočene pojave lignita i mikrofosila. Zamke su strukturnog tipa, osim u najplićem ležištu PLQ1–A gdje je zamka strukturno–stratigrafskog tipa.

Plin je biogenog podrijetla, sastavljen uglavnom od metana (98%), dušika (oko 1%), ugljikovog dioksida (manje od 1%). Ležišne su stijene karakterizirane primarnom intergranularnom šupljikavošću u rasponu od 20 do 33%. Ukupne utvrđene rezerve plina spadaju u kategoriju C₁ te iznose $3\,346,748 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ukupna pridobiva količina plina iznosi $2\,275,71 \times 10^6 \text{ m}^3$, što daje iscrpak od 68% (VIDAČEK, 2005).

5. 3D SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA

5.1. 3D Seizmička mjerenja

Refleksijska seizmička istraživanja najčešće se izvode duž profila na kojima se postavljaju geofoni i izvori valova, a njihovim uzastopnim pomicanjem pokriva se cijeli profil. Postoje niz geofonskih rasporeda koji se mogu koristiti u 2D ili 3D seizmičkim istraživanjima: simetrični raspored, razmaknuti simetrični raspored, asimetrični raspored, razmaknuti asimetrični raspored, T-raspored, L-raspored, križni raspored i dr. Kod seizmičkih istraživanja mjeri se vrijeme putovanja vala od izvora do neke točke u podzemlju i nazad do detektora vala, tj. geofona. Osnovni cilj kod seizmičkih mjerenja je dobiti više puta reflekske od svake točke u podzemlju (metoda višestrukog pokrivanja, eng. *Common Depth Point - CDP*), kako bi se zbrajanjima i ostalim korekcijama dobio što bolji prikaz podzemlja, tj. poboljšavanje signala a prigušivanje šumova.

U seizmičkim istraživanjima na moru snimaju se 2D seizmički profili duž putanje kretanja broda, koji se kasnije povezuju u 3D seizmičku kocku. Za razliku od kopnenih mjerenja, ovdje se sva oprema nalazi na brodu; na njemu se nalazi izvor valova, obično zračna puška (eng. *Air gun*), i posebno konstruiran kabel s hidrofona.

Seizmička istraživanja u bloku Aiza–Laura snimljena su u dvije faze. U prvoj fazi koja je bila od listopada 1997. godine do ožujka 1998. godine istraživanjem je obuhvaćeno 2 600 km². Druga faza je trajala od prosinca 1997. godine do ožujka 1998. godine prekriveno je novih 1 700 km². Uzdužni profili snimljeni su u smjeru sjeverozapad–jugoistok, a poprečni profili sjeveroistok–jugozapad (CAROTENUTO et al., 2000).

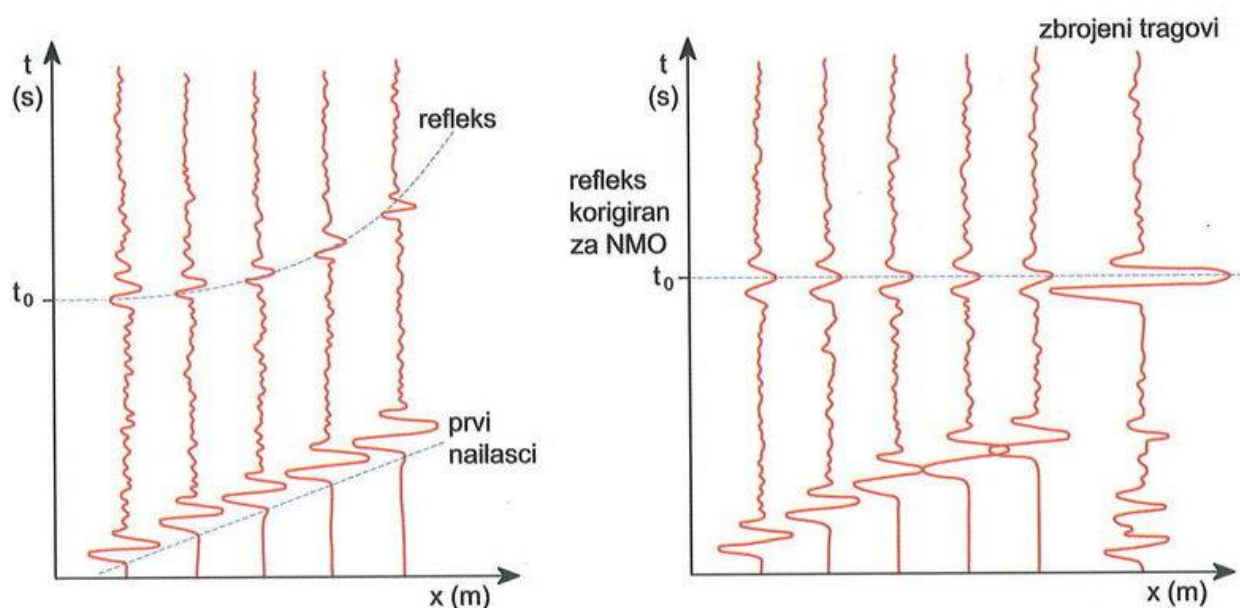
5.2. Obrada snimljenih podataka

Obrada podataka izvodi se pomoću odgovarajućih softvera koji se razlikuju u količini podataka koje mogu obraditi. Postoji niz standardnih postupaka obrade.

Obrada počinje uređivanjem tragova, u koje je uključeno odstranjivanje mrtvih tragova i tragova s prevelikim šumom. Kako bi se jače istaknuli refleksi, potrebno je prigušiti

refraktirane valove, prve nailaske te zvučne valove koji imaju razmjerno veće amplitude od reflektiranih valova. Dalje slijedi sortiranje tragova, postupak kojim se iz terenskih snimaka izdvajaju tragovi koji pripadaju zajedničkoj dubinskoj točki tj. ako se pretpostave granice usporedne s površinom, zajedničkoj središnjoj točki (CMP–točki).

Kod statičke korekcije, referentna ravnina postavlja se uzimajući u obzir reljef istraživanog terena. Može se postaviti približno na najniže nadmorske visine ili na srednje visine terena. U analizi brzina određuju su vertikalne i uzdužne promjene seizmičkih brzina koje se koriste kako bi se izračunale NMO–korekcije za svaki pojedinačni refleks. NMO–korekcija, ili dinamička korekcija, je postupak svođenja vremena nailaska vala na nulto vrijeme, tj. na okomiti put od izvora do geofona (Slika 3).



Slika 3: Prikaz NMO–korekcije na skupu mjenjenih CDP–seizmograma.

Spektralnom analizom određuju se dominantne frekvencije reflektiranih i ostalih valova, onih kojih smatramo šumom. Na temelju ove analize određuju se filtri koji se primjenjuju u postupku filtriranja, svrha ovog postupka je poboljšanje omjera signal/šum jer

se razlikuju spektri frekvencija reflektiranih valova i šumova. Na temelju ove analize primijeni se filter koji propušta određeni pojas frekvencija u kojem se očekuju refleksi.

Dekonvolucija služi kako bi seizmički prikaz učinili „čišćim“. Svrha dekonvolucije je prigušiti dodatne titraje uzrokovane reflektiranjem valova od niza bliskih granica, zatim skratiti seizmički val na oblik koji bi imao pri odbijanju od izolirane, pojedinačne granice. Nakon filtriranja izvodi se skaliranje, to jest automatsko podešavanje amplituda kako bi se jače i jasnije istaknuli refleksi. Završni postupak obrade je zbrajanje tragova koji pripadaju istoj CDP-točki, s obzirom na to da na svim CDP-točkama najčešće nemamo isti broj tragova, zbrojeni trag se podijeli s brojem ulaznih tragova kako bi sve CDP-točke dobile istu težinu.

5.3. Zakoni brzina i sintetski seizmogram

Zbog ispravne interpretacije seizmičkih podataka od posebne je važnosti precizno određivanje seizmičkih brzina u stijenama. Pomoću određenog modela brzine u podzemlju mogu se donijeti zaključci o geološkoj građi i sastavu, te može poslužiti u pretvorbi vremenskog mjerila u dubinsko mjerilo na seizmičkim profilima i kartama.

Sintetski seizmogram izračunati je seizmogram za zadani geološki model podzemlja. Izrada sintetskog seizmograma je ustvari seizmičko modeliranje (eng. *Forward Modelling*) koje može biti jednodimenzionalno (1D), dvodimenzionalno (2D) i trodimenzionalno (3D). Pod sintetskim seizmogramom najčešće podrazumijevamo jednodimenzionalno (1D) seizmičko modeliranje. Glavna namjena sintetskog seizmograma je njegova usporedba sa seizmičkim podacima kako bi se refleksima na profilu pridružile stratigrafske i litološke granice. Tako se granice dalje prate na seizmičkim profilima i preciznije se kartiraju. Sintetski seizmogram služi za povezivanje podataka u dubinskom mjerilu i seizmičkih podataka u vremenskom mjerilu. Također, usporedba stvarnog i sintetskog seizmograma omogućava i razlikovanje primarnih od višestrukih refleksa.

Svojstva svakog sloja u podzemlju opisana su akustičnom impedancijom koja se dobije množenjem brzine seizmičkih valova V i gustoće ρ . Koeficijent refleksije na granici slojeva izračuna se pomoću sljedećeg izraza:

$$R = \frac{A_2}{A_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{V_2 \rho_2 - V_1 \rho_1}{V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1} \quad (5-1)$$

gdje su:

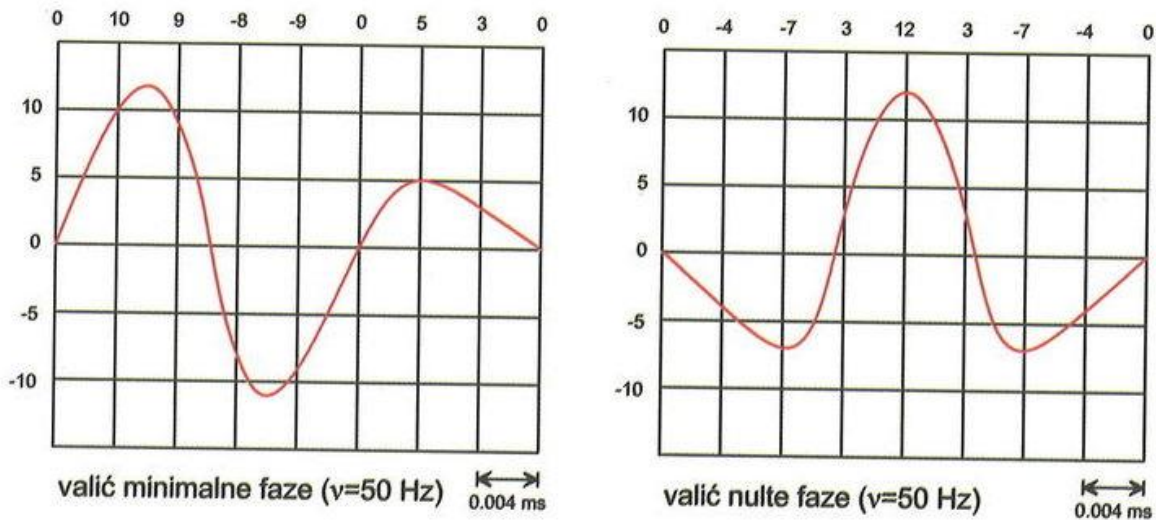
A_1, A_2 – amplitude upadnog i reflektiranog vala

V_1, V_2 – brzine P-valova iznad i ispod granice dvaju slojeva

ρ_1, ρ_2 – gustoća gornjeg i donjeg sloja

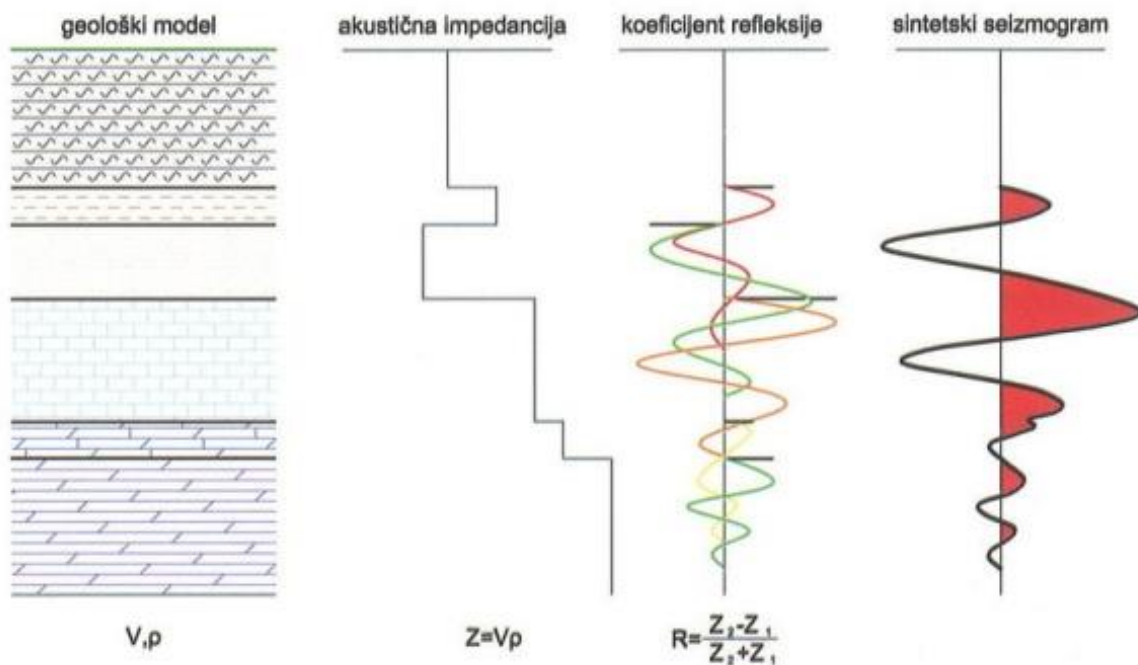
R – koeficijent refleksije

Množenjem ulaznog vala (eng. *Wavelet*–valić) s koeficijentom refleksije dobije se pojedinačni refleks sa svake granice. Kao ulazni valić može se uzeti neki od teoretskih valića kao što su valić minimalne faze, nulte faze, Rickerov valić ili valić izdvojen iz seizmičkih podataka u procesu njihove obrade (Slika 4). Zbrajanjem svih refleksa s pojedinačnih granica, dobije se seizmogram za zadani geološki model – sintetski seizmogram (Slika 5).



Slika 4: Teoretski ulazni valići koji se često koriste u izradi sintetskog seizmograma; prikazani u digitalnom i analognom obliku (SHERIFF, 1978).

Ulazne podatke za izradu sintetskog seizmograma daju karotažna mjerenja u bušotini. Brzine se dobivaju zvučnom karotažom, a gustoće γ – γ karotažom (karotaža gustoće). Ako se ne raspolaže podacima gustoća, može se uzeti konstantna gustoća za cijeli model ili se ona izračuna pomoću tzv. Gardnerovog zakona (GARDNER et al., 1974).



Slika 5: Skica dobivanja sintetskog seizmograma (SHERIFF, 1978).

6. INTERPRETACIJA

Interpretacija seizmičkih podataka s polja Katarina odvijala se u tri koraka. Prvi je bio proces identifikacije horizonata pomoću sintetskih seizmograma, zatim je slijedila strukturno–tektonska interpretacija i analiza seizmičkih atributa. U strukturno–tektonskoj interpretaciji krajnji je cilj bio izraditi dubinsko geološke karte svakog zasebnog interpretiranog horizonta. Analiza seizmičkih atributa napravljena je kako bi se sama interpretacija pospješila te bila pouzdanija. Interpretacija je rađena u računalnom programu Petrel 2014.

Petrel 2014 je Schlumbergerov računalni program koji se najčešće koristi kod istraživanja ležišta ugljikovodika. To je software koji korisniku omogućuje interpretaciju seizmičkih podataka dobivenih geofizičkim mjerenjima, korelaciju bušotina, izgradnju modela ležišta, simulaciju ležišta, računanje volumena ležišta, izradu raznih karakterističnih karata i dr. Za ovaj diplomski rad korišteni su podaci koji su već bili u bazi podataka Petrela, a korišteni su prije u izradi izvješća „*Razvoj procedura geofizičke interpretacije radi povećanja rezervi u geološkim složenim ležištima, plinsko polje Katarina*“ (ŠUMANOVAC, 2010). U te podatke spadaju sve mjerene karotažne krivulje, trajektorije bušotine te položaje dubina krovina ležišta.

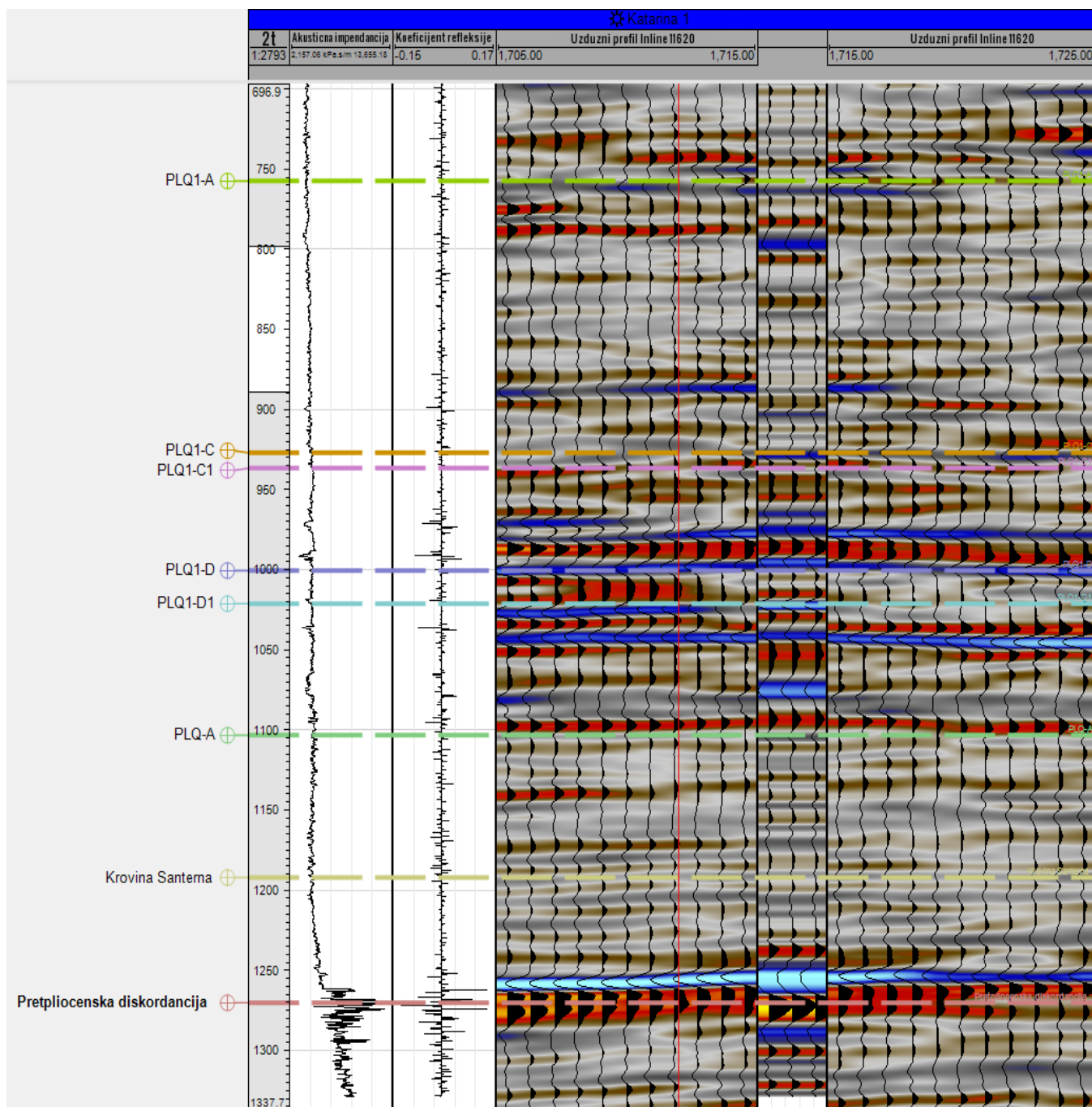
6.1. Identifikacija horizonata

U ovom koraku utvrđene su litostratigrafske granice, tj. krovine ležišta na seizmičkim profilima. Kako bi se seizmički horizonti mogli pratiti po cijelom seizmičkom volumenu, izrađeni su sintetski seizmogrami. Za izradu sintetskih seizmograma korištene su krivulje zvučne karotaže te krivulje gustoće koje su bile izmjerene na bušotinama Katarina–1 i Katarina–2, a nalaze se u bazi podataka u Petrelu. Za ulazni valić korišten je deterministički valić (eng. *Deterministic wavelet*) izveden iz seizmičkih podataka.

