

Seizmička interpretacija ležišta p1 i p8 naftno-plinskog polja Struša u programskom paketu Petrelu

Kavelj, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:464185>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

DIPLOMSKI STUDIJ GEOLOGIJE

**SEIZMIČKA INTERPRETACIJA LEŽIŠTA p1 I p8 NAFTNO-
PLINSKOG POLJA STRUŠCA U PROGRAMSKOM PAKETU
PETRELU**

DIPLOMSKI RAD

PETAR KAVELJ

G-148

Zagreb, 2015.

SEIZMIČKA INTERPRETACIJA LEŽIŠTA p1 I p8 NAFTNO-PLINSKOG POLJA STRUŠCA U PROGRAMSKOM PAKETU PETRELU

PETAR KAVELJ

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 načinjena je trodimenzionalna seizmička interpretacija naftno-plinskog polja Strušca. Cilj ovog rada je prikazati interpretaciju karakterističnih horizonata p1 i p8, EK-markera λ i R ϕ , interpretaciju rasjeda te strukturne karte u programskom paketu Petrelu. Radi pouzdanije interpretacije načinjen je sintetski seizmogram za bušotinu O-134 kako bi se točnije povezali seizmički podaci s mjerenim podacima u bušotinama. Polje Stružec predstavlja brahiantiklinala dužine oko 6 km i široke oko 1,5 km. Geološke značajke ležišta p1 predstavlja pješčenjak donjeg pontaa, dok za ležište p8 predstavlja pješčenjak gornjeg pontaa. Interpretacija rasjeda je većinom rađena na klasičnim seizmičkim profilima. Rasjedi su svrstani u dvije skupine: reversnih, pružanja istok-zapad i normalnih, generalnog pružanja sjever-jug. Korišteni su seizmički atributi varijance i kaosa kod interpretacije rasjeda i seizmički atribut kosinus faze kod interpretacije horizonata i EK-markera. Korištenjem seizmičkih atributa dobivena je pouzdanija interpretacija horizonata i rasjeda kod tektonski vrlo razlomljenih zona radi jasnijeg definiranja struktura u podzemlju. Brahiantiklinala je prikazana strukturnim kartama u vremenskom i dubinskom mjerilu po oba horizonta i EK-markera. Strukturni oblici i rasjedi se mogu pratiti na svim horizontima te se izgled strukturnih karata vrlo malo mijenja.

Ključne riječi: 3D-seizmički podaci, seizmička interpretacija, sintetski seizmogram, seizmički atributi, Petrel.

Diplomski rad sadrži: 67 stranice, 40 slika i 32 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, RGNF
Pomoć pri izradi: Doc. dr.sc. Jasna Orešković, RGNF
Nataša Balaško, mag.ing. geol., RGNF

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, RGNF
Doc. dr. sc. Jasna Orešković, RGNF
Prof. dr. sc. Ivan Dragičević, RGNF

Datum obrane: 30.rujna 2015.

University of Zagreb:

Master Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering:

**SEISMIC INTERPRETATION p1 i p8 RESERVOIRS OF OIL-GAS FIELD STRUŽEC IN
SOFTWARE PACKAGE PETREL**

PETAR KAVELJ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Institute of geophysical exploration and measurement mining
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Three-dimensional seismic interpretation of Stružec oil-natural gas field was made. Interpretations of characteristic horizons p1 and p8, e-log marker λ and $R\phi$, interpretation of a fault, and structural maps in Petrel software package. For a more reliable interpretation, a synthetic seismogram of the well O-134 was made in order to more precisely connect seismic data with the data measured in the wells. Stružec field is a brahianticline about 6 km long and 1,5 km wide. Geologically the reservoir p1 is characterised by sandstone of lower Pontian, while the reservoir p8 is characterised by sandstone of upper Pontian. Interpretation of the faults was mostly done with classic seismic profiles. Faults were classified into two groups: reverse, east-west oriented faults; and normal, generally north-south oriented faults. Seismic attributes of variance and chaos were used for interpreting the faults, and seismic attribute of cosine phase was used for interpreting horizons and e-log markers. By using seismic attributes, a more reliable interpretation of horizons and faults was obtained in tectonically very fractured zones. Brahianticline is shown with structural maps in time and depth scales along both horizons and e-log markers. Structural shapes and faults can be monitored on all horizons and the look of the structural maps does not change much.

Keywords: 3D-seismic data, seismic interpretation, synthetic seismogram, seismic attributes, Petrel.

Thesis contains: 67 pages, 40 figures, 32 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Full Professor Franjo Šumanovac, PhD
Technical support and assistance: Assistant Professor Jasna Orešković, PhD
Nataša Balaško, Assistant

Reviewers: Full Professor Franjo Šumanovac, PhD
Assistant Professor Jasna Orešković, PhD
Full Professor Ivan Dragičević, PhD

Date of defense: 30.9.2015. Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering;
University of Zagreb

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Geografski položaj	2
3. Dosadašnja istraživanja	3
4. Geologija šireg područja	6
5. Geologija užeg područja.....	8
6. Geološke karakteristike ležišta.....	11
6.1. Ležište p1	11
6.2. Ležište p8	11
7. Kratki prikaz metode 3D seizmike.....	12
7.1. Snimanje 3D seizmike.....	12
7.2. Obrada podataka.....	12
7.3. Seizmičke brzine i sintetski seizmogram	15
8. Seizmička interpretacija	21
8.1. Računalni program Petrel.....	21
8.2. Praćenje seizmičkih horizonata na naftnom polju Stružec.....	21
9. Analiza osnovnih seizmičkih atributa	36
9.1. Kompleksni seizmički trag.....	36
9.2. Upotreba seizmičkih atributa u interpretaciji	41
10. Strukturno-tektonska interpretacija.....	51
10.1. Interpretacija rasjeda	52
10.2. Strukturne karte	54
11. Zaključak.....	63
12. Popis literature	65

Popis slika

Slika 2-1. Položaj polja Stručec	2
Slika 3-1. Dio karte gravimetrijskog reziduala Savske i Dravske potoline	3
Slika 4-1. Strukturne jedinice u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena	7
Slika 5-1. Odnos EK–markera i repera, litostratigrafskih i kronostratigrafskih jedinica u Savskoj depresiji	9
Slika 7-1. Skica skupa mjerenih CDP-seizmograma i korigiranih za NMO	13
Slika 7-2. Položaj migriranog i nemigriranog reflektora	14
Slika 7-3. Izračunavanje sintetskog seizmograma pomoću metode konvolucije.....	17
Slika 7-4. Standardni polaritet za pozitivan koeficijent refleksije	18
Slika 7-5. Sintetski seizmogram izračunat za bušotinu O-134 s pripadajućim horizontima	20
Slika 8-1. Položaji prikazanih profila u tekstu i položaji određenih bušotina	22
Slika 8-2. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu L 215, koji prolazi središnjim područjem antiklinale i zahvaća zonu normalnih rasjeda.....	24
Slika 8-3. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu L 240, koji prolazi središnjim područjem antiklinale i zahvaća zonu normalnih rasjeda.....	25
Slika 8-4. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu L 300, koji prolazi istočnim područjem antiklinale	26
Slika 8-5. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu T 3600, koji prolazi kroz susjedno polje Okoli.....	28
Slika 8-6. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu T 3815, koji prolazi kroz sjeverni dio polja i prikazuje normalne rasjede unutar reversnih rasjeda	29
Slika 8-7. Interpretacija horizonta i rasjeda na profilu T 3830, koji prolazi sjevernim dijelom polja te prikazuje normalne rasjede unutar reversnih.....	30
Slika 8-8. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu T 3875, koji prolazi dijagonalno kroz središnji, tektonski vrlo razlomljenog dijela antiklinale	32
Slika 8-9. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu T 3895, koji prolazi dijagonalno kroz središnji, tektonski vrlo razlomljeni dio antiklinale	33
Slika 8-10. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu U-1, koji prolazi uzdužno po središnjem dijelu strukture	34
Slika 8-11. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu P-1, koji prolazi poprečno po istočnom, reversno rasjednutom, dijelu strukture	35
Slika 9-1. Kompleksni seizmički trag.....	37
Slika 9-2. Prikaz seizmičkog vala u polarnim kordinatama (A(t)-trenutna amplituda).....	38
Slika 9-3. Grafički prikaz seizmičkog traga i trenutne faze.....	39
Slika 9-4. Interpretacija horizonata i EK-markera pomoću atributa kosinus faze	43

Slika 9-5. Interpretacija horizonata i EK-markera pomoću atributa kosinusa faze	44
Slika 9-6. Korištenje atributa varijance kod interpretacije rasjeda na profilu L 300	46
Slika 9-7. Korištenje atributa varijance kod interpretacije rasjeda na profilu T 3600	47
Slika 9-8. Korištenje atributa varijance kod interpretacije rasjeda na profilu T 3815	48
Slika 9-9. Korištenje atributa kaosa kod interpretacije rasjeda na profilu L 300.....	49
Slika 9-10. Horizontalni presjek varijance na 952 ms	50
Slika 9-11. Horizontalni presjek varijance na 1200 ms	51
Slika 10-1. Horizontalni vremenski presjek (952 ms) s položajima i oznakama rasjeda	53
Slika 10-2. Strukturna karta u vremenskoj domeni po horizontu p8	55
Slika 10-3. Strukturna karta u dubinskoj domeni po horizontu p8	56
Slika 10-4. Strukturna karta u vremenskoj domeni po horizontu p1	57
Slika 10-5. Strukturna karta u dubinskoj domeni po horizontu p1	58
Slika 10-6. Strukturna karta u vremenskoj domeni po EK-markeru λ	59
Slika 10-7. Strukturna karta u dubinskoj domeni po EK-markeru λ	60
Slika 10-8. Strukturna karta u vremenskoj domeni po EK-markeru $R\phi$	61
Slika 10-9. Strukturna karta u dubinskoj domeni po EK-markeru $R\phi$	62

1. Uvod

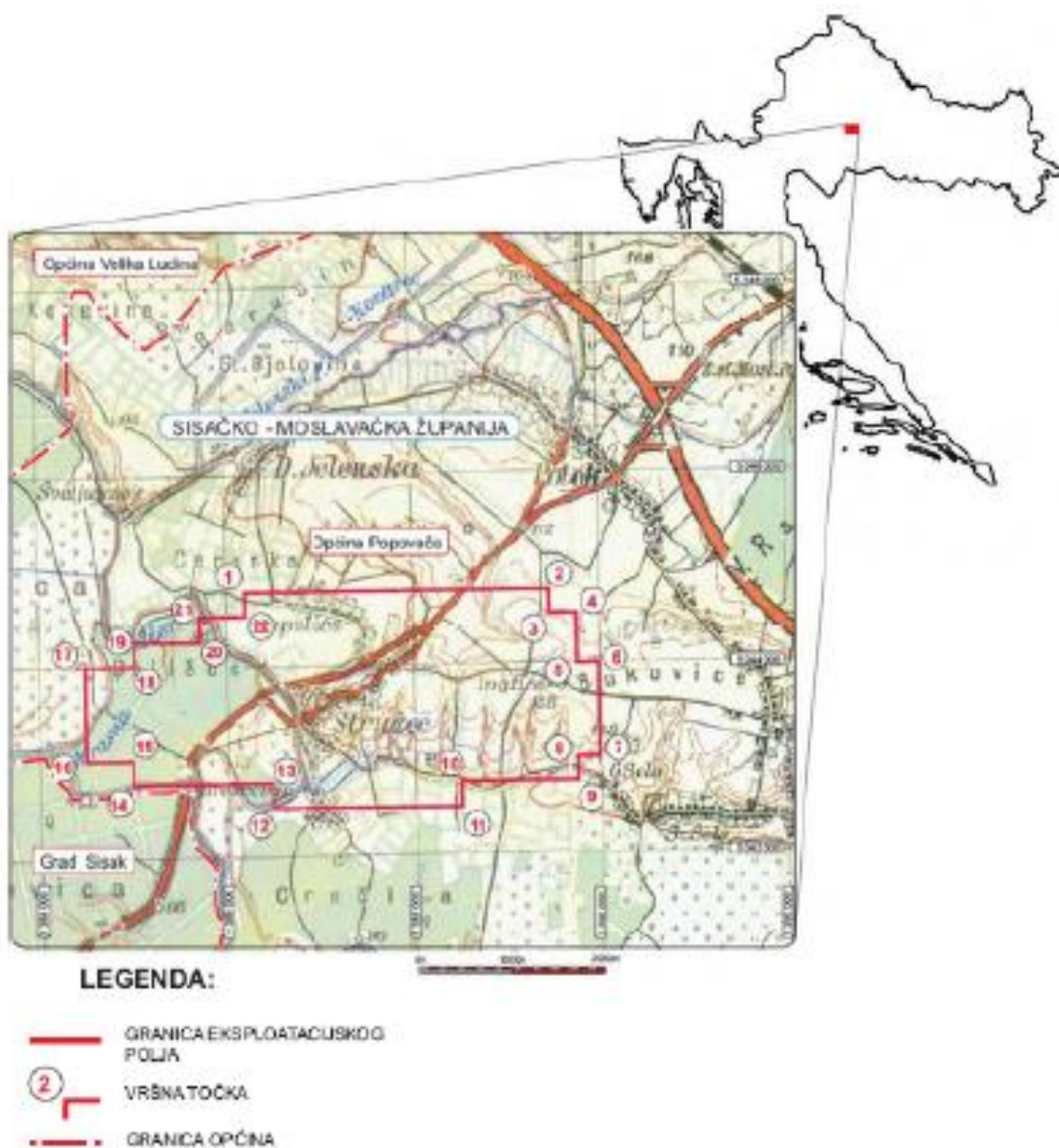
U ovom radu načinjena je trodimenzionalna seizmička interpretacija naftno-plinskog polja Stružec uporabom seizmičkih atributa u programskom paketu Petrelu¹. Polje Stružec se nalazi na području istoimenog sela u općini Popovača 55 km jugoistočno od Zagreba. Polje geotektonski pripada dubljem, zapadnom dijelu Savske depresije

Osnovni cilj ovog rada je strukturno-tektonska interpretacija krovine i podine karakterističnih horizonata i EK-markera λ i R ϕ . Time je dobiveno strukturno-tektonsko rješenje interpretiranog područja. Radi pouzdanije interpretacije seizmičkih horizonata i rasjeda primijenjeni su seizmički atributi. Korišteni su ponajviše seizmički atributi kosinus faze, varijance i kaosa. Prilikom izrade seizmičkih atributa za cijeli volumen 3D seizmičkih podataka nastojala se povećati preciznost interpretacije te jasnije definirati strukture u podzemlju.

¹ Petrel 2013 E&P softverska platforma tvrtke Schlumberger. Sva prava pridržana.

2. Geografski položaj

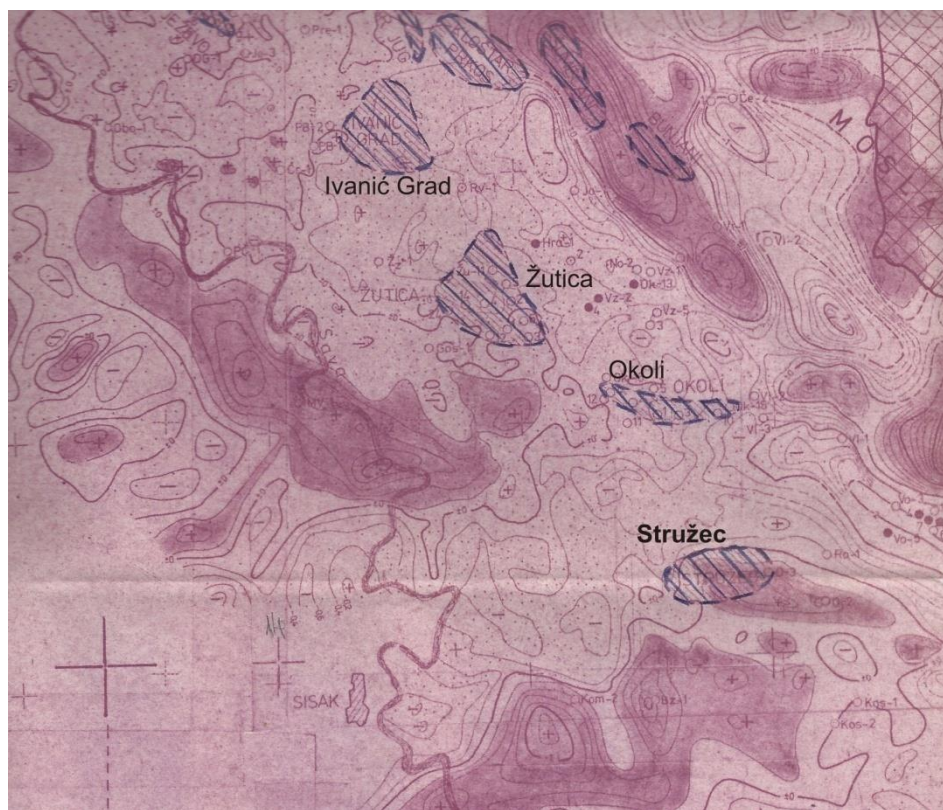
Naftno polje Stružec nalazi se na području istoimenog sela općine Popovača u Sisačko-moslavačkoj županiji (slika 2-1). Nalazi se na pogodnom geografskom i prometnom položaju 55 km jugoistočno od Zagreba, a prema jugozapadu oko 15 km nalazi se Sisak. Nadmorska visina eksploatacijskog polja varira od 135 m na istočnom brežuljkastom dijelu, te 95 m na zapadnom ravničarskom dijelu. Što se hidrologije tiče, kroz zapadno polje protječe Obžev potok, dok je rijeka Lonja južnije od polja.



Slika 2-1. Položaj polja Stružec (ŽUŽUL i dr., 2011)

3. Dosadašnja istraživanja

Istraživanja na području polja započela su 1940. godine gravimetrijskim mjerenjima. Karta gravimetrijskog reziduala, izračunata s polumjerom od 2 km, ukazuje na izduženu pozitivnu anomaliju pružanja zapad-istok s vrijednošću reziduala većom od +8 mgal u maksimumu (slika 3). Uzročnik anomalije je antiklinala Osekovo, unutar koje su otkrivena komercijalna ležišta ugljikovodika. Struktura se pruža zapad-istok od Stručca prema Osekovu, i postupno tone prema istoku, što je u skladu sa smanjenjem anomalije reziduala (ZAGORAC, 1975). Međutim, polje Stružec zahvaća samo vršni i zapadni dio maksimuma reziduala te njegovo rubno područje. Prema gravimetrijskom rezidualu struktura je puno izduženija nego samo polje. Međutim, naknadna istraživanja su pokazala da polje Stružec ipak zahvaća vršni dio cijele strukture. Prema tome, gravimetrija jasno ukazuje na antiklinalnu, uzdignutu strukturu, ali je prikazuje izduženijom nego u stvarnosti.



Slika 3-1. Dio karte gravimetrijskog reziduala Savske i Dravske potoline (ZAGORAC, 1975)

Bušotine polja nose naziv Osekovo prema nazivu antiklinale, a prva istraživačka bušotina O-1 izrađena je 1941. godine (DEVIC' i dr., 1976), koja nije smještena u vršni dio maksimuma anomalije nego istočnije od njega. Jezgrovanjem su utvrđeni tragovi ugljikovodika u stijenama za koje se smatralo da pripadaju naslagama Abichi, to jest Kloštar Ivanić formaciji (DEVIC' i dr., 1976). Istraživanja su nastavljena tek 1951. godine bušotinom O-2 koja je udaljena 200 m od bušotine O-1. Cilj je bio probušiti cijeli slijed sedimentata do temeljnog gorja i ispitati naslage u kojima su otkriveni tragovi ugljikovodika. Međutim, na konačnoj dubini od 2420 m tek je otkriven dio naslaga Banatica koje pripadaju Ivanić-Grad formaciji, a bušenje je obustavljeno zbog čestih zaglava. Ispitivanjima su dobiveni samo tragovi plina.

Opsežnija geofizička istraživanja 2D-refleksijskim seizmičkim mjerenjima izvedena su 1956. i 1957. godine. Istraživanja su proširena na dio Savske depresije, izvedena na širem području oko Osekova, povezujući gravimetrijske anomalije Komarevo, Osekovo i Mramor Brdo. Strukturna karta izrađena na temelju seizmičkih podataka općenito je definirala strukturnu cjelinu, iako je sjeverozapadni dio gravimetrijske anomalije Osekovo na području Struša bio bez refleksa. Međutim, na svim seizmičkim profilima koji su presijekali područje bez refleksa, uočeno je uzdizanje slojeva prema bezrefleksnoj zoni. Na osnovi interpretacije seizmičkih podataka izrađena je bušotina O-3 s ciljem daljnjeg istraživanja strukture Osekovo. Smještena je u vršnom dijelu područja s dobivenim, vidljivim refleksima. Bušotina O-3 dosegla je dubinu 2364 m, probušivši slijed sedimentnih stijena do prevalencienezijskih naslaga (DEVIC' i dr., 1978). Nafta je otkrivena u tri pješčenjačka sloja imenovana p_1 , P_1 i P_2 koji su definirani kao donji dio naslaga Abichi (DEVIC' i dr., 1976). Ekvivalentni slojevi otkriveni su 300 m pliće nego u bušotini O-1. Pretpostavljajući da se slojevi i dalje uzdižu prema zapadu, prema zoni bez refleksa, bušotina O-4 postavljena je oko 3 km zapadno od bušotine O-3. Ekvivalentni slojevi otkriveni su oko 180 m pliće nego u bušotini O-3. Potvrđeno je zasićenje ugljikovodicima u spomenutim ležištima, a utvrđeno je zasićenje i u pješčenjačkoj seriji A koja se nalazi ispod P_2 . U početnoj fazi razrade polja otkrivena su i dublja ležišta, serije *a* i *b*. Bušotinom O-9 utvrđeno je zasićenje naftom u sloju b_1 , a tek je kasnije bušotinama O-134 α i O-135 probušena cijela serija *b* te su otkrivena najdublja ležišta $b_8 - b_{12}$.

Pješčenjačke serije zasićene ugljikovodicima raščlanjene su do 2010. godine na 37 ležišta (ŽUŽUL i dr., 2011). Od mlađih naslaga prema starijima to su: p_9 , p_8 , p_7 , p_6 , p_5 , p_4 , p_3 , p_{3x} i

p_2 (serija p), p_1 , P_1 , P_2 , A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5 , A_6 i A_7 (serija A), a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 i a_6 (serija a) i b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 , b_6 , b_7 , b_8 , b_9 , b_{10} , b_{11} i b_{12} (serija b). Proizvodnja na polju Stružec traje od 1960.godine. Prema stanju iz 2010. godine ukupno je izrađeno 149 bušotina sa 151 kanalom: proizvodnih naftnih bušotina je 61, plinskih proizvodnih je 7, 16 je utisnih za otpadne vode, 47 je označeno mjernima, 16 je tehnički likvidirano i 4 su napuštene (ŽUŽUL i dr., 2011). Prosječna dubina bušotina je 1100 m.

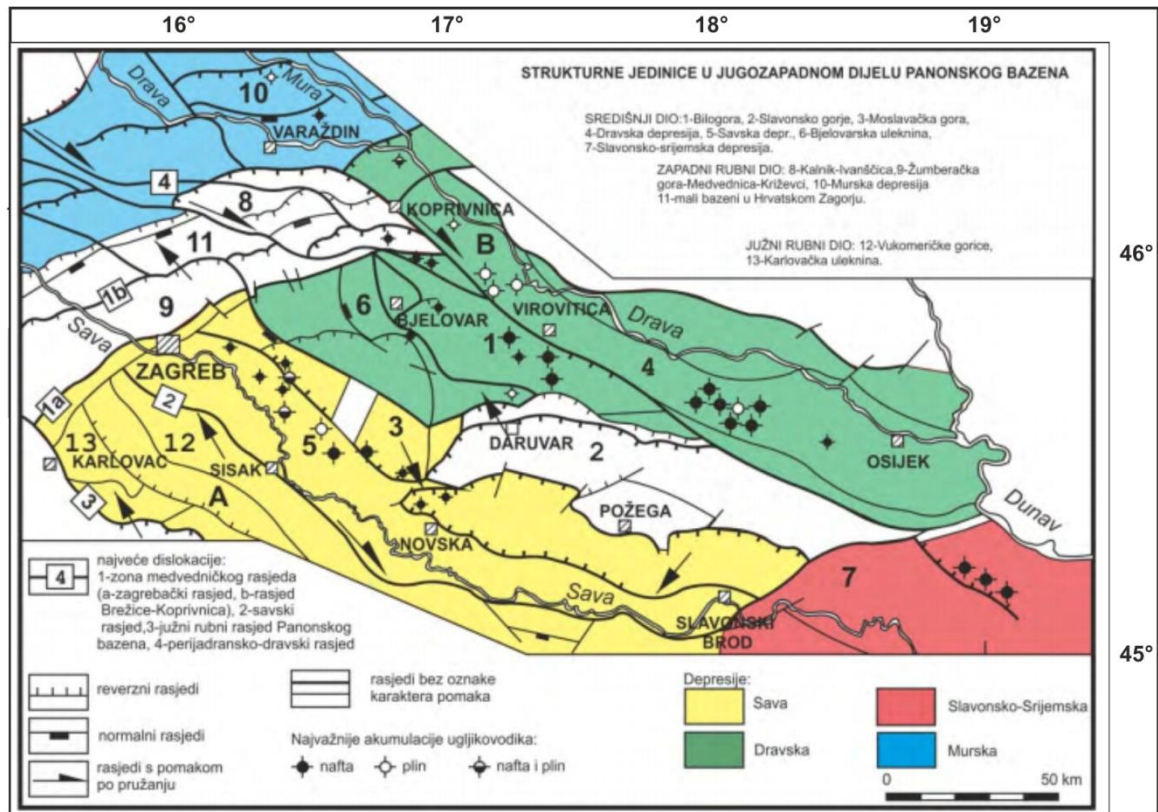
Eksploatacijsko polje Stružec svrstano je među najznačajnija polja u Hrvatskoj, a najvećim dijelom se pridobiva nafta, čiji je iscrpak u 2010. godini iznosio 45,7 %. Rezerve plina iz plinskih ležišta nisu velike i pridobiveni plin se uglavnom koristi na samom polju (BONJAJ i dr., 2001).