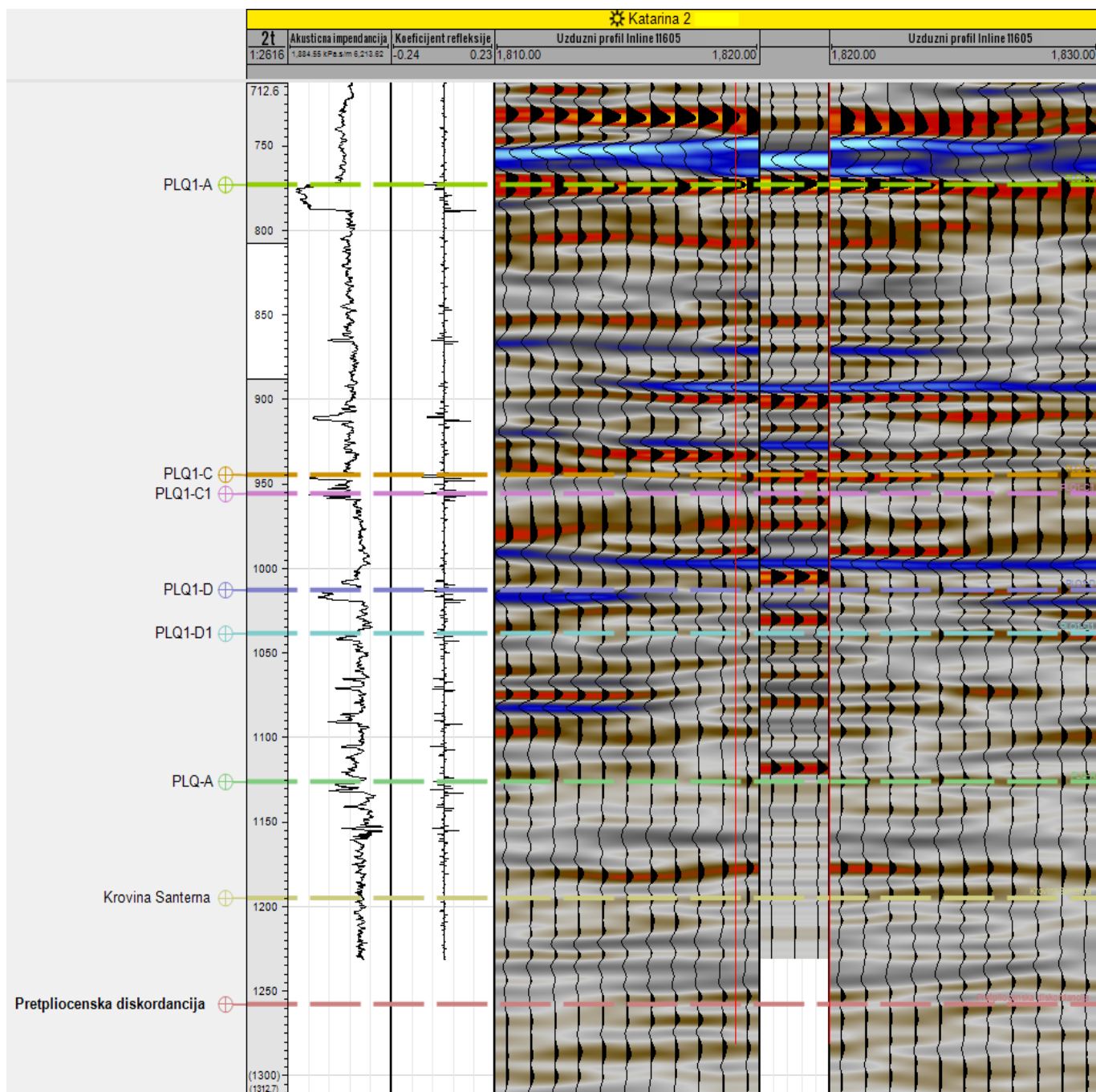
Na slici 6 prikazan je sintetski seizmogram za bušotinu Katarina–1. Podudaranje podataka sa sintetskog seizmograma i sa seizmičkih profila je veoma dobro. Može su vidjeti jako dobro poklapanje jako izraženog pozitivnog refleksa horizonta „Pretpliocenska diskordancija“ na oko 1280 ms. U središnjem dijelu seizmograma poklapanje je također

odlično. Horizont PLQ–A nalazi se na otprilike 1100 ms ispod jasno izraženog pozitivnog refleksa. PLQ1–D i PLQ1–D1 prolaze kroz dobro poklapajuće reflekse s negativnim polaritetom. Nalaze se na oko 1000 ms i 1025 ms. Za ležišta PLQ1–C i PLQ1–C1 poklapanje kod seizmograma na ovoj bušotini nije idealno, no oni se mogu korelirati prema seizmogramu bušotine Katarina–2. Refleksi koji nisu izraženi su PLQ1–A i „Krovina Santerno“ zbog slabih refleksa i na seizmičkim podacima oko bušotine Katarina–1. Iako „Krovina Santerno“ nije baš izražena ni kod bušotine Katarina–2, horizont PLQ1–A je dobro vidljiv i povezan na sintetskom seizmogramu te bušotine.

Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina–2 prikazan je na slici 7. Kod ovog seizmograma odmah se uočava da nije obuhvatio horizont „Pretpliocenska diskordancija“, a uzrok tomu je da je bušotina manje dubine nego na kojoj se nalazi navedeni horizont. Podudaranje refleksa i kod ovog seizmograma je vrlo dobro. Horizont PLQ1–A, koji se nije mogao povezati na bušotini Katarina–1, izražen je jakim pozitivnim refleksom na 775 ms. U središnjem dijelu može se vidjeti poklapanje pozitivnog refleksa za ležište PLQ1–C na oko 950 ms, a ispod njega se nalazi ležište PLQ1–C1. Za ležište PLQ1–D i PLQ1–D1 refleksi nisu izraženi, ali se može uočiti da su smješteni ispod vidljivih pozitivnih refleksa. Kod ovog seizmograma se može uočiti smanjivanje kvalitete podudaranja s povećanjem dubine. Tako uz „Pretpliocensku diskordanciju“ koja nije probušena, refleksi za horizonte PLQ–A i „Krovina Santerno“ nisu pokazali zadovoljavajuće poklapanje.

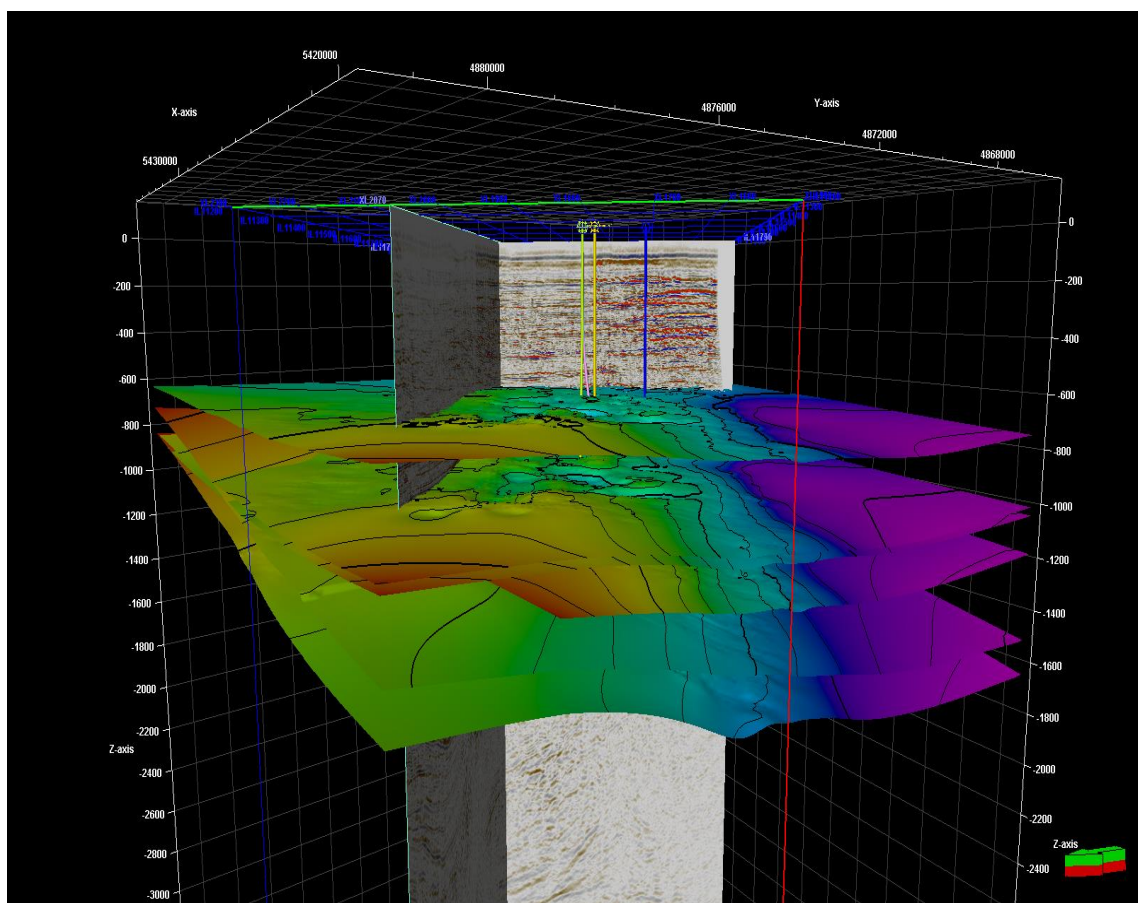


Slika 6: Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina-1.



Slika 7: Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina-2.

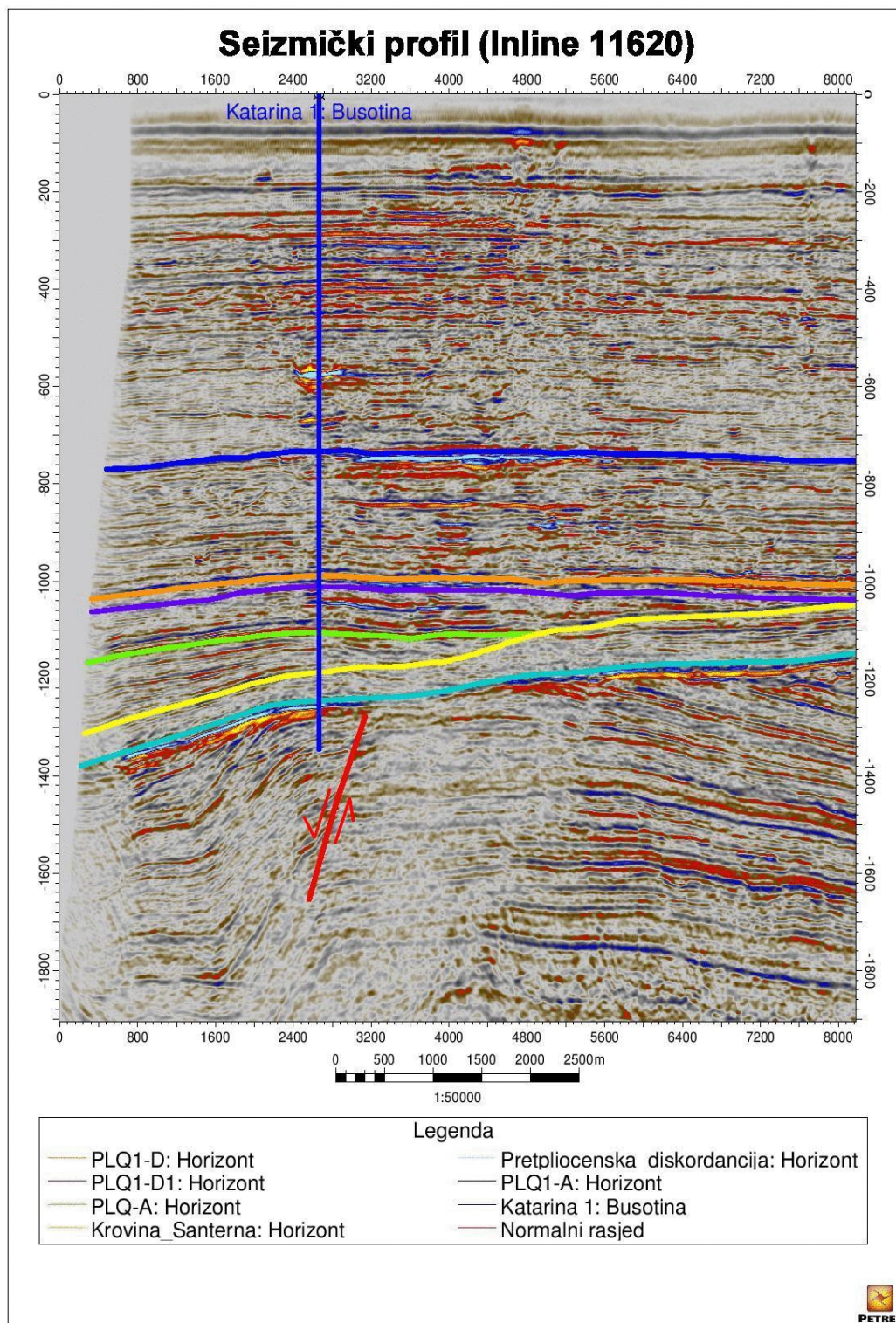
Nakon izrade sintetskih seizmograma pristupilo se interpretaciji horizonata na seizmičkim profilima. Interpretirane su krovine sljedećih ležišta: PLQ1–A, PLQ1–D, PLQ1–D1 i PLQ–A. Također, interpretirani su još horizonti „Krovina Santerno“ i „Pretpliocenska diskordancija“. Na slici 8 nalazi se trodimenzionalni prikaz interpretiranih navedenih horizonata. Interpretacija je rađena na svakom desetom uzdužnom (eng. *Inline*) i na svakom desetom poprečnom (eng. *Xline*) profilu. Cijela 3D seizmička kocka sastoji od ukupno 701 uzdužnih profila (brojevni raspon 11200 – 11900) i 801 poprečnih profila (brojevni raspon 1500 – 2300). Interpretacija je rađena ručnim praćenjem odgovarajućih refleksa. Dvodimenzionalna i trodimenzionalna automatska interpretacija nije bila precizna. Iako se ovo područje sastoji od dobro uslojenih naslaga, učestala su mjesta ispod „bijelih mrlja“, tj. mjesta ispod nakupina ugljikovodika u ležištu gdje refleksi nisu tako izraženi ili se događa karakteristično povijanje refleksa (eng. *Pull down effect*).



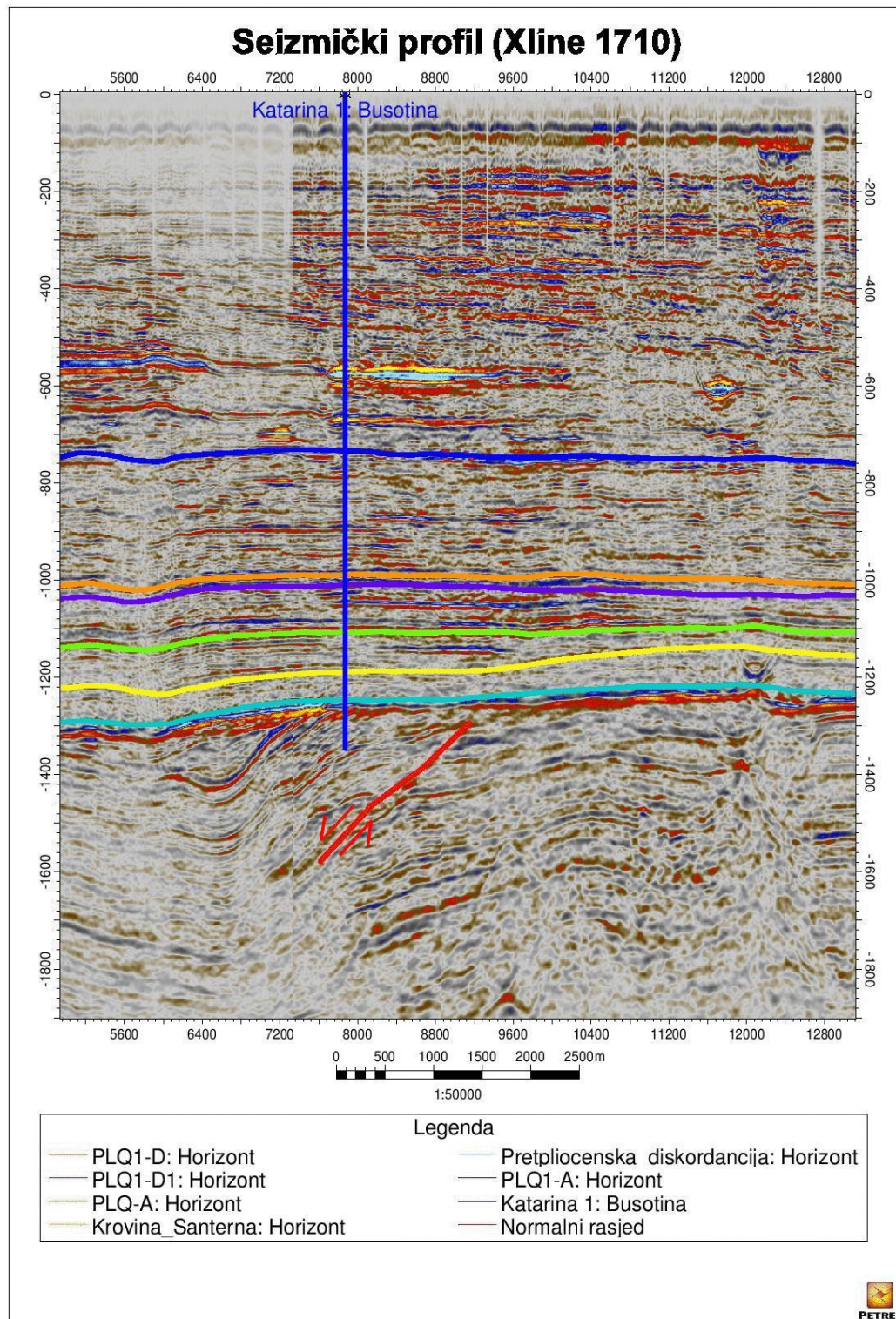
Slika 8: Trodimenzionalni prikaz interpretiranih horizonata.