4. Geologija šireg područja

Polje Stružec nalazi se u sjeverozapadnom, dubokom dijelu Savske depresije, uz jugozapadni rub Panonskog bazena. Postanak Panonskog bazena detaljno je opisan u mnogim znanstvenim radovima i najčešće se razmatra u odnosu prema Alpskoj i Karpatskoj orogenezi (BALDI, 1980; ROYDEN i dr., 1983; ROYDEN & HORVÁTH, 1988; CSONTOS i dr., 1992; TARI, 1994; TARI & PAMIĆ, 1998). Geotektonski je definiran kao bazen pozadinskog otočnog luka (eng. *Back Arc*) ekstenzijskog karaktera koji je nastao sinsedimentacijskim riftovanjem. Ekstenzijska faza Panonskog bazena započela je početkom miocena (HORVÁTH, 1993). Prema tome dolazi do izdizanja gornjeg plašta na relativnu plitku razinu te stanivanje kontinentalne kore. Time dolazi do širenja, pucanja i rasjedanja u njezinom pripovršinskom dijelu. Izraženi su rasjedi pružanja SZ-JI duž kojih nastaje depresija. Nakon toga, u pliocenu započinje konačno zapunjavanje Panonskog bazena, uglavnom terigenog sedimenta. Recentno stanje na ovom području obilježeno je kompresijom. Budući da su neki dijelovi taložnog bazena imali zajednički razvoj a neki poseban, daljnje istraživanje se bazira na Savsku depresiju.

Prva faza strukturnih promjena događala se u rasponu oligocen-rani miocen što je uzrokovalo stvaranje nekoliko manjih pull-apart bazena nastalih usjedanjem duž aktivnih velikih desnih transkurentnih rasjeda koji se u jugozapadnom dijelu PBS-a pružaju pravcem SZ-JI (SAFTIĆ i dr., 2003). Na području Savske depresije u otnangu započinje taloženje slatkovodnih jezerskih naslaga (PAVELIĆ, 2001). Tijekom ranog i srednjeg miocena (egenburg-baden) dolazi do promijene regionalnog stresa na SSI-JJZ koji aktivira lijeve transkurentne rasjede (TOMLJENović, 1999). Regionalni, prvi transtenzijski događaj u PBS-u započeo je u badenu (ĆORIĆ i dr., 2009; MALVIĆ & VELIĆ, 2011). Nastankom velikih dubokomorskih područja tijekom badena talože se lapori i paralelno s njima u plitkovodnim sedimentima talože se pješčenjaci i biogeni vapnenci (MALVIĆ & VELIĆ, 2011). Prva transpresijska faza odvijala se u sarmatu, a u pojedinim dijelovima PBS-a i u donjem panonu (MALVIĆ & VELIĆ, 2011). U sarmatu dolazi i do pada saliniteta kao uvod u stvaranje brakičnih sredina tijekom panona i posebice slatkovodnih sredina za vrijeme ponta (MALVIĆ, 2006). Tijekom donjeg panona počela se odvijati druga transtenzijska faza, a dok je na cijelom prostoru prostoru depresije u gornjem panonu i donjem pontu (MALVIĆ & VELIĆ, 2011). U panonu je prestala subdukcija u Vanjskim Karpatima i tako započinje termalno spuštanje kore u panonskom bazenu čime se rezultira

taloženje velikih količina sedimenata, uglavnom lapora i pješčenjaka. Druga transpresijska faza započela je u gornjem pontu a traje sve do danas (MALVIĆ & VELIĆ, 2011). Ovu fazu karakterizira stvaranje strukturnih odnosa obilježenih orijentacijom regionalnog stresa S-J, desni transkurentni pomaci i kompresija (VELIĆ, 2007). Na slici 4-1 prikazani su najvažniji rasjedi u hrvatskom dijelu Panonskog bazena.



Slika 4-1. Strukturne jedinice u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena (PRELOGOVIĆ i dr., 1998)

5. Geologija užeg područja

Polje Stružec nalazi se u zapadnom dijelu Savske depresije te se sastoji od neogenskih i kvartarnih naslaga.

Struktura Osekovo predstavlja antiklinalu kojoj je dulja os pružanja istok-zapad dužine oko 6 km, a kraća os oko 1,5 km. Antiklinala je presječena uzdužnim, reversnim rasjedima, te poprečnim, normalnim rasjedima. Ležišta, prema BRODU (1945), pripadaju grupi slojevitih nadsvođenih ležišta koja su ekranizirana tektonski (serije *A* i *b*) ili tektonskolitološki (ležišta p_2 - p_9). Prema podjeli po LEVORSENU (1956) pripadaju kombiniranim, strukturno-stratigrafskim zamkama ograničenima rubnom vodom.

KRANJEC (1972) razvrstava polja prema tektogenezi i smještaju unutar depresija. Polje Stružec spada u skupinu rasjednutih antiklinala i podskupinu razmjerno najdublje smještenih struktura u središnjim dijelovima depresija, uz debljine panonskih i pliocenskih taložina preko 2000 m.

Akumulacija ugljikovodika najvjerojatnije je nastala prije rasjedanja antiklinale, vjerojatno tektonskom aktivnošću tijekom pleistocena. Pretpostavka je potvrđena relativno dobrom korelacijom EK-dijagrama u plićim dijelovima bušotina (DEVIĆ i dr., 1978).

Ležišta ugljikovodika na polju Stružec nalaze se u stijenama gornjeg miocena. Bušotina O-23, koja je s dubinom 3327 m najdublja na području polja, zahvatila je naslage konglomeratičnog pješčenjaka i lapora (2325-3327 m) koji su uslijed nedostataka pouzdanih paleontoloških podataka definirani kao oligomiocen (DEVIĆ i dr., 1978). Stratigrafska raščlamba nije bila moguća na profilima dubokih bušotina pa je plići interval (1978–2325 m), koji čine tamni i sivosmeđi lapori te slojevi sivozelenkastih pješčenjaka, jednostavno određen kao miocen.

Na cijelom području sedimenti badena i sarmata označavaju početak transgresije. Podinske stijene sastoje se od paleozojskih i mezozojskih magmatita i metamorfita. Mlađe naslage su u odnosu na podinske stijene odvojene tektonsko-erozijskom diskordancijom. Na sedimente badena i sarmata konkordantno naliježu naslage panona, ponta te pliocena i kvartara.

Naslage donjeg panona u Savskoj depresiji pripadaju formaciji Prkos (ŠIMON, 1973). Biostratigrafski odgovara Croatica naslagama karakteristična po fosilu *Radix croatica*. Ove naslage se litološki sastoje od glinovitih vapnenaca, siltnih lapora, lapora i pješčenjaka.

Na polju Stružec mogu se razdvojiti četiri formacije panonske i pontske starosti: Ivanić-Grad, Kloštar Ivanić, Široko Polje i Lonja (slika 5-1). Navedene formacije pripadaju dvama sedimentacijskim megaciklusima (VELIĆ i dr., 2002): grupa Sava (formacije Ivanić-Grad, Kloštar Ivanić i Široko Polje) i grupa kojoj pripada formacija Lonja.

KRONOSTRATIGRAFSKE JEDINICE ZA SREDIŠNJI DIO PARATETHYS-A RCMNS (1967-1985)				Neogenski megaciklusi	EK-reperi i EK-markeri	LITOSTRATIGRAFSKE JEDINICE U SAVSKOJ DEPRESIJI DOKAZANE NA NAFTNOM POLJU KLOŠTAR			
K E N O Z O I K	HOLOCEN			3. megaciklus	α'	FORMACIJA LONJA			
		PLEISTOCEN							
			PLIOCEN				ROMANJ		
		DACIJ							
	M I O C E N	GORNJI	PONT	GORNJI	2. megaciklus	R ϕ	FORMACIJA ŠIROKO POLJE		
				DONJI					
				PANON			GORNJI	Z'	FORMACIJA KLOŠTAR IVANIĆ
							DONJI		
		SREDNJI	SARMAT	Rs5	FORMACIJA IVANIĆ-GRAD				
			BADEN						
		DONJI	KARPAT	Rs7	FM. PRKOS				
			OTNANG						
			EGENBURG						
	OLIGO-MIOCEN	EGER	1. megaciklus	pTc	GRUPA MOSLAVAČKA GORA	FORMACIJA PREČEC			
MEZOZOIK				Tg		TEMELJNO GORJE			
PALEOZOIK									

Slika 5-1. Odnos EK–markera i repera, litostratigrafskih i kronostratigrafskih jedinica u Savskoj depresiji (VELIĆ i dr., 2011)

Formacija Ivanić-Grad pripada sedimentima gornjeg panona te predstavlja najstarije taložine drugog sedimentacijskog megaciklusa grupe Sava. Biostratigrafski odgovara akrozoni *Congerina banatica*, tj. Banatica naslagama. Omeđena je EK-markerima Rs5 u

podini i Z' u krovini. Subgrauvakni pješčenjaci s visokim sadržajem karbonatnog detritusa i asocijacijom teških minerala ukazuju na jači intenzitet tonjenja taložnog prostora te izražen transport materijala s okolnih masiva. Najveći broj pješčenjaka se pojavljuje u dva člana: pješčenjacima Iva i Okoli.

Formacija Kloštar Ivanić su naslage donjeg pontaa, a biostratigrafski predstavlja Abichi naslage po školjkašu *Paradacna abichi*. Donja granica je definirana EK-markerom Z', dok je gornja definirana EK-markerom Rφ. Po litologiji su slične formaciji Ivanić-Grad s izmjenom pješčenjaka i lapora sa svim prijelaznim tipovima prema pijescima i pješčenjacima, a čine ju različito debele naslage sivih, srednje tvrdih i djelomično pjeskovitih lapora u izmjeni sa slabo do srednje vezanim, sitnozrnatim, kvarcnim pješčenjacima s tinjcima. Debljina formacije se kreće u intervalu od 600 do 700 metara.

Formacija Široko Polje je zadnja faza drugog sedimentacijskog ciklusa u kojoj su taložene Rhomboidea naslage gornjeg pontaa u kojoj je karakterističan provodni fosil *Congerina rhomboidea*. Specifične su po jednoličnoj izmjeni pješčenjaka i lapora, sivih, mekih laporovitih glina koje s dubinom prelaze u glinovite lapore, svijetlosive, slabovezane pješčenjake i slabokarbonizirani ugljen.

Formacija Lonja pripada naslagama taloženim tijekom srednjeg pliocena do danas. Omeđena je EK-markerom α' u podini i površinom terena. Za tu formaciju karakteristična je ritmična izmjena sivih, slabovezanih pijesaka izgrađenih pretežno od kvarca i tinjca, i sivkastih do plavičastih mekih glina s rijetkim proslojcima lignita i treseta u donjem dijelu, te šljunaka, prapora i uložaka treseta u gornjem dijelu taložnog prostora. Unutar glinenih naslaga česte su vapnenačke konkrecije, a u pijescima se mogu naći krhotine školjaka i puževa. Sedimentacija se uglavnom odvijala u aluvijalnim facijesima djelovanjem rijeka koje su odlagale materijal u močvarama uz riječne tokove. Kvartarni sedimenti imaju debljinu približno 10-15 m. Čine ih uglavnom nekonsolidirani i nesortirani pijesci i gline.

6. Geološke karakteristike ležišta

Najveći dio rezervi nafte na polju nalazi se u ležištu p1, P1, P2 i A serije s ležištima A1, A2, A3, A4, A5, A6 i A7 koji zaliježu konkordantno navedenim slijedom. Primijenivši klasifikaciju naftnih i plinskih ležišta po I.O. Brodu uvrštava ležište u grupu slojevitih, zasvođenih tektonskih ekraniziranih ležišta s rubnom vodom.

6.1. Ležište p1

Ležište p1 je prilično homogeni sloj slabo do srednje konsolidiranog pješčenjaka ukupne debljine 1-3 metra te je kontinuiranog rasprostiranja preko cijelog polja. Taj pješčenjak pripada Abichi naslagama donjeg pontaa. Uglavnom je nositelj naftnog, a samo sporadično plinskog zasićenja i to formiranog kao plinska kapa (DEVIĆ i dr., 1976).

6.2. Ležište p8

Ležište p8 pripada pješčenjaku gornjeg pontaa, efektivne debljine od oko 6 metra. Srednja šupljikavost je oko 33%, a početno zasićenje vodom oko 30%. Glavni nositelj ugljikovodika su Rhomboidea naslage. Ležište je zasićeno plinom, a na rubnim dijelovima naftom (DEVIĆ i dr., 1976).

7. Kratki prikaz metode 3D seizmike

7.1. Snimanje 3D seizmike

Snimanje seizmičkih podataka se obavlja po profilu te se dobivaju 2D podaci. U pristupačnim dijelovima kopna, kao izvor energije, koristi se vibrator dok se u nepristupačnim dijelovima koriste eksplozivi. U marinskim istraživanjima se koristi zračni ili vodeni top. Prijemnici u seizmičkim istraživanjima su geofoni ili hidrofoni u marinskim istraživanjima. Generiranjem energije na površini elastični val se kreće podzemljem te se reflektira od reflektora u podzemlju i dolazi do geofona i snima se u digitalnom obliku. Mjesto generiranja vala (eksplozija ili vibracija) je točka paljenja (eng. *Shot Point*). Sam odziv se odnosi na zajedničku dubinsku točku (eng. *Common Depth Point, CDP*), odnosno zajedničku refleksijsku točku (eng. *Common Reflection Point*) na reflektoru. Projekcija točke na površini je zajednička središnja točka (eng. *Common Midd Point*). Ta se točka nalazi na polovici razmaka između točke paljenja i geofona. Glavni cilj nam je dobiti više puta refleks sa svake točke u podzemlju. Zbrajanjem tih tragova poboljšava se omjer signal-šum te se dobivaju kvalitetniji podatci.

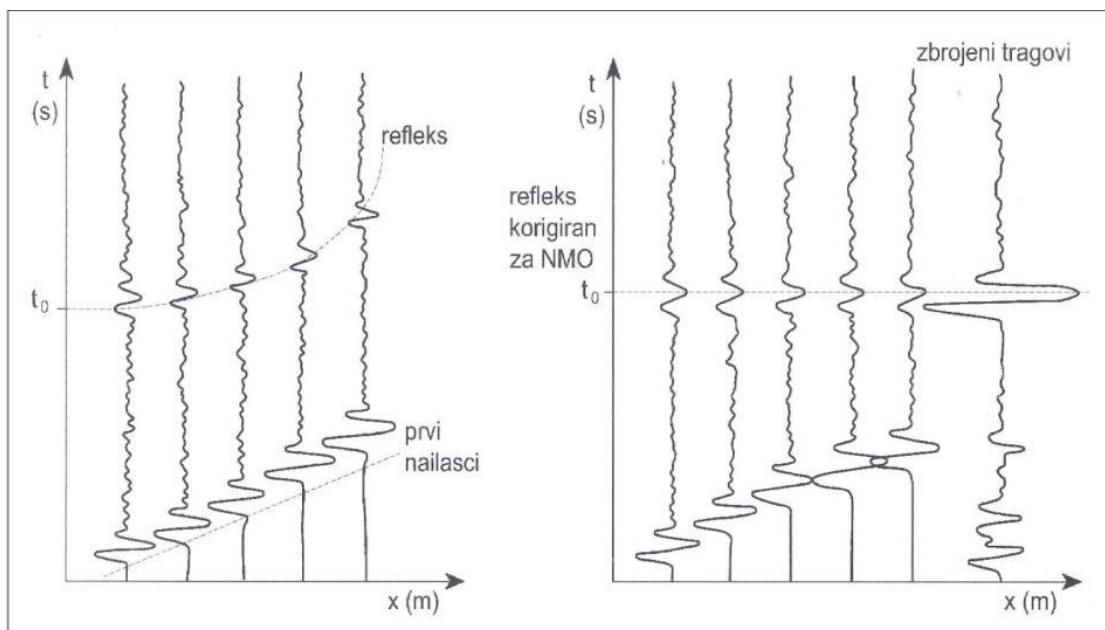
7.2. Obrada podataka

Mjerenja kod seizmičkih istraživanja se najčešće izvode metodom višestrukog pokrivanja pa je u daljnjem tekstu obrazložena obrada podataka ove metode. Najvažniji dio obrade podataka ove metode su statička i dinamička korekcija. Izvodi se i niz drugih postupaka u okviru obrade, koji su na neki način vezani za dinamičku korekciju, kao što je određivanje geometrije mjerenja i razvrstavanje tragova prema zajedničkoj dubinskoj točki (ŠUMANOVAC, 2012).

Uloga statičke korekcije je otklanjanje utjecaja razlika u visinama među pojedinim točkama emitiranja i prijama vala i debljine rastrošne zone, odnosno „sloja male brzine“. Kod dinamičke korekcije, sva vremena refleksa se svode na najkraći, okomiti put seizmičke zrake. Odgovarajućim filtriranjem pomoću postupaka stekiranja ili zbrajanja terenskih zapisa smetnje se svode na najmanju moguću mjeru. Na svakom seizmogramu

CDP-skupa tragova (slika 7-1), načini se korekcija za NMO (eng. *Normal Move Out*), prema izrazu (7-1). NMO je hiperbolička funkcija i opada s povećanjem vremena t . Što je reflektor dublje smješten u podzemlju, to će krivulja biti blaža. NMO korekcija ovisi o vremenu putovanja za svaki pojedinačni refleks, zbog čega se naziva dinamičkim popravkom, za razliku od statičke korekcije koja je jednaka za cijeli trag.

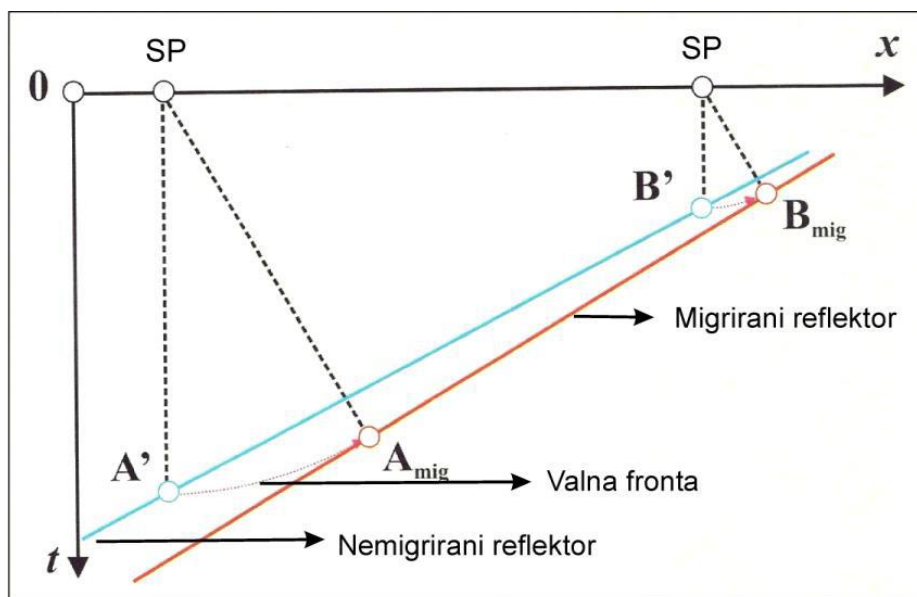
$$NMO = t - t_0 = \Delta t \approx \frac{x^2}{2tV^2} \quad (7-1)$$



Slika 7-1. Skica skupa mjerenih CDP-seizmograma i korigiranih za NMO (ŠUMANOVAC, 2012)

Na svakom seizmogramu CDP skupa tragova, načini se korekcija za NMO, prema izrazu (7-1), pri čemu je potrebno znati vrijeme putovanja vala t , udaljenost od točke paljenja x i seizmičku brzinu V u materijalu iznad granice. Time će vremena refleksa biti svedena na njihovo nulto vrijeme t_0 za okomiti put vala. Refleksi će biti svrstani u jednoj liniji, za razliku od drugih nailazaka i šumova. Zbrajanjem tragova amplituda refleksa povećat će se n puta za n zbrojenih tragova, a šumovima će se amplituda povećati samo \sqrt{n} puta. Tim zbrajanjem omjer signal-šum se pojača \sqrt{n} puta, te je to osnovni cilj CDP metode. No, to se može postići samo ako su refleksi potpuno poravnani (ŠUMANOVAC, 2012).

Nakon primjene statičke i dinamičke korekcije, filtriranja i dekonvolucije seizmički se nailasci prikazuju na tragovima smještenim duž okomice na horizontalnu os. Ako se radi o horizontalnim reflektorima, položaj pojedinih reflektora na takvom prikazu odgovara njihovom stvarnom položaju. U protivnom, stvarno mjesto točaka refleksije na određenim profilima pomaknuto je u suprotnom smjeru nagiba slojnih granica, a veličina tog pomaka funkcija je dubine i nagiba reflektora te brzine širenja seizmičkih valova. Dekonvolucijom, postupkom uklanjanja višestrukih signala, poboljšava se vertikalna rezolucija, dok se horizontalna rezolucija povećava migracijom koja određenim postupkom vraća točke refleksije na pravo mjesto. U slučaju da se radi o kosom reflektoru, reflektirani nailasci na seizmičkom profilu se ne nalaze u stvarnom položaju, nego su pomaknuti ulijevo (slika 7-2). Rezultat toga su izobličenja strukturnih oblika na nemigriranim profilima koja se izražavaju u lažnom povećanju antiklinalnih i ublažavanju sinklinalnih strukturnih oblika.



Slika 7-2. Položaj migriranog i nemigriranog reflektora

7.3. Seizmičke brzine i sintetski seizmogram

Zbog ispravnosti interpretacije podataka seizmičkih mjerenja, važno je precizno odrediti seizmičke brzine u stijenama. Poznavanje seizmičkih brzina je potrebno radi preciznije pretvorbe vremenskog u dubinsko mjerilo na seizmičkim profilima.

Kod mjerenja seizmičke brzine u stijenama, brzina je veća što su stijene gušće. U stijenama, koje se mogu okarakterizirati kao zrnasti materijali, gustoća zrna se ne mijenja značajnije. Tu uvelike utjecaj na volumnu gustoću ima šupljikavost. Šupljikavost više ovisi o stupnju kompaktacije i cementacije nego o sastavu stijene pa se može mijenjati u širokom rasponu. Elastični moduli stijena ovise o dodiru, kontaktu između zrna i povećavaju se s povećanjem stupnja kompaktacije. Elastični moduli rastu brže nego što raste volumna gustoća, koja se također povećava s povećanjem stupnja kompaktacije. Time se naglašava povezanost porasta brzine s povećanjem gustoće. Zakon brzina se može dobiti izravnim mjerenjem brzina širenja elastičnih valova u bušotini, a to mogu biti: vertikalnim seizmičkim profiliranjem (VSP metoda) ili zvučnom karotažom. Koriste se srednje i intervalne brzine. Intervalna brzina se dobije iz razlike dubina dvaju stajališta geofona i njihove vremenske razlike nailazaka. Ove brzine su precizne i mogu se uspješno iskoristiti za pretvorbu iz vremenskog u dubinsko mjerenje. Kod srednje brzine, vrijednost se dobiva iz omjera ukupne duljine puta i vremena putovanja vala za paket naslaga do određene dubine. Mjerenja u bušotinama se izvode s uzastopnim stajalištima geofona od dna prema vrhu bušotine. U novije vrijeme, mjerenje se izvodi s više geofona istovremeno.

U izračunu se mogu primijeniti neka od empirijskih formula koja povezuje gustoću i brzinu, kao što je na primjer Gardnerova formula:

$$\rho = aV^{1/4}, \quad (7-2)$$

gdje je: ρ - gustoća izražena u g/cm^3 ,

$a = 0,31$ kada je brzina izražena u m/s ,

$a = 0,23$ kada je brzina izražena u ft/s ,

V - brzina.

Također postoji empirijski odnos između seizmičke brzine u ovisnosti o dubini z i otpornosti stijene R' koji je opisan Faustovom formulom (SHERIFF i dr., 1995):

$$V_p = 900 * (z * R')^{1/6}, \quad (7-3)$$

gdje je: V_p - intervalna brzina izražena u m/s,

z - dubina izražena u metrima,

R' - otpornost stijene izražena u Ωm .

Glavna namjena sintetskog seizmograma je njegova usporedba sa seizmičkim podacima kako bi se refleksima na seizmičkom profilu pridružile stratigrafske i litološke granice. Time se granice mogu dalje precizno pratiti na profilima te se preciznije kartiraju. Prema tome, sintetski seizmogram služi za povezivanje bušotinskih podataka u dubinskom mjerilu i seizmičkih podataka u vremenskom mjerilu. Sintetski seizmogram omogućuje sigurno odvajanje višestrukih refleksa, ali i određivanje promjene polariteta i pomaka faza, što upućuje na litološke promjene i promjene fluida u stijenama. Osim toga može služiti i za provjeru interpretacije (ŠUMANOVAC, 2012).

Sintetski seizmogram je izračunati seizmogram za pretpostavljeni geološki model podzemlja. To je zapravo seizmičko modeliranje (*eng. Forward modelling*), koje može biti jednodimenzionalno, dvodimenzionalno i trodimenzionalno. U užem smislu podrazumijeva se jednodimenzionalni model. Pretpostavlja se da se podzemlje sastoji od slojeva različite litologije i fizikalnih svojstava. Svaki sloj u podzemlju je definiran gustoćom i seizmičkom brzinom. Umnožak brzine i gustoće daje seizmičku impedanciju sloja. Razlika u impedanciji susjednih slojeva uzrokuje reflektiranje seizmičkih valova. Koeficijent refleksije (R) na granici dvaju slojeva ukazuje na količinu reflektirane energije, te je jednak omjeru amplituda reflektiranog i upadnog vala.

$$R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{v_2 \rho_2 - v_1 \rho_1}{v_2 \rho_2 + v_1 \rho_1} \quad (7-4)$$

gdje je: A_0, A_I – amplituda upadnog, odnosno reflektiranog vala,

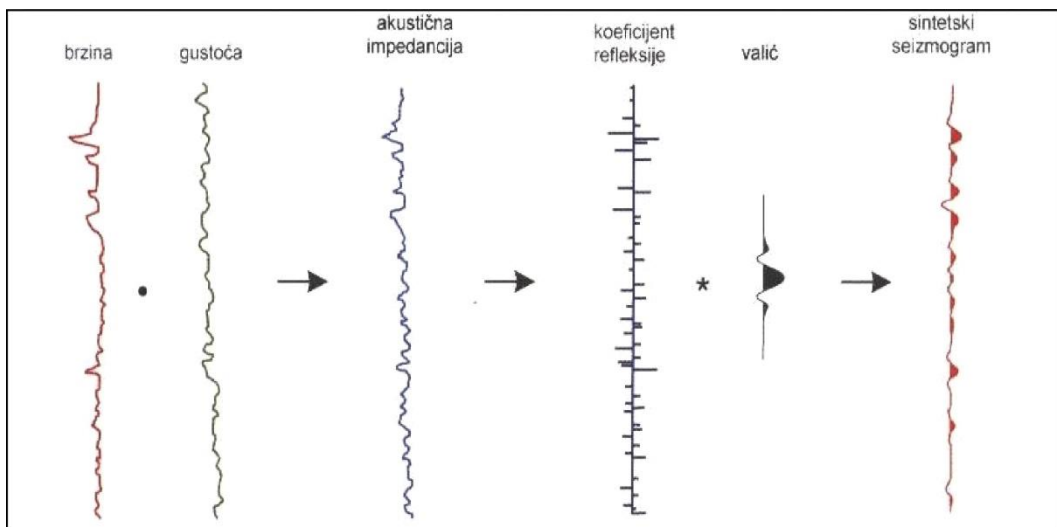
v_1, v_2 – brzina P-valova iznad i ispod granice dvaju slojeva,

ρ_1, ρ_2 – gustoća gornjeg, odnosno donjeg sloja.