Na slikama 9 i 10 prikazani su seizmički profili koji prolaze bušotinom Katarina–1. Na uzdužnom i poprečnom profilu mogu se vidjeti interpretirani horizonti: PLQ1–A, PLQ1–D, PLQ1–D1, PLQ–A, „Krovina Santerno“ i „Pretpliocenska diskordancija“. Na uzdužnom profilu može se vidjeti kako ležišta PLQ1–D, PLQ1–D1 i PLQ–A diskordantno naliježu na „Krovinu Santerno“. Refleksi su kontinuirani i lako praćeni, jedino se može vidjeti povijanje refleksa „Krovine Santerno“ na 1200 ms. Horizont PLQ1–A je interpretiran po pozitivnom refleku koji se nalazi iznad izražene „bijeke mrlje“ koja se može uočiti pokraj bušotine na 750 ms. Ispod se nalaze PLQ1–D i PLQ1–D1 kod čije interpretacije je bilo važno paziti kako ne bi došlo do većeg odstupanja u debljini, tj. u razmaku između ta dva horizonta. Najdublje ležište PLQ–A diskordantno naliježe na formaciju Santerno na 1150 ms. Kod interpretacije „Pretpliocenske diskordancije“ bilo je važno razlučiti koji je prvi jaki refleks koji ukazuje na postojanje diskordancije, tj. po kojem će se vršiti interpretacija. Pretpliocenske naslage pokazuju povijanje, i u tim naslagama je interpretiran i normalni rasjed. Na poprečnom profilu možemo vidjeti relativno kontinuirane reflekse i konkordantne horizonte. Povijanje svih interpretiranih horizonata vidljivo je zapadno od bušotine Katarina–1 koje je uzrokovano „bijelom mrljom“ na 550 ms. U donjem, pretpliocenskom dijelu, možemo uočiti reflekse koji nisu kontinuirani te njihove prekide i povijanje.

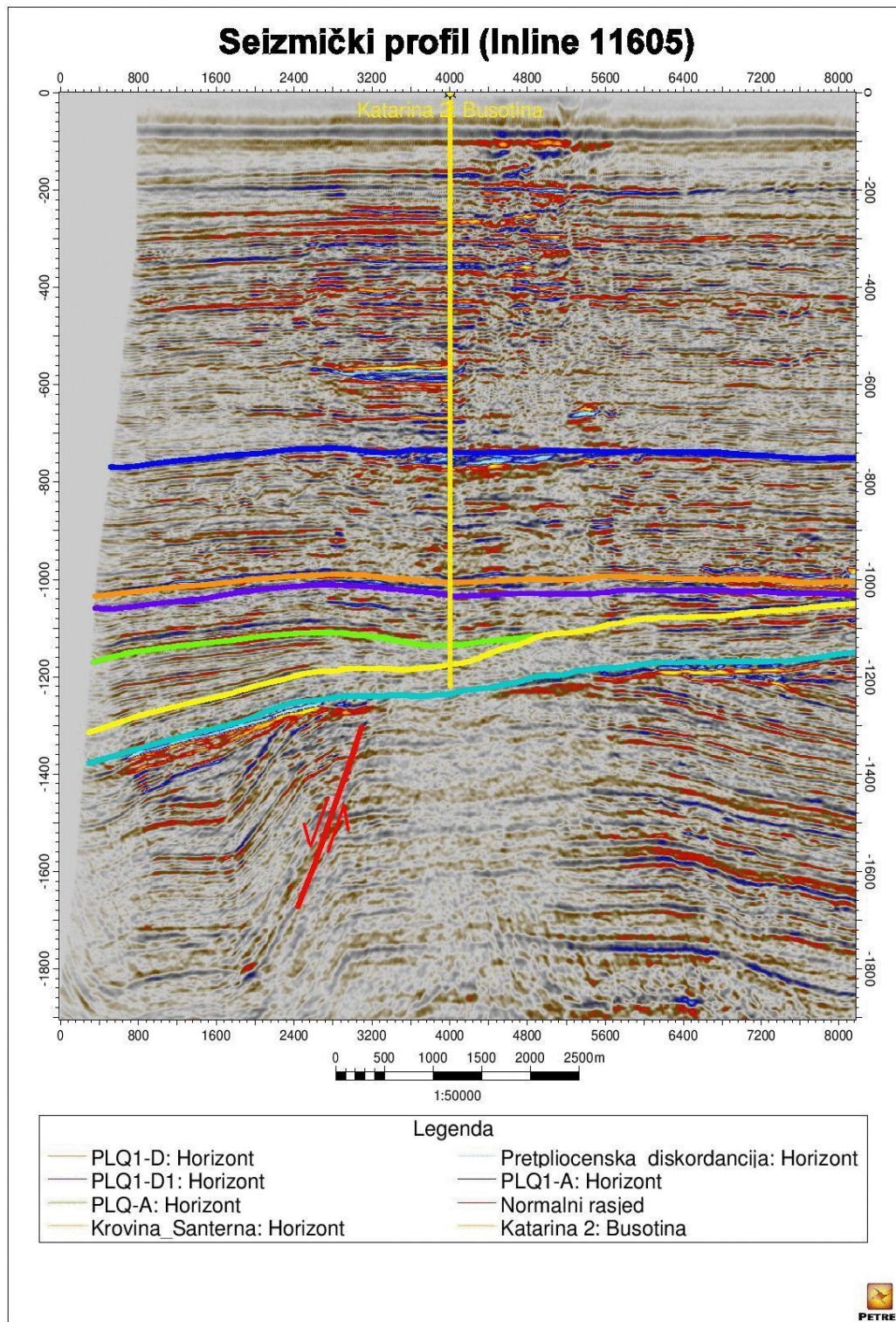
Uzdužni i poprečni seizmički profili koji prolaze bušotinom Katarina–2 nalaze se na slikama 11 i 12. Na profilima se također vide svi interpretirani horizonti. Na uzdužnom profilu može se vidjeti diskordantno nalijeganje ležišta PLQ1–D, PLQ1–D1 i PLQ–A na „Krovinu Santerno“. „Bijela mrlja“ kod ležišta PLQ1–A u području bušotine uzrokuje povijanje refleksa koji se nalaze ispod, a najviše je izraženo kod PLQ–A i „Krovine Santerno“. U pretpliocenskim naslagama interpretiran je normalni rasjed koji se može vidjeti i na profilu koji prolazi bušotinom Katarina–1. Na poprečnom profilu vide se konkordantni interpretirani horizonti, osim PLQ–1 koji diskordantno naliježe na „Krovinu Santerno“. Na ovom profilu dolazi nešto više do izražaja povijanje refleksa u području bušotine. To je uzrokovano smanjenjem brzina ispod „bijeke mrlje“ koja se nalazi na području najbližeg ležišta PLQ1–A kod bušotine. To je karakteristična „zona sjene“ gdje refleksi nisu istaknuti te dolazi do njihovog povijanja.



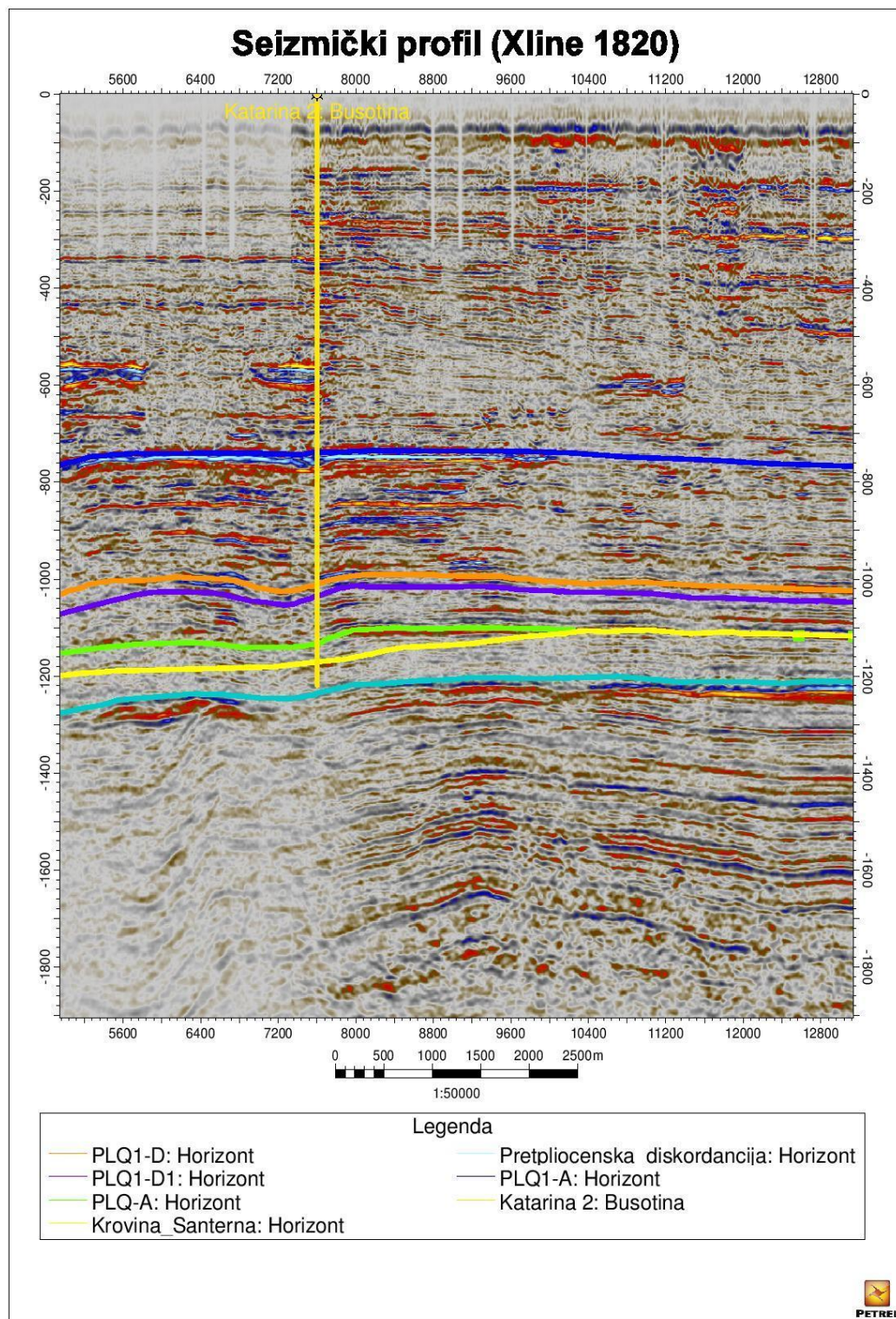
Slika 9: *Uzdužni seizmički profil 11620.*



Slika 10: *Poprečni seizmički profil 1710.*



Slika 11: *Uzdužni seizmički profil 11605.*

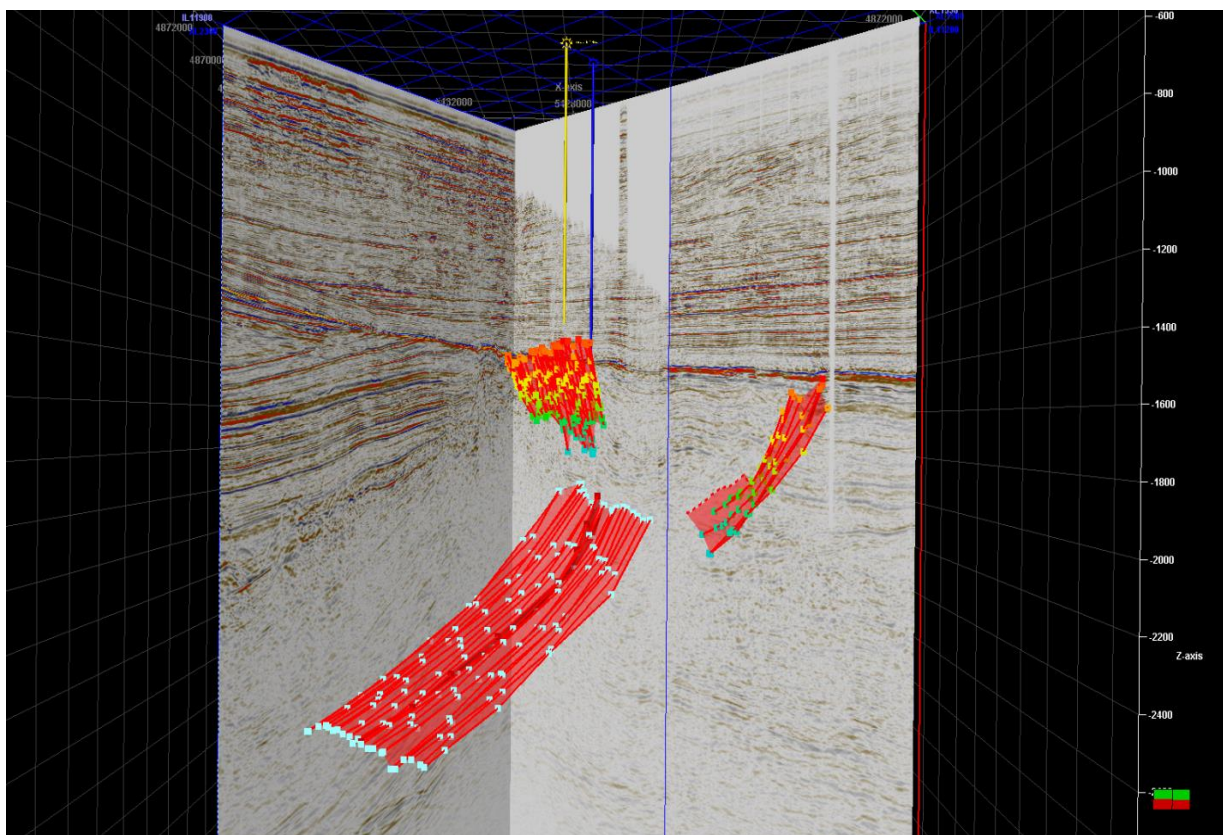


Slika 12: *Poprečni seizmički profil 1820.*

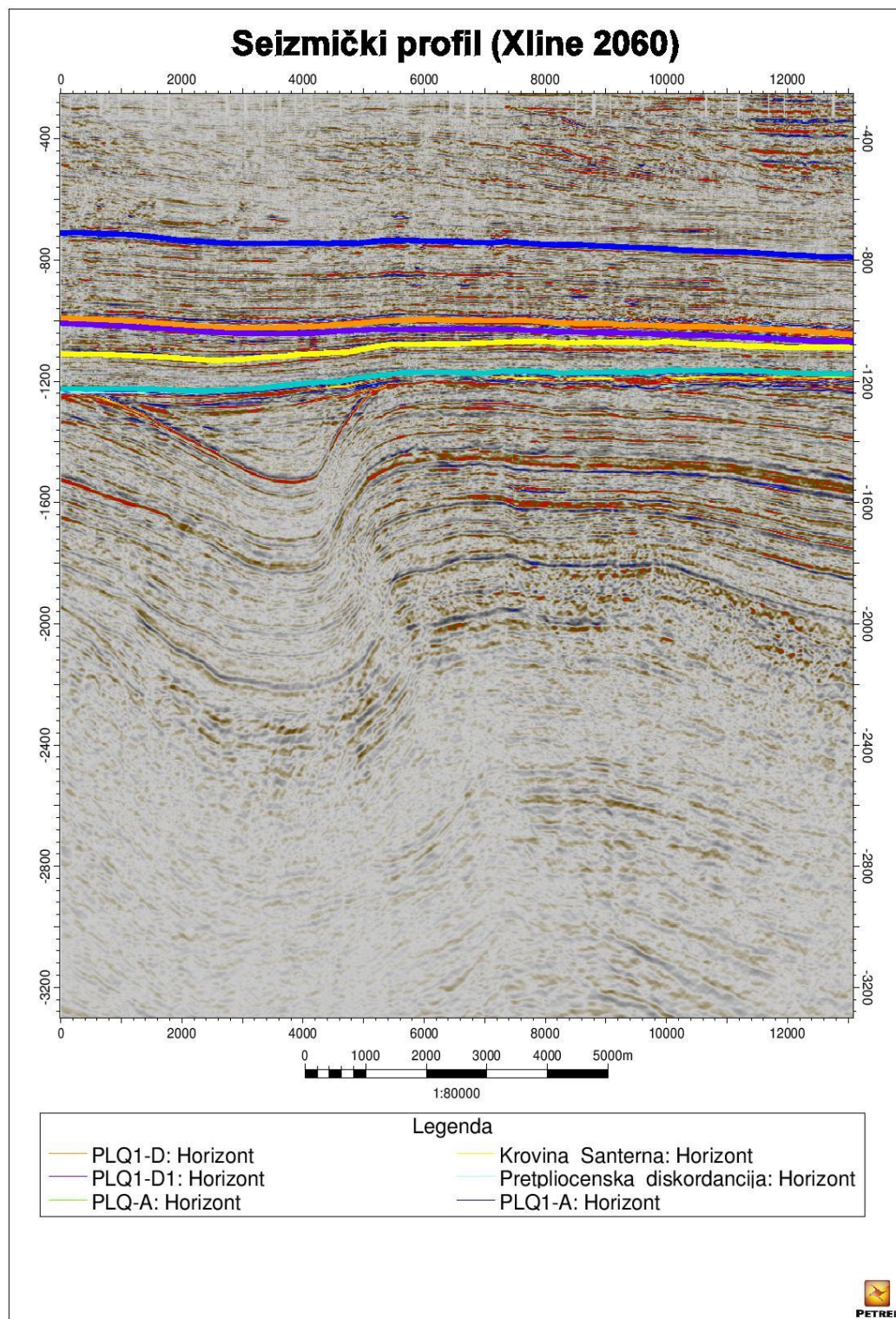
6.2. Strukturno–tektonska interpretacija

Struktura plinskog polja Katarina ima oblik izdužene antiklinale pružanja SSZ–JJJ. Antiklinalne strukture posljedice su povremenih kompresijskih naprezanja koje je uzrokovalo diferencijalnu kompakciju pleistocensko–kvartarne starosti. Sva ležišta plina nalaze se u formaciji Carola starosti donjeg do srednjeg pleistocena u nekonsolidiranim do slabokonsolidiranim turbiditnim pješčenjacima u izmjeni sa šejlovima. Proslojci šejlova predstavljaju matične a ujedno i izolatorske stijene (VIDAČEK, 2005).

U podini pleistocenskih naslaga nalaze se vapnenci tercijarne, kredne, jurske i trijaske starosti koji su najčešće borani te u nekim dijelovima rasjednuti (Slika 14). U pretpliocenskom dijelu interpretirana su tri rasjeda (Slika 13). Interpretacija se vršila na klasičnim seizmičkim profilima na mjestima gdje se uočavao jasan prekid refleksa. Rasjedi su još potvrđeni izradom određenih seizmičkih atributa koji mogu ukazivati na njihovo postojanje.



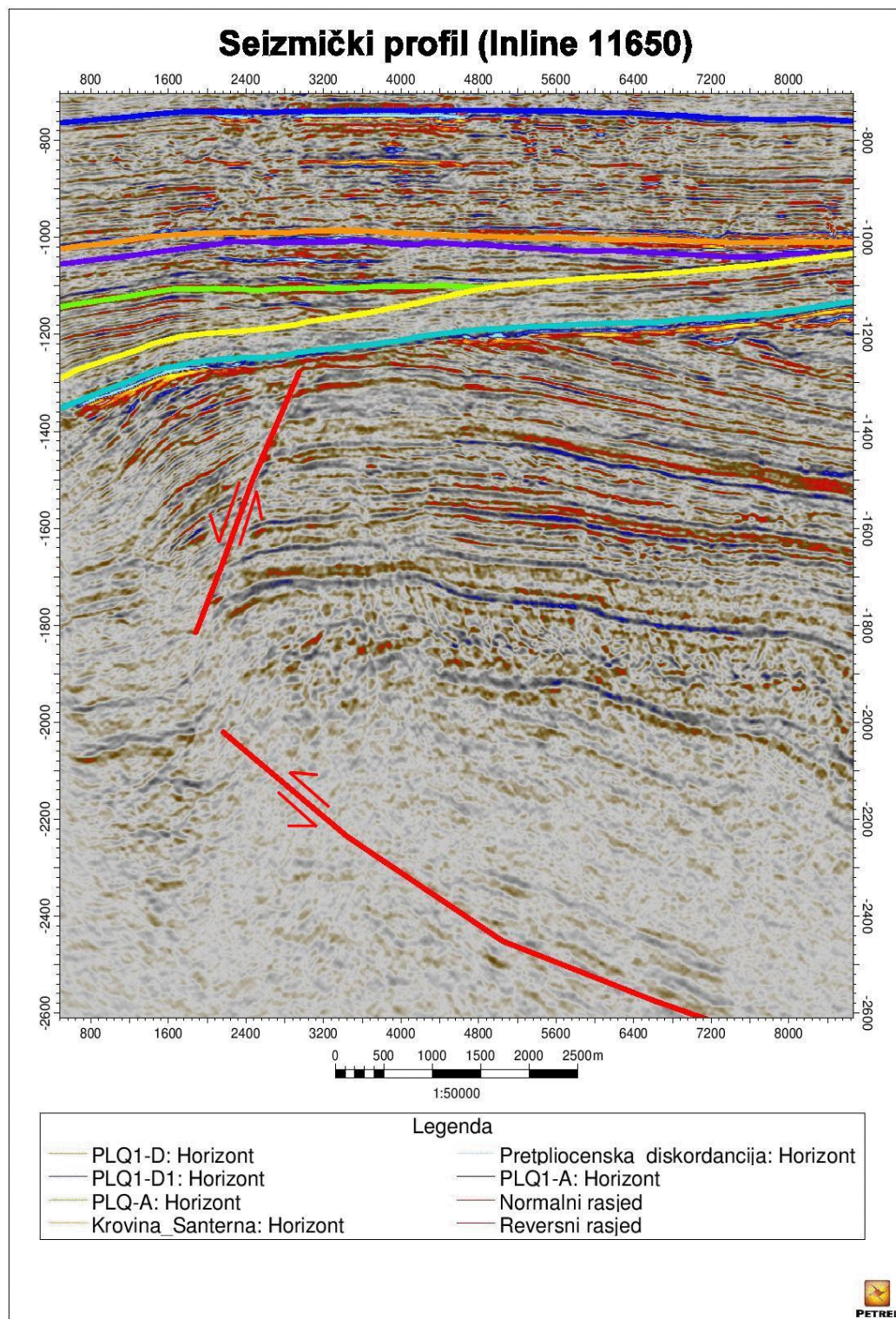
Slika 13: Trodimenzionalni prikaz interpretiranih rasjeda.



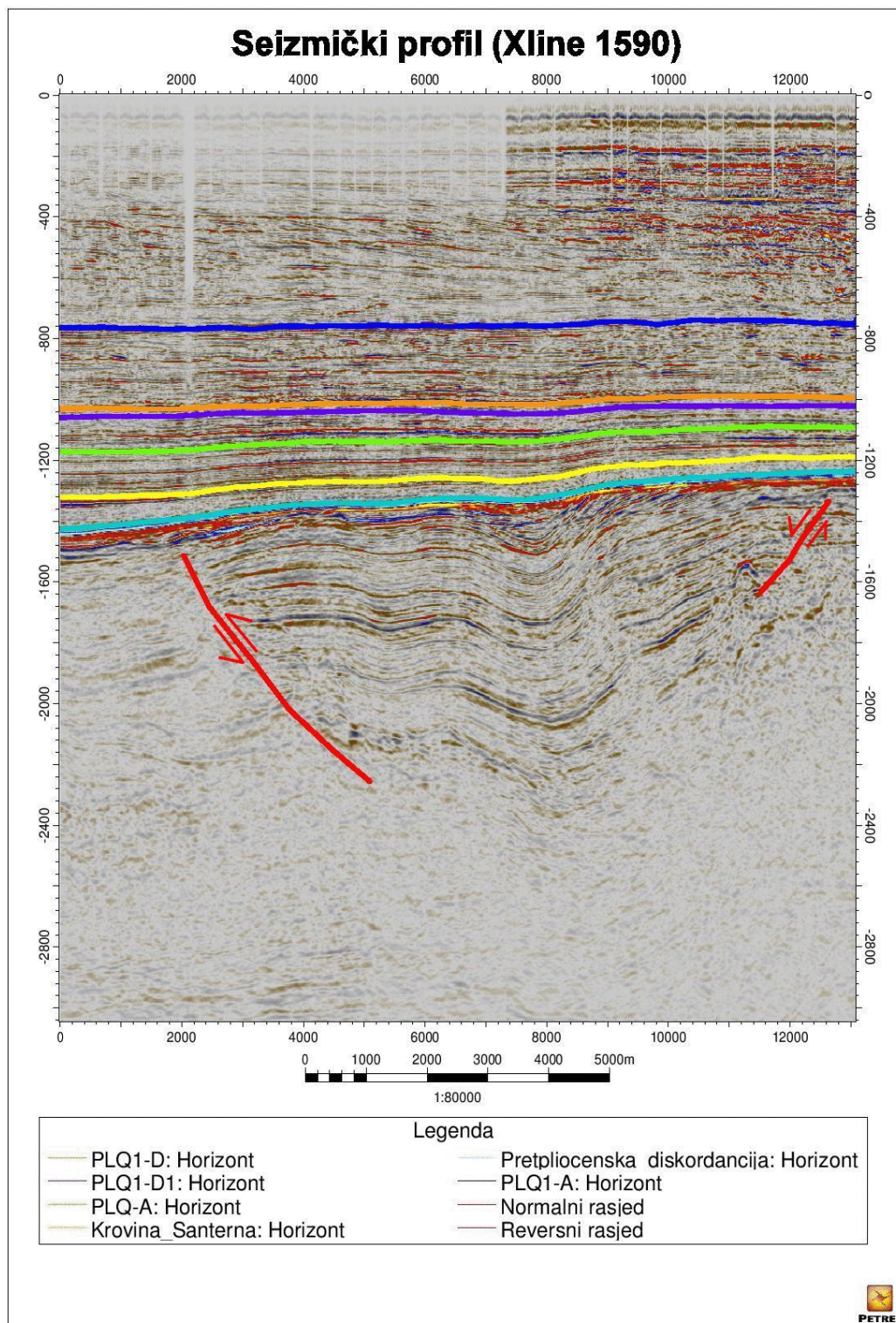
Slika 14: Poprečni seizmički profil 2060. Prikaz boranja u pretpliocenskim naslagama.

Na slici 15 mogu se vidjeti jedan normalni i jedan reversni rasjed. Reversni rasjed pripada vrsti *Fault propagation fold* rasjeda. Na mjestu gdje je interpretiran ovaj rasjed refleksi nisu izraženi zbog velikog prigušenja u dubini, no struktura koja se nalazi u pretpliocenskom dijelu može biti uzrokovana ovom vrstom rasjeda. To je rasjed blagog nagiba, pružanja SZ–JI, koji uzrokuje navlačenje mlađih naslaga na starije te njihovo boranje. U ovom slučaju nastala je antiklinalna struktura. Normalni rasjed je nastao zbog kretnje uzrokovanih navedenim reversnim rasjedom. Zbog reversnog rasjeda nastalo je boranje koje je dovelo i do normalnog rasjedanja u tjemenu antiklinale. Ovaj rasjed je interpretiran na temelju jasnog prekida refleksa na seizmičkim profilima, no problem je bio odrediti pomak po krilima tj. da li je rasjed normalnog ili reversnog karaktera. Kako se u krovinskom krilu na maloj udaljenosti od paraklaze vidi povijanje refleksa prema dolje, zaključeno je da se radi o normalnom tipu.

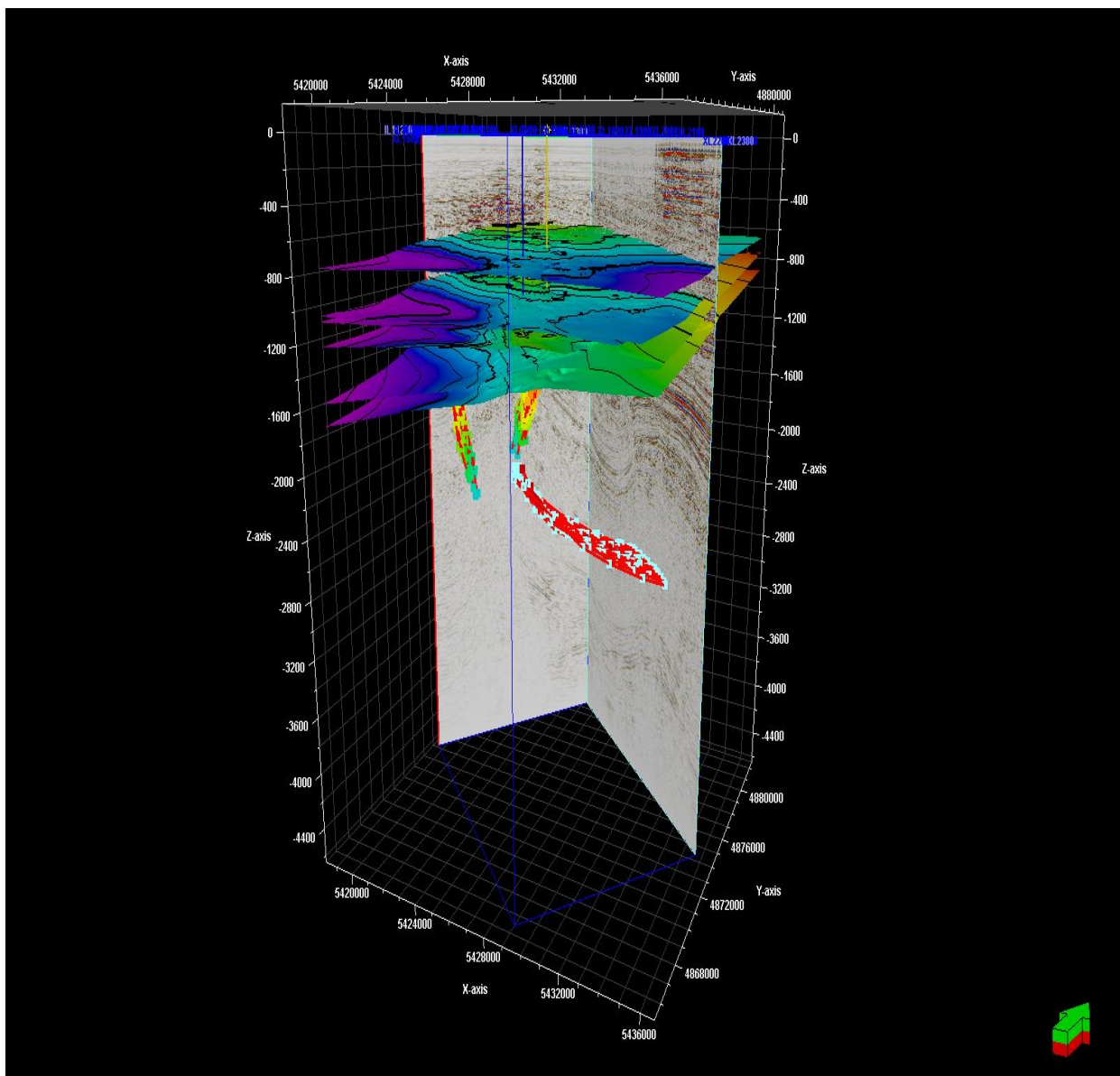
Na slici 16 može se vidjeti također normalni rasjed te još jedan interpretirani reversni rasjed suprotnog nagiba. Normalni rasjed je isti interpretirani rasjed kao i na slici 15 dok je drugi novointerpretirani reversni rasjed. Interpretiran je prema vidljivim prekidima refleksa na profilu te je u ovom slučaju jasno vidljivo pomicanje krovinskog krila tj. refleksa prema gore što ukazuje na reversni karakter pomaka. Cijelokupni prikaz interpretiranih elemenata je na slici 17.



Slika 15: Uzdužni seizmički profil 11650. Prikaz normalnog i reversnog rasjeda.



Slika 16: Poprečni seizmički profil 1590. Prikaz normalnog i reversnog rasjeda.



Slika 17: *Trodimenzijski prikaz interpretiranih horizonata i rasjeda.*

6.3. Analiza seizmičkih atributa

Seizmički atributi omogućavaju pouzdanije i lakše praćenje horizonata te pouzdanu interpretaciju položaja rasjeda i karaktera pomaka po njima. Da bi interpretacija bila uspješna, potrebno je izraditi seizmičke atribute na cijelom 3D–volumenu podataka, posebno temeljne atribute: trenutnu fazu, trenutnu amplitudu i trenutnu frekvenciju.

Seizmički atributi najčešće se primjenjuju za definiranje regionalnih odnosa, strukturno–tektonskog sklopa, odnosa među taložnim jedinicama i sl. Koriste se i za namjenu razrade ležišta, za definiranje ležišnih karakteristika kao što su poroznost i zasićenje, utvrđivanje bočnih granica ležišta, promjena u kvaliteti ležišta i slično.

6.3.1. Kompleksni seizmički trag

Snimljeni seizmički podaci (seizmički tragovi) promatraju se kao realna komponenta kompleksne funkcije:

$$s(t) = x(t) + iy(t) \quad (6-1)$$

gdje je:

$s(t)$ – kompleksni seizmički signal

$x(t)$ – realni dio seizmičkog signala

$y(t)$ – imaginarni dio seizmičkog signala

$y(t)$ je zapravo realni dio seizmičkog signala koji se transformira u kompleksni analitički signal pomoću Hilbertove transformacije:

$$y(t) = H[x(t)] = \left(\frac{1}{\pi}\right) P \int \frac{x(s)}{t-s} ds \quad (6-2)$$

gdje je:

$H[x(t)]$ – Hilbertova transformacija

s – varijabla integracije

P – vrijednost Caucyevog principa

Prednost transformacije seizmičkog signala u kompleksnu funkciju je odvajanje informacija o amplitudi i informaciji o fazi i frekvenciji. Seizmički trag promatramo u polarnim koordinatama (Slika 18), budući da amplituda i faza u tom slučaju daju novu perspektivu:

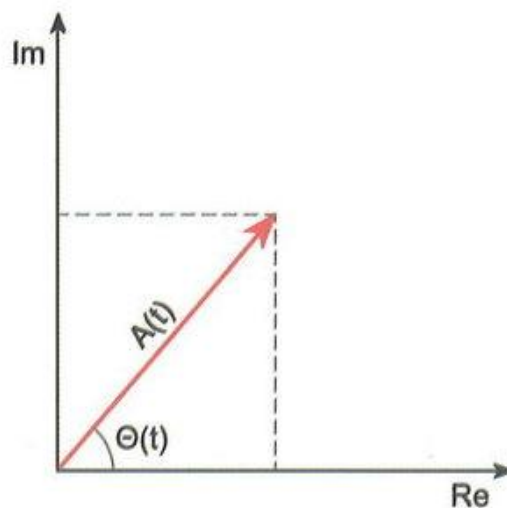
$$x(t) = A(t)\cos\theta(t) \quad (6-3)$$

gdje je:

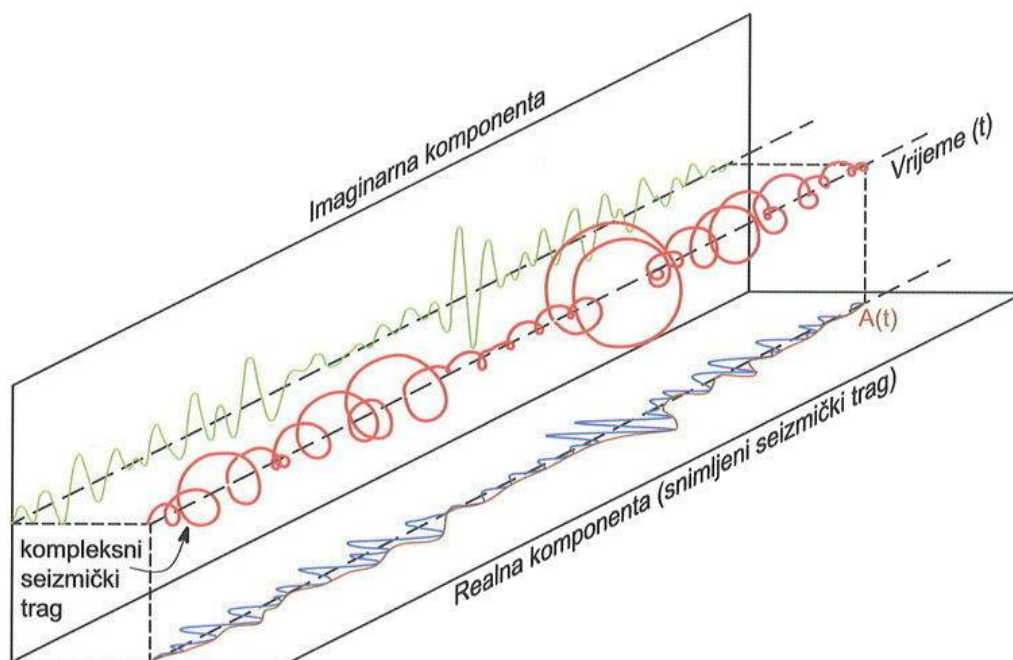
$A(t)$ – amplituda koja se mijenja u vremenu t

$\theta(t)$ – faza koja se mijenja u vremenu t

Kompleksni seizmički trag može se zamisliti kao trag koji u kompleksnom prostoru opisuje vektor koji rotira i mijenja svoju duljinu u vremenu (Slika 19). Rezultat ove rotacije bit će nepravilna zavojnica. Njena projekcija na realnu ravninu je realni (stvarni) seizmički trag, a projekcija na imaginarnu ravninu je Hilbertova transformacija realne funkcije. Duljina rotirajućeg vektora je trenutna amplituda $A(t)$ (eng. *Instantaneous amplitude*), a kut koji vektor zatvara s pozitivnim dijelom realnom osi je trenutna faza $\theta(t)$ (eng. *Instantaneous phase*). Trenutna amplituda i faza zapravo predstavljaju polarni oblik kompleksnog seizmičkog traga, odnosno predstavljaju sam seizmički signal te se nazivaju temeljnim atributima. Pomoću njih se mogu izračunati ostali atributi kao npr. trenutna frekvencija $\omega(t)$ (eng. *Instantaneous frequency*).



Slika 18: Seizmički trag u polarnim koordinatama; $A(t)$ – trenutna amplituda, $\theta(t)$ – trenutna faza, Re – realna os, Im – imaginarna os (TANNER et al., 1979).



Slika 19: Izometrijski prikaz kompleksnog seizmičkog traga (TANNER et al., 1979).

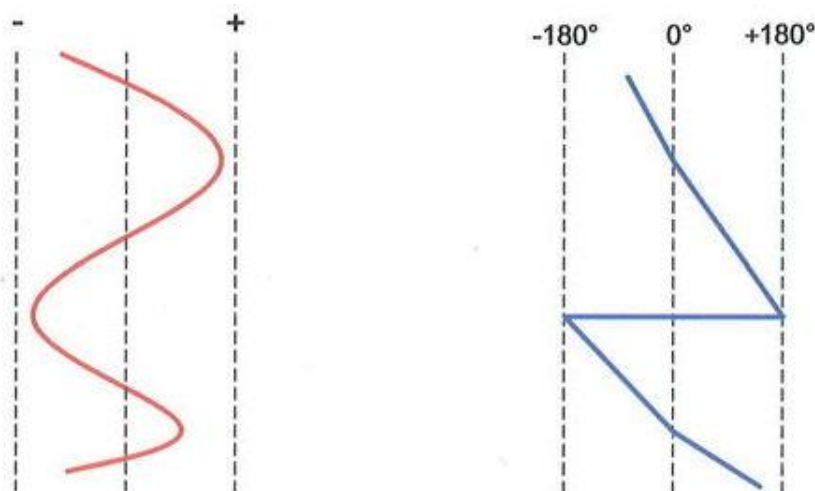
U nastavku su detaljnije opisani i prikazani seizmički atributi koji su napravljeni i korišteni u ovom diplomskom radu.

6.3.2. Trenutna faza $\theta(t)$ (eng. *Instantaneous phase*)

Trenutna faza je kut koji rotirajući vektor zatvara s pozitivnim dijelom realne osi, a izračunava se prema izrazu:

$$\theta(t) = \arctg \frac{H[x(t)]}{x(t)} \quad (6-4)$$

Trenutna faza neovisna je o trenutnoj amplitudi, a poprima vrijednosti između -180° i $+180^\circ$. Kod promjene seizmičkog traga od brijega prema dolu, trenutna faza se mijenja od 0° do $+180^\circ$. U točki minimalne amplitude trenutna faza se promijeni od $+180^\circ$ na -180° , a idući od minimuma prema maksimumu promjena je od -180° do 0° (Slika 20).