Vrijednosti koeficijenta refleksije mogu biti pozitivne ili negativne, a kreću se između -1 i +1. Koeficijent refleksije na granici dvaju slojeva bit će pozitivan kada se akustična impedancija poveća i negativan kada se akustična impedancija smanjuje.

Izračunavanje akustične impedancije se najčešće dobiva iz podataka karotažnih mjerenja. Zvučnom karotažom se dobiva brzina širenja valova kroz stijene (eng. *Sonic Log*). Za gustoću se mogu uzeti karotažni podatci ili se mogu primijeniti neke od empirijskih formula koje povezuju gustoću i brzinu, kao što je Gardnerova formula (7-2), ako gustoća nije mjerena.

Ako znamo koeficijent refleksije i pretpostavljeni ulazni valić moguće je oblikovati sintetski seizmogram (slika 7-3).

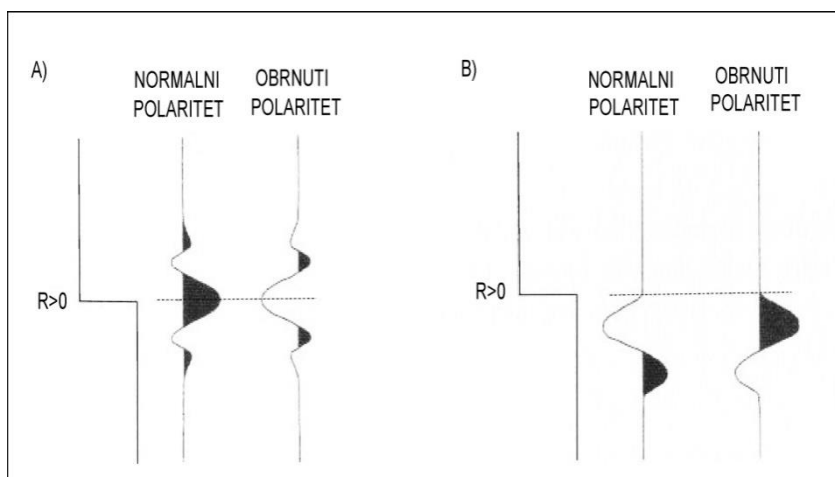


Slika 7-3. Izračunavanje sintetskog seizmograma pomoću metode konvolucije (OREŠKOVIĆ, 2006)

Valić je jednodimenzionalni impuls, karakteriziran je fazom i frekvencijom. Najčešće korišteni su valić nulte faze i valić minimalne faze. Valić s faznim pomakom jednak nuli

(eng. *Zero-phase Wavelet*) ostvarit će maksimalnu konstruktivnu interferenciju u točki $t=0$, te će na tom mjestu imati maksimalnu moguću amplitudu. U slučaju ostalih vrijednosti t amplituda će biti manje. Valić minimalne faze (eng. *Minimum-phase Wavelet*), za razliku od valića nulte faze, ima energiju najvećim dijelom sadržanu u prvom dijelu valića. Vrijednost valića za negativne vrijednosti vremena t jednak je nuli.

Prema dogovoru (SEG konvencija) standardni polaritet za valić nulte faze je takav da je za pozitivni koeficijent refleksije val predstavljen brijegom u točki simetrije. Za valić minimalne faze val ima pomak prema dolje, odnosno negativnu vrijednost. (slika 7-4).

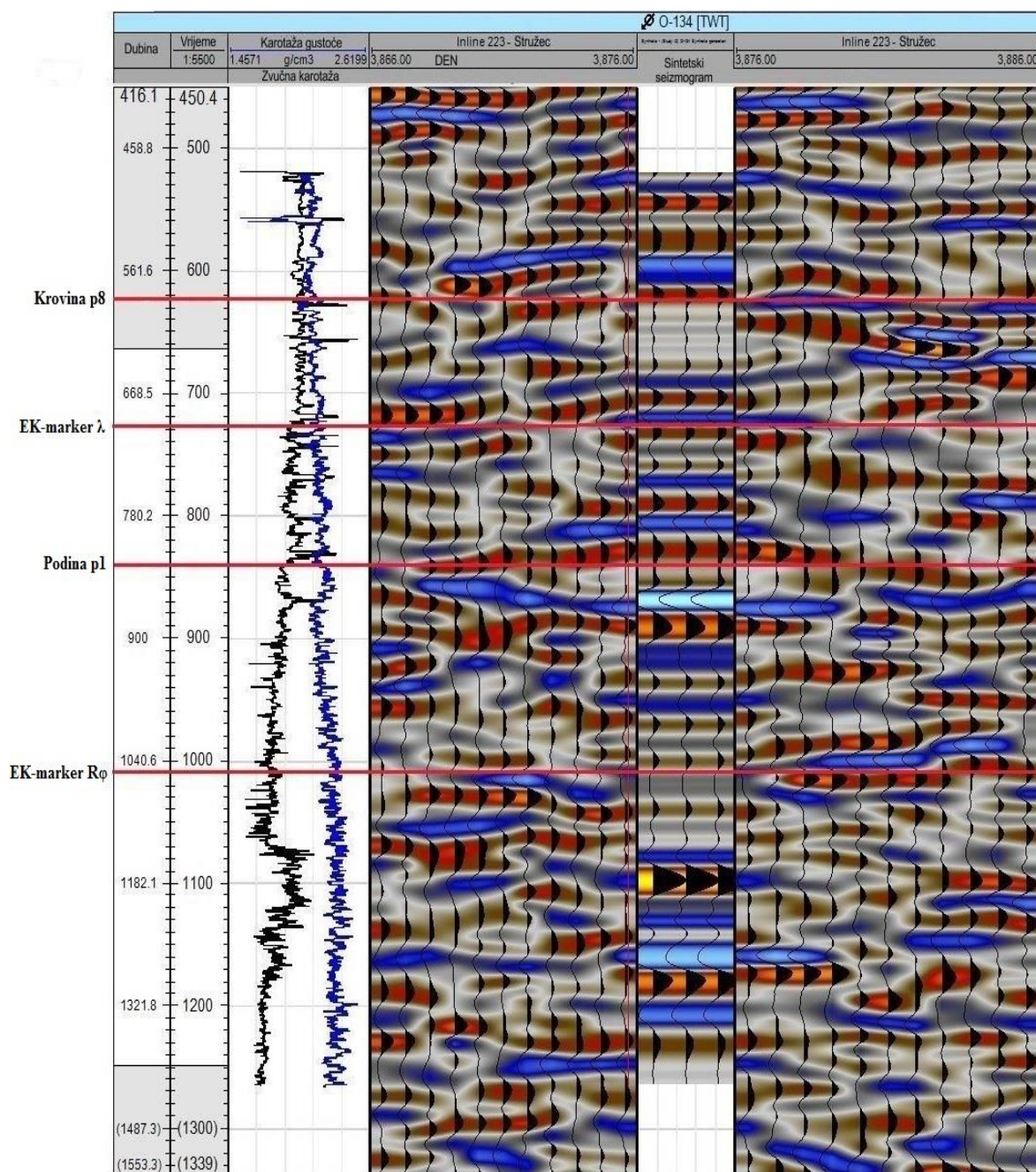


Slika 7-4. Standardni polaritet za pozitivan koeficijent refleksije (SHERIFF & GELDART, 1995)

Kod izrade sintetskog seizmograma osnovni ulazni podatci moraju biti krivulje zvučne karotaže i karotaže gustoće. Sintetski seizmogram u ovom radu je napravljen za bušotinu O-134 radi dobrog preklapanja mjerenih refleksa s refleksima sintetskog seizmograma u odnosu na ostale bušotine koje nisu imale snimljene karotažne krivulje iz kojih se mogao izračunati sintetski seizmogram. Zbog mjerenja zvučne karotaže samo u dijelu bušotine, interval korelacije odgovara intervalu mjerenja zvučne karotaže te su dobivena dobra podudaranje refleksa. Iz karotaže gustoće i zvučne karotaže izračunavaju se akustične impedancije na koje se primjenjuje valić (konvolucija). Valić može biti Ricker-ov,

Klauder-ov, Hamming-ov, Butterworth-ov, ili ekstrahirani, odnosno valić izdvojen iz seizmike. U našem slučaju ulazni valić je ekstrahiran iz seizmike. Karotažne krivulje se kalibriraju s postojećim zakonom brzina i kalibrirane ulaze u izračun.

Korelacijom sintetskog seizmograma sa snimljenim seizmičkim podacima (slika 7-5), može se uočiti djelomično neslaganje koje dolazi zbog povećane vrijednosti zvučne karotaže i lateralne promjene litologije. Na intervalima od -547 m - -574 m i -1150 m - 1200 m uočavaju se neslaganja sintetskog seizmograma i snimljene seizmike. U intervalu od -574 m - -1150 m, unutar kojih su detektirani horizonti i EK-markeri, vrlo je dobro poklapanje podataka. Zakon brzina nije snimljen na području polja Stružec, već je snimljen na područja polja Okoli u bušotini Ok-3 pa dijelom utječe na neslaganje. Nakon što je napravljen postupak jednodimenzionalnog modeliranja slijedi postupak praćenja seizmičkog horizonta na svim snimljenim profilima 3D-seizmičkih podataka.



Slika 7-5. Sintetski seizmogram izračunat za bušotinu O-134 s pripadajućim horizontima

8. Seizmička interpretacija

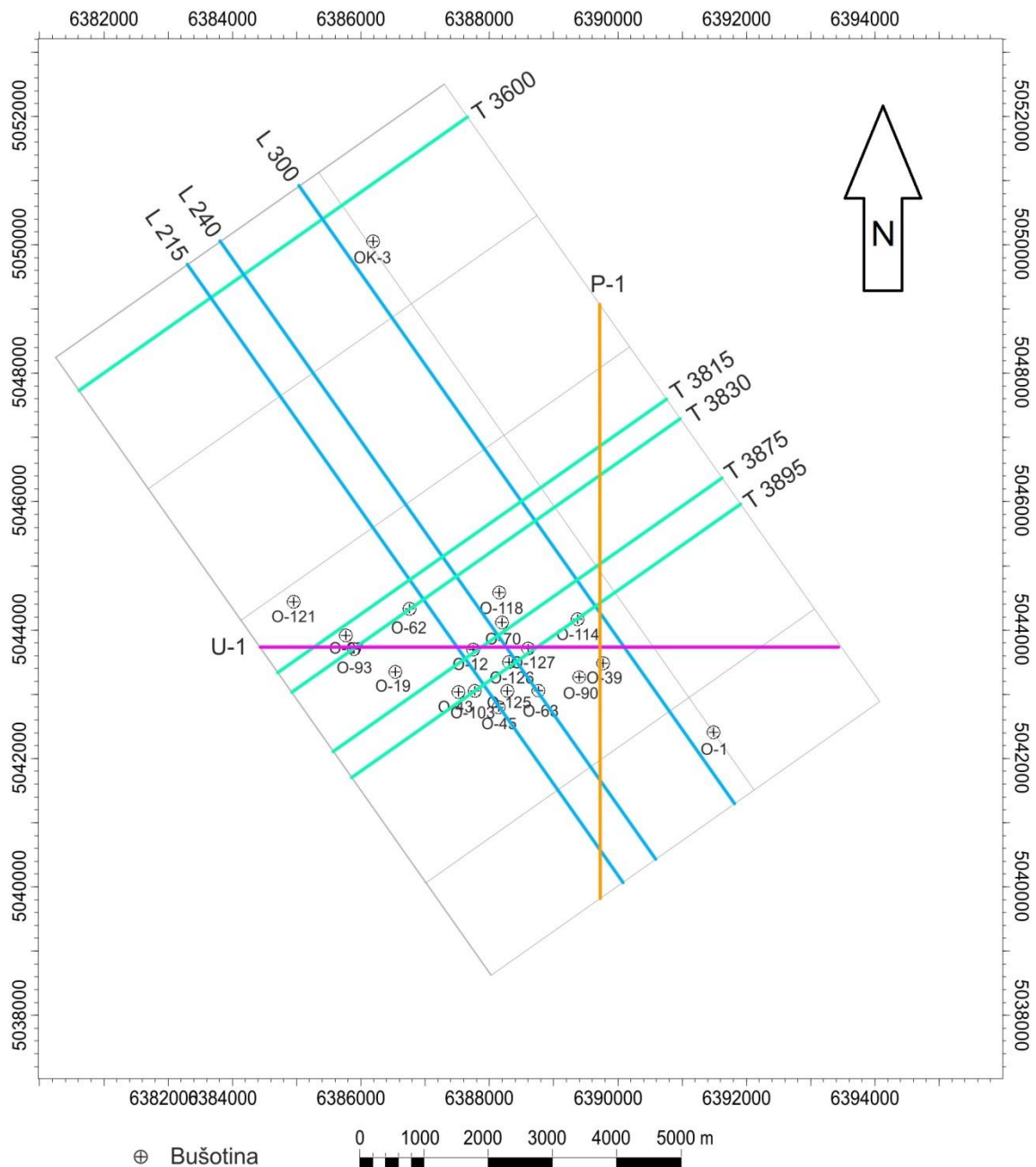
8.1. Računalni program Petrel

Interpretacija seizmičkih horizonata i rasjeda, te izračunavanje seizmičkih atributa napravljeno je u računalnom programu Petrel tvrtke Schlumberger. Petrel kao softver služi za izradu i interpretaciju geoloških modela, a pogotovo služi za interpretaciju geoloških modela ležišta ugljikovodika. Program omogućava interpretaciju seizmičkih podataka, bušotinsku korelaciju, izradu modela ležišta ugljikovodika za simulaciju, izračun volumena ležišta ugljikovodika te modula koji izračunavaju seizmičke attribute kako bi se olakšala interpretacija u svrhu boljeg iskorištenja ležišnih stijena. Time se dobiva jako dobra slika podzemlja u odnosu na prijašnje načine interpretacije seizmičkih podataka te čini bolju preciznost kod radova tijekom razrade i proizvodnje ležišta ugljikovodika.

8.2. Praćenje seizmičkih horizonata na naftnom polju Stružec

Interpretacija litoloških granica i rasjeda napravljena je u programskom paketu Petrelu. Cilj rada je određivanje pikova za krovinu ležišta p8, podinu ležišta p1 te za EK-markere $R\phi$ i λ u bušotinama te strukturno-tektonska interpretacija praćenjem krovine i podine određenih ležišta i EK-markera. Prema VELIĆ (2007) polje Stružec obuhvaća formacije Široko Polje i Kloštar Ivanić. Interpretacija seizmičkih horizonata izvedena je na svakom 5-om uzdužnom i poprečnom profilu. Interpretacija rasjeda izvedena je također na svakom 5-om uzdužnom ili poprečnom profilu, ovisno o pružanju rasjeda i njegovom obliku. Podatci o dubinama krovine ležišta p8 bili su dostupni za 103 bušotine s naglaskom da jedan dio raspoloživih očitanih granica u bušotinama nije odgovarao pravim dubinama krovine što je dosta otežalo interpretaciju. Kod podine ležišta p1 podatci o dubinama bili su dostupni u 133 bušotine. Za EK-marker λ podatci su bili raspoloživi za 149 bušotina. Za EK-marker $R\phi$ podatci o dubini su poznati samo 39 bušotina tj. manje od 30%, te je to također otežalo interpretaciju. Na slici 8-1 prikazan je niz karakterističnih profila s interpretiranim horizontima i rasjedima. Na slikama su prikazana tri približno poprečna profila (eng. *Inline*) označenih s L (slika 8-2 – slika 8-4), pet približno uzdužnih profila (eng. *Xline*)

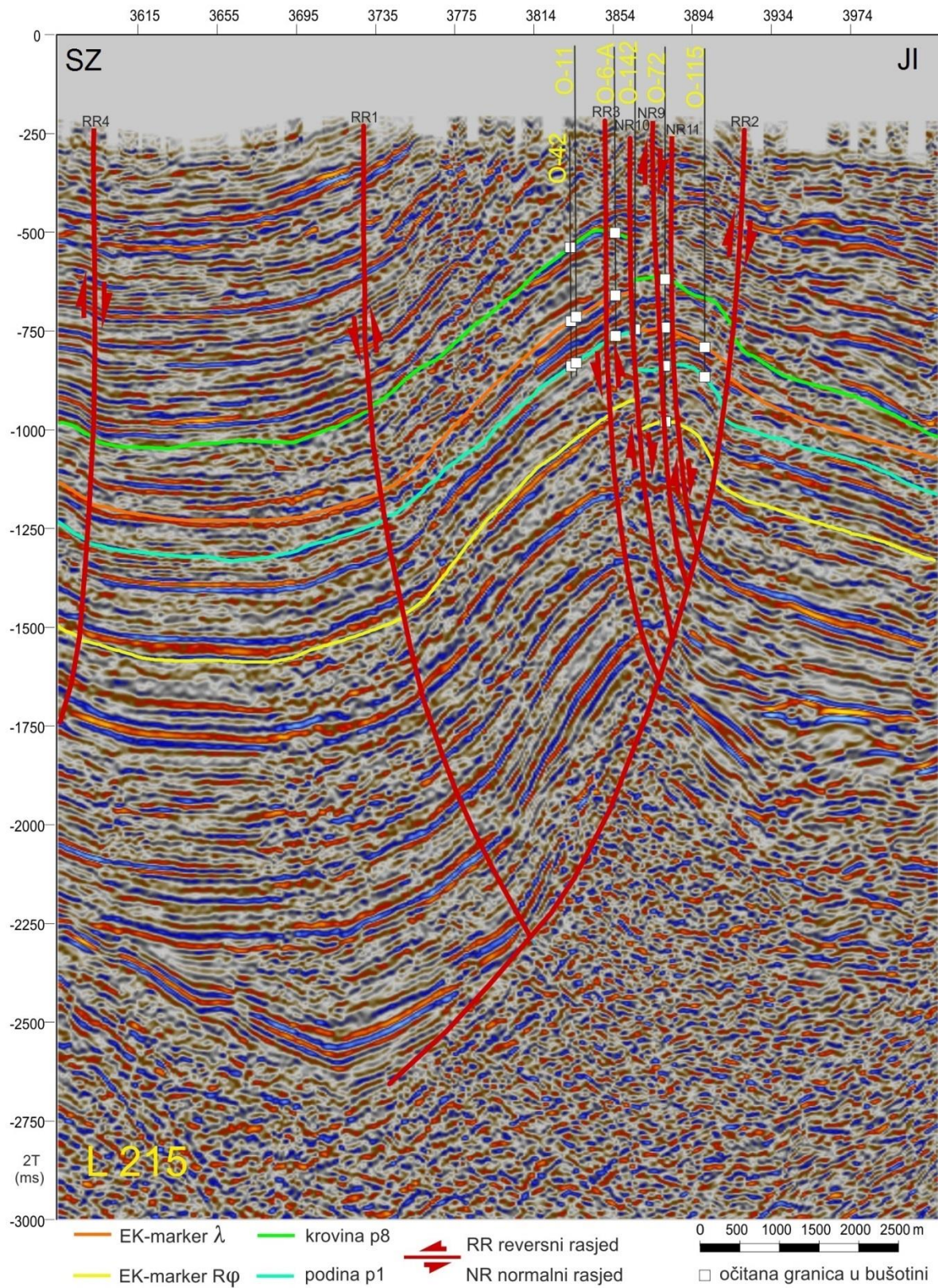
označenih s T (slika 8-5 – slika 8-9) te jedan stvarno uzdužni profil pružanja istok-zapad (slika 8-10) i stvarno poprečni profil pružanja sjever-jug (slika 8-11).



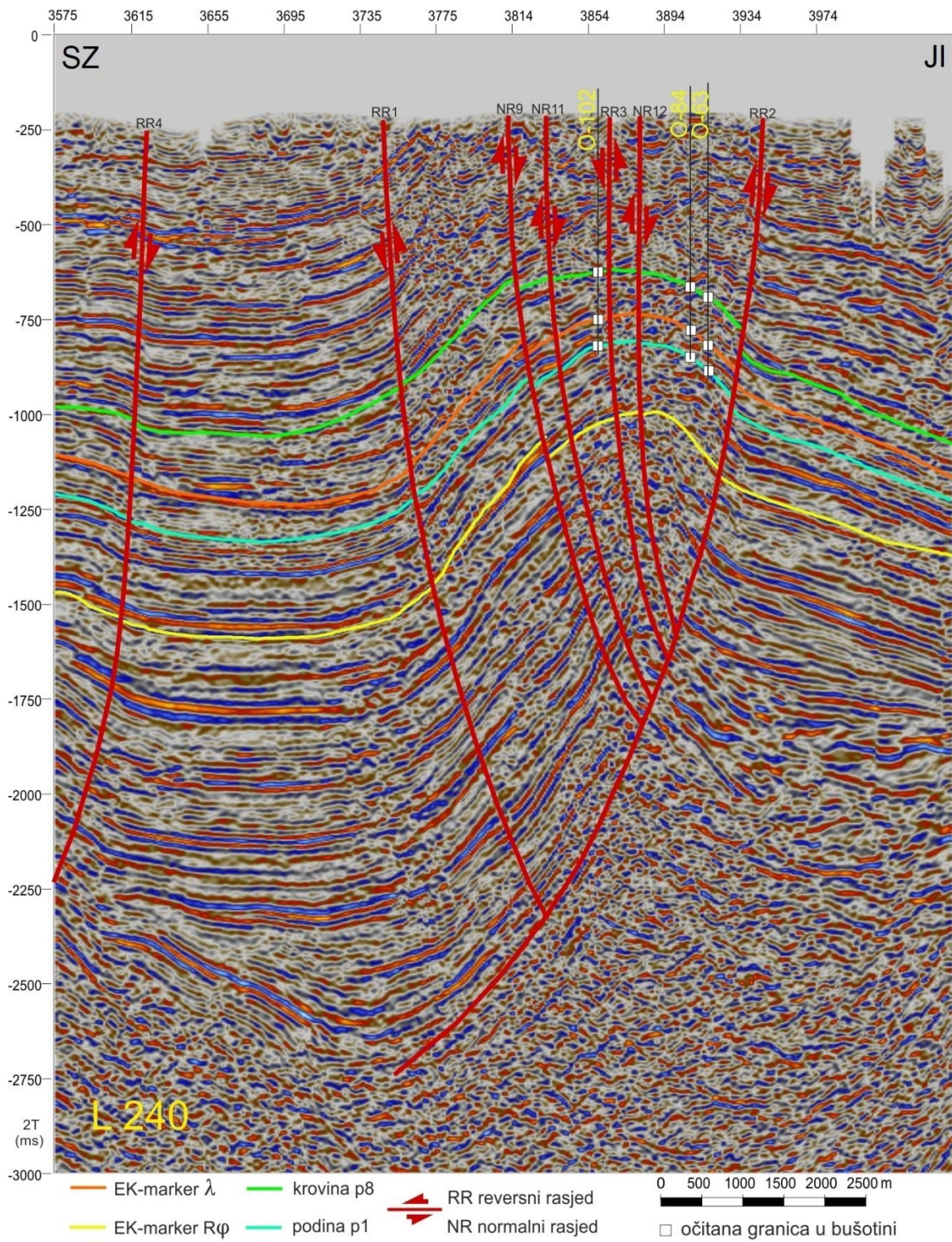
Slika 8-1. Položaji prikazanih profila u tekstu i položaji određenih bušotina

Na slikama 8-2, 8-3 i 8-4 su prikazana tri seizmička profila. Kako os antiklinale ima pružanje istok-zapad, ti profili su približno poprečni na pružanje strukture. Horizont krovine p8 se nalazi u vremenskom intervalu od 510 do 1170 ms, dok se horizont podine

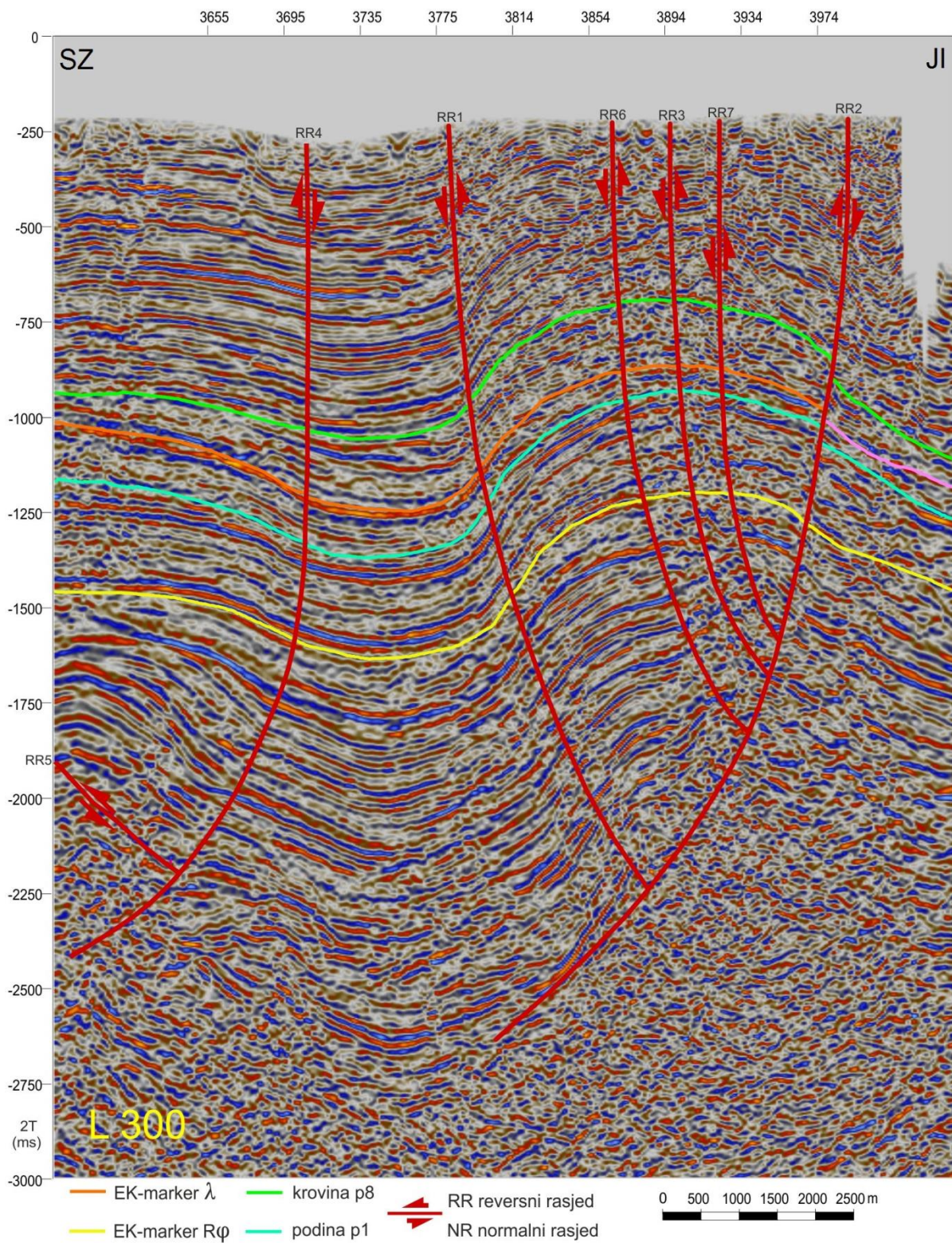
p1 nalazi u vremenskom intervalu od 780 do 1380 ms. Između njih se nalazi EK-marker λ , a ispod podine p1 nalazi se EK-marker $R\phi$. Kod sva tri profila mogu se uočiti razlike debljina paketa na jednom i drugom kraju profila. Na sjeverozapadnom dijelu profila razlike debljina paketa između horizonata je veća nego na jugoistočnom dijelu što podrazumijeva stanjivanje slojeva u podzemlju zbog mogućih uvjeta taloženja. Krenuvši od profila L 215, preko L 240 do profila L 300 uočava se ublažavanje strmine oba krila antiklinale ali i njezino „tonjenje“, dok sinklinala koja se nalazi na sjeverozapadnom dijelu profila postaje strmija te se i ona produbljuje. Također se istim redoslijedom promatrajućih profila uočava širenje tektonske poremećene zone unutar antiklinale. Kod profila L 215 uočava se kako pikovi horizonata u bušotinama O-42, O-11 i O-6A imaju manju dubinu u odnosu na bušotine O-142, O-72 i O-115. Time se područje većeg skoka u pikovima, koji određuju horizonte, definira kao paraklaza normalnog rasjeda (NR10). Skokovi horizonata na profilu L 215 kod rasjeda NR10 su oko 100 ms. Skokovi drugih rasjeda su vrlo mali. Na profilu L 240 veći skokovi horizonata su definirani kao područje normalnog rasjeda (NR9), te vrijednost skoka iznosi oko 30 ms.