Slika 20: Prikaz seizmičkog traga i trenutne faze.

Trenutna faza će uvijek u brijegu imati vrijednost 0, bez obzira na iznos amplitude tj. duljinu vektora $A(t)$, što znači da jednak značaj dobivaju slabi i jaki refleksi. Trenutna faza naglašava kontinuitet događaja; mogu se lakše pratiti slabi ali i kontinuirani događaji, lakše se uočavaju i prekidi refleksa kao što su diskontinuiteti, rasjedi isklinjenja i sl.

Uz trenutnu fazu često se izračunava i kosinus trenutne faze, a naziva se „normirani“ seizmički trag ili normirana amplituda. Kosinus trenutne faze $\theta(t)$ jednak je omjeru realnog seizmičkog traga i trenutne amplitude $A(t)$:

$$\cos\theta(t) = \frac{x(t)}{A(t)} \quad (6-5)$$

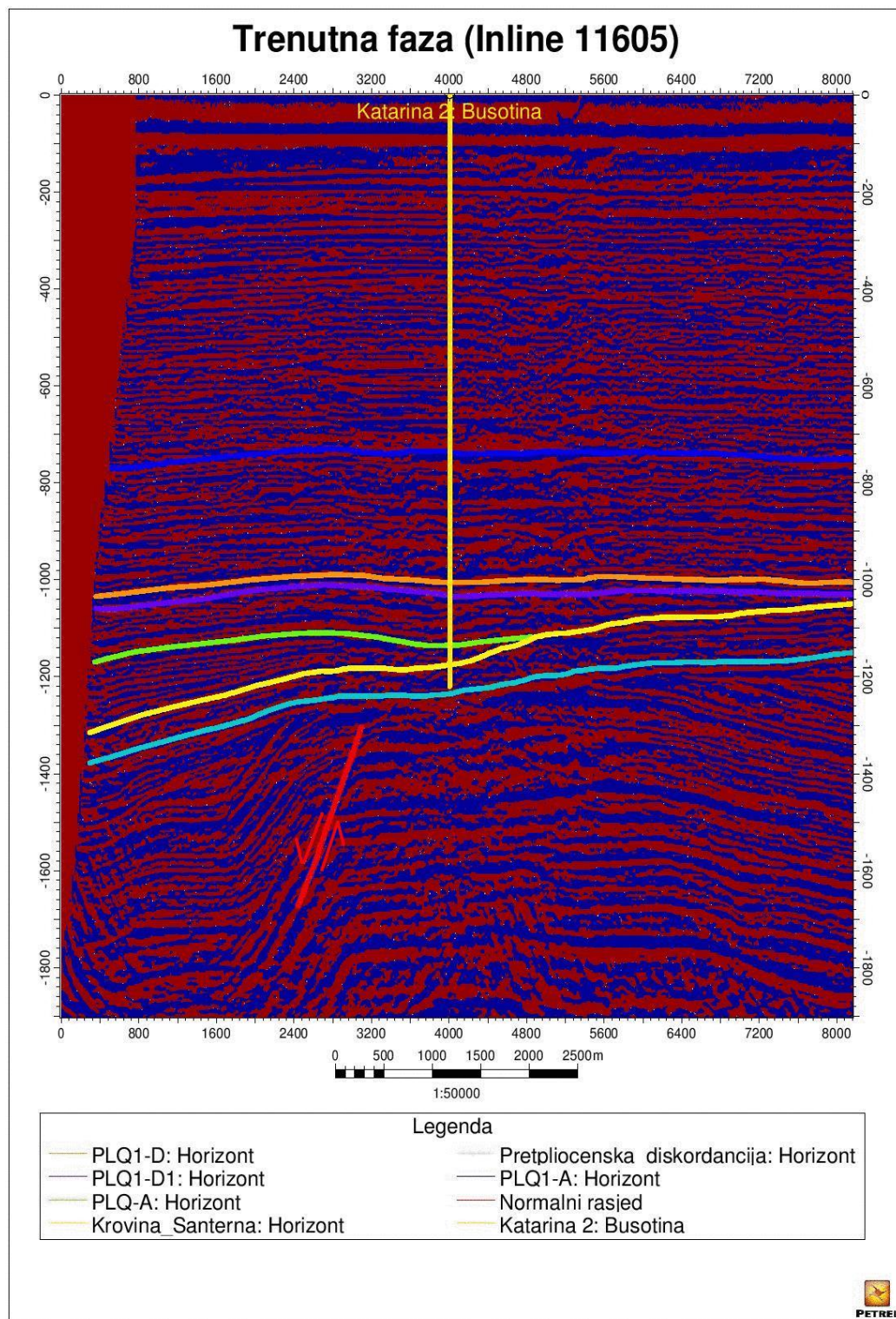
Raspon iznosa kosinusa faze je u rasponu od -1,0 do 1,0. Kod izračunavanja ovog atributa naglašavaju se kontinuiranost reflektora i pojačava se izgled rubova kao što su rasjedi ili stratigrafske granice. Ovaj atribut je odličan indikator lateralnog kontinuiteta i varijacija u seizmičkom facijesu.

Na slikama 21 i 22 prikazani su profili atributa trenutne faze koji prolaze bušotinom Katarina–2. Trenutna faza je prikazana u dvije boje: crvena i plava. Ovaj atribut je korišten kako si se točnije interpretirali seizmički horizonti i rasjedi. Na slikama se može uočiti kontinuiranost seizmičkog traga, najviše kod horizonta „Prepliocenska diskordancija“ i kod horizonta „PLQ1–A“ na poprečnom profilu (Slika 28). Slabije izraženi refleksi za krovine ležišta PLQ1–D i PLQ–A mogli su se pomoću atributa trenutne faze točnije interpretirati. Izrada atributa trenutne faze posebice je pomogla kod interpretacije horizonta u dijelovima gdje su refleksi u vremenskom seizmičkom prikazu isprekidani ili slabo izraženi, primjerice ispod područja „bijelih mrlja“. To se može vidjeti u području bušotine Katarina–2 gdje su u vremenskom prikazu refleksi često smanjenih amplituda, dok se na ovom atributu dobro vidi kontinuiranost i blago povijanje uzrokovano smanjivanjem brzina.

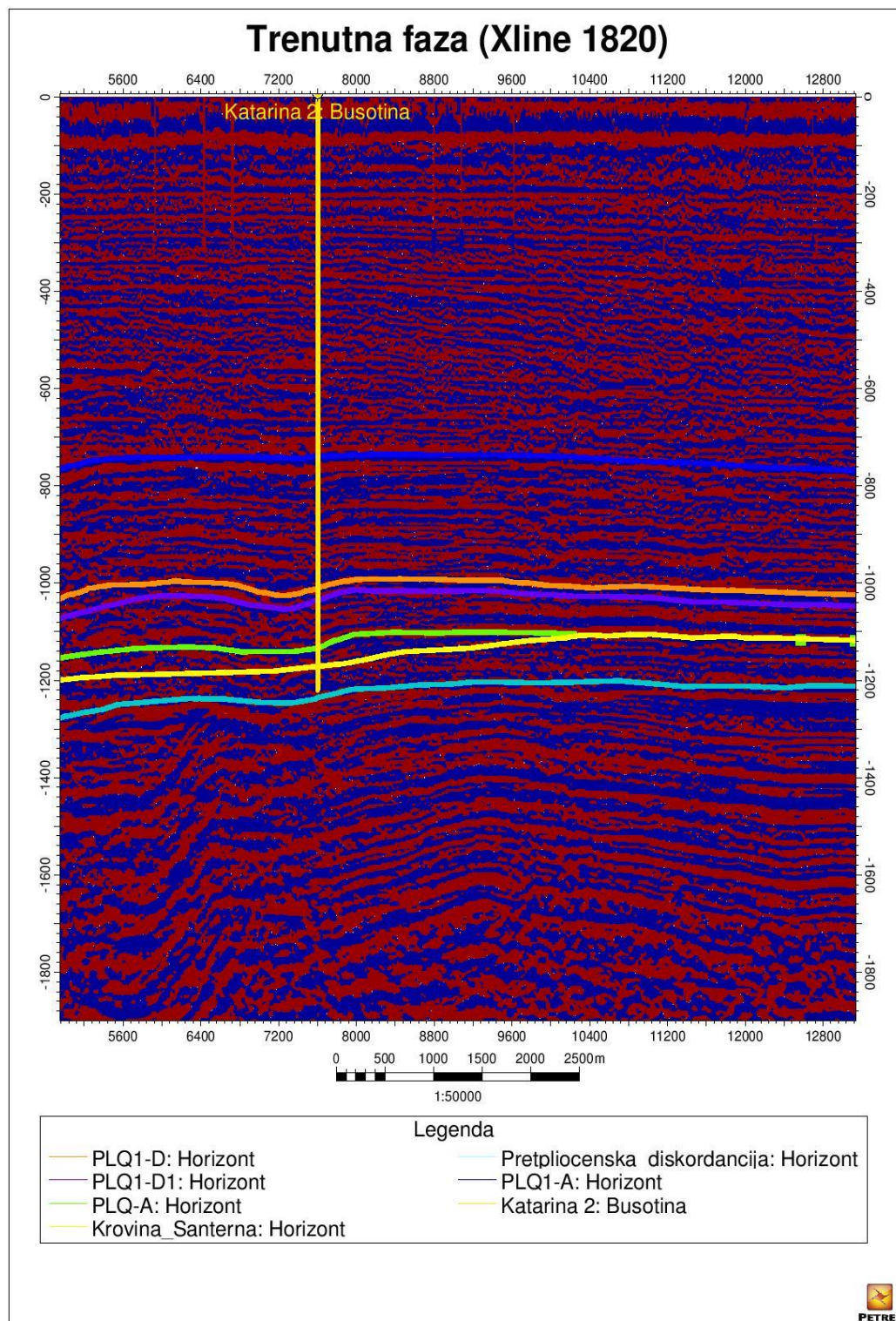
Na slikama 23 i 24 su profili kosinusa trenutne faze. Izdvojeni su uzdužni i poprečni profil koji prolaze bušotinom Katarina–1. Ovaj atribut je također korišten kako bi se točnije interpretirali horizonti i rasjedi jer se njime naglašava kontinuiranost događaja tj. dolaze do izražaja prekidi refleksa. Korišten je ponajviše za horizonte u središnjem dijelu profila: PLQ1–D, PLQ1–D1, PLQ–A i „Krovina Santerno“ jer njihovi refleksi nisu bili izraženi toliko kao i ostali horizonti. Pomoću kosinusa trenutne faze mogli su se kontinuirano ispratiti te točno odrediti mjesto gdje horizont PLQ–A završava kod horizonta „Krovina Santerno“.

Uz interpretirane horizonte, na profilima ovih atributa možemo vidjeti i interpretirani normalni rasjed. Ovi atributi su posebno pogodni kod strukturno–tektonske interpretacije jer

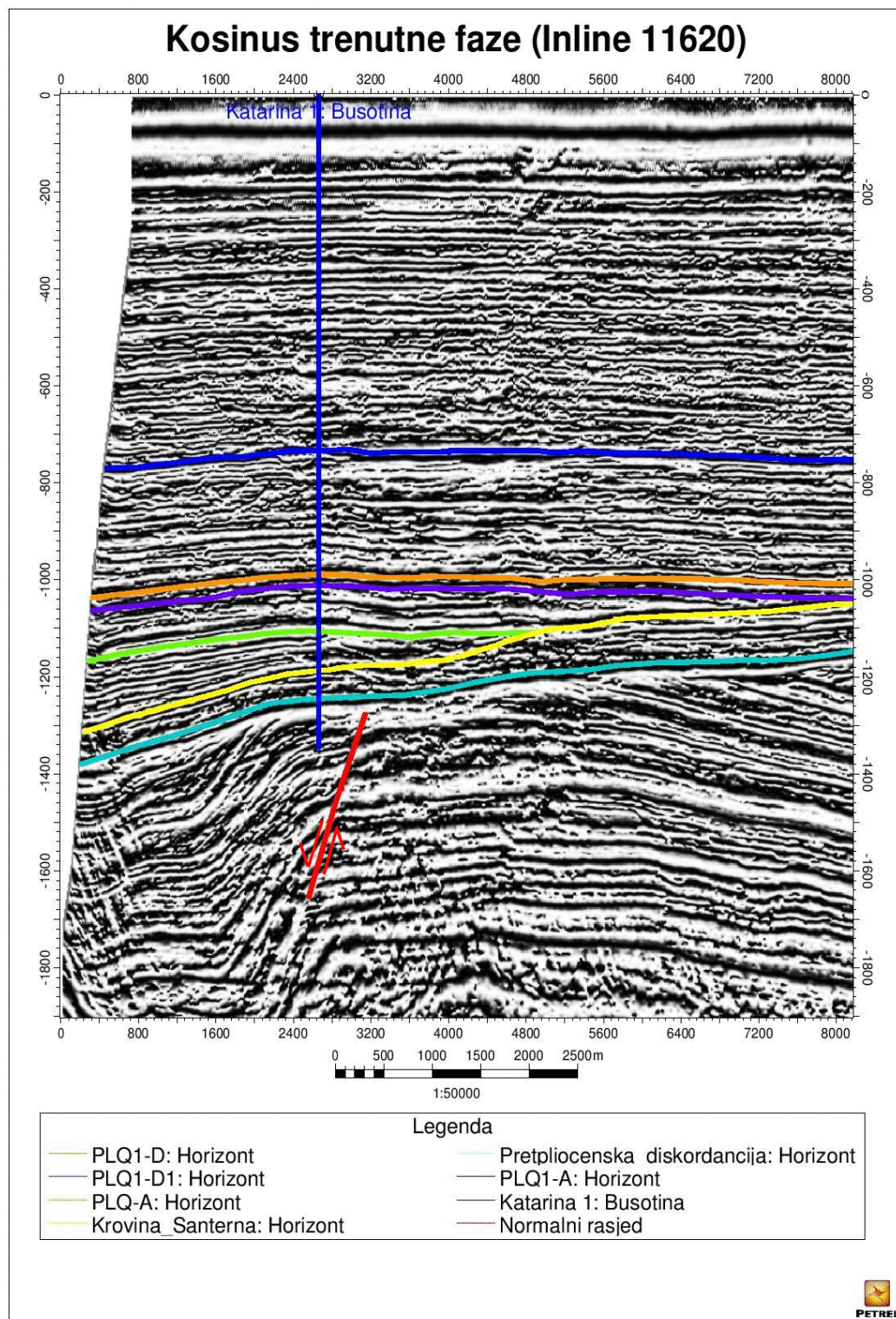
ukazuju na kontinuiranost odnosno nekontinuiranost refleksa. Tako se na slikama u području rasjeda može vidjeti očiti prekid u trenutnoj fazi odnosno kosinusu trenutne faze što je ukazivalo na postojanje rasjeda.



Slika 21: Trenutna faza na uzdužnom profilu 11605.



Slika 22: *Trenutna faza na poprečnom profilu 1820.*



Slika 23: Kosinus trenutne faze na uzdužnom profilu 11620.

6.3.3. Trenutna amplituda $A(t)$ (eng. *Instantaneous amplitude*)

Trenutna amplituda je amplituda ovojnice seizmičkog traga, a naziva se još i snagom refleksije (eng. *Reflection strength*). Definirana je izrazom:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + H[x(t)]^2} = |s(t)| \quad (6-6)$$

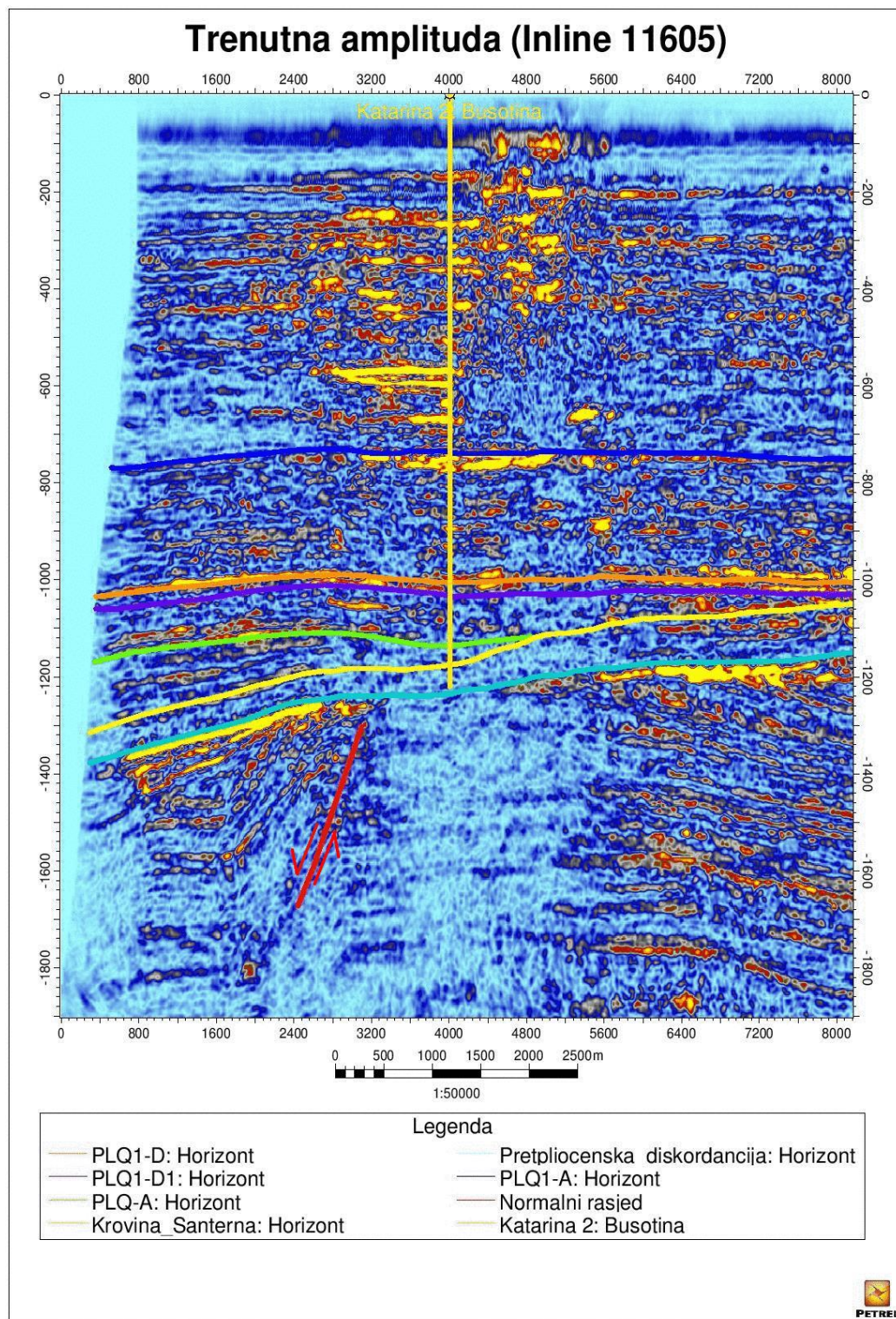
Ne ovisi o fazi i uvijek ima pozitivnu vrijednost; brjegov i dolovi realnog traga odgovaraju visokim vrijednostima trenutne amplitude. Može čak imati maksimum u točkama koje nisu niti brijeg niti dol realnog traga.

Trenutna amplituda predstavlja kontrast akustične impedancije. Može se koristiti kao indirektni pokazatelj akumulacije ugljikovodika – pojave „bijeke mrlje“ (eng. *Bright spot*). Pomoću nje se mogu odrediti granice litostratigrafskih jedinica; promjene taložnog okoliša, diskordancije, lokalne promjene koje ukazuju na rasjedanje (nagle promjene amplitude), utjecaj tankih slojeva i dr.

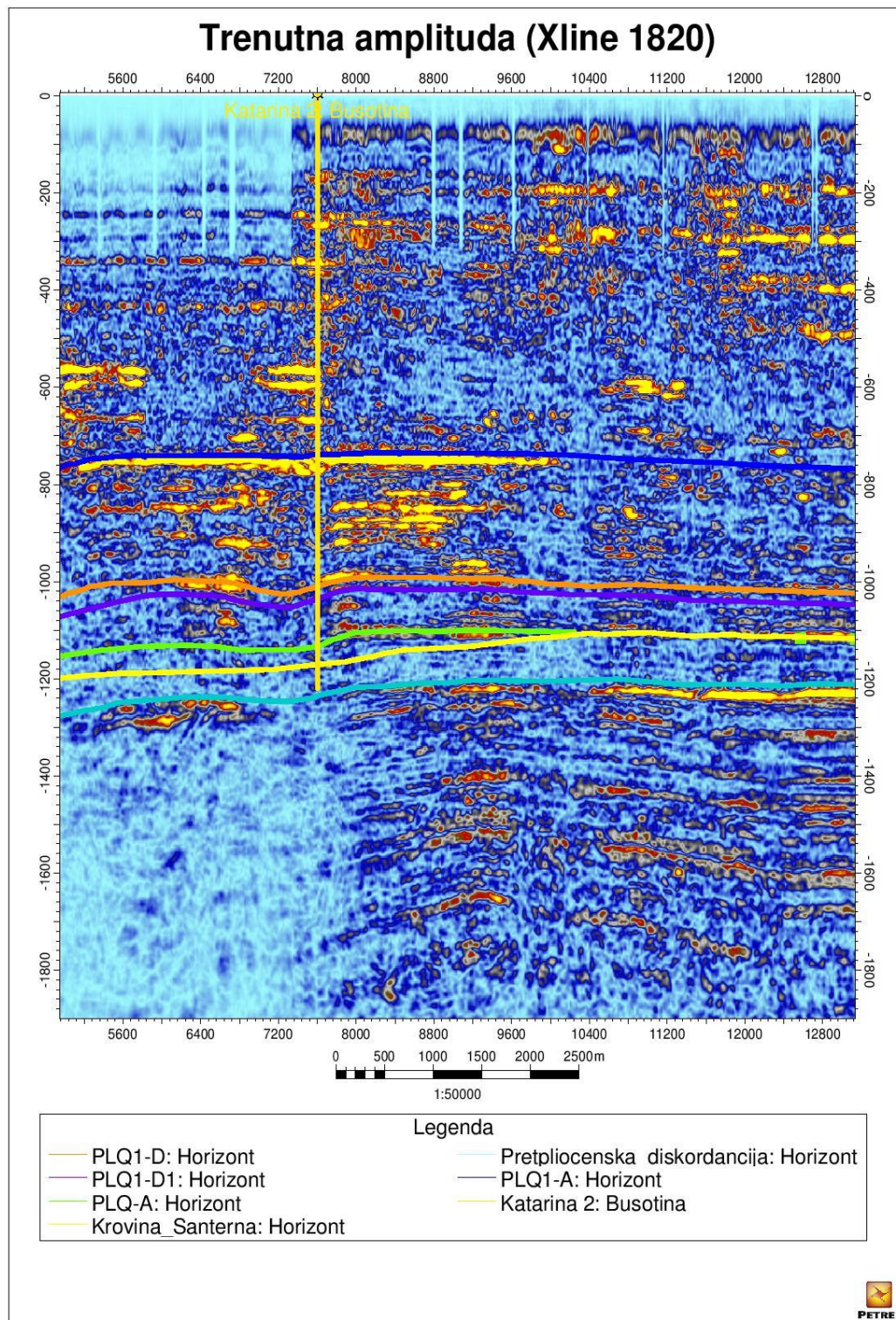
Na slikama 25 i 26 su prikazani profili trenutne amplitude koji prolaze bušotinom Katarina–2. Mjesta niskih vrijednosti amplituda prikazana su svjetlijom, plavom bojom, dok su mjesta na kojima je iznos amplitude velik prikazana žutom bojom. Može se uočiti da se bušotina Katarina–2 prolazi mjestima koja imaju najviše vrijednosti amplitude. Ovaj atribut se koristi kao indirektni pokazatelj „bijelih mrlja“ tj. pokazatelj akumulacije ugljikovodika, pa se tako može vidjeti izrazito povećana vrijednost amplituda duž horizonta PLQ1–A koje predstavlja najbliže ležište. Sama krovina tog ležišta je interpretirana točno po vrhu najveće amplitudne anomalije, jer samo mjesto velike amplitude ukazuje na „bijelu mrlju“. Iako se i kod ostalih ležišta uočavaju povećane vrijednosti trenutne amplitude, kod njih ona nije izrazito upotrebljavana u interpretaciji. Više su bili korišteni atributi trenutne faze i kosinusa trenutne faze.

Ovaj atribut je i dobar u praćenju granica litostratigrafskih jedinica, no kod granice formacije Santerno nije dao dobre rezultate. Iako se na profilima može vidjeti malo povećane vrijednosti amplitude one nisu bile dovoljne za poboljšanje interpretacije tog horizonta. Za horizont „Pretpliocensku diskordanciju“ ovo je bio temeljni atribut za interpretaciju. Horizont je praćen točno po početku povećanja vrijednosti amplitude. Na vremenskom seizmičkom

profilu morao se odrediti prvi jaki refleks po kojem će diskordancija biti praćena. Kako se na tim profilima nije moglo izvući sigurno rješenje, atribut trenutne amplitude je u ovom slučaju dao siguran odgovor.



Slika 25: *Trenutna amplituda na uzdužnom profilu 11605.*



Slika 26: Trenutna amplituda na poprečnom profilu 1820.

6.3.4. Trenutna frekvencija $\omega(t)$ (eng. *Instantaneous frequency*)

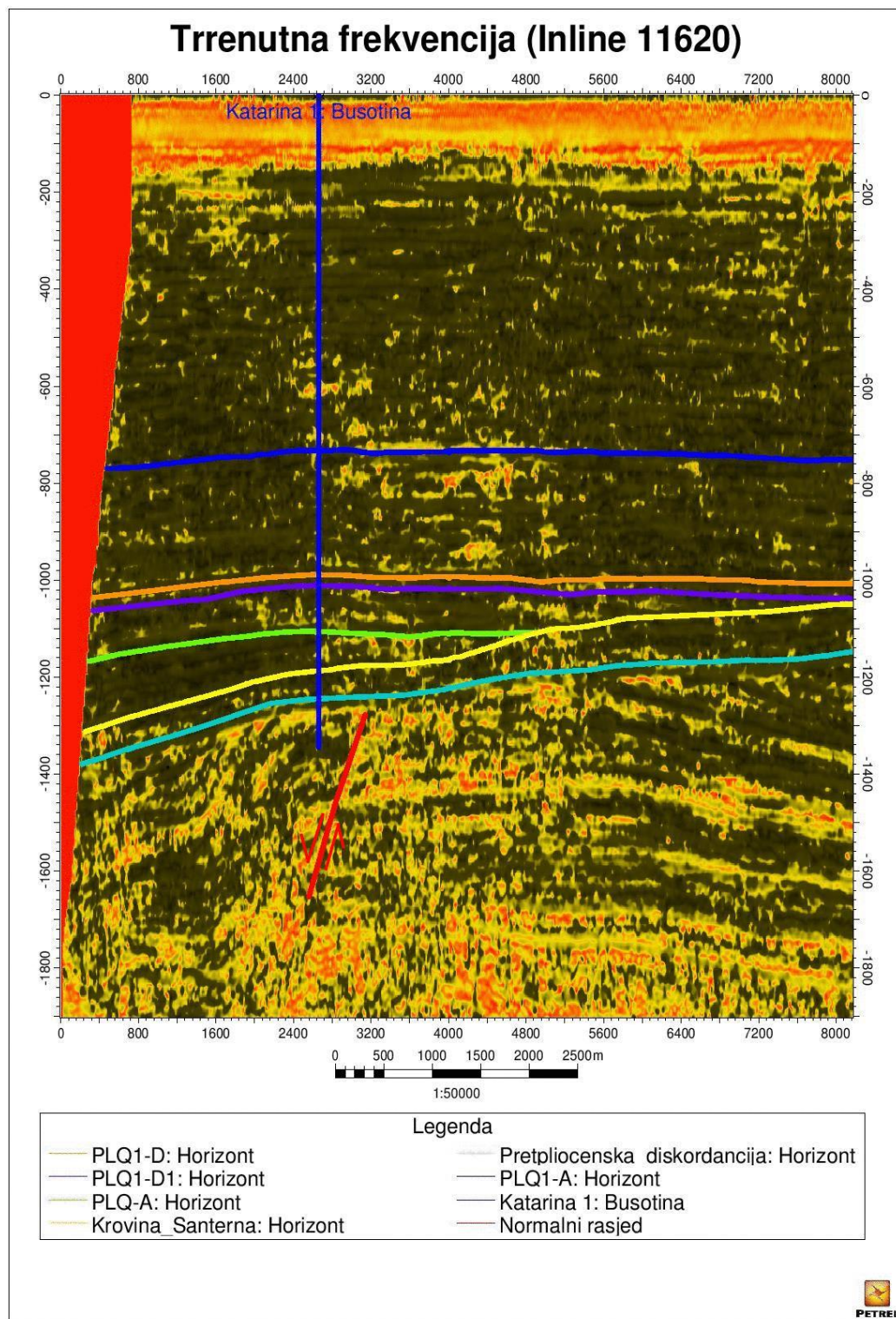
Trenutna frekvencija je vremenska promjena trenutne faze a dobiva se izrazom:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6-7)$$

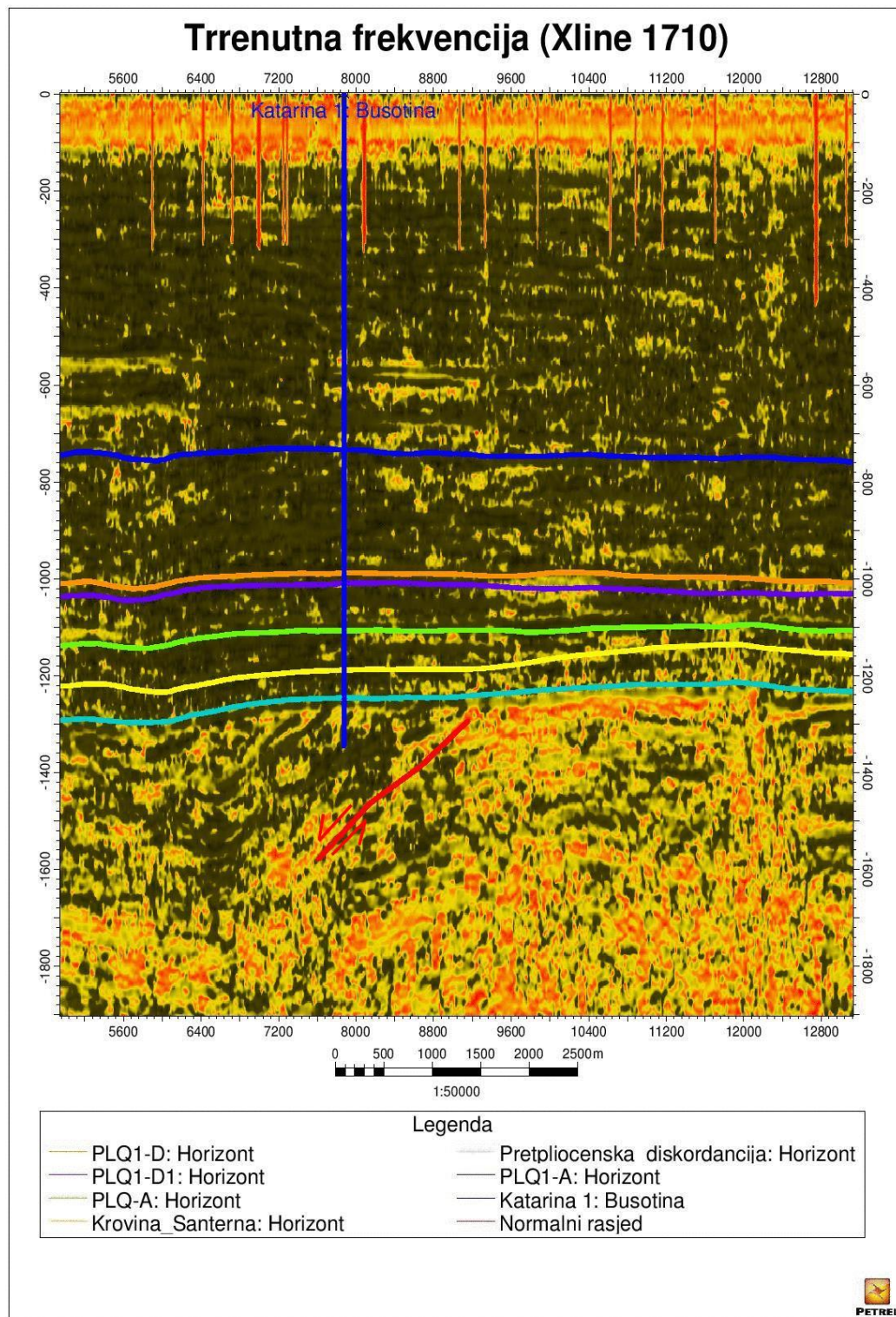
Vrijednosti trenutne frekvencije su uglavnom jednolike i pozitivne, ali mogu poprimiti i negativne vrijednosti. Prema definiciji trenutna frekvencija je brzina promjene trenutne faze tj. kuta koji rotirajući vektor zatvara s realnom osi.

Ako pretpostavimo da je pozitivan smjer rotacije vektora smjer obrnut od kazaljke na satu, tada u točki infleksije vektor usporava i rotira u suprotnom smjeru tj. trenutna frekvencija postaje negativna. Trenutna frekvencija nije frekvencija u pravome smislu.

Na slikama 27 i 28 prikazani su atributi trenutne frekvencije na profilima koji prolaze bušotinom Katarina–1. Crna boja na profilima ukazuje na područja više vrijednosti trenutne frekvencije koja mogu biti mjesta naglih promjena litološkog sastava. Crvena i žuta boja označuju niže vrijednosti koje mogu ukazivati na pojave ugljikovodika ili na pukotinske sustave. Ovaj atribut ne ukazuje na nikakve nove podatke koje bi pomogli u poboljšanju interpretacije. Praćenje samih horizonata nije se moglo raditi na temelju trenutne frekvencije, a nije koristila ni kod interpretacije rasjeda. Može se zaključiti kako ovaj atribut nije dao zadovoljavajuća rješenja u slučaju ovog polja.



Slika 27: Trenutna frekvencija na uzdužnom profilu 11620.

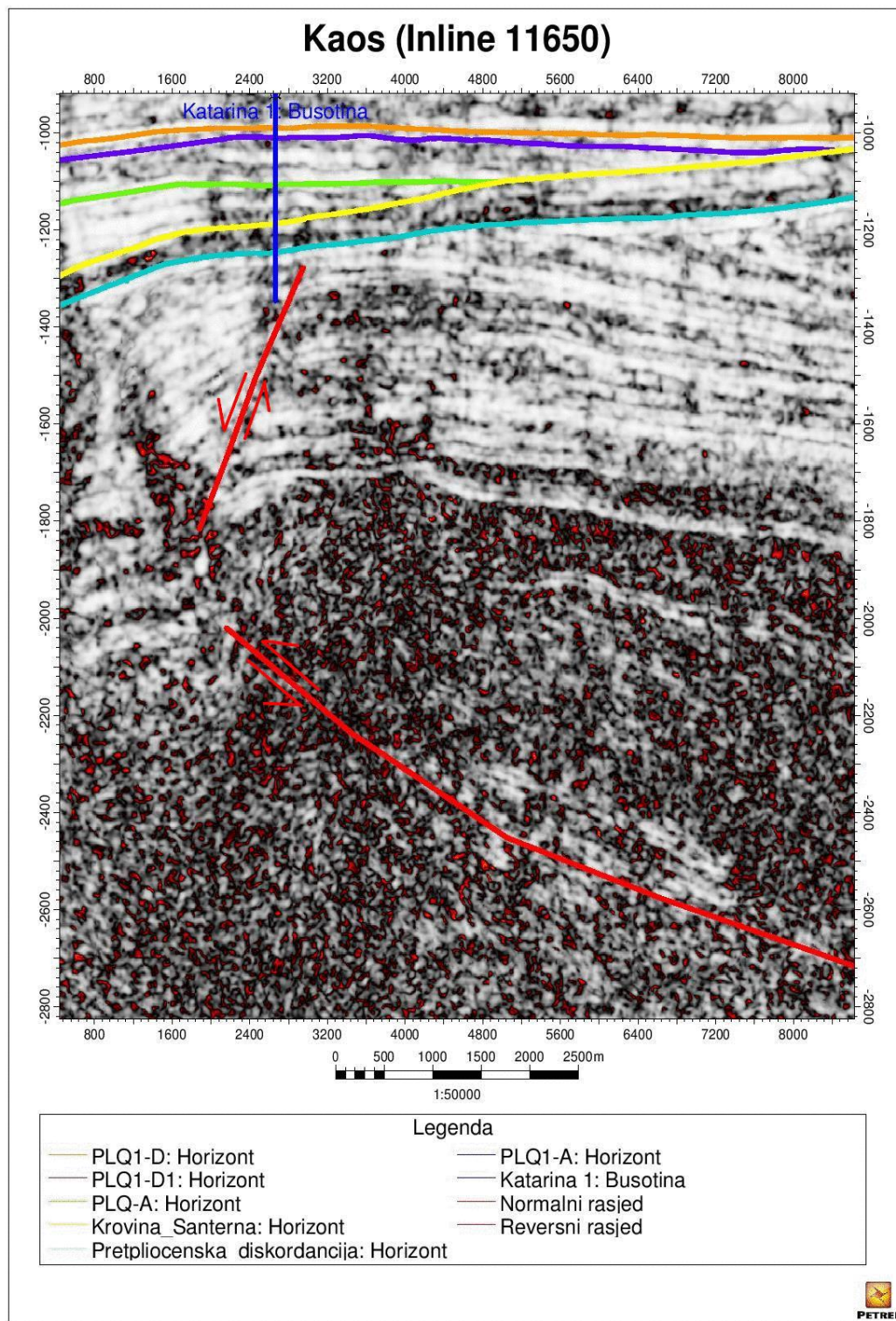


Slika 28: Trenutna frekvencija na poprečnom profilu 1710.