Slika 8-2. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu L 215, koji prolazi središnjim područjem antiklinale i zahvaća zonu normalnih rasjeda



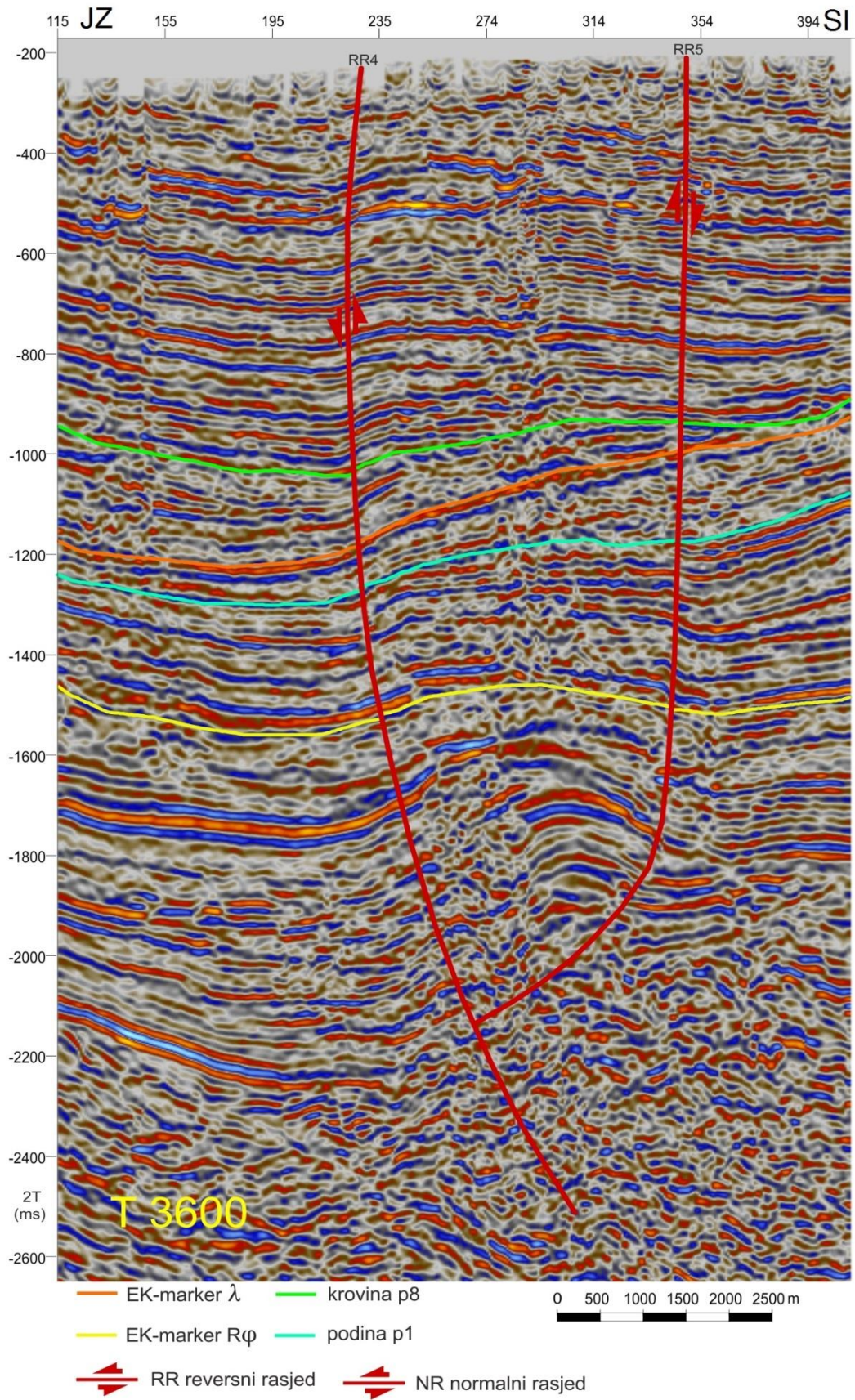
Slika 8-3. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu L 240, koji prolazi središnjim područjem antiklinale i zahvaća zonu normalnih rasjeda



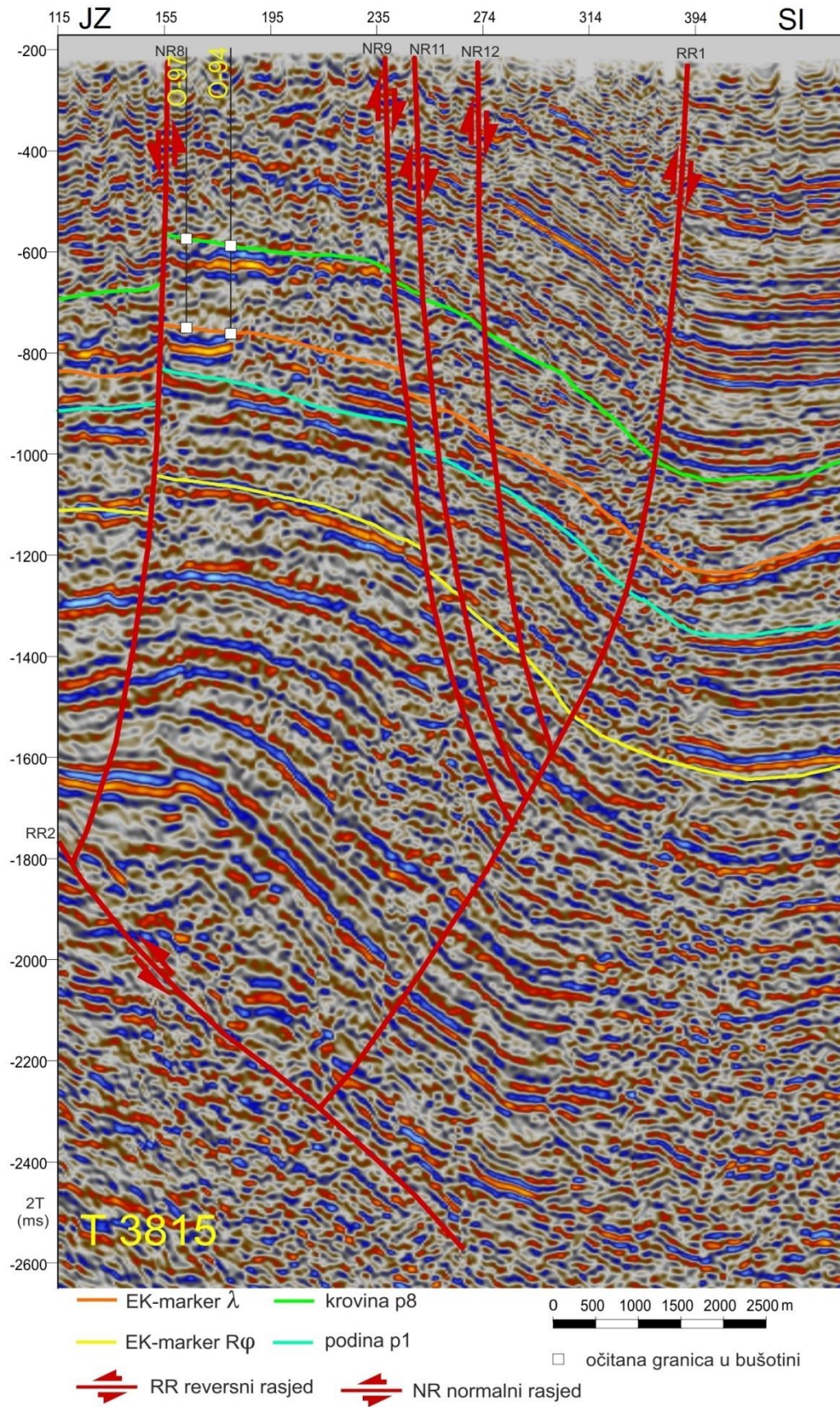
Slika 8-4. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu L 300, koji prolazi istočnim područjem antiklinale

Na slikama 8-5, 8-6, 8-7, 8-8 i 8-9 prikazano je pet približno uzdužnih seizmičkih profila. Na profilu T 3600, koji obuhvaća susjedno polje Okoli, jasno se vidi da horizont krovine p8 ima tendenciju isklinjena u desnu stranu zbog vjerojatno različitih uvjeta taloženja za razliku od drugih slojeva. Razmaci između ostalih horizonata se blago smanjuju od sjeverozapadnog prema jugoistočnom dijelu profila.

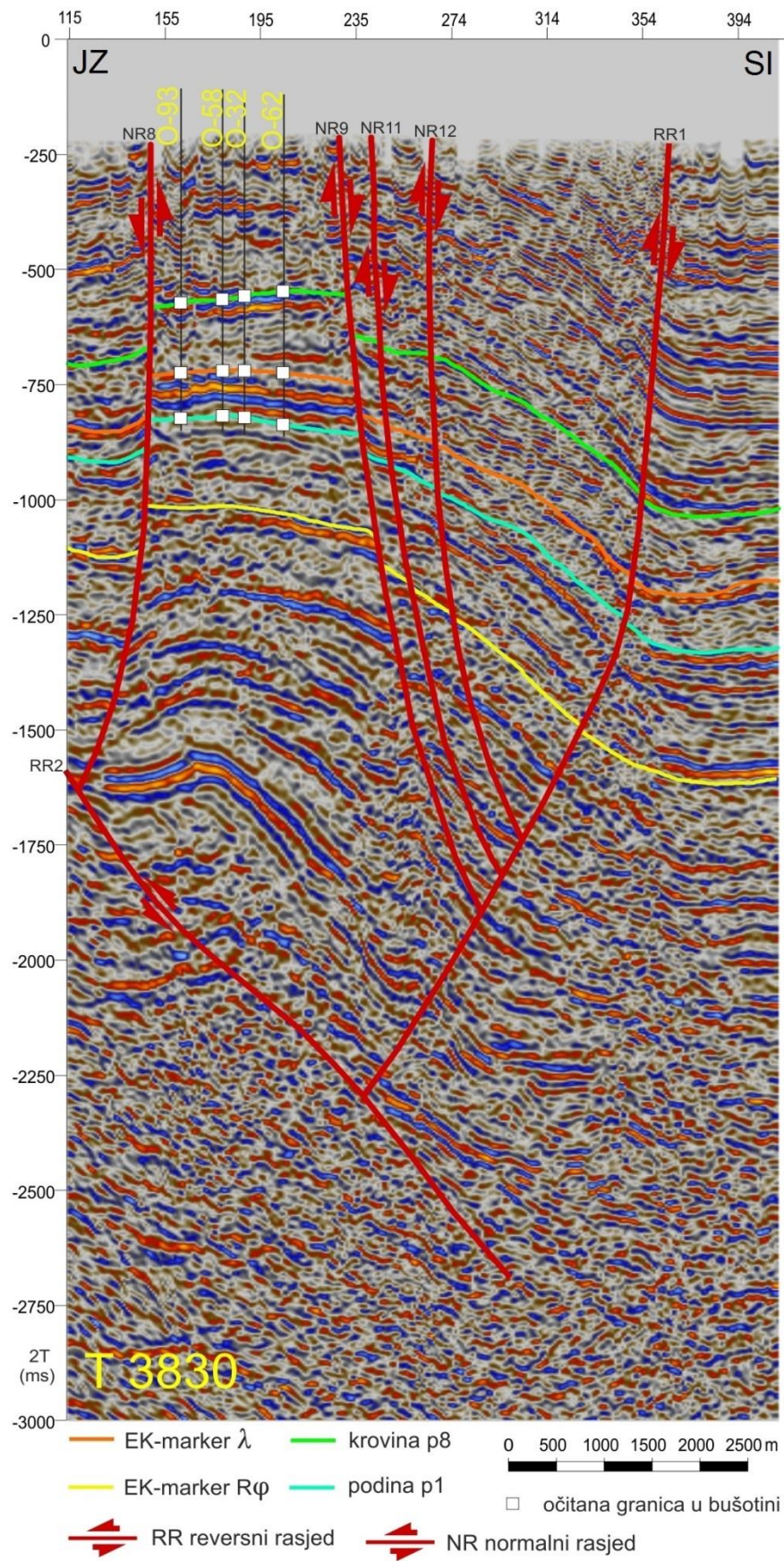
Kako se ide prema profilima T 3815 i T 3830 dolazi do prekida kontinuiteta refleksa po kojima su se interpretirali rasjedi. Skokovi na profilu T 3830 iznose od 40 ms do 100 ms na rasjedu NR9, dok na rasjedu NR8 skok horizonata iznosi oko 80 ms. Središnji tjemeni dio antiklinale je rasjednut normalnim rasjedima s jedne i druge strane. Budući da je tektonski više razlomljeno područje na sjeveroistoku profila, interpretirano je više normalnih rasjeda (NR9, NR11 i NR12) u odnosu na jugozapadni dio (NR8). Na profilima se vide glavni reversni rasjedi RR1 i djelomično RR2. Razmaci na profilu između interpretiranih horizonata su manje-više kontinuirani kroz cijeli profil.



Slika 8-5. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu T 3600, koji prolazi kroz susjedno polje Okoli

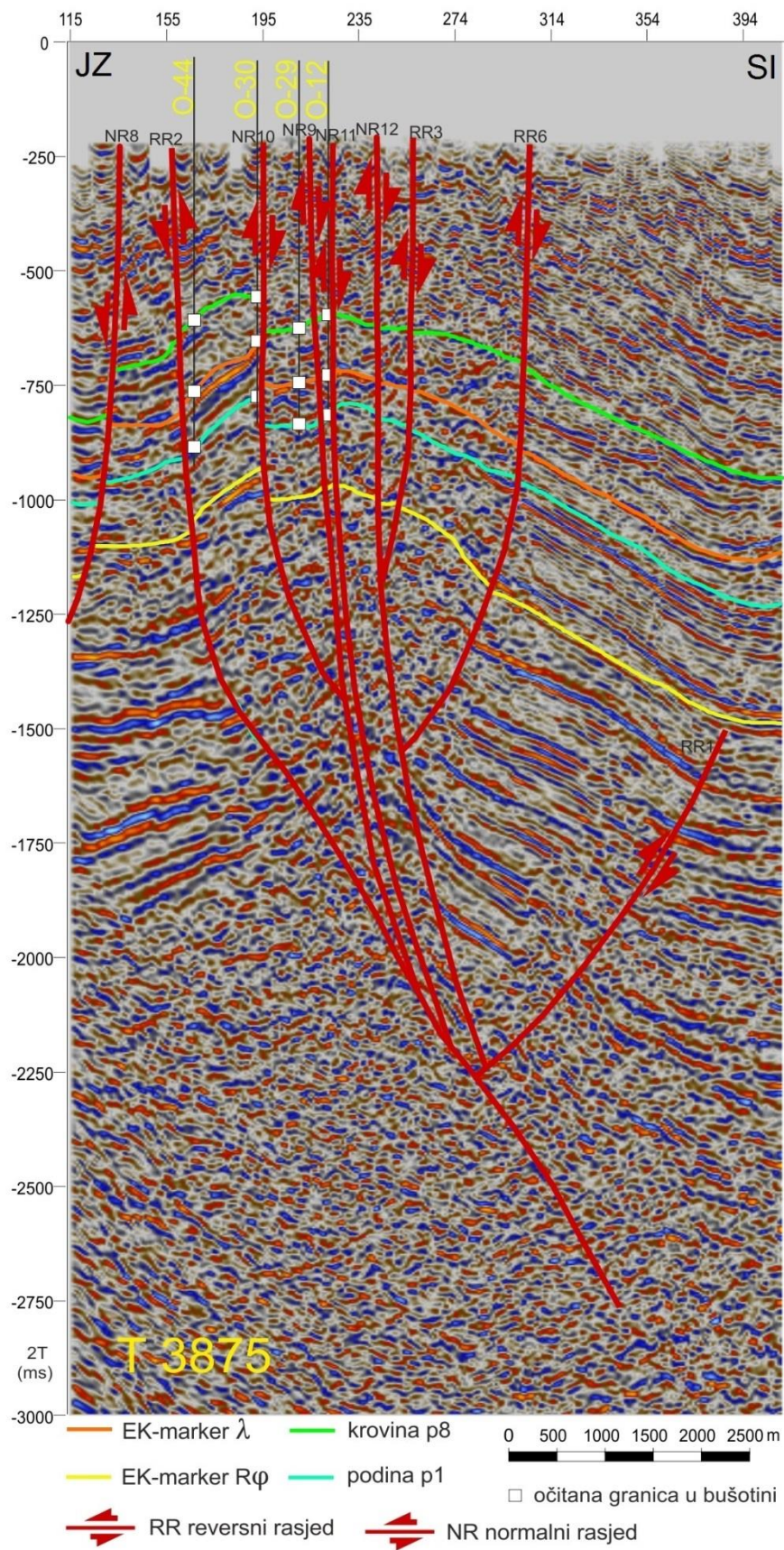


Slika 8-6. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu T 3815, koji prolazi kroz sjeverni dio polja i prikazuje normalne rasjede unutar reversnih rasjeda

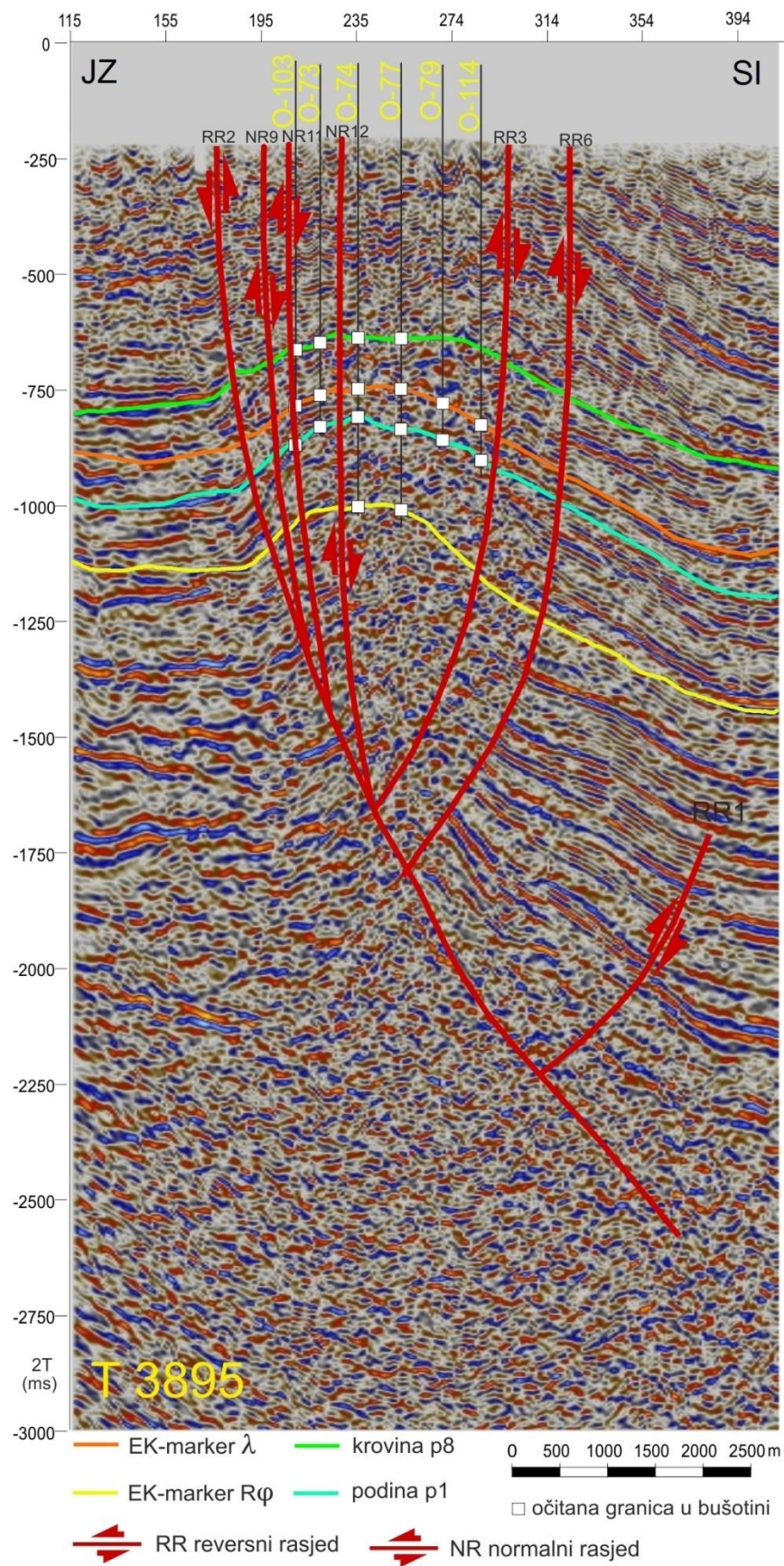


Slika 8-7. Interpretacija horizonta i rasjeda na profilu T 3830, koji prolazi sjevernim dijelom polja te prikazuje normalne rasjede unutar reversnih

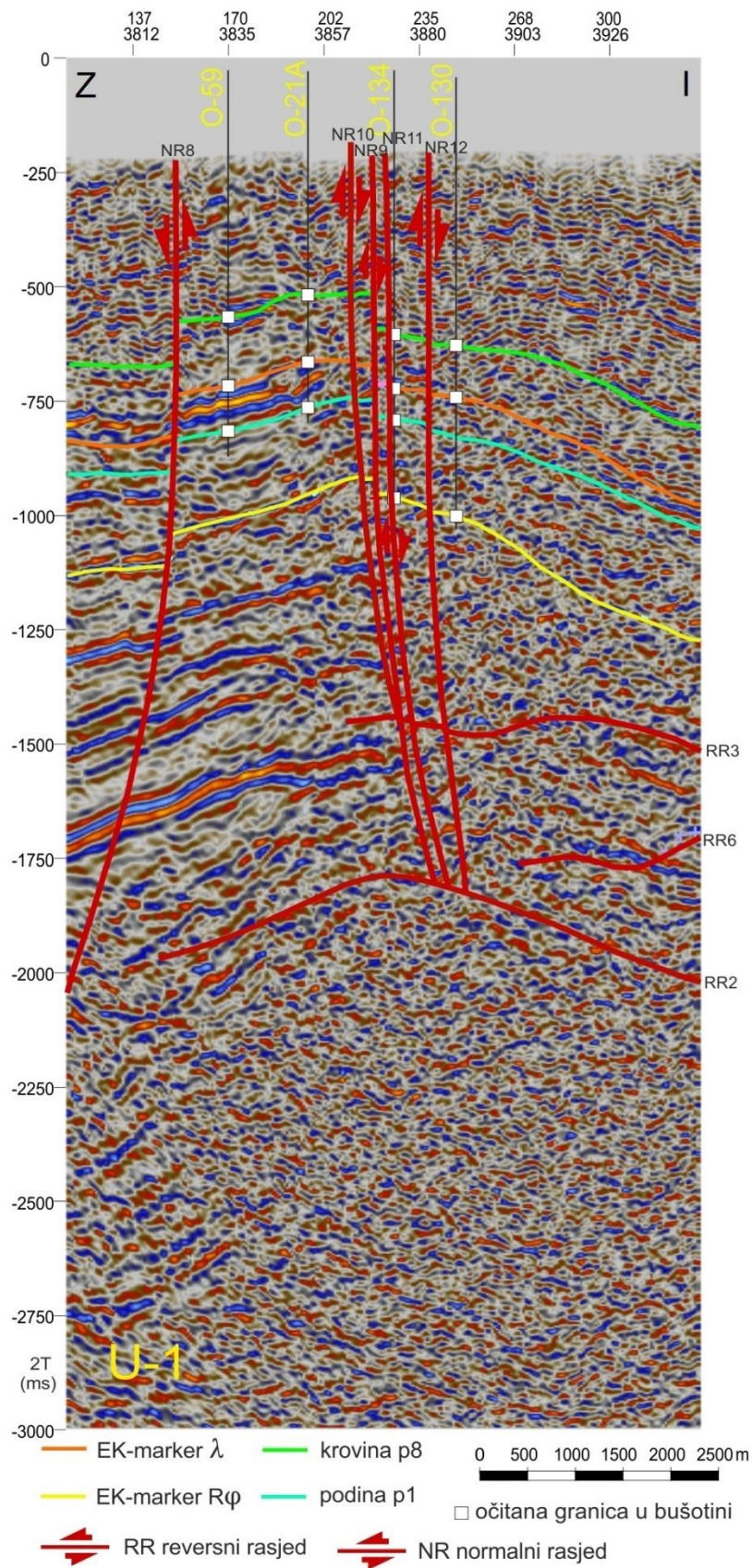
Na profilima T 3875 i T 3895 (slike 8-8 i 8-9) vide se jako rasjednuti dijelovi antiklinale zbog prekida refleksa. Područje većeg skoka pikova istih horizonata na profilu T 3875 prikazano na slici 8-8 nalazi se između bušotina O-30 i O-29 što je okarakterizirano rasjedom NR10. Veličina skoka iznosi oko 80 ms. Generalno gledajući, unutar dva glavna reversna rasjeda RR1 i RR2 se nalazi jako tektonski poremećena zona te je bila otežana interpretacija rasjeda i horizonata. Udaljenosti između interpretiranih horizonata smanjuju se kako se ide prema tjemenu antiklinale. Također vrlo tektonski poremećeno područje se nalazi i na slici 8-9. Tjemeni dio antiklinale je omeđen reversnim rasjedima sa sjeverne strane i normalnim rasjedima s južne strane. Debljina paketa između interpretiranih horizonata se blago smanjuje idući od sjeveroistočnog prema jugozapadnom dijelu profila. Na slici 8-10 prikazan je pravi uzdužni profil U-1 u odnosu na pružanje antiklinale. Razlike između udaljenosti horizonata su relativno ujednačene na cijelom profilu. U središnjem dijelu profila se vidi jako tektonski razlomljena zona interpretirana normalnim rasjedima. Kod rasjeda NR8 skokovi horizonata su oko 70 ms, a kod rasjeda NR10 skokovi interpretiranih horizonata su od 80 ms do 100 ms. Na profilu P-1 (slika 8-11) prikazan je pravi poprečni profil koji ima pružanje sjever-jug. Nalazi se na desnom području antiklinale gdje je tektonski rasjednuta reversnim rasjedima pružanja istok-zapad. Uočavaju se dva glavna reversna rasjeda RR1 i RR2 te unutar njih manji reversni rasjedi RR3, RR6 i RR7. Debljine između interpretiranih horizonata se blago smanjuju idući od sjevera prema jugu.



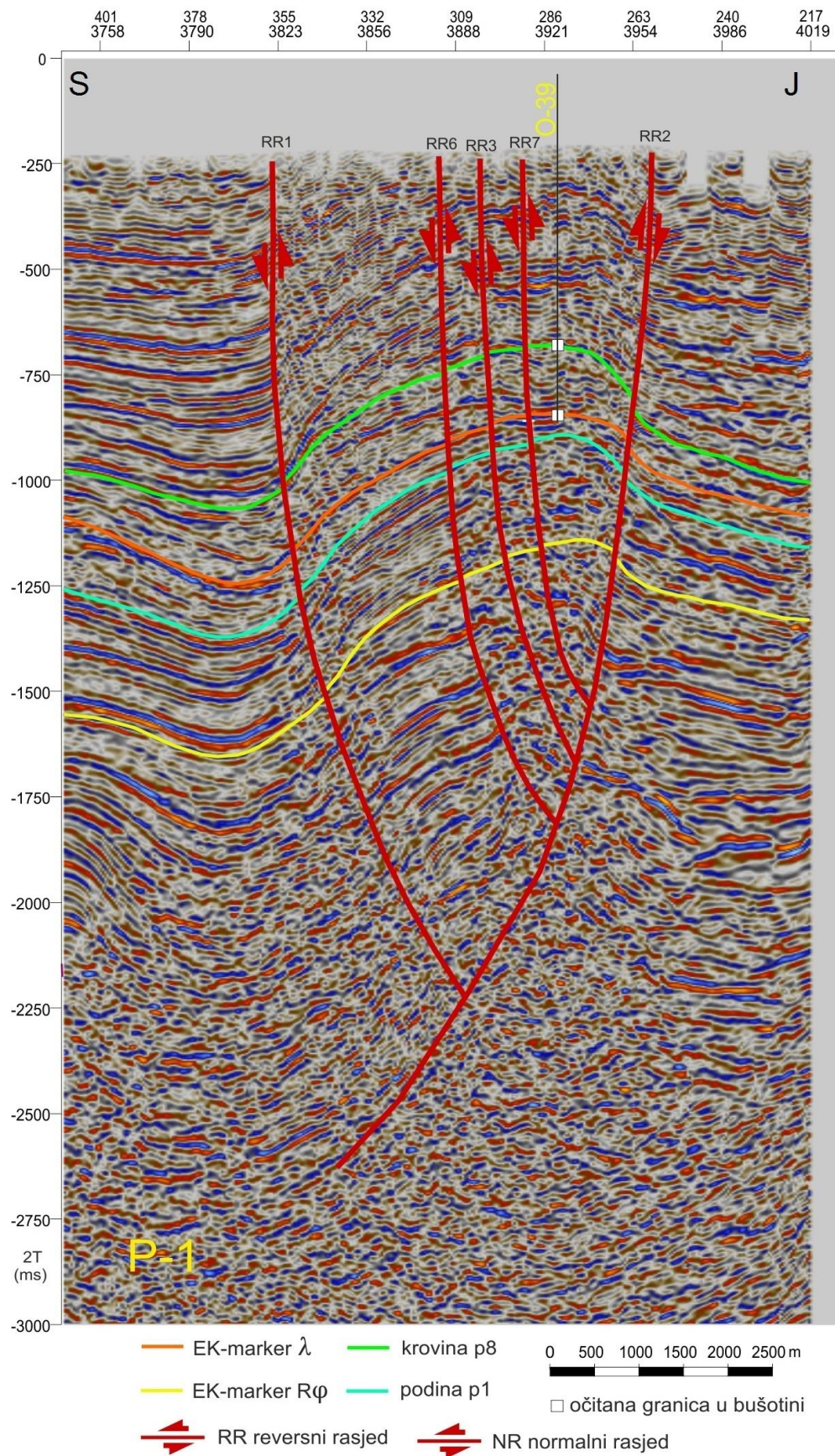
Slika 8-8. Interpretacija horizontata i rasjeda na profilu T 3875, koji prolazi dijagonalno kroz središnji, tektonski vrlo razlomljenog dijela antiklinale



Slika 8-9. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu T 3895, koji prolazi dijagonalno kroz središnji, tektonski vrlo razlomljeni dio antiklinale



Slika 8-10. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu U-1, koji prolazi uzdužno po središnjem dijelu strukture



Slika 8-11. Interpretacija horizonata i rasjeda na profilu P-1, koji prolazi poprečno po istočnom, reversno rasjednutom, dijelu strukture

9. Analiza osnovnih seizmičkih atributa

Seizmički atributi obuhvaćaju podatke koji su dobiveni ili izdvojeni iz klasičnih seizmičkih mjerenja. Ovaj način prikaza bazira se na drugačijem prikazu seizmičkih podataka kako bi se podatci bolje mogli iskoristiti. Atributi u okviru naftno-geoloških istraživanja imaju primjenu u definiranju regionalnih odnosa, strukturno-tektonskog sklopa, odnosa taložnih jedinica, razradi ležišta i slično. Kod razrade ležišta atributi se koriste za definiranje ležišnih karakteristika stijena, kao što su poroznost i zasićenje, utvrđivanje bočnih granica ležišta, promjena u kvaliteti ležišta i sl. (KUKAVICA, 2010.)

Razvoj seizmičkih atributa započet je definiranjem trenutne amplitude, trenutne frekvencije i trenutne faze. Nakon toga su definirani mnogi seizmički atributi. Općenito je u današnje vrijeme teško povući crtu između seizmičkih atributa i klasičnih seizmičkih podataka (ŠUMANOVAC, 2012.)

9.1. Kompleksni seizmički trag

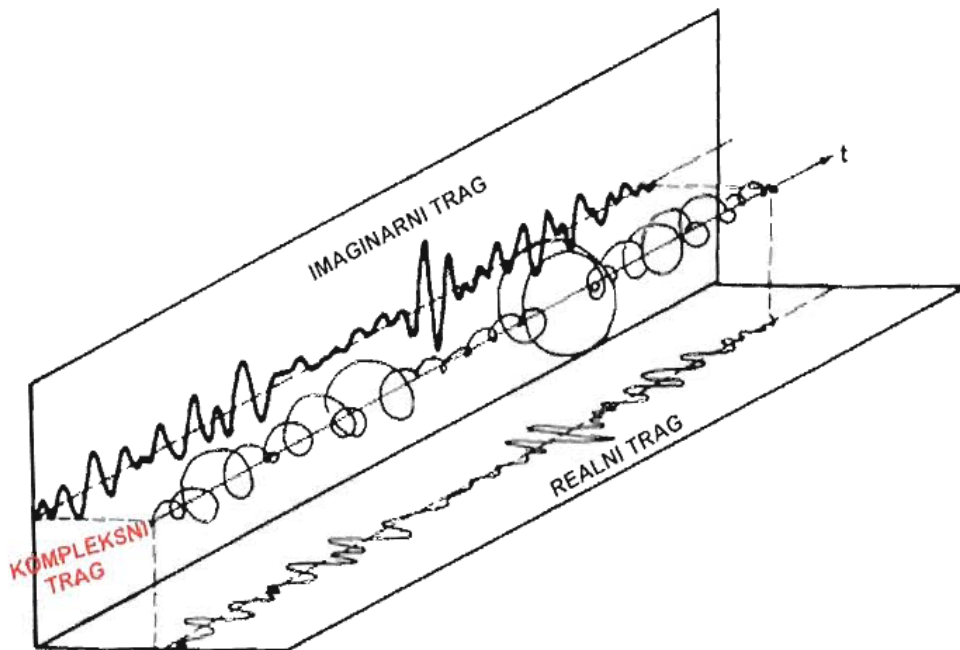
U određenom trenutku standardni seizmički trag definiran je amplitudom i fazom pojedinačnih frekvencija koje sadrži seizmički val. Na standardnom prikazu seizmičkog vala neke informacije se jasno uočavaju dok su neke prikrivene. Pojedine prikrivene karakteristike vala mogu biti jasnije ako se promijeni prikaz seizmičkih podataka pa se time može dosta olakšati interpretacija seizmičkih podataka. Analiza kompleksnog seizmičkog traga omogućava razdvajanje informacija o amplitudi i fazi u zasebne prikaze. Rezultati analize kompleksnog seizmičkog traga su trenutni atributi tragova koji se sastoje od realne komponente (izmjereni seizmički trag) i imaginarne komponente (TANER i dr., 1977):

$$F(t)=f(t)+ih(t) \quad (9-1)$$

gdje je $F(t)$ – kompleksni seizmički trag, $f(t)$ – realna komponenta, $h(t)$ – imaginarna komponenta, i – imaginarna jedinica ($\sqrt{-1}$).

Razlika između realne i imaginarne komponente je ta što je realna komponenta seizmičkog traga identična ulaznom snimljenom tragu, dok je imaginarna komponenta predstavljena Hilbertovom transformacijom realnog seizmičkog traga. Hilbertova transformacija je vrsta filtra koja mijenja položaj svim pozitivnim frekvencijama ulaznog signala za -90° , te svim negativnim frekvencijama za $+90^\circ$. Ovo omogućuje izračunavanje imaginarne komponente niza pomoću realne komponente, odnosno realne pomoću imaginarne. Primjena Hilbertove transformacije na seizmički signal omogućuje prikaz u kompleksnom obliku. Glavni cilj definiranja kompleksnog seizmičkog signala je određivanje trenutne amplitude i trenutne frekvencije iz koje se izvode svi ostali seizmički atributi (TANER i dr., 1977).

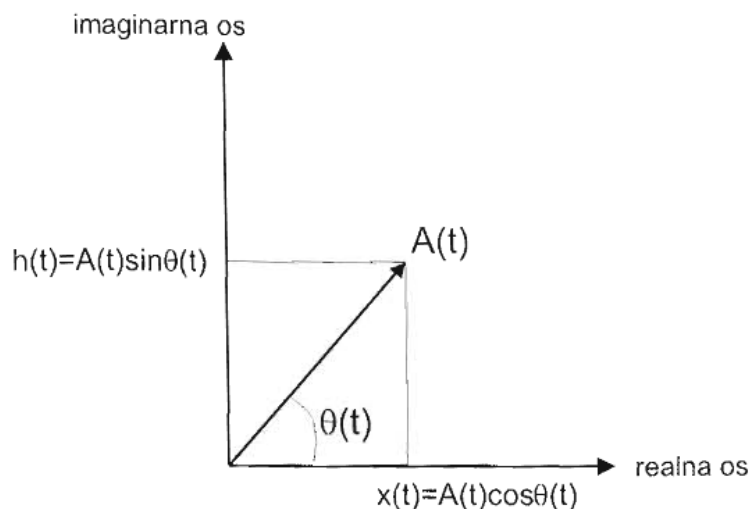
Kompleksni seizmički trag može se zamisliti kao trag koji u kompleksnom prostoru opisuje vektor koji rotira i mijenja svoju duljinu u vremenu (slika 9-1). Krajnji rezultat ove rotacija bit će nepravilna zavojnica. Projekcija te zavojnice na realnu ravninu je realni (stvarni) seizmički trag, dok je projekcija na imaginarnu ravninu dio Hilbertove transformacije realne funkcije, tj. njen pomak u fazi za 90° . Realna i imaginarna komponenta imaju jednak odnos signal-šum.



Slika 9-1. Kompleksni seizmički trag (TANER i dr., 1979)

Duljina rotirajućeg vektora je trenutna amplituda $A(t)$, a kut koji vektor zatvara s pozitivnim dijelom realne osi je trenutna faza $\theta(t)$ (slika 9-2). Trenutna amplituda i faza predstavljaju polarni oblik kompleksnog seizmičkog traga. To odnosno predstavlja sam

seizmički signal te se nazivaju temeljnim atributima pomoću kojih se mogu izračunati ostali atributi.



Slika 9-2. Prikaz seizmičkog vala u polarnim koordinatama ($A(t)$ -trenutna amplituda)

Glavni razlog zbog kojeg se koriste seizmički atributi je prikaz veće rezolucije u odnosu na klasični seizmički prikaz.

Seizmički atributi korišteni u ovom radu su trenutna amplituda, trenutna faza, trenutna frekvencija, kosinus faza, atribut kaosa, RMS-amplituda i varijanica. U daljnjem tekstu će se opisati u kratkim crtama svaki seizmički atribut koji je korišten u ovom radu.

Trenutna amplituda

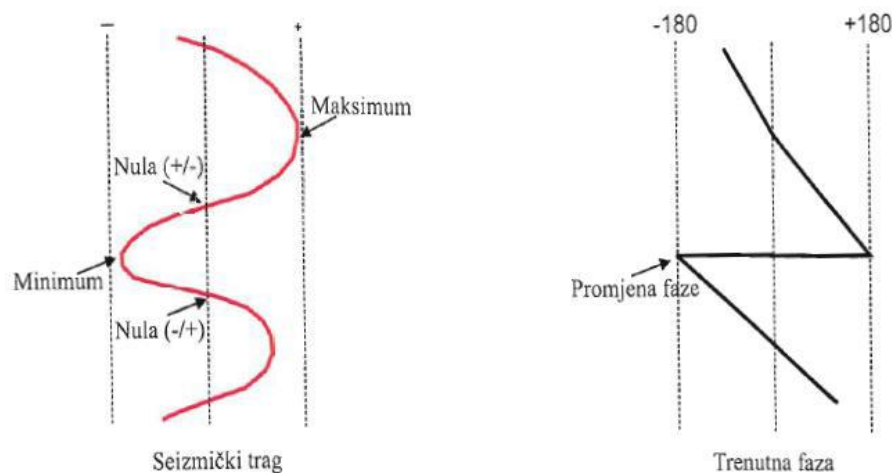
Trenutna amplituda je amplituda ovojnice kompleksnog seizmičkog traga. Naziva se još i snagom refleksije te ne ovisi o fazi i uvijek ima pozitivnu vrijednost. Bregovi i dolovi stvarnog seizmičkog traga odgovaraju visokim vrijednostima trenutne amplitude, no može se dogoditi da se maksimumi ne podudaraju s brijegom ili dolom stvarnog seizmičkog traga. Povećane vrijednosti trenutne amplitude najčešće su vezane za oštre litološke promjene, kao što su diskordancije i promjene u taložnom okolišu. Kod prisustva plina (eng. *Bright Spot*), koji uzrokuju velike vrijednosti, može se koristiti kao neposredni indikator prisustva ugljikovodika.

Trenutna faza

Trenutna faza je kut koji fazor (vektor koji rotira) zatvara s realnom osi te se izračunava pomoću ove formule:

$$\Theta(t) = \text{artg} \frac{h(t)}{f(t)} \quad (9-2)$$

Trenutna faza nije ovisna o snazi refleksije te ima vrijednosti u intervalu od -180° do $+180^\circ$. Idući od maksimuma (brijeg) prema minimumu (dol) realnog seizmičkog traga trenutna se faza mijenja od 0° do 180° . U točki minimalne amplitude realnog seizmičkog traga (dol) faza se mijenja od $+180^\circ$ do -180° (slika 9-3). Dakle, svim maksimumima na stvarnom seizmičkom tragu odgovarat će nulta faza na prikazu trenutne faze, bez obzira na iznos amplitude stvarnog traga. Budući da nije ovisna o snazi refleksije, trenutna faza teži isticanju refleksa i naglašava kontinuitet događaja te se time omogućuje uočavanje i praćenje slabo izraženih refleksa. Može se koristiti i kod prepoznavanja diskontinuiteta, rasjeda, promjene nagiba i isklinjenja (TANER, 1979)



Slika 9-3. Grafički prikaz seizmičkog traga i trenutne faze

Trenutna frekvencija

Trenutna frekvencija $\omega(t)$ predstavlja vremensku promjenu trenutne faze $\theta(t)$, tj. brzinu promjene trenutne faze, koja se izračunava po izrazu:

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (9-3)$$

Vrijednosti trenutne frekvencije uglavnom su pozitivne i ujednačene, dok u slučaju negativne vrijednosti trenutna frekvencija ima u točki infleksije realnog seizmičkog traga. Može se zaključiti da trenutna frekvencija nije frekvencija u pravom smislu riječi. Ako se pretpostavi da je pozitivan smjer vektora obrnut od kazaljke na satu, tada u točki infleksije

vektor usporava i rotira u suprotnom smjeru, tj. trenutna frekvencija postaje negativna. Time vektor nastavlja rotaciju u smjeru obrnutom od kazaljke na satu.

Prikaz trenutne frekvencije koristi se za prepoznavanje efekta apsorpcije i pukotinskog sustava, debljine sedimenta i frekvencijskih karakteristika seizmičkog odziva. U većini slučajeva koristi se za prepoznavanje visoko frekvencijskih sjena (eng. Low Frequency Shadows) koje se pojavljuju u reflektorima neposredno ispod ležišta zasićenim ugljikovodicima (TANER, 1979).

Kosinus faza

Kosinus faza, ili normalna amplituda, predstavlja kosinus kuta trenutne faze $\theta(t)$. Prema matematičkom obliku glasi:

$$\text{kosinus faza} = \cos(\theta(t)) \quad (9-4)$$

Trigonometrijska operacija kosinusa daje rješenje u rasponu od -1 do +1, iz čega slijedi da atribut kosinusa faze ne sadrži informaciju o amplitudi. Postupkom normiranja poboljšavaju se kontinuiranost seizmičkih reflektora i unapređuju prikaz „rubnih elemenata“, kao što su stratigrafske granice i rasjedi. Odličan je pokazatelj lateralnog rasprostiranja, stratigrafskih granica i seizmičkih promjena u facijesima. Kosinus faza se često upotrebljava u područjima slabe rezolucije, odnosno malih amplituda, kako bi se poboljšala strukturna interpretacija.

Atribut kaosa

Atribut kaosa ističe sve lokalne kaotične pojave unutar 3D seizmičkih podataka (ISKE & RANDEN, 2005). Pomoću ovog atributa, područje niske ujednačenosti signala odgovara kaotičnom signalnom oblikom te je taj atribut koristan za interpretaciju kaotičnih tekstura. Područja s kaotičnim signalom povezana su s lokalnim geološkim diskontinuitetima.

RMS-amplituda

Naziv ovog seizmičkog atributa dolazi od engleskog naziva *Root mean square amplitude*, odnosno drugi korijen srednje vrijednosti kvadrata amplitude. Izračunava se prema formuli:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (9-5)$$

RMS amplituda naglašava varijacije u akustičnim impedancijama unutar odabranog intervala. Maksimum i minimum amplitude mjere refleksije, odnosno promjene u akustičnim impedancijama unutar odabranog vremenskog intervala. Maksimum amplitude predstavlja najveću pozitivnu vrijednost (brijeg vala) unutar odabranog vremenskog intervala, dok minimum amplitude predstavlja najveću negativnu vrijednost (dol vala) unutar vremenskog intervala.

Atribut varijance

Bahorich i Farmer su 1995. uveli naziv „*The Coherency cube*“, seizmički atribut namijenjen prvenstveno prikazivanju diskontinuiteta. Prema autorima, rasjedne površine predstavljaju numeričke i grafičke seizmičke podatke izrazito različite od susjednih podataka. Time se omogućuje automatsko praćenje određenog seizmičkog horizonta.

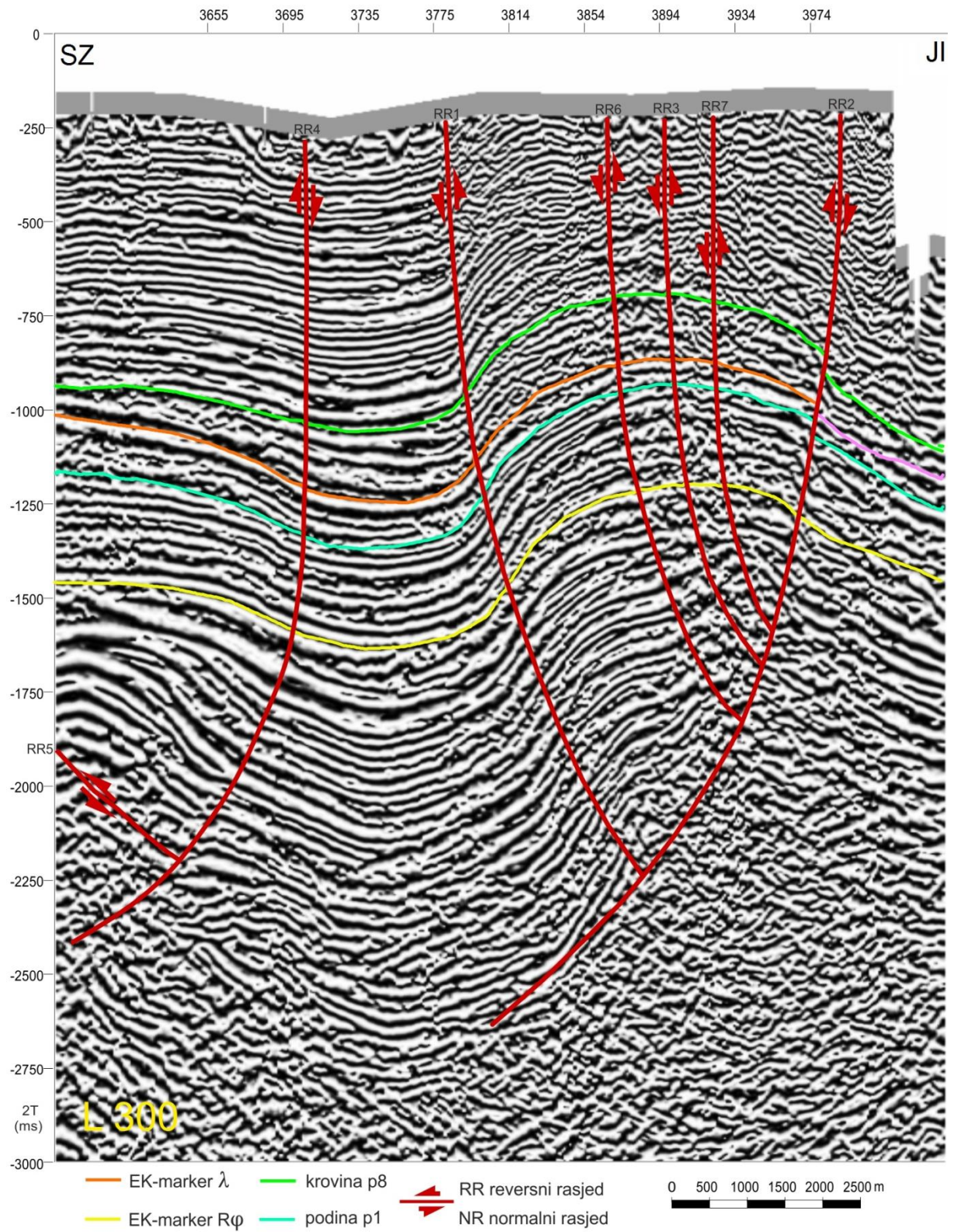
Trasiranje rasjeda u 3D seizmičkim podacima CRAWFORD& MEDWEDEFF (1999) prikazali su otkrivanjem linearnih pojava na lateralnim presjecima kroz diskontinuitete. Kao nastavak rada VAN BEMMEL i dr. (2000) patentirao je atribut seizmičke varijance koji se koristi za izdvajanje „rubnih elemenata“ iz ulazne grupe podataka. „Rubne elemente“ predstavljaju horizontalni prekidi u kontinuitetu amplitude. Ovom metodom se izračunava normirana varijanca s ponderiranim vertikalnim izgladivanjem (*Interpreter's Guide to Seismic Attributes*, 2007).

Također je važan stratigrafski atribut jer omogućava definiranje taložnih struktura kao što su kanalne forme, grebeni i sl. Uz varijancu, druge „rubne metode“ u Petrelovom izborniku seizmičkih atributa čine atribut kaosa (eng. *Chaos*) i „Dip deviation“.