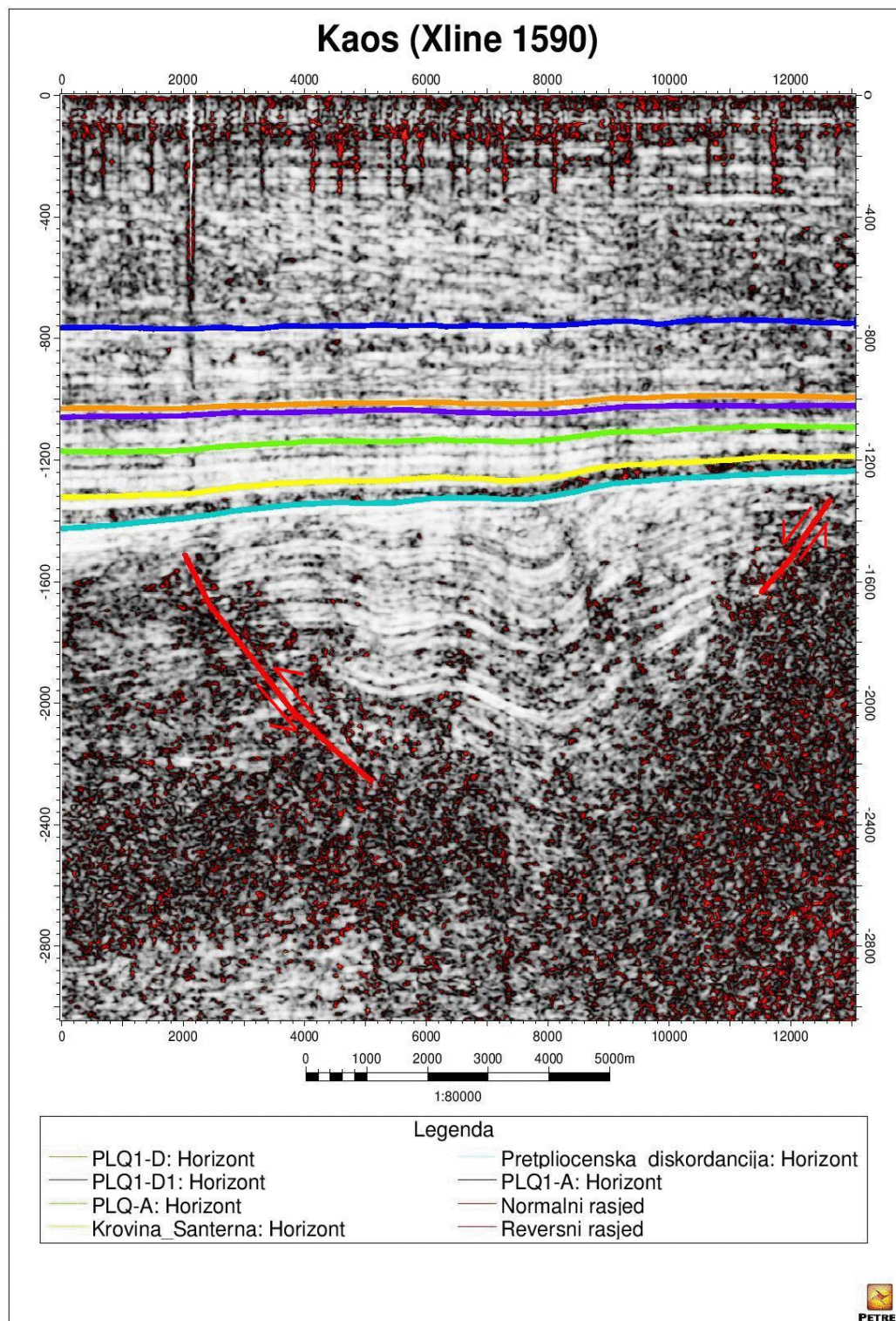
6.3.5. Atributi kontinuiteta

Atributima kontinuiteta prate se sličnosti, odnosno različitosti između susjednih tragova. Koriste se za određivanje lateralnih diskontinuiteta uzrokovanih rasjedanjem ili stratigrafskim promjenama tj. uvelike pomažu pri strukturno–tektonskoj interpretaciji. Atributi kontinuiteta su: određivanje ruba, poboljšanje slike, nagib i azimut, kaos i varijanca.

U ovom diplomskom radu izrađen je atribut kaosa. Atribut kaosa ukazuje na područja kaotičnog signala. Ima jednaki rezultat za jake i slabe amplitude, a veće vrijednosti odgovaraju diskontinuitetima kao što su rasjedi. Na slikama 29 i 30 može se vidjeti kako se veće vrijednosti atributa kaosa nalaze u pretpliocenskom dijelu gdje su interpretirani i rasjedi. Crvena područja na profilima ukazuje na veće vrijednosti kaosa, no to ne treba ukazivati da je na svakom tom području prisutan rasjed. Rasjedi koji su interpretirani nalaze se u kaotičnom signalu, no na temelju samog atributa kaosa ne bi se mogli interpretirati. Ovaj atribut, kao ni trenutna frekvencija, nije poslužio značajnom poboljšanju kod strukturno–tektonske interpretacije na ovom polju.



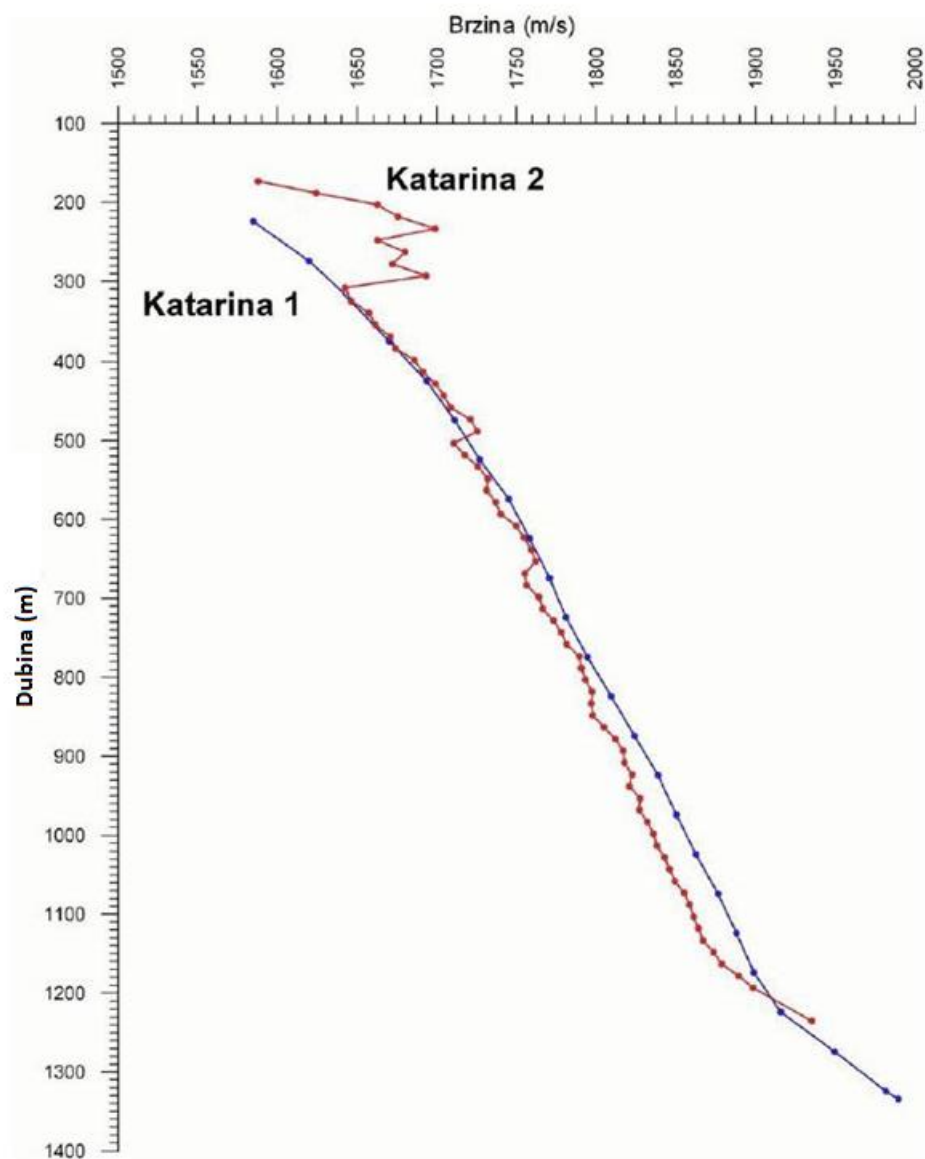
Slika 29: Atribut kaosa na uzdužnom profilu 11650.



Slika 30: Atribut kaosa na poprečnom profilu 1590.

6.4. Vremenske i dubinske karte

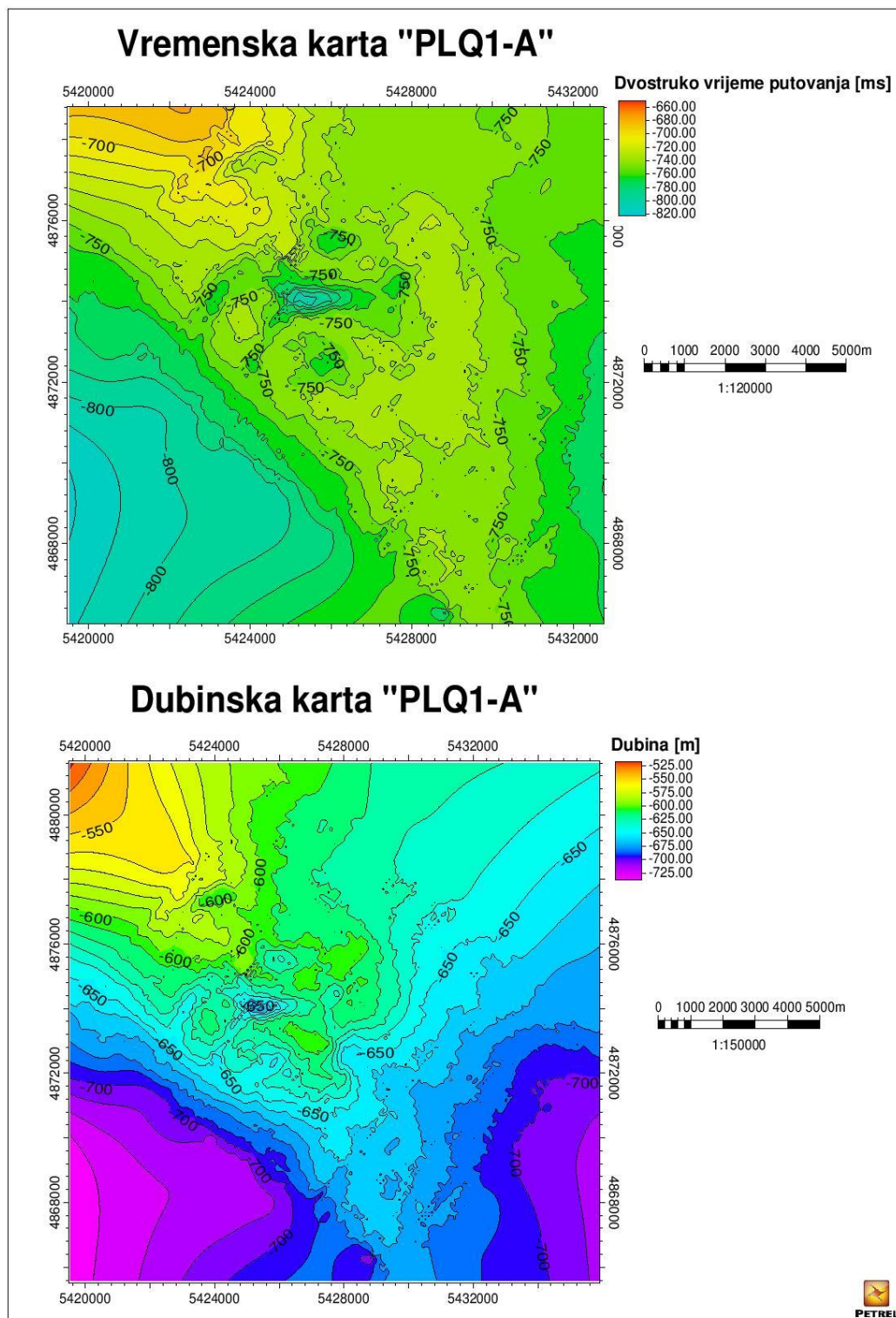
Nakon interpretacija horizonata i rasjeda pristupilo se izradi strukturnih karata. Prvo su izrađene vremenske karte s vremenskim mjerilom dvostrukog vremena putovanja vala. Zatim su pomoću zakona brzina napravljene dubinske karte. Zakoni brzina pomoću kojih su izrađene dubinske karte prikazani su na slici 31. Na slikama 32 do 37 prikazane su za svaki interpretirani horizont vremenska i dubinska karta.



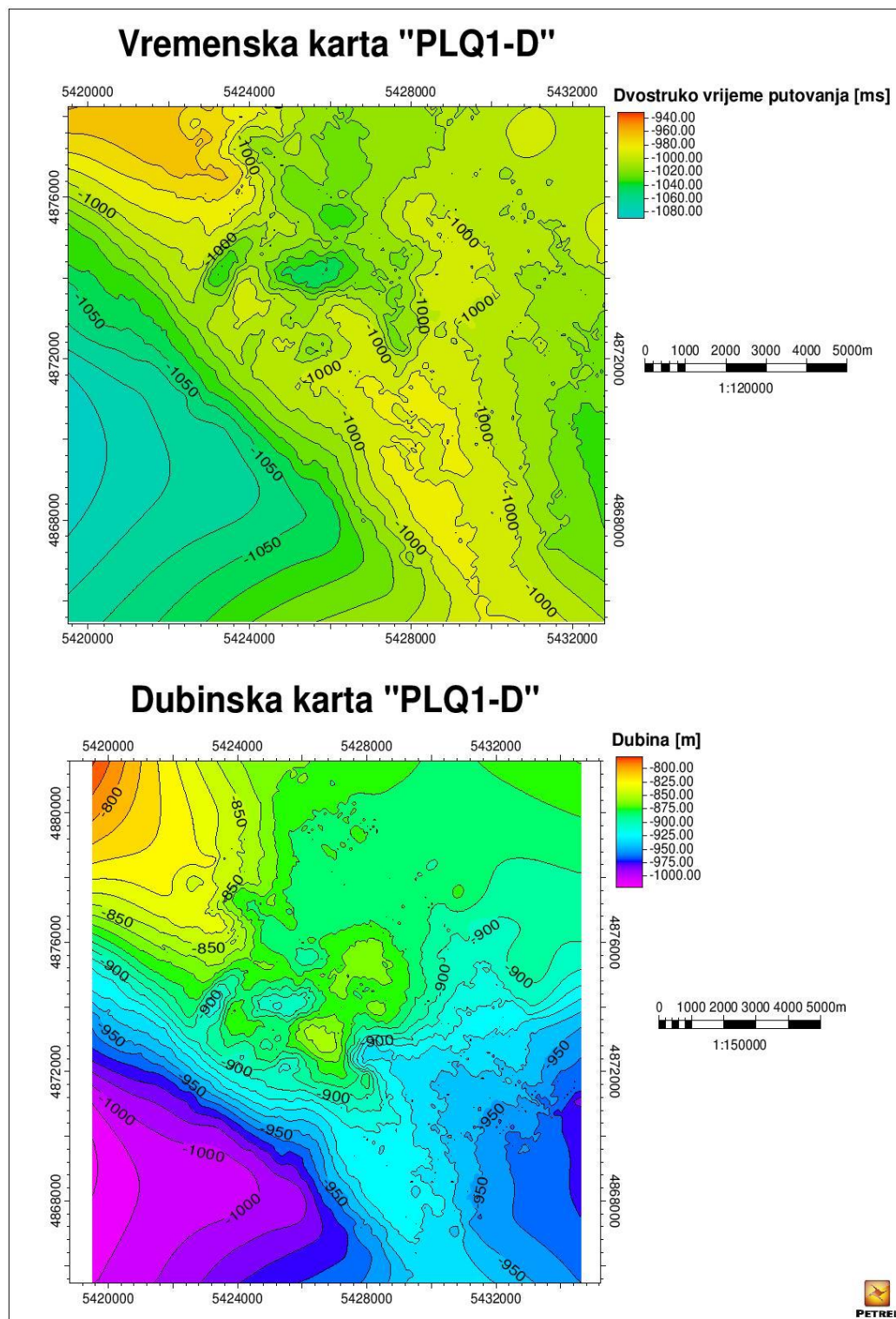
Slika 31: Zakoni brzina mjereni na bušotinama Katarina-1 i Katarina-2.

Interpretirano ležište PLQ1–A najpliće je i najmasivnije ležište, a utvrđeno je bušotinom Katarina–2. Raspon dubine krovine ležišta je od 520 do 730 m a ukupna debljina iznosi 21 m. Zamka ovog ležišta je kombiniranog strukturno–stratigrafskog tipa nastala erodiranjem pješćanih horizonata distribucijskim kanalom pleistocenske starosti. Na kartama se vidi blago izduženje strukture u smjeru SZ–JI koje bi odgovaralo antiklinalnoj strukturi ležišta. Ležište PLQ1–D ukupne debljine je 5,5 m a krovina se nalazi na dubini od 780 do 1020 m. Zamka za ovo ležište je strukturnog tipa, tj. antiklinalna zamka. Na karta se mogu vidjeti povišene vrijednosti u sredini područja istraživanja, dok je struktura izduženja u smjeru SZ–JI što je ugrubo vidljivo na kartama. Ležište PLQ1–D1 utvrđeno je bušotinom Katarina–2 dir a krovina se nalazi na dubini od 810 do 1050 m. Ovo ležište je gotovo isto kao i prethodno, te se nalazi na maloj dubini neposredno ispod ležišta PLQ1–D. Također je zamka strukturnog tipa te se na kartama to također može vidjeti. Krovina ležišta PLQ–A nalazi se na dubini od 950 do 1190 m, a ležište je ukupne debljine od 7 m. Na kartama se može odmah uočiti problematičan dio u sjeverozapadnom području. Uzrok tomu je diskordantno nalijezanje krovine ovog ležišta na formaciju Santerno u tom dijelu. Tamo ovaj horizont nije bio ni interpretiran nego je izvršena ekstrapolacija u računalnom programu Petrel koja nije dala dobar prikaz karte u tom dijelu. Ležište je heterogene građe sastavljeno od više pješćanih proslojaka međusobno odijeljenim proslojcima lapora. Zamka za ovo ležište je strukturna, antiklinalna forma. Može se uočiti izdužena struktura pružanja SZ–JI ne obazirući se na problematičan sjeverozapadni dio.

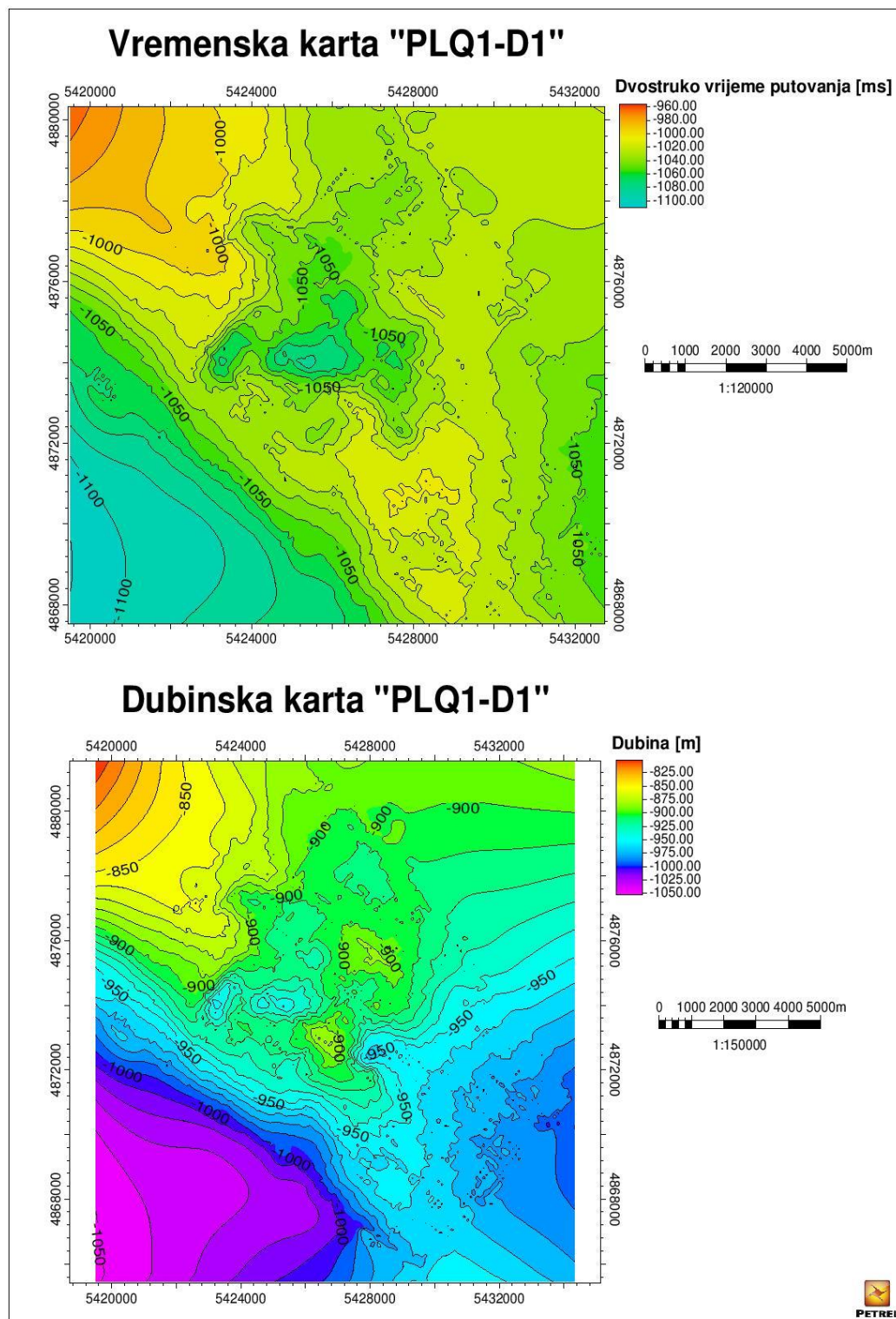
Krovina formacije Santerno interpretirana je kao podina kvartarnih turbidita, tj. predstavlja krovinu plio–pleistocenskih šejlova na koju isklinjavaju turbiditi. Utvrđena je na dubini od 750 do 1530 m. Krovina Santerno predstavlja tektonsko–erozijsku diskordanciju, te bazu turbiditne sekvencije. Pružanje je SZ–JI a smjer nagiba jugozapad. Pretpliocenska diskordancija je u geološkom smislu definirana kao kontakt šejla i eocenskih vapnenaca. Nalazi se na dubinama od 870 do 1620 m, ima isto pružanje kao i formacija Santerno, SZ–JI, te također isti smjer nagiba prema jugozapadu.