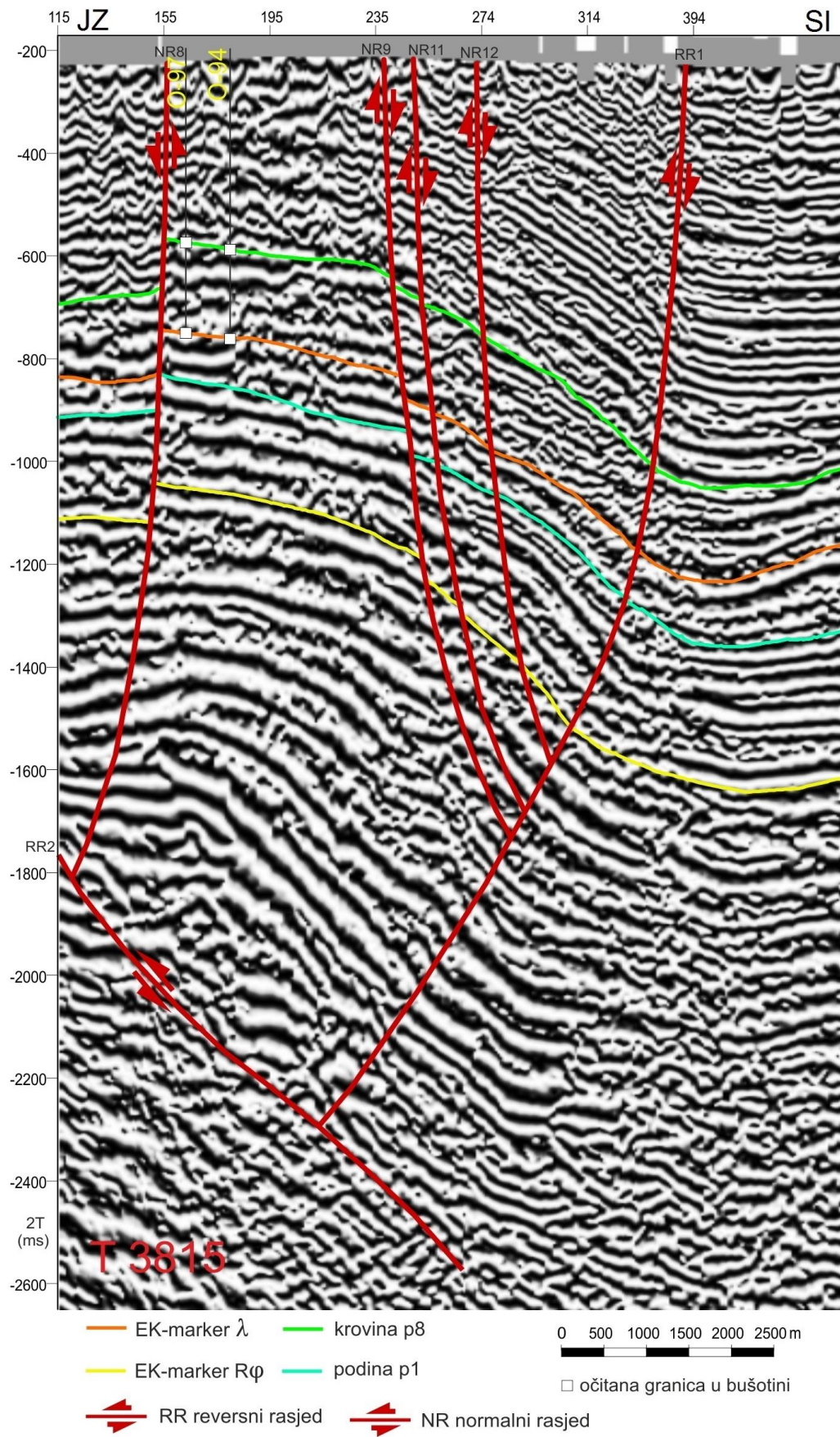
9.2. Upotreba seizmičkih atributa u interpretaciji

Od samog početka tijekom interpretacije horizonata i EK-markera korišteni su seizmički atributi. Najbolji atributi koji nam pomažu u interpretaciji horizonata odnosno praćenju refleksa su kosinus faze i trenutna faza. U ovom radu je korišten seizmički atribut kosinus faze prilikom interpretacije horizonata (slika 9-4). Tijekom interpretacije horizonata i EK-markera na sjeverozapadnom području, gdje se nalazi blaga sinklinala, interpretacija nije bila zahtjevna jer su refleksi jasno uočljivi i kontinuirani. Kako na području antiklinale nemamo kontinuirane reflekske jer je područje jako tektonski razlomljeno rasjedima RR3,

RR6 i RR7, teško je bilo interpretirati horizonte i EK-markere na klasičnim seizmičkim profilima. Uporabom kosinus faze olakšan je postupak interpretacije. Također, na slici 9-5 je prikazana uporaba kosinusa faze. Na sjeveroistočnom dijelu profila na području sinklinale imamo kontinuirane refleksije te je interpretacija olakšana, dok na krilu antiklinale zbog zone rasjeda RR1, NR9, NR11 i NR12 refleksije nisu kontinuirane te je korištenjem atributa kosinusa faze interpretacija olakšana.



Slika 9-4. Interpretacija horizonata i EK-markera pomoću atributa kosinus faze

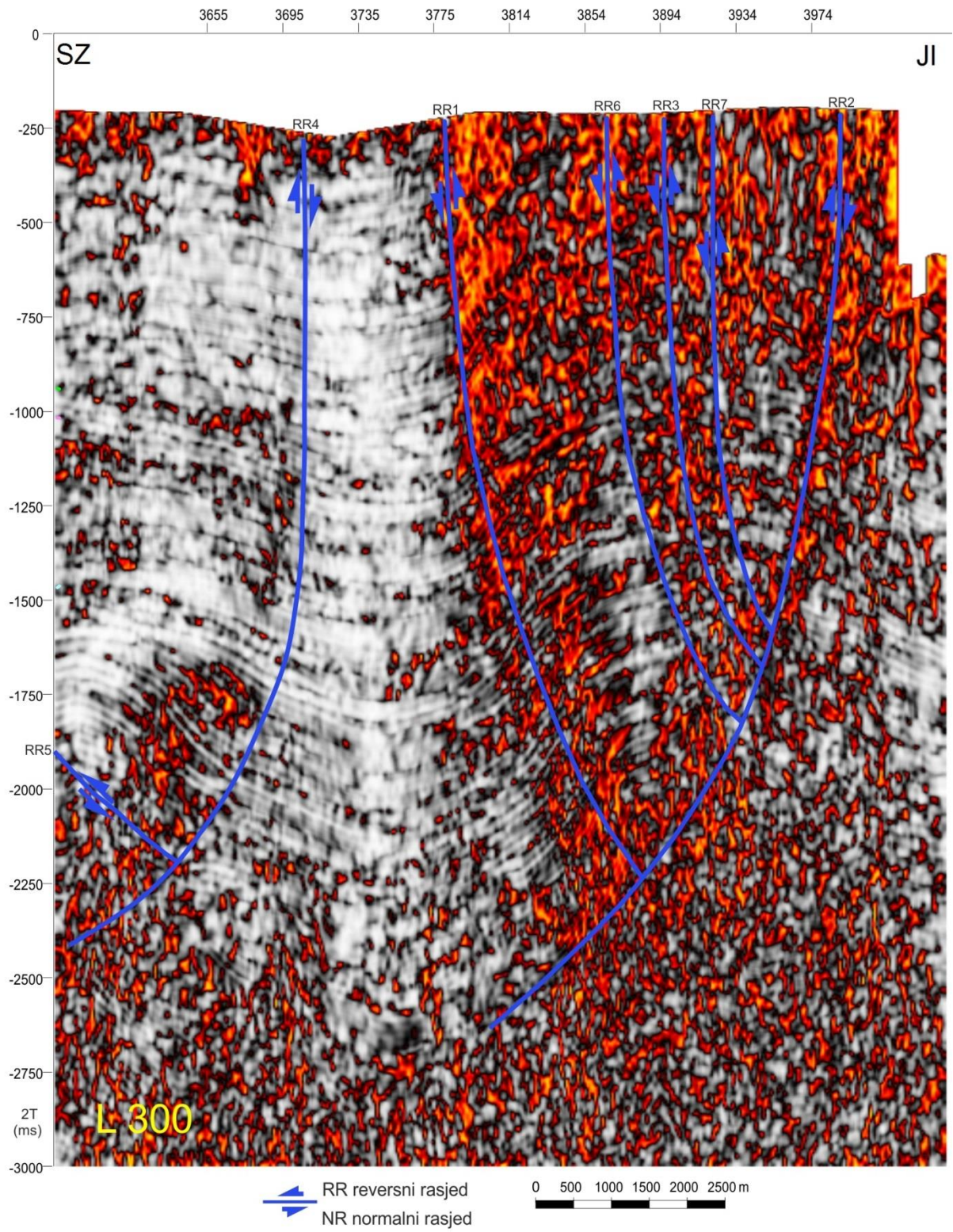


Slika 9-5. Interpretacija horizonata i EK-markera pomoću atributa kosinusa faze

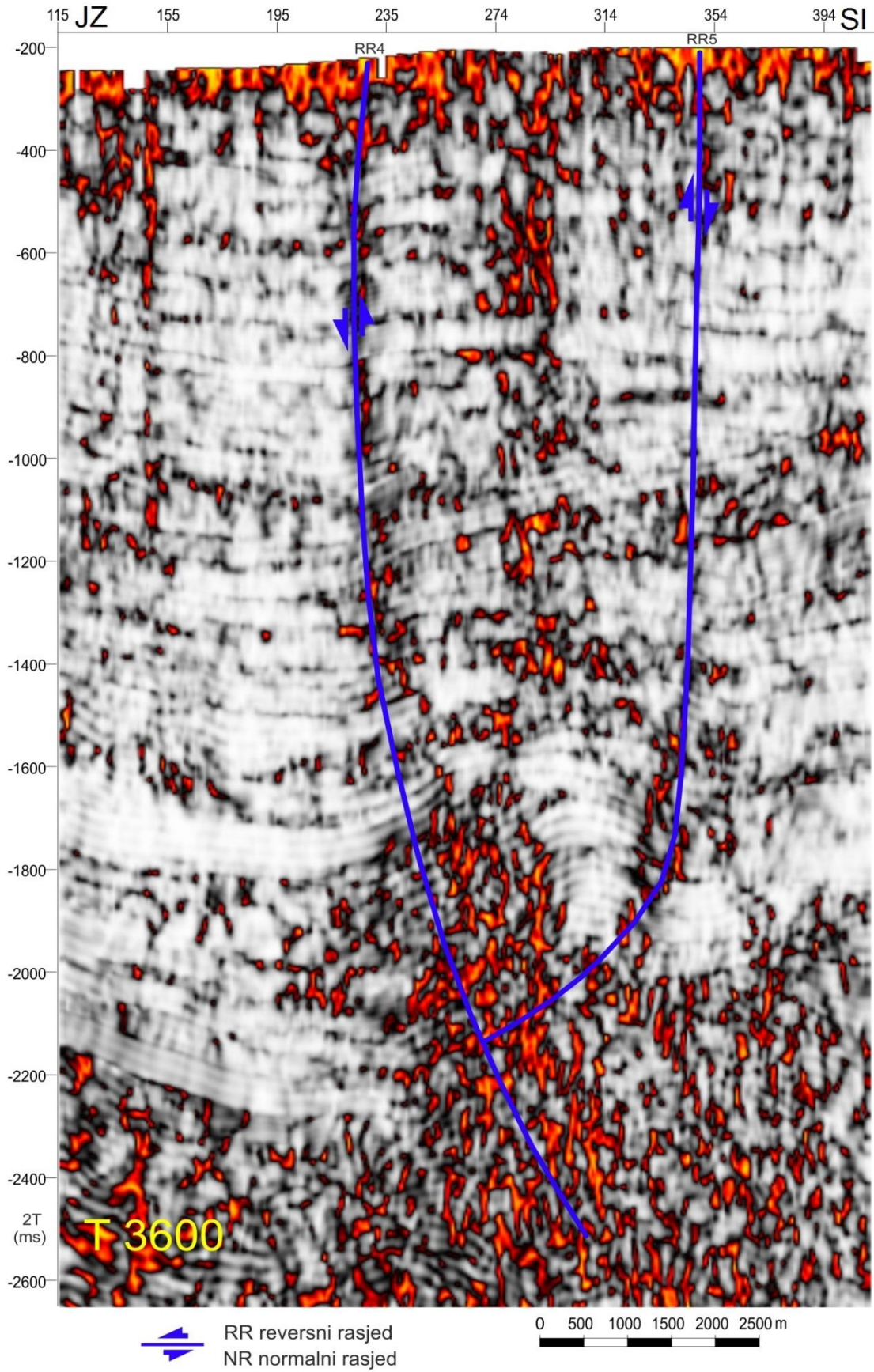
Interpretacija rasjeda u ovom radu je najviše rađena na klasičnim seizmičkim profilima. To su većinom rasjedi koji imaju veliki skok koji su objašnjeni u poglavlju 8. Rasjede koji imaju mali skok teško je definirati na klasičnom seizmičkom prikazu. Upotrebom seizmičkih atributa uvelike se olakšava daljnje definiranje i interpretacija rasjeda. Seizmički atributi koji su korisni pri interpretaciji rasjeda su atributi varijance, kaosa i frekvencije. Tijekom interpretacije u ovom radu najviše je korišten atribut varijance, a manje atribut kaosa. Na slikama 9-6, 9-7 i 9-8 prikazani su profili gdje su korišteni atributi varijance. Na slici 9-6 prikazan je profil L 300 gdje se vidi da rasjed RR1 odvaja područje sinklinale na sjeverozapadnom, tektonski manje razlomljenom dijelu i područje antiklinale na jugoistočnom, tektonski više razlomljenom području. Unutar strukture antiklinale koja je omeđena glavnim reversnim rasjedima RR1 i RR2 nalaze se povećane vrijednosti varijance koja ukazuje na diskontinuitete. Na profilu T 3600 prikazanom na slici 9-7 vide se dva reversna rasjeda RR4 i RR5 koja se nalaze na sjevernom dijelu interpretiranog područja. Reversni rasjedi omeđuju vrlo blagu antiklinalu te su interpretirani baš na mjestima povećane vrijednosti varijance koja ukazuje na postojanje diskontinuiteta. Kod interpretacije profila T 3815 (slika 9-8) vidi se jako tektonski razlomljeno područje između reversnog rasjeda RR1 i normalnog rasjeda NR9 zbog povećanih vrijednosti varijance. Taj dio tektonski vrlo razlomljenog područja predstavlja krilo antiklinale. Također su na istom profilu odvojeni tjemeni dio i krila antiklinale interpretacijom normalnih rasjeda NR8 i NR9 na mjestima povećane vrijednosti varijance.

Pri interpretaciji rasjeda na profilu L 300 (slika 9-9) prikazano je korištenje seizmičkog atributa kaosa. Kaotičan signal prikazan plavom bojom sugerira postojanje diskontinuiteta koji se vidi samo na jugoistočnom dijelu profila te su interpretirani reversni rasjedi RR6, RR3, RR7 i RR2. Na ostatku profila jako je teško definirati ostale rasjede.

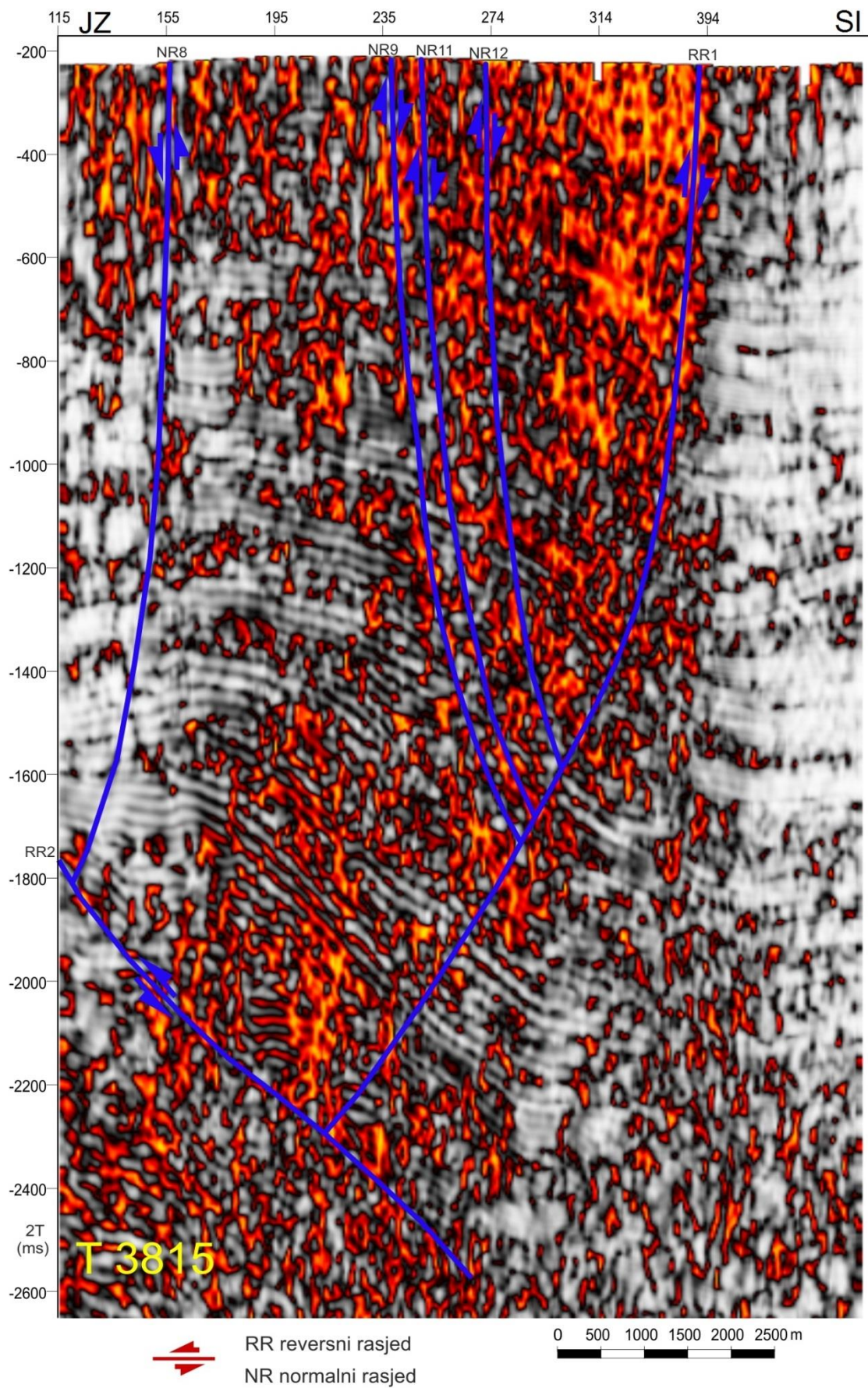
Zbog nemogućnosti definiranja većine diskontinuiteta na seizmičkim profilima u manjoj mjeri je pri interpretaciji rasjeda korišten atribut kaosa. Zbog bolje izraženih diskontinuiteta, interpretacija je najčešće rađena korištenjem seizmičkog atributa varijance.



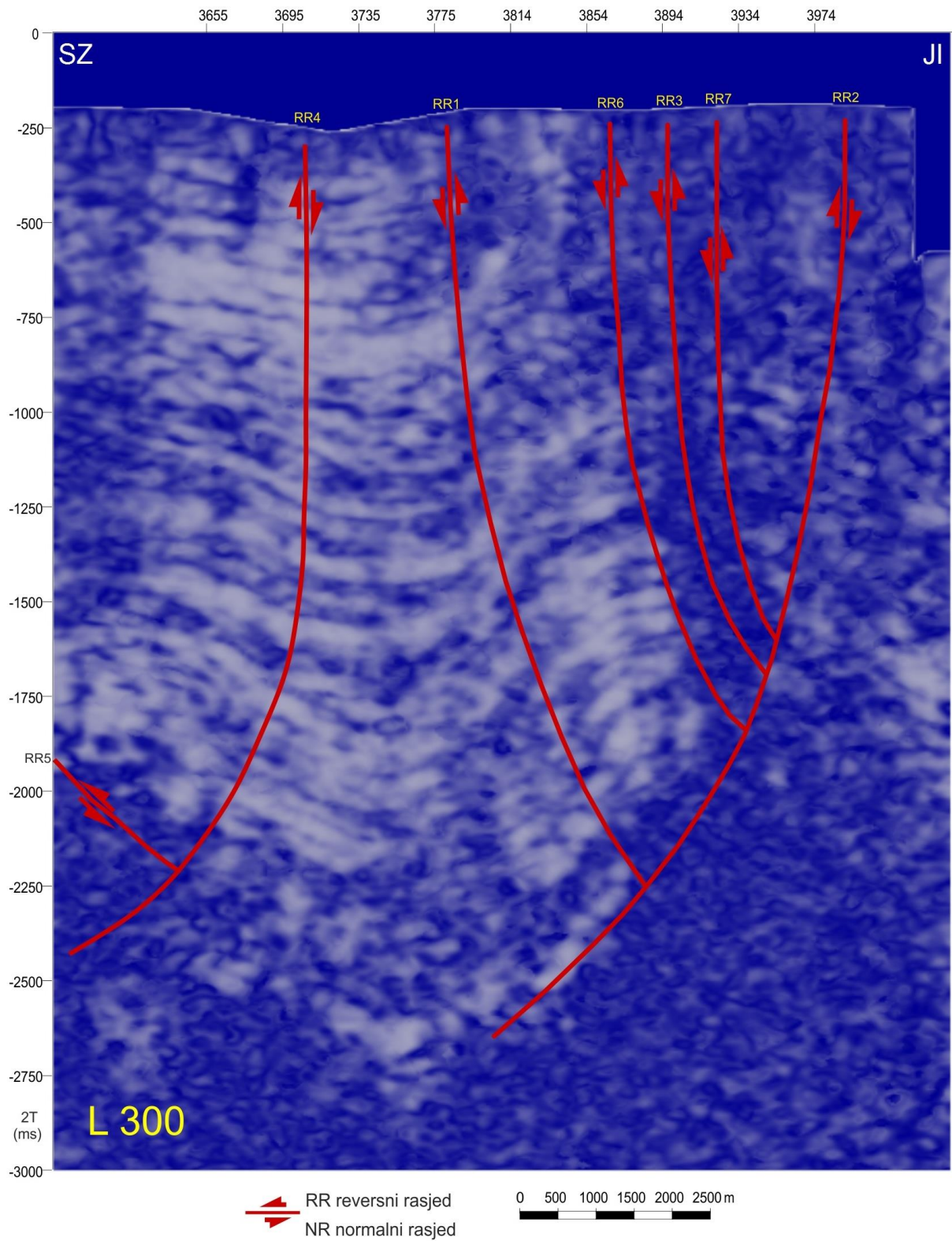
Slika 9-6. Korištenje atributa varijance kod interpretacije rasjeda na profilu L 300



Slika 9-7. Korištenje atributa varijance kod interpretacije rasjeda na profilu T 3600

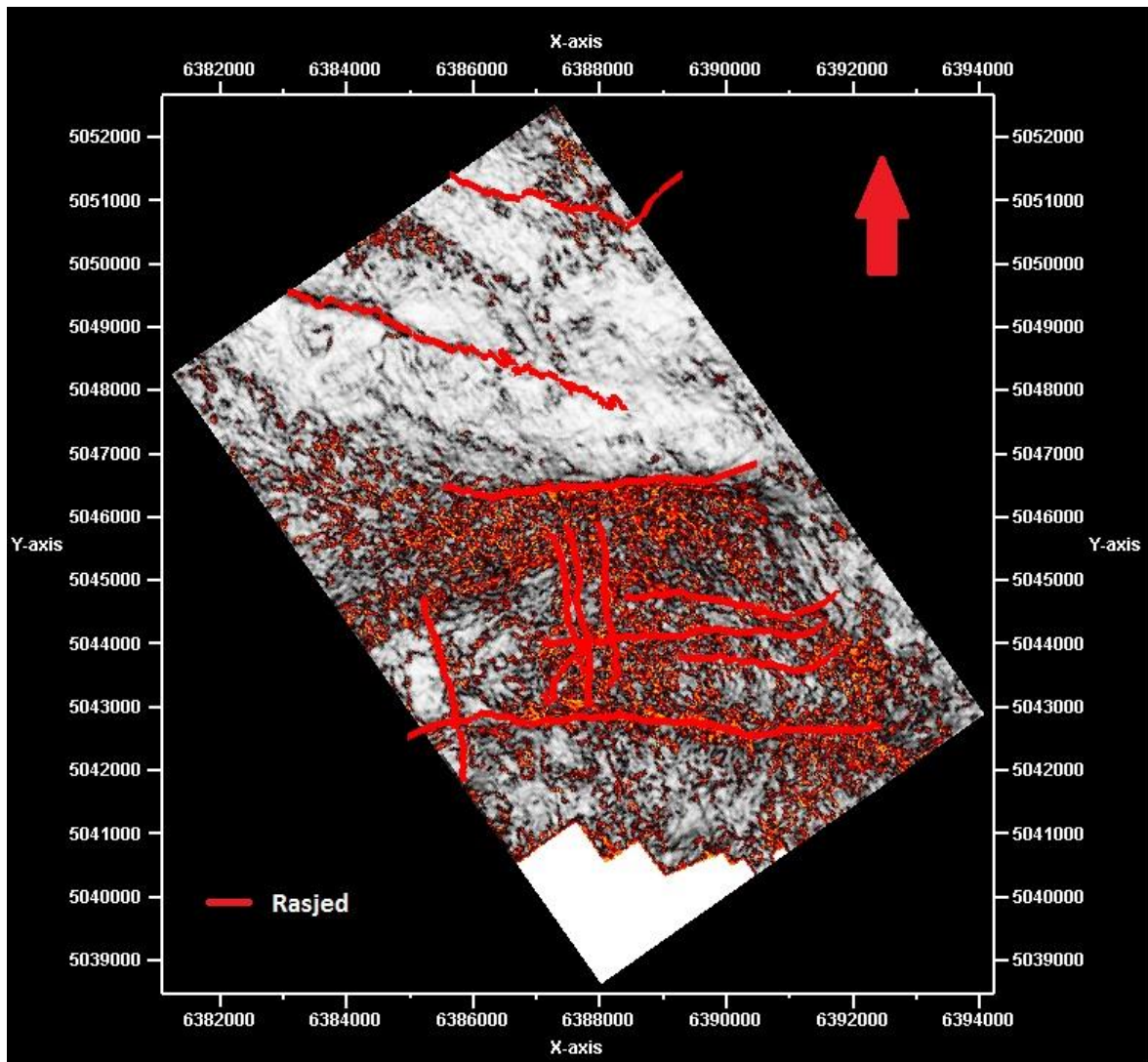


Slika 9-8. Korištenje atributa varijance kod interpretacije rasjeda na profilu T 3815