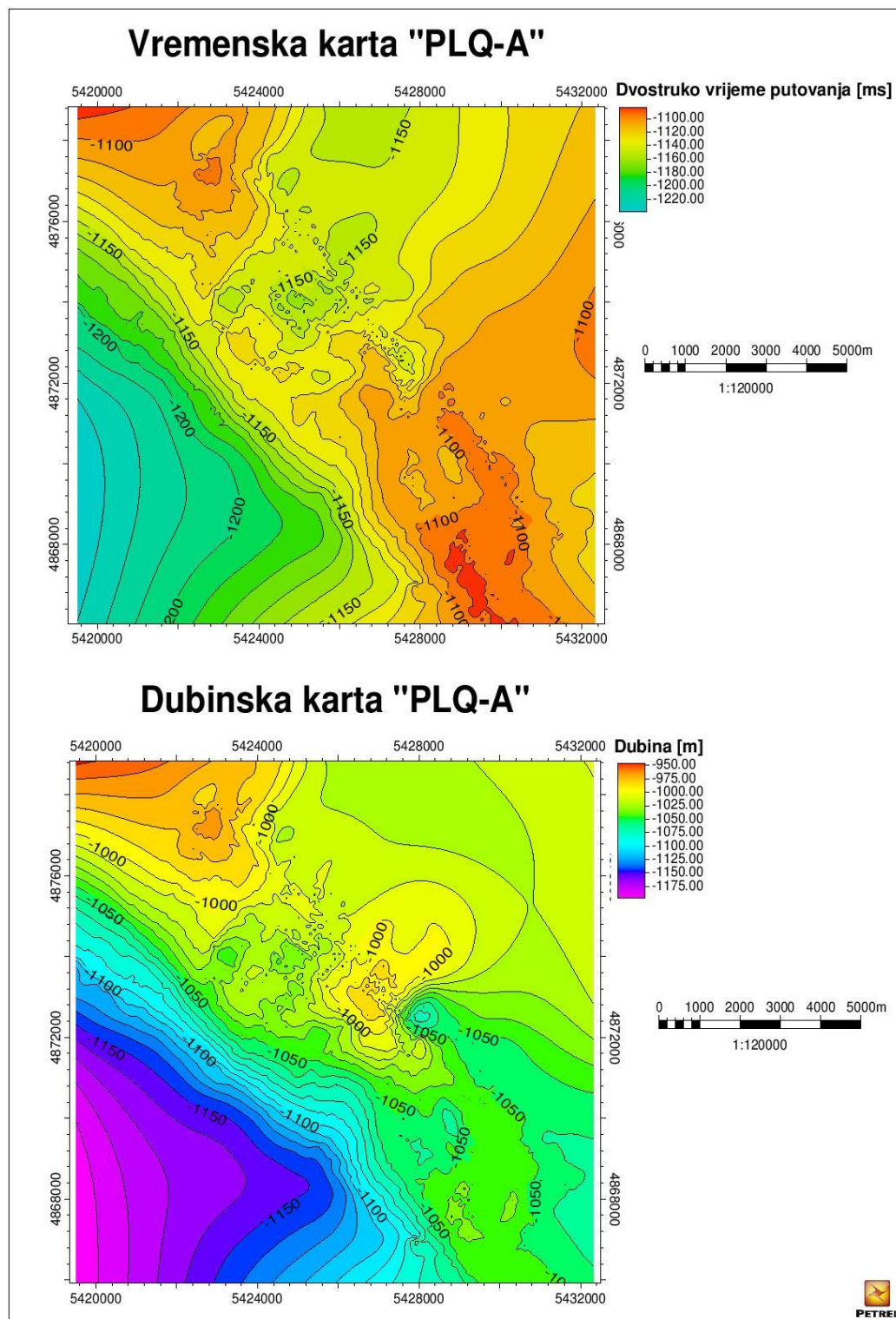
Slika 32: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ1-A.



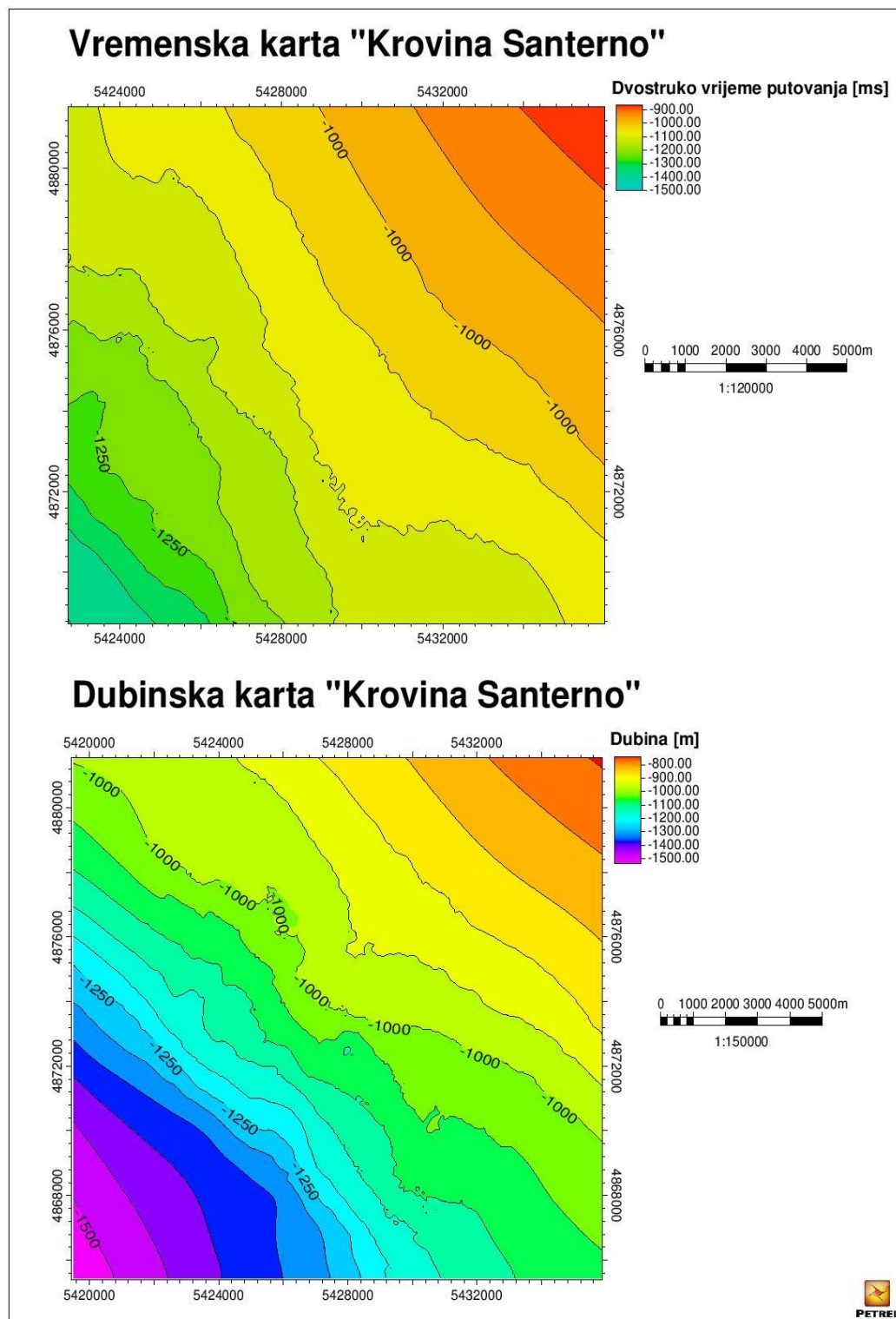
Slika 33: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ1-D.



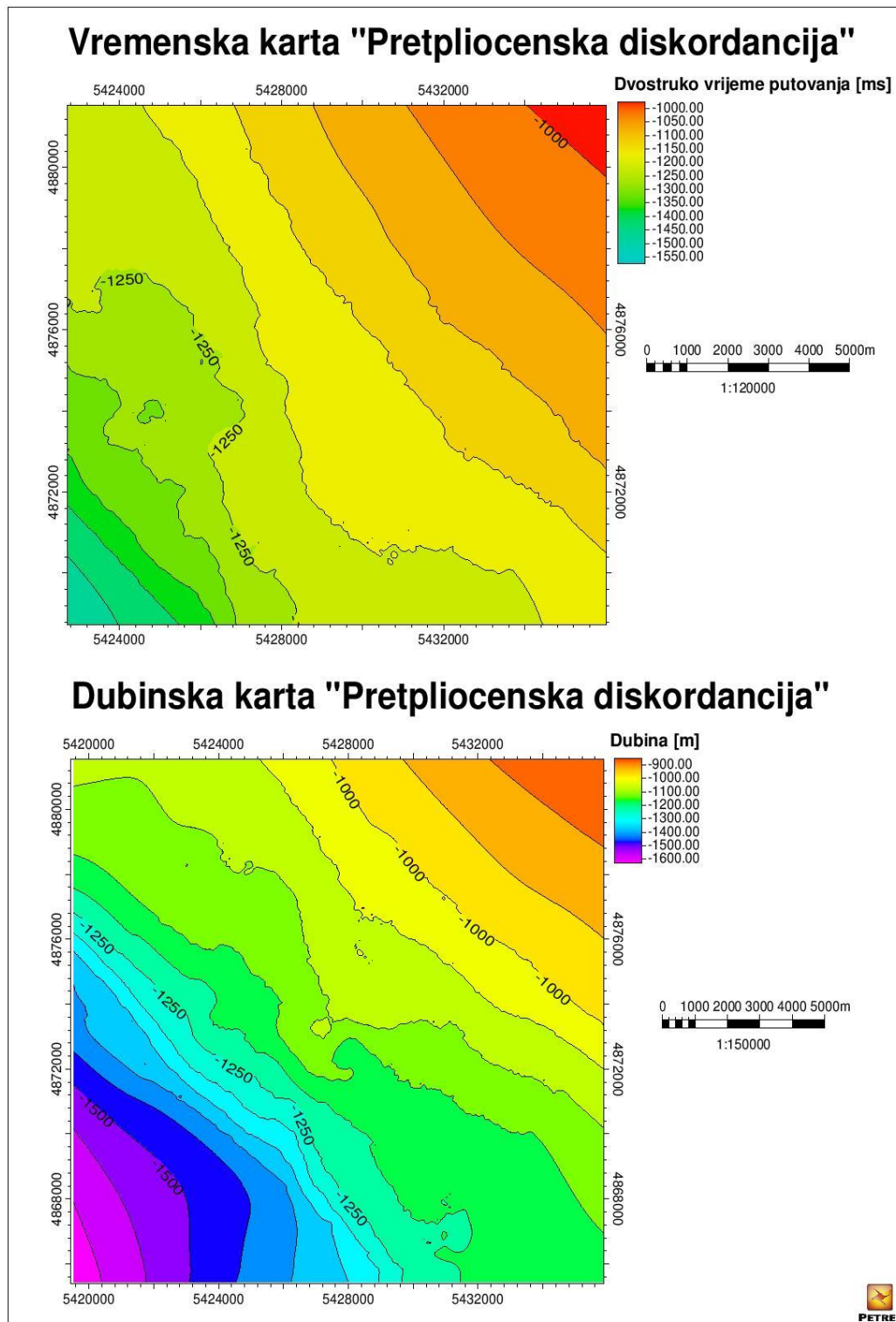
Slika 34: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ1–D1.



Slika 35: Vremenska i dubinska karta za ležište PLQ-A.



Slika 36: Vremenska i dubinska karta horizonta "Krovina Santerno".



Slika 37: Vremenska i dubinska karta horizonta "Pretpliocenska diskordancija".

7. ZAKLJUČAK

Trodimenzionalana seizmička interpretacija izvedena je na plinskom polju Katarina u računalnom programu Petrel 2014. Interpretirane su krovine sljedećih ležišta: PLQ1–A, PLQ1–D, PLQ1–D1 i PLQ–A. Također, interpretirana je krovina formacije Santerno te pretpliocenska diskordancija.

U procesu identifikacije horizonata, koji je bio prvi korak u interpretaciji, napravljeni su sintetski seizmogrami za bušotine Katarina–1 i Katarina–2. Oni su omogućili povezivanje podataka o dubini ležišta s podacima sa seizmičkih profila u vremenskoj domeni. Seizmogrami su pokazali vrlo dobro podudaranje refleksa. Najbolje podudaranje dobilo se za refleks „Pretpliocenska diskordancija“ na Katarini–1 te PLQ1–A na Katarini–2. Interpretacija svih horizonata je napravljena na svakom desetom uzdužnom i poprečnom profilu. Nakon toga, u koraku strukturno–tektonske interpretacije dobivene su karte na kojima je prikazano dvostruko vrijeme putovanja vala do granice. Pomoću zakona brzina koji se nalazi u bazi podataka u Petrelu, iz vremenskih karata dobivene su dubinske karte izražene u metrima. Na kartama se ugrubo može vidjeti struktura izdužene antiklinale pružanja SZ–JI koja je bila i pretpostavljena na plinskom polju Katarina. Za horizonte koji ne predstavljaju krovine ležišta, „Krovina Santerno“ i „Pretpliocenska diskordancija“, dubinske karte pokazuju da imaju pružanje SZ–JI a nagib prema jugozapadu. Također, u ovom koraku interpretirana su tri rasjeda u pretpliocenskom dijelu. Te starije naslage bile su pod utjecajem tektonske aktivnosti koja je uzrokovala boranje i rasjedanje. Jedan reversni rasjed je interpretiran kao tip *Fault propagation fold* na temelju strukture, dok su jedan normalni i drugi reversni rasjed interpretirani na seizmičkim profilima na temelju jasnih prekida refleksa.

Izračunavanje seizmičkih atributa omogućilo je pouzdanije i lakše praćenje horizonata te pouzdanu interpretaciju položaja rasjeda i karaktera pomaka po njima. Izrađeni su sljedeći atributi na cijelom 3D volumenu podataka: trenutna faza, kosinus trenutne faze, trenutna amplituda, trenutna frekvencija i atribut kontinuiteta (kaos). Trenutna faza i kosinus trenutne faze su dali jako dobre rezultate u interpretiranju horizonata. Pomoću tih atributa refleksi su se mogli pratiti i na mjestima gdje nisu jako izraženi, kao što su „zone sjene“ ispod „bijelih mrlja“. Također su se pomoću njih potvrdili prekidi refleksa koji su ukazivali na postojanje rasjeda. Trenutna amplituda je bila korisna kod ležišta gdje postoji „bijela mrlja“, ponajviše

kod PLQ1–A. Kako su „bijeke mrlje“ mjesta na profilu gdje su amplitude vrlo visoke bilo je relativno lagano interpretirati krovine ležišta koje karakterizira ta pojava. Kod interpretacije pretpliocenske diskordancije pomoću trenutne amplitude se moglo točno odrediti refleks po kome će se pratiti taj horizont na seizmičkim profilima. Uz upotrebu trenutne frekvencije i kaosa nije se moglo doći do značajnijeg poboljšanja u interpretaciji pa se može reći da ova dva atributa nisu dali zadovoljavajuće rezultate za ovo polje.

8. LITERATURA

- CAROTENUTO, M., MARIANI, M. & POMPADORO, G. (2000): Tehnical Evaluation of the Exploration Potential, Geological and geophysical project, final report. Fond stručne dokumentacije AGIP-a.
- CHIRI, C., CIRONE, C., ZAMBELLI, S. & LOINGER, E. (1997): Aiza-Laura 3D project, Seismic acquisition feasibility study. Fond stručne dokumentacije AGIP-a.
- JAKOVAC, B. (2006): Proizvodna platforma na plinskom polju Katarina. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko–geološko–naftni fakultet. Diplomski rad.
- GARDNER, G.H.F., GARDNER, L.W. & GREGORY, A.R. (1974): Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39, 770–780.
- OREŠKOVIĆ, J. (2006): Procjena ležišnih značajki korištenjem seizmičkih atributa i seizmičkog modeliranja na primjenu polja Stari Gradac. Zagreb. Rudarsko–geološko–naftni fakultet. Zagreb.
- OSTOJČIĆ, K. (2010): Naftogeološke značajke hrvatskih plinskih polja u sjevernom Jadranu. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko–geološko–naftni fakultet.
- PIŠONIĆ, I. (2012): Trodimenzionalna seizmička interpretacija plinskog polja Katarine uporabom programskog programa Petrel. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko–geološko–naftni fakultet. Diplomski rad.
- PRELOGOVIĆ, E. & KRANJEC, V. (1983): Geološki razvitak područja Jadranskog mora. Pomorski zbornik. Rijeka.
- SAHADŽIĆ, S., VIDAČEK, R., ŽIVKOVIĆ, M. & PERIĆ, M. (2003): Katarina field reservoir study. Fond stručne dokumentacije. INAGIP. Zagreb.
- SCHLUMBERGER (2007): Interpreter's guide to seismic attributes. Petrel 2007.1.
- SHERIFF, R.E. (1978): A first course in geophysical exploration and interpretation. International Human Resources Development Corporation. Boston.
- ŠUMANOVAC, F. (2007): Geofizička istraživanja podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko–geološko–naftni fakultet.
- ŠUMANOVAC, F. (2010): Razvoj procedura geofizičke interpretacije radi povećanja rezervi u geološki složenim ležištima, plinsko polje Katarina. – 1. izvješće.
- ŠUMANOVAC, F. (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Sveučilište u Zagrebu: Rudarsko–geološko–naftni fakultet.

- TANNER, M.T., KOEHLER, F. & SHERIFF, R.E. (1979): Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44, 1041–1061.
- VALENTE, G. (2002): Well seismic data processing Katarina–2. Fond stručne dokumentacije ENI.
- VELIĆ, J. (2007): Geologija ležišta nafte i plina. Sveučilište u zagrebu: Rudarsko–geološko–naftni fakultet.
- VIDAČEK, R. (2005): Elaborat o rezervama prirodnog plina eksploatacijskog polja Marica, plinsko polje Katarina. Fond stručne dokumentacije INA–e.
- VIDAČEK, R. & VIDAČEK, O. (2006): Post well appraisal of Katarina–1 dir, Katarina–2 dir, Katarina–3 dir. Fond stručne dokumentacije INAGIP.