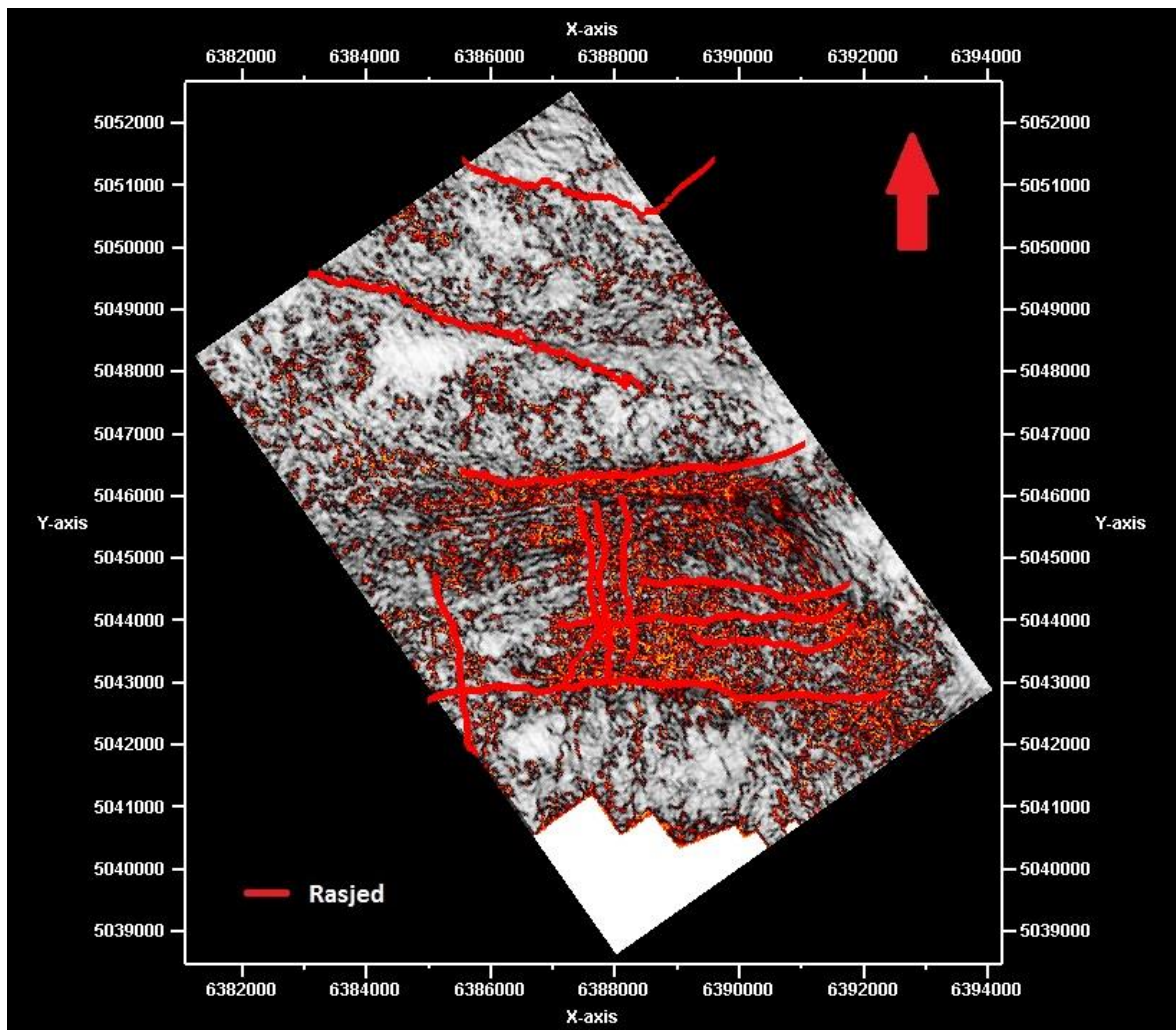


Slika 9-9. Korištenje atributa kaosa kod interpretacije rasjeda na profilu L 300

Prikazani su horizontalni vremenski presjeci seizmičkog atributa varijance za 952 ms (slika 9-10) i 1200 ms (slika 9-11). Jasno se vidi da su na područjima s povećanom vrijednošću varijance interpretirani rasjedi. Na oba primjera se jako dobro izdvajaju sjeverni, manje tektonski poremećen, od južnog, jače tektonski poremećenog područja.



Slika 9-10. Horizontalni presjek varijance na 952 ms



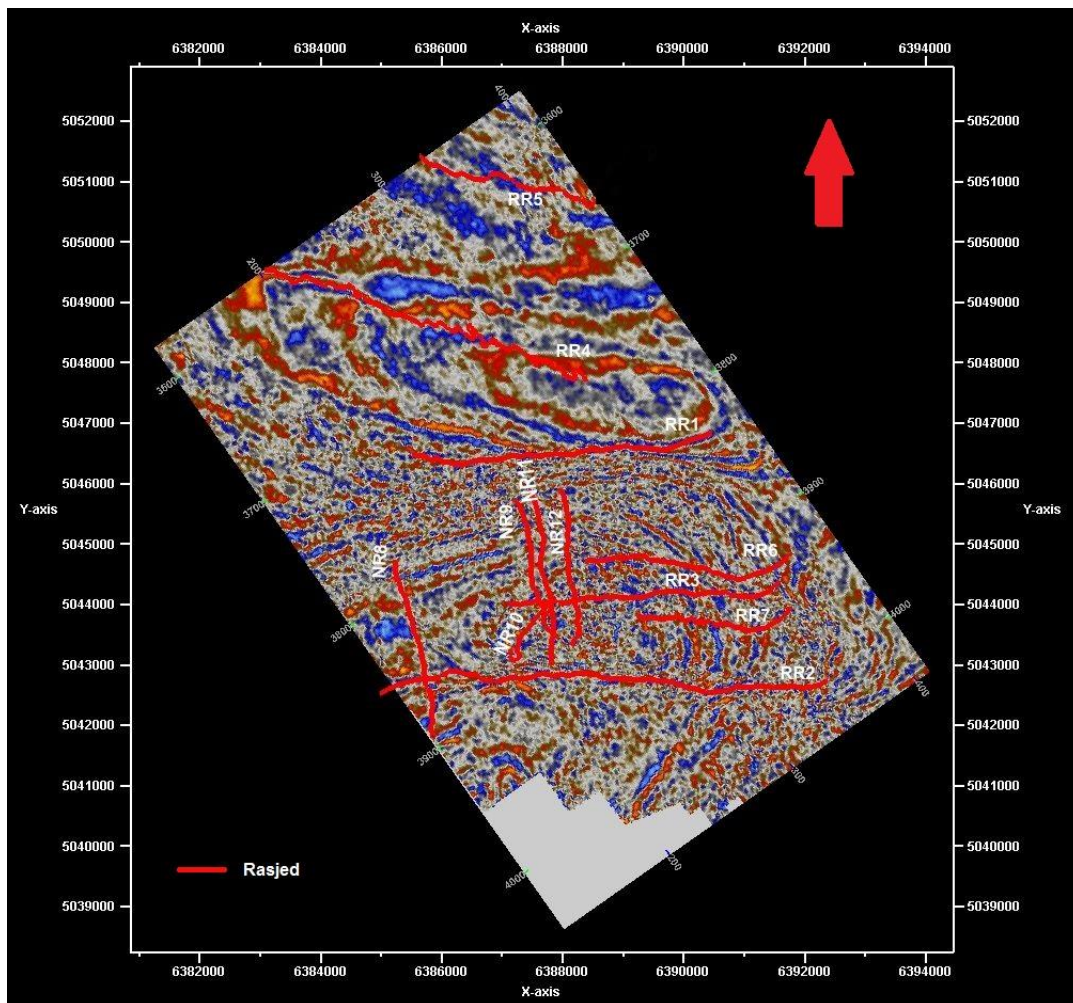
Slika 9-11. Horizontalni presjek varijance na 1200 ms

10. Strukturno-tektonska interpretacija

Polje Stružec je izdužena antiklinala, odnosno brahiantiklinala dužine 4,5 i širine 1,8 km s pravcem pružanja dulje osi istok-zapad. Antiklinala je omeđena dvama glavnim reversnim rasjedima pružanja istok-zapad te poprečnim, normalnim rasjedima pružanja sjever-jug.

10.1. Interpretacija rasjeda

Polje Stružec je tektonski vrlo razlomljeno te su se pojavljivale poteškoće kod interpretacije horizonata i EK-markera kroz seizmičke profile. Interpretacija se radila praćenjem određenih kontinuiranih refleksa opažanih na seizmičkim profilima. Prekidi kontinuiranih refleksa stvarali su poteškoće u interpretaciji, te su time definirane paraklaze pojedinih rasjeda. Karakter rasjeda se određivao prema relativnom pomaku krovinskog krila u odnosu na podinsko krilo te su interpretirani normalni i reversni rasjedi. Kao što je spomenuto, antiklinala je rasjednuta dvama glavnim reversnim rasjedima RR1 i RR2 (slika 10-1) koji imaju pružanje istok-zapad kao i struktura Osekovo. Reversni rasjedi interpretirani unutar ova dva rasjeda su RR3, RR6 i RR7 koji imaju također isto pružanje (slika 10-1). Istočni dijelovi tih rasjeda ipak skreću prema sjeveroistoku. Reversni rasjedi na sjevernom području interpretacije su RR4 i RR5 te pripadaju susjednom polju Okoli. Pružanje reversnih rasjeda je IJI-ZSZ (slika 10-1). Kod rasjeda RR5 istočni dio zakreće prema sjeveroistoku. Što se tiče normalnih rasjeda, oni generalno imaju pravac pružanja sjever-jug te se pružaju okomito na strukturu. Ti rasjedi su NR9, NR11 i NR12 i nalaze se u središnjem dijelu antiklinale, te NR8 koji se nalazi na zapadnom dijelu interpretiranog područja (slika 10-1). Rasjed NR10 je normalnog karaktera s pružanjem sjeveroistok-jugozapad. Gledajući općenito na cijelo područje može se reći da NR9 odvaja antiklinalu na dva dijela: istočni, koji je značajnije tektonski razlomljen od zapadnog, manje tektonski razlomljenog.



Slika 10-1. Horizontalni vremenski presjek (952 ms) s položajima i oznakama rasjeda

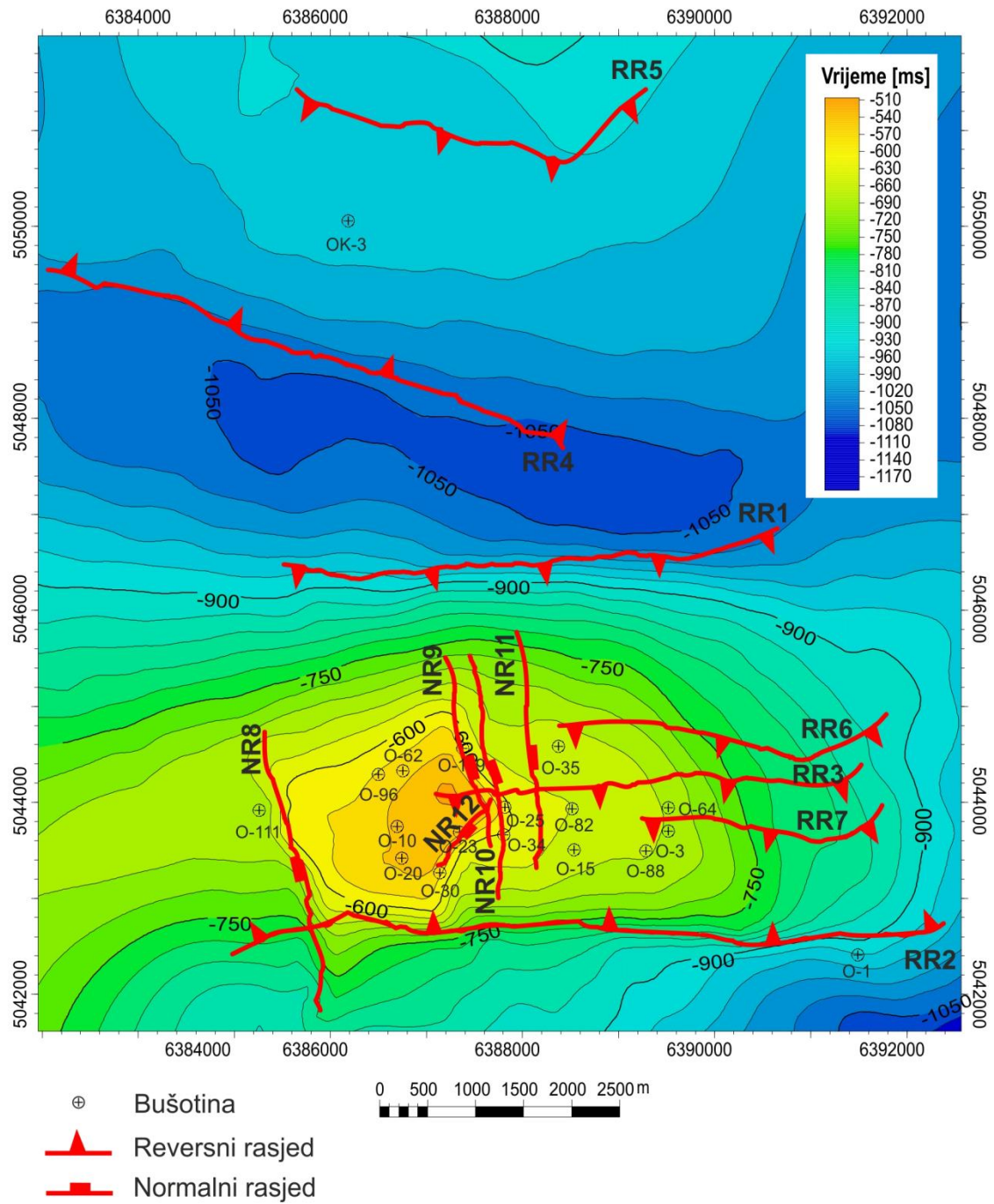
Nastanak ovih rasjeda može se svrstati u dvije skupine: reversnih rasjeda koji su nastali pod utjecajem kompresijskih sila i normalnih rasjeda koji nastaju uslijed ekstenzijskih sila. Položaji glavnih reversnih rasjeda RR1 i RR2 govore nam o kompresijskoj fazi koja je odgovorna za nastajanje antiklinale i nakupljanje ugljikovodika. Normalni rasjedi su pružanja sjever-jug te su nastali ekstenzijskim procesima. Dva su moguća objašnjenja nastanka normalnih rasjeda. Prva je mogućnost da je poslije kompresijske faze nastala naknadna ekstenzijska faza te je došlo do stvaranja normalnih rasjeda (DEVIĆ i dr., 1978). S druge strane nastanak normalnih rasjeda objašnjava nastanak i reversnih i normalnih rasjeda tijekom jedne faze. Tijekom djelovanja kompresije i nastajanja strme antiklinale, u vršnom dijelu dolazi do relaksacije i nastanka normalnih rasjeda. U literaturi se spominje da u Panonskom bazenu ekstenzija završava u pontu, pa u pliocenu dolazi do promjene stresa i nastanka kompresijske faze. Ona traje do danas i uzrokuje stvaranje pozitivnih

cvjetnih struktura i antiklinala (HORVÁTH, 2005). Budući da se normalni rasjedi nalaze unutar antiklinale (osim rasjeda NR8) te ne sijeku glavne reversne rasjede, može se pretpostaviti da su normalni rasjedi nastali tijekom jedne faze relaksacijom vršnog dijela antiklinale. Pružanje normalnih rasjeda odgovara smjeru najvećeg regionalnog stresa S-J kojom je nastala antiklinala.

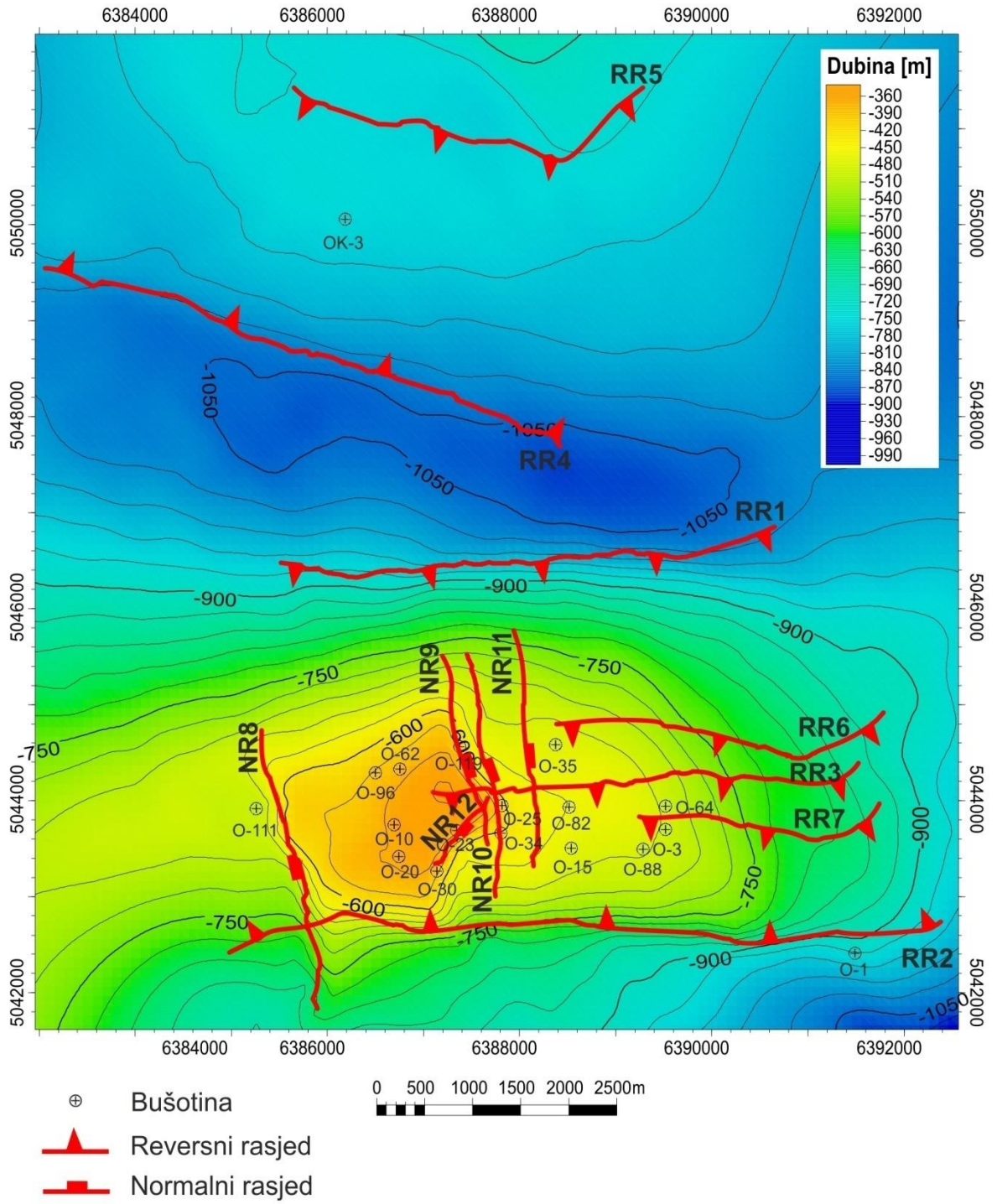
10.2. Strukturne karte

Strukturne karte su načinjene za oba horizonta i oba Ek-markera kako bi se mogli lakše pratiti strukturni i tektonski odnosi. Jako dobro se uočava pružanje antiklinale i pružanje rasjeda, te horizontalno protezanje rasjeda. Također se na strukturnim kartama uočavaju dva glavna reversna rasjeda RR1 i RR2 koja određuju antiklinalu te normalni rasjed NR9 koji odvaja zapadni, manje tektonski razlomljeni dio od istočnog, značajnije tektonski razlomljenog dijela. Jasno nam karte govore i o sličnim pružanjima reversnih rasjeda kao i normalnih rasjeda. Time se može interpretirati da su reversni ili normalni rasjedi nastali tijekom istih tektonskih uvjeta i istog geološkog vremena. Sva presjecišta rasjeda i određenih strukturnih karata su različita jer se nagibi paraklaza rasjeda s povećanjem dubine opadaju.

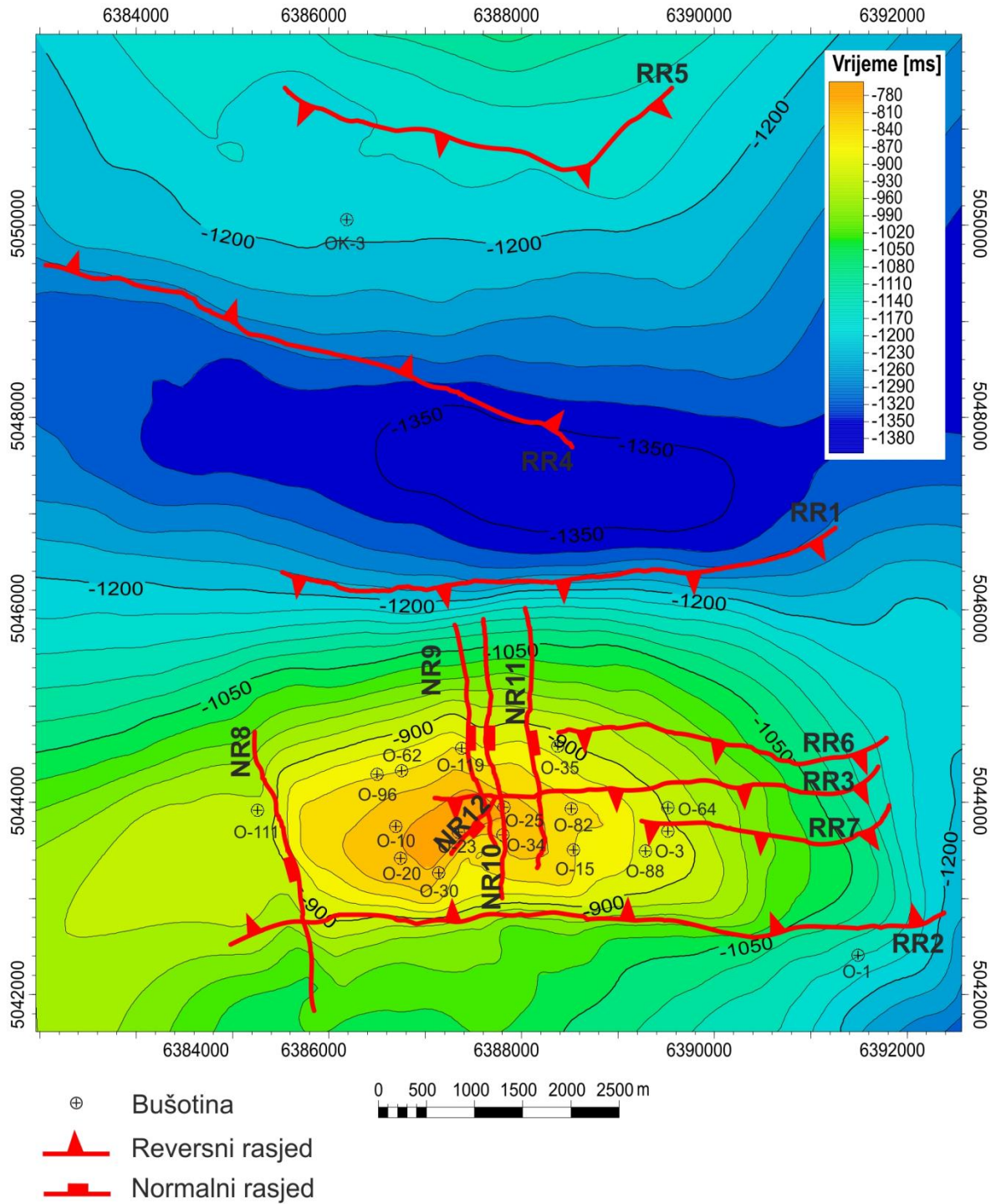
Konstruirane su karte u vremenskom i dubinskom mjerilu. Dubinske karte su konstruirane uporabom modificiranih zakona brzina. Na dubinskim strukturnim kartama se uočavaju slični strukturni oblici i svi rasjedi na svim razinama kao i kod vremenskih strukturnih karata počevši od horizonta krovine p8 do EK-markera R ϕ (slika 10-2 – slika 10-9). Prema tome nema bitnijih promjena između vremenskih i strukturnih karata.



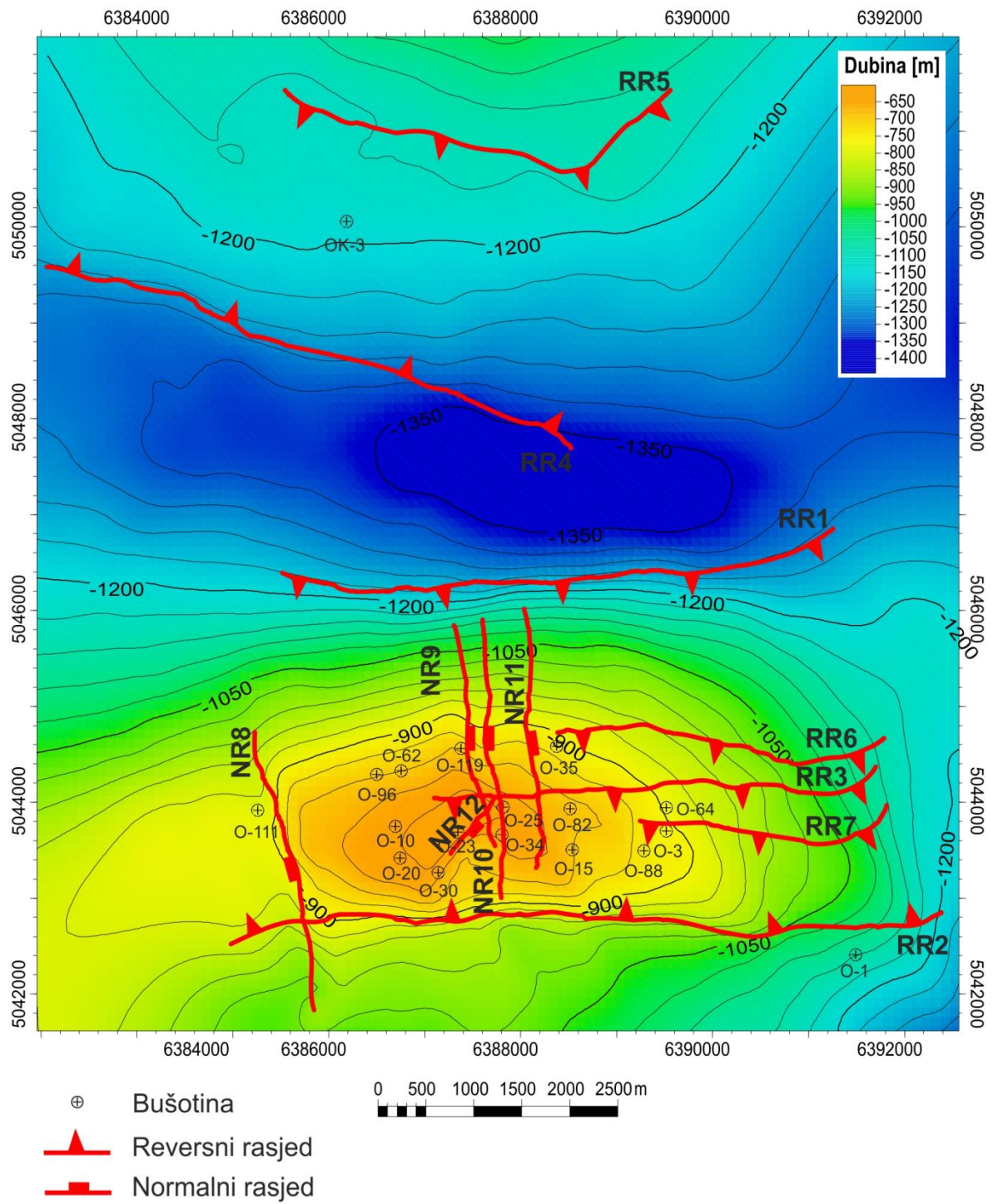
Slika 10-2. Strukturna karta u vremenskoj domeni po horizontu p8



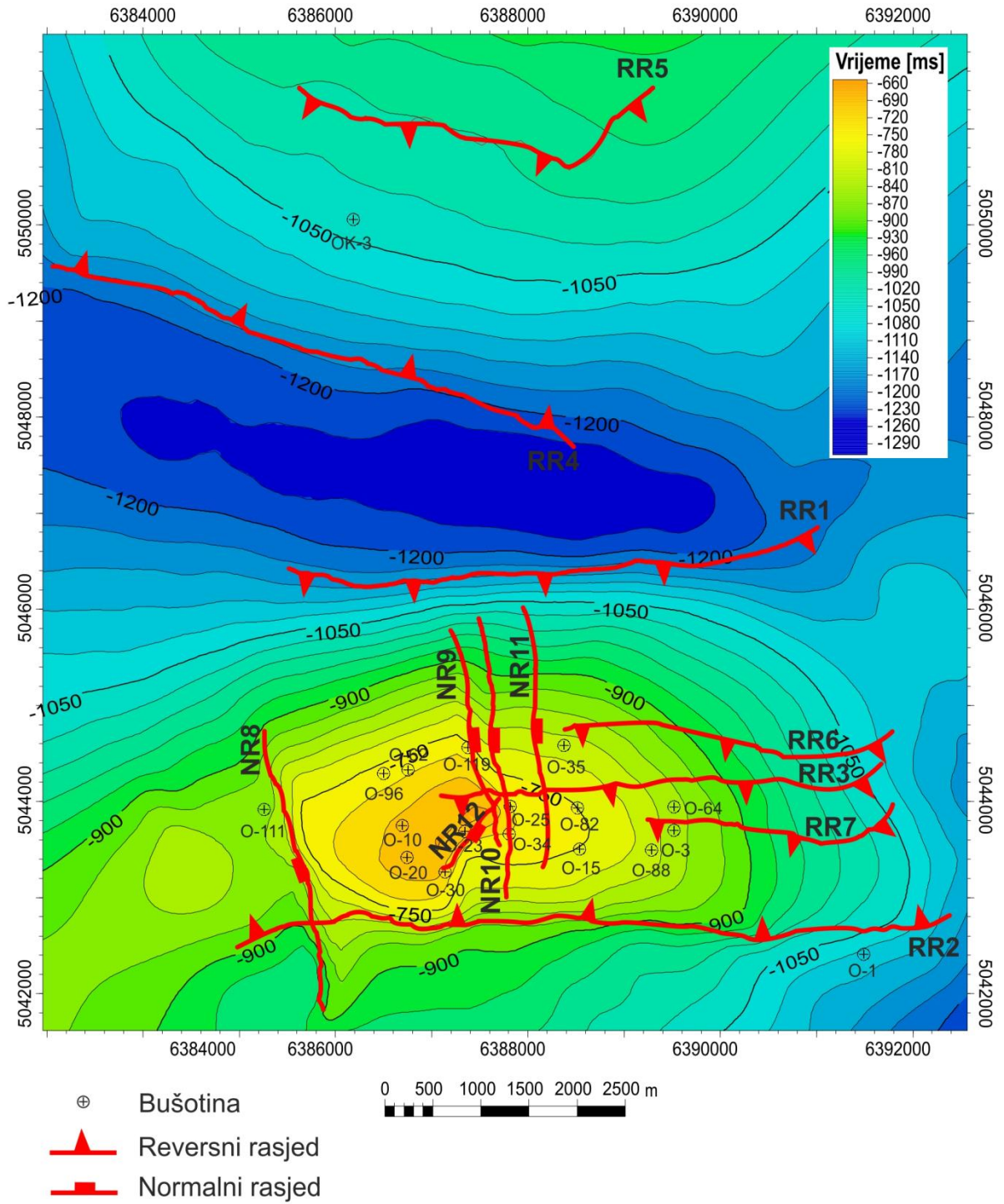
Slika 10-3. Strukturna karta u dubinskoj domeni po horizontu p8



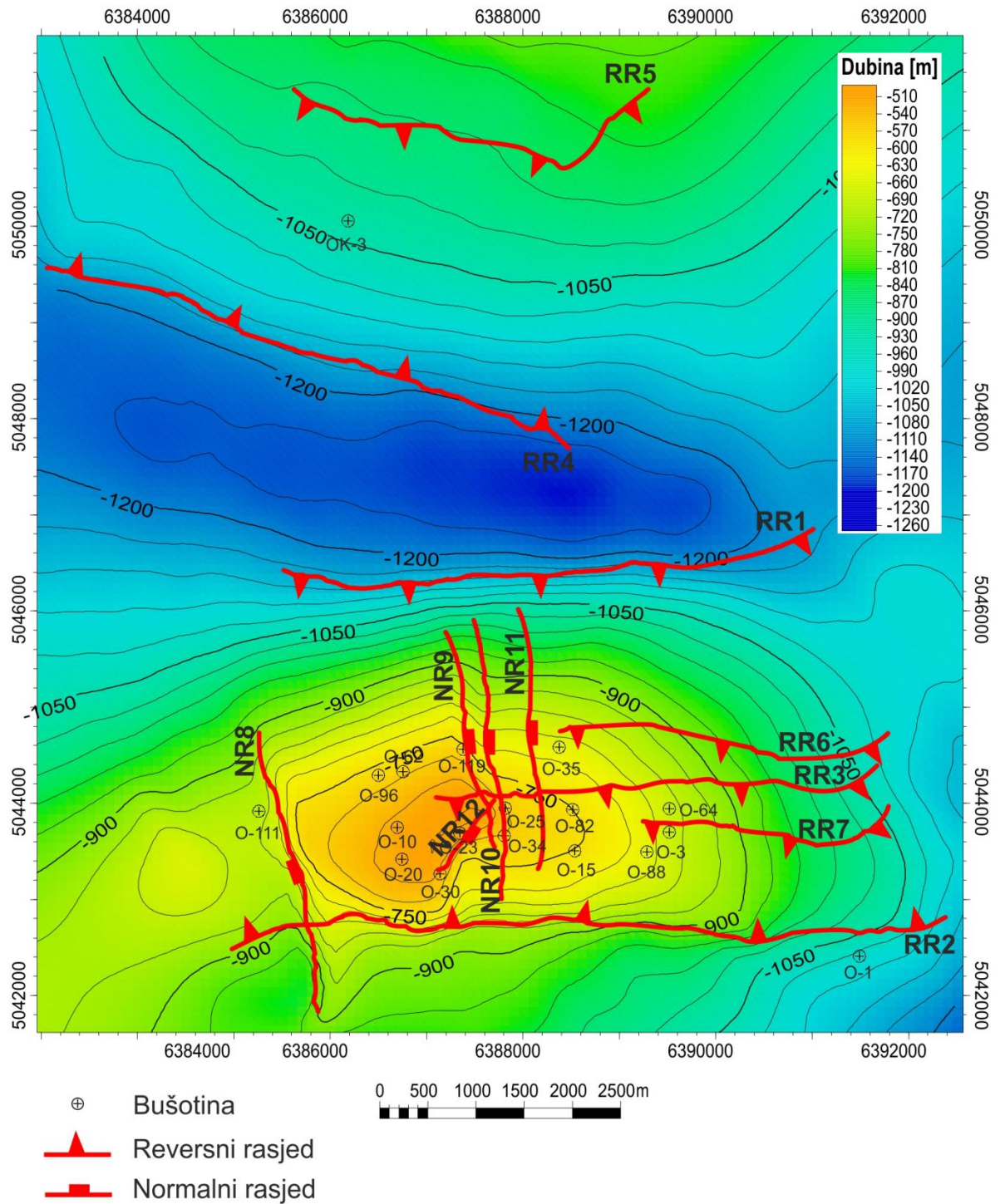
Slika 10-4. Strukturna karta u vremenskoj domeni po horizontu p1



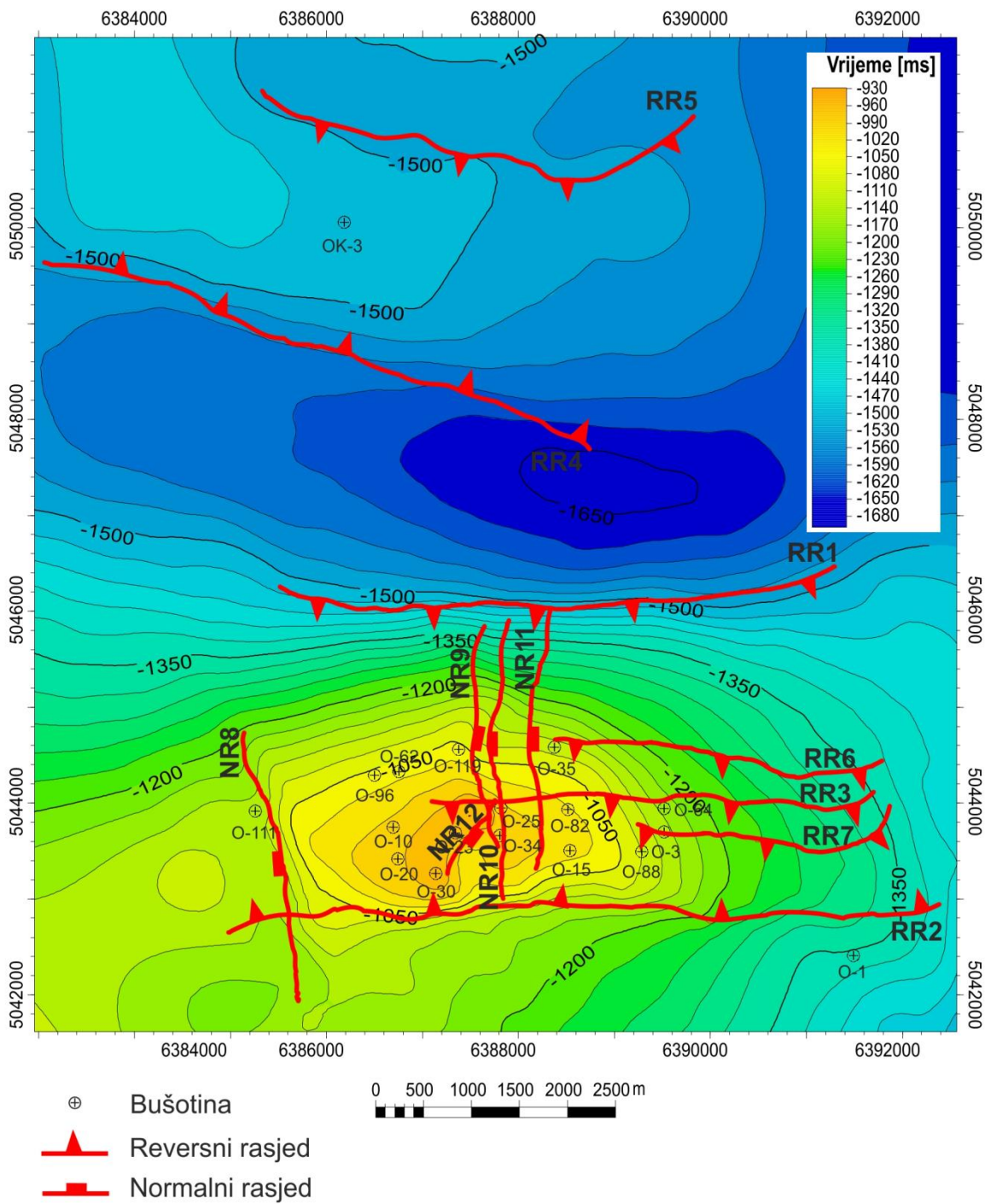
Slika 10-5. Strukturna karta u dubinskoj domeni po horizontu p1



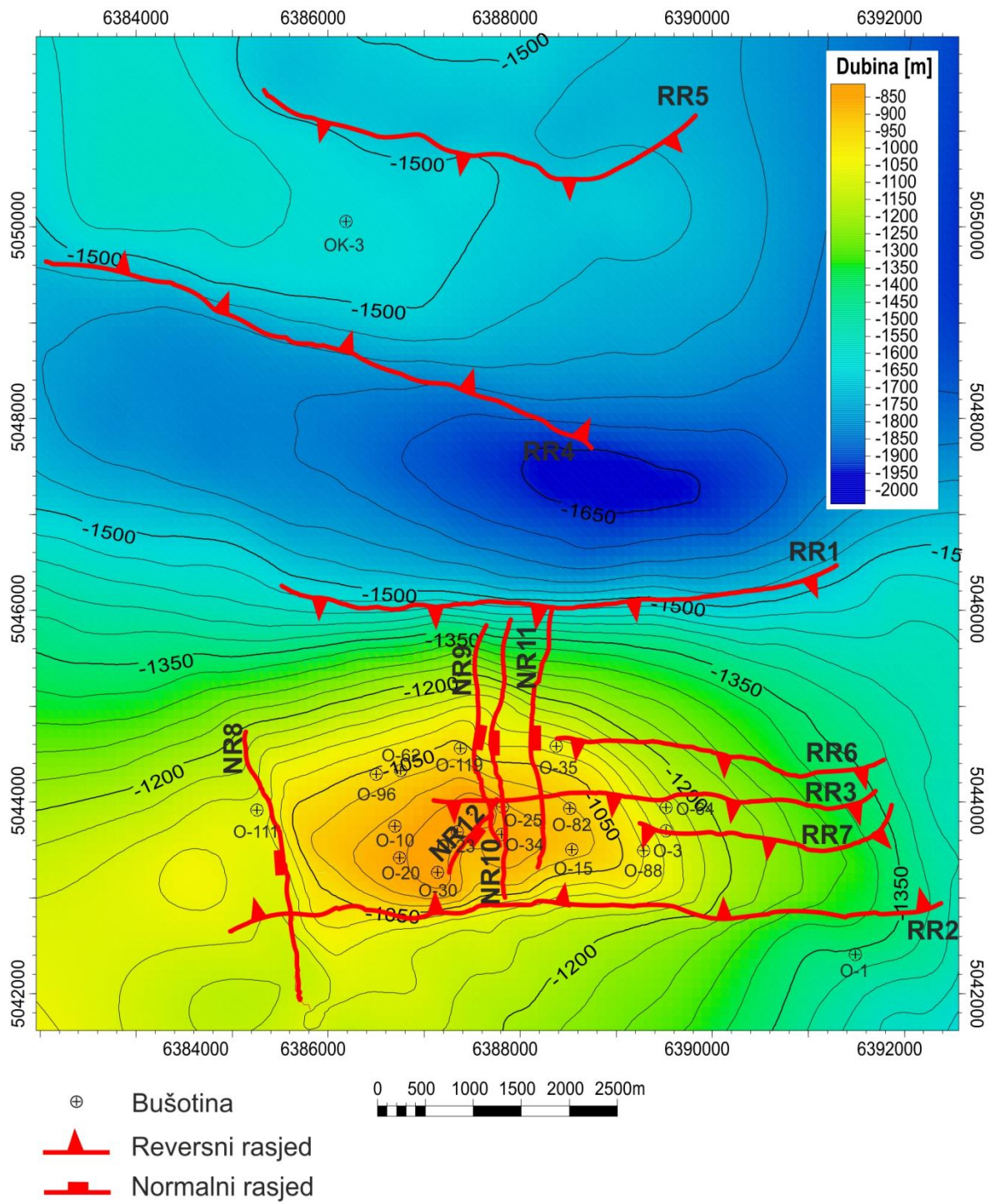
Slika 10-6. Strukturna karta u vremenskoj domeni po EK-markeru λ



Slika 10-7. Strukturna karta u dubinskoj domeni po EK-markeru λ



Slika 10-8. Strukturna karta u vremenskoj domeni po EK-markeru R ϕ



Slika 10-9. Strukturna karta u dubinskoj domeni po EK-markeru R_ρ

11. Zaključak

Trodimenzionalna seizmička interpretacija izvedena je na polju Stružec u programskom paketu Petrelu. Načinjena je interpretacija horizonata krovine ležišta p8 i podine ležišta p1, te EK-markera λ i $R\phi$.

Zbog pouzdanijeg određivanja seizmičkih karakteristika horizonata i EK-markera, načinjen je sintetski seizmogram za bušotinu O-134. Sintetski seizmogram ne pokazuje potpuno slaganje izračunatih i mjerenih seizmičkih podataka. Ti intervali neslaganja su od -547 m - -574 m i -1150 m -1200 m. Takvo neslaganje može biti zbog povećane vrijednosti zvučne karotaže i lateralne promjene litologije. To uzrokuje različite vrijednosti seizmičkih podataka i karotažnih mjerenja. Interpretacijom krovine ležišta p8 i podine ležišta p1 te EK-markera λ i $R\phi$ dobiveno je preciznije strukturno-tektonsko rješenje. Interpretacija krovine ležišta p8 je bila otežana zbog loše definiranih granica na temelju bušotinskih podataka za taj horizont. Strukturno-tektonskom interpretacijom definirana je antiklinala, odnosno brahiantiklinala, pružanja istok-zapad. Generalno, brahiantiklinala je rasjednuta reversnim rasjedima koji se pružaju uzdužno na strukturu i normalnim rasjedima koji su okvirno poprečnog pružanja na strukturu. Reversni rasjedi RR1 i RR2 omeđuju antiklinalu te se mogu smatrati glavnim uzročnicima stvaranja antiklinale. Unutar antiklinale, normalni rasjed NR9 razdvaja lijevi zapadni, manje tektonski poremećeni dio od desnog istočnog, jače tektonski poremećenog dijela.

Brahiantiklinala Stružec je prikazana detaljno na strukturnim kartama po krovini ležišta p8, podini ležišta p1, te EK-markerima λ i $R\phi$ u vremenskim i dubinskim mjerilima. Vrlo se malo mijenjaju položaji rasjeda kroz interpretirane horizonte zbog vrlo strmih krila antiklinale i strmo položenih paraklaza rasjeda. Značajnija promjena nagiba paraklaza se događa u dubljim dijelovima ispod interpretiranog područja praćenih horizonata. Pomoću strukturnih karata pretpostavlja se da su rasjedi nastali tijekom jedne faze. Nakon kompresije i nastanka reversnih rasjeda, došlo je do relaksacije u vršnom dijelu antiklinale i nastanku normalnih rasjeda. Pružanja normalnih rasjeda su u smjeru najvećeg regionalnog stresa S-J čijim djelovanjem je nastala antiklinala.

Tijekom interpretacije horizonata od samog početka korišten je seizmički atribut kosinus faze čime se poboljšava kontinuiranost seizmičkih reflektora te je time olakšana interpretacija. Interpretacija glavnih rasjeda s većim skokom je rađena na klasičnom

seizmičkom prikazu. Prilikom uporabe seizmičkih atributa varijance i kaosa, definirani su tektonski poremećeni prostori te je olakšana interpretacija normalnih i reversnih rasjeda s relativno malim skokovima.

12. Popis literature

- BÁLDI, T. (1980). The early history of Paratethys (in Hungarian with English abstract). *Földtani Közlöny*, 110/3–4, 456–472.
- BONJAJ, Z., BAUER, D., VRBOŠIĆ, A., 2001. Proizvodnja na bušotinama naftnog polja Stružec iz više odvojenih intervala te korištenje energije plinskih ležišta za plinsko podizanje. *Naftaplin*, Izv. br. 1, 68-70.
- CSONTOS, L., NAGYMAROSY, A., HORVÁTH, F. & KOVÁCS, M., 1992. Tertiary evolution of the Intra-Carpathian area: a model. *Tectonophysics*, 208, 221–241.
- ĆORIĆ S., PAVELIĆ, D., ROGL, F., MANDIĆ, O., VRBAC S., AVANIĆ, R., JERKOVIĆ, L. & VRANJKOVIĆ, A., 2009. Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of Northern Croatian Basin (Pannonian Basin System, Central Paratethys). *Geol. Croat.*, 62/1, str. 31-43, Zagreb
- DEVIĆ, P., SEČEN, J., THALLER, J., 1976. Stružec - Ležišta nafte i plina p₁, P₁, P₂ i A. Elaborat o rezervama nafte i plina. Fond struč. dok. INA-Naftaplina, Zagreb.
- DEVIĆ, P., PERIĆ, M., BAUK, A., THALLER, J., 1978. Polje Stružec (ležišta serije „a“ i „b“). Elaborat o rezervama nafte i plina. Fond struč. dok. INA-Naftaplina, Zagreb.
- HORVÁTH, F., 1993. Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 225, 333–358.
- HORVÁTH, F., 1995. Phases of compression during the evolution of the Pannonian basin and its bearing on hydrocarbon exploration. *Marine and Petroleum Geology*, 12, 837–844.
- KRANJEC, V., 1972. Subsurface structures in the Sava and Drava river depression and their classification. – *Bulletin in scientifique, sec. A*, 17/11-12, 362-364 str., Zagreb.
- KUKAVICA, V., 2010. Utvrđivanje geoloških odnosa i ležišnih značajki plinskog Ivana analizom seizmičkih atributa. Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. 103 str.
- MALVIĆ T., 2006. Middle Miocene depositional model in the Drava Depression described by geostatistical porosity and thickness maps (case study: Stari Gradac-Barcs Nyugat Field). *Rud.-geol.-naft. zbornik*, 18: 63–70
- MALVIĆ, T. & VELIĆ, J. 2011. Neogene Tectonics in Croatian Part of the Pannonian Basin and Reflectance in Hydrocarbon Accumulations. –SCHATTNER, U. (ed.): *New Frontiers in Tectonic Research: At the Midst of Plate Convergence*, InTech, Rijeka, str. 352

- OREŠKOVIĆ J., 2006. Procjena ležišnih značajki korištenjem seizmičkih atributa i seizmičkog modeliranja na primjeru polja Stari Gradac. Zagreb: Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- 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 str.
- PRELOGOVIĆ, E., SAFTIĆ, B., KUK, V., VELIĆ, J., DRAGAŠ, M. & LUČIĆ, D., 1998. Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 297, 283–293 str.
- ROYDEN, L. H., HORVÁTH, F. & RUMPLER, J., 1983. Evolution of the Pannonian Basin system: Tectonics. *Tectonics*, 2, 63-90.
- ROYDEN, L.H. & HORVÁTH, F., 1988. The Pannonian Basin – A Study in Basin Evolution. *AAPG Memoir*, 45, 394 p.
- SAFTIĆ, B., VELIĆ, J., SZTANO, O., JUHAS, 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 str
- SHERIFF R. E., & GELDART L. P., 1995. *Exploration Seismology*. Second edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- ŠIMON, J., 1973. O nekim rezultatima regionalne korelacije litostratigrafskih jedinica u jugozapadnom području Panonskog bazena. *Nafta*, 24/(12), 623 – 630 str.
- ŠUMANOVAC, F., 2012. *Osnove geofizičkih istraživanja*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu
- ŠUMANOVAC, F., 2012. *Razvoj procedura geofizike interpretacije radi povećanja rezervi u geološki složenim ležištima, polje Stružec*. 3. Izvješće, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
- TANER, M.T, KOEHLER, F. & SHERIFF, R.E., 1979. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44, 1041-1061.
- TARI, G., 1994. *Alpine tectonics of the Pannonian Basin*. Unpubl. PhD Thesis, Rice University, Houston.
- TARI, V. & PAMIĆ, J., 1998. Geodynamic evolution of the northern Dinarides and the southern part of the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 297, 269–281.
- TOMLJENOVIĆ, B., 1999. Middle Miocene Extension at the Southwestern Corner of the Pannonian Basin: Surface data on fault sand paleostress field. *Romanian Journal of Tectonics and Regional Geology*, Geological Institute of Romania, Bucuresti.

VAN BEMMEL, P., PEPPER, R., 2000. Seismic Signal Processing Method and Apparatus for Generating a Cube of Variance Values: US Patent 615155.

VELIĆ, J., WEISSER, M., SAFTIĆ, B., VRBANAC, B. & IVKOVIĆ, Ž., 2002. Petroleum-geological characteristic sand exploration level of the three Neogene depositional megacycles in the Croatian part of the Pannonian basin. *Nafta*, 53, 239–249.

VELIĆ, J., 2007. Geologija ležišta nafte i plina. Zagreb: Rudarsko–geološko–naftni fakultet

VELIĆ, J., MALVIĆ, T. & CVETKOVIĆ, M., 2011. Palinspastic reconstruction of synsedimentary tectonics of Neogene and Quaternary sediments in the Kloštar Field (Sava Depression), Pannonian Basin, Croatia. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 162, 2, 193-201p

ZAGORAC, Ž., 1975. Interpretacija gravimetrijskog reziduala i njena primjena u području Savske i Dravske potoline. Disertacija, Rud.-geol. Fakultet, Sveučilišta u Beogradu

ŽUŽUL, V., SMONTARA, N., ŠUŠNJAR, I., 2011. Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Stružec. Fond struč. dok. INA-Naftaplina, Zagreb